



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

KRISNA HELLEN SILVINO RODRIGUES

PERSPECTIVAS DE NOVAS TECNOLOGIAS DE CÉLULAS SOLARES
FOTOVOLTAICAS COMO OPORTUNIDADE PARA OTIMIZAR O
APROVEITAMENTO DO POTENCIAL TÉCNICO SOLAR DO NORDESTE
BRASILEIRO

FORTALEZA

2023

KRISNA HELLEN SILVINO RODRIGUES

PERSPECTIVAS DE NOVAS TECNOLOGIAS DE CÉLULAS SOLARES
FOTOVOLTAICAS COMO OPORTUNIDADE PARA OTIMIZAR O
APROVEITAMENTO DO POTENCIAL TÉCNICO SOLAR DO NORDESTE
BRASILEIRO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia de Energias Renováveis
do Centro de Tecnologia da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de Engenheira de Energias
Renováveis.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Ana Fabíola Leite
Almeida

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R613p Rodrigues, Krisna Hellen Silvino.
Perspectivas de novas tecnologias de células solares fotovoltaicas como oportunidade para otimizar o aproveitamento do potencial técnico solar do nordeste brasileiro / Krisna Hellen Silvino Rodrigues. – 2023.
81 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2023.
Orientação: Profa. Dra. Ana Fabíola Leite Almeida.

1. Energia solar fotovoltaica. 2. Células solares fotovoltaicas. 3. Nordeste brasileiro. 4. Potencial técnico. I. Título.

CDD 621.042

KRISNA HELLEN SILVINO RODRIGUES

PERSPECTIVAS DE NOVAS TECNOLOGIAS DE CÉLULAS SOLARES
FOTOVOLTAICAS COMO OPORTUNIDADE PARA OTIMIZAR O
APROVEITAMENTO DO POTENCIAL TÉCNICO SOLAR DO NORDESTE
BRASILEIRO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia de Energias Renováveis
do Centro de Tecnologia da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de Engenheira de Energias
Renováveis.

Aprovado em: 14/12/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Ana Fabíola Leite Almeida (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Nivaldo Aguiar Freire
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus. Aos meus pais, Carlos e Cleuma, que sempre foram meu ponto de apoio. Aos meus irmãos, Guilherme e Guilbert, que de um jeito único me fazem perceber que a vida sempre pode ser mais leve. Ao meu amor, Paulo Vitor, que caminha ao meu lado. A todos os meus amigos que perto ou longe torcem e rezam por mim.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que me concede o dom da vida todos os dias e tem me abençoado com um espírito forte e resiliente. Sou grata em especial pela restauração da minha saúde e por se fazer sempre presente, mostrando-me que com fé podemos alcançar nossos objetivos e trilhar os caminhos da vida, mesmo tortuosos, com um coração tranquilo.

Aos meus pais, Carlos e Cleuma, que sempre foram grande fonte de inspiração de caráter e formação, além de serem os maiores incentivadores da busca incessante pelo conhecimento e criticidade, fomentando principalmente a importância da solidez e qualidade da educação de base. São assim meu porto seguro e apoio na minha jornada pessoal, acadêmica e profissional.

Aos meus irmãos, Guilbert e Guilherme, com todo carinho e bom humor, formam a dupla dinâmica de irmãos caçulas que cuidam de mim e me ensinam lições valiosas sobre o verdadeiro significado de amor fraterno e companheirismo.

Ao Paulo Vitor, presente de Deus e da graduação, amigo e amor, que está comigo em todos os momentos, sendo meu parceiro de todas as disciplinas e da vida. Sou grata pela sua crença no meu potencial e mais que isso, por me fazer enxergá-lo.

Aos meus amigos Marcos Vinicius e Rodrigo César, é um prazer inenarrável compartilhar a vida com vocês. É um prazer citá-los em sua imensa importância em minha jornada acadêmica. Agradeço por todo apoio, inspiração e contribuições que tornaram a minha graduação uma experiência enriquecedora e memorável.

Às minhas amigas de colégio e de infância, Beatriz, Isabelle e Gabriela, que torcem por mim e se fazem sempre presentes comemorando comigo todas as minhas conquistas e cuja amizade pretendo conservar e levar por toda a vida.

Aos meus colegas de trabalho, Eveline, João, Victor, Rafael, Igor e Alexandre, por serem ouvintes e colaboradores durante a escrita deste trabalho, além de tornarem meu cotidiano mais leve e divertido, atendendo ainda às demandas de trabalho quando precisei me ausentar. Sou grata ainda à Ágilis Solar, por todas as oportunidades positivas de crescimento pessoal e profissional e por me acolher, me abrindo portas para o mercado.

A todos os amigos que fizeram parte da minha história acadêmica e que na graduação, em especial, compartilhamos momentos e experiências que ficarão para sempre guardadas com muito carinho.

À Prof. Dr. Ana Fabiola Leite Almeida, expressei minha gratidão pela prontidão em oferecer orientação para esta monografia e pelas sugestões de grande valia dadas.

"A menor semente de uma ideia pode crescer para definir ou destruir você." - Dom Cobb, Inception (A Origem).

RESUMO

O uso de eletricidade desempenha um papel crucial na sociedade contemporânea e dada a significativa e crescente demanda por esse recurso essencial, atrelados à incessante busca por recursos e evolução social, o desenvolvimento sustentável surge como resposta aos impactos ambientais, dando destaque à transição para fontes renováveis. No contexto energético, a energia solar fotovoltaica desponta como uma solução promissora, especialmente no Nordeste, que é uma das regiões com maior potencial técnico de exploração da fonte sob diversos aspectos, como alto e constante índice de radiação solar e área disponível. Assim, faz-se necessária uma comparação de tecnologias existentes e emergentes, além de uma comparação dos desafios e oportunidades associados a essa fonte. Em vista disso, o presente trabalho, tem como objetivo estudar o nível de subaproveitamento da energia solar na região Nordeste e explorar as oportunidades e desafios que as novas tecnologias de células solares fotovoltaicas enfrentam, com foco nas de terceira geração, para maximizar o aproveitamento do potencial solar no Nordeste brasileiro. Para isso, realizou-se um estudo exploratório aplicado por meio de pesquisa bibliográfica. O estudo classifica as tecnologias fotovoltaicas de três gerações, destacando as limitações e vantagens específicas de cada uma delas sob diversos critérios relevantes. A pesquisa foca nas oportunidades proporcionadas por tecnologias mais recentes visando um futuro mais acessível, sustentável e eficiente em termos energéticos. O Nordeste brasileiro, com seu alto potencial solar subaproveitado, é identificado como um local estratégico para implementar essas novas tecnologias. Os resultados revelam um potencial significativo subaproveitado, com menos de 3% da capacidade de geração distribuída sendo explorada. A análise comparativa entre as tecnologias destaca que a maturidade de cada uma é essencial para compreender as limitações das células de silício e o potencial inovador das de terceira geração, essencial para a diversificação de materiais e redução de custos. A pesquisa conclui que o Nordeste brasileiro apresenta uma oportunidade única para a implementação bem-sucedida de novas tecnologias fotovoltaicas.

Palavras-chave: energia solar fotovoltaica; células solares fotovoltaicas; nordeste brasileiro; potencial técnico.

ABSTRACT

The use of electricity plays a crucial role in contemporary society, and given the significant and growing demand for this essential resource, coupled with the incessant search for resources and social evolution, sustainable development emerges as a response to environmental impacts, emphasizing the transition to renewable sources. In the energy context, photovoltaic solar energy stands out as a promising solution, especially in the Northeast, one of the regions with the greatest technical potential for exploring this source, considering various aspects such as a high and constant solar radiation index and available area. The research objectives also include the comparison of existing and emerging technologies and understanding the challenges and opportunities associated with this energy source. In light of this, this study aims to investigate the underutilization of solar energy in the Northeast region and explore the opportunities and challenges that new photovoltaic solar cell technologies, particularly third-generation ones, face to maximize solar potential in northeastern Brazil. To achieve this, an exploratory study was conducted through bibliographic research. The study classifies photovoltaic technologies into three generations, highlighting the specific limitations and advantages of each under various relevant criteria. The research focuses on the opportunities provided by technologies that are more recent, aiming for a more accessible, sustainable, and efficient energy future. The Brazilian Northeast, with its underutilized solar potential, is identified as a strategic location to implement these new technologies. The results reveal a significant untapped potential, with less than 3% of distributed generation capacity being explored. The comparative analysis between technologies emphasizes the maturity of each as essential to understanding the limitations of silicon cells and the innovative potential of third-generation cells, crucial for material diversification and cost reduction. The research concludes that the Brazilian Northeast presents a unique opportunity for the successful implementation of new photovoltaic technologies.

Keywords: photovoltaic solar energy; photovoltaic solar cells; brazilian northeast; technical potential.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Formas de radiação solar na superfície terrestre.....	22
Figura 2 - Célula, módulo e painel fotovoltaico	24
Figura 3 - Principais tecnologias de células fotovoltaicas existentes	30
Figura 4 - Acúmulo de cargas na junção p-n após o processo de dopagem do silício	31
Figura 5 - Esquema de módulo fotovoltaico	32
Figura 6 - Célula, módulo fotovoltaicos e estrutura atômica de silício monocristalino	33
Figura 7 - Célula, módulo fotovoltaicos e estrutura atômica de silício policristalino.....	35
Figura 8 - Célula de silício amorfo de junção rígida (a), de tripla junção flexível (b) e módulo comercial de silício amorfo (c).....	37
Figura 9 - Estrutura da célula de silício amorfo (a-Si)	38
Figura 10 - Esquema de uma célula de CdS/CdTe	39
Figura 11 - Esquema de uma célula de CIGS.....	41
Figura 12 - Célula solar fotovoltaica de GaAs	43
Figura 13 - Esquema de estrutura e funcionamento de uma célula sensibilizada por corante .	46
Figura 14 - Célula solar fotovoltaica sensibilizada por corante	47
Figura 15 - Esquema de uma célula solar sensibilizada por pontos quânticos com os processos de transferência de cargas envolvidos	48
Figura 16 - Diferentes configurações de células solares de Perovskita.....	50
Figura 17 - Variações estruturais de células solares orgânicas	53
Figura 18 - Esquema de funcionamento de uma célula solar orgânica	53
Figura 19 - Árvore solar com folhas de células solares orgânicas	54
Figura 20 - Um painel AuREUS (à direita) e sua aplicação para janelas solares.....	55
Figura 21 - Placas solares orgânicas instaladas no Departamento de Física da UFPR	56
Figura 22 - Média anual da irradiação solar global horizontal no Brasil	57
Figura 23 - Potencial de geração solar fotovoltaica em termos de rendimento energético anual para o Brasil.....	58

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Matriz Elétrica Brasileira em 2022	59
Gráfico 2 - Evolução da capacidade instalada de sistemas de geração de energia solar no Brasil (MW).....	60
Gráfico 3 - Eficiências de conversão de células fotovoltaicas registradas para uma variedade de tecnologias.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre inversores de string, microinversores e Otimizadores de Potência	26
Tabela 2 - Potência instalada de geração solar fotovoltaica no Brasil, Nordeste e estados da Região.....	61
Tabela 3 - Potencial Técnico Fotovoltaico Subaproveitado da Região Nordeste do Brasil por estados	65
Tabela 4 - Comparação qualitativa entre os diferentes tipos de tecnologias de células solares fotovoltaicas	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APP	áreas de preservação permanente
ARC	<i>anti-reflection coating</i>
a-Si	silício amorfo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	Corrente Alternada
CBD	<i>bath chemical deposition</i>
CC	Corrente Contínua
CdS	sulfeto de cádmio
CdTe	Telureto de Cádmio
CETENE	Centro de Tecnologia Estratégicas do Nordeste
CIGS	Cobre-Índio-Gálio-Selênio, Disseleneto de cobre-índio-gálio
CIS	Cobre-Índio-Selênio, Disseleneto de Cobre-Índio
CSS	<i>close spaced sublimation</i>
DPS	Dispositivos de Proteção contra Surtos
DSSC	<i>Dye-Sensitized Solar Cell</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
Etene	Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste,
ETL	<i>Electron Transport Layer</i>
EVA	acetato de vinil etileno
FTO	<i>Fluorine doped Tin Oxide</i>
GaAs	arsenieto de gálio
GC	Geração Centralizada
GD	Geração Distribuída
GW	gigawatts
HIT	<i>Heterojunction with Intrinsic Thin layer</i>
HTL	<i>Hole Transport Layer</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Inpi	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
ITO	<i>Indium doped Tin Oxide</i>

LAMAI	Laboratório de Materiais Aplicados e Interfaces
LNES	Laboratório de Nanotecnologia e Energia Solar
LPCVD	<i>low Pressure Chemical Vapor Deposition</i>
MLPE	<i>module level power electronics</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
MMGD	mini e microgeração distribuída
MPPTs	<i>maximum power point tracker</i>
m-Si	silício monocristalino
MW	megawatts
NASA	National Aeronautics and Space Administration.
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
OTI	<i>Indium Tin Oxide</i>
PQs	pontos quânticos
PRODEEM	Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios
PSC	<i>Perovskite Solar Cell</i>
p-Si	silício policristalino
PVF	fluoreto de polivinila
QDSSC	<i>Quantum Dot-Sensitized Solar Cells</i>
REN	Resolução Normativa
RL	reserva legal
SI	Sistema Internacional
SIGA	Sistema de Informações de Geração da Aneel
SiGE	silício de grau eletrônico
SIGFIs	Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes.
SiGS	silício de grau solar
SIN	Sistema Interligado Nacional
STC	<i>Standard Testing Conditions</i>
TCO	<i>Transparent Conducting Oxide</i>
UNESP	Universidade Estadual de São Paulo
UV	ultravioleta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivos	19
<i>1.1.1 Objetivo geral</i>	19
<i>1.1.2 Objetivos específicos</i>	19
1.2 Estrutura Do Trabalho	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 Definição de radiação e irradiação	21
2.2 Energia Solar	22
<i>2.2.1 Energia Solar Fotovoltaica</i>	23
<i>2.2.1.1 Sistemas de Geração Fotovoltaica</i>	23
2.3 Células solares fotovoltaicas	28
<i>2.3.1 Estrutura e Funcionamento básico de Células Solares Fotovoltaicas</i>	29
<i>2.3.2 Tipos de Células Solares Fotovoltaicas</i>	30
<i>2.3.2.1 Células Solares Fotovoltaicas de 1ª Geração</i>	30
<i>2.3.2.1.1 Células de Silício Monocristalino (m-Si)</i>	32
<i>2.3.2.1.2 Células de Silício Policristalino (p-Si)</i>	34
<i>2.3.2.2 Células Solares Fotovoltaicas de 2ª Geração</i>	35
<i>2.3.2.2.1 Células de Silício Amorfo (a-Si)</i>	36
<i>2.3.2.2.2 Células de Telureto de Cádmio (CdTe)</i>	39
<i>2.3.2.2.3 Células de Disseleneto de cobre-índio-gálio (CIGS)</i>	40
<i>2.3.2.2.4 Células de Arsenieto de Gálio (GaAs)</i>	42
<i>2.3.2.3 Células Solares Fotovoltaicas de 3ª Geração</i>	43
<i>2.3.2.3.1 Células Solares Sensibilizadas por Corante (DSSC)</i>	44
<i>2.3.2.3.2 Células Solares baseadas em pontos quânticos (QDSSC)</i>	47
<i>2.3.2.3.3 Células Solares Híbridas - HIT e Perovskitas</i>	49
<i>2.3.2.3.4 Células Solares Orgânicas</i>	51
2.4 Potencial de geração de energia solar no Brasil	56
2.5 Potencial de geração no Nordeste brasileiro	58
2.6 Cenário atual da potência instalada	59
3 METODOLOGIA	62
3.1 Classificação da Pesquisa	62
3.2 Método Proposto	63

3.3 Estudo do potencial técnico subaproveitado de geração solar fotovoltaica na região Nordeste do Brasil	63
3.4 Estudo comparativo entre as diferentes tecnologias de células solares fotovoltaicas.	65
<i>3.4.1 Estudo comparativo entre eficiências</i>	<i>65</i>
<i>3.4.2 Estudo comparativo sob critérios qualitativos</i>	<i>67</i>
3.5 Desafios e oportunidades para novas tecnologias de células fotovoltaicas no Nordeste do Brasil.....	71
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	75
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

Segundo a teoria da hierarquia de necessidades proposta pelo psicólogo americano Abraham Maslow, em seu artigo "A teoria da motivação humana", existem cinco categorias de necessidades humanas que vão desde as fisiológicas, que estão diretamente relacionadas à sobrevivência; às de autorrealização (SØRENSEN, 2018). Em consonância com esta ideia, desde o início dos tempos, a humanidade vem buscando de forma incessante novas formas de exploração de recursos e possibilidades, se desdobrando em descobertas e invenções que sempre superam suas necessidades contemporâneas e abrem margem para novos limites superiores.

Uma destas conquistas, foi a energia elétrica, que se tornou tão essencial para a existência humana quanto a água. No entanto, assim como é característico no marco das eras industriais e tecnológicas, a exploração dos recursos básicos tornou-se exacerbada e praticamente insustentável a longo prazo, apresentando impactos e danos ambientais e sociais. A partir desta visão, a humanidade começou a pensar na gestão de recursos e processos de modo a reduzir esses impactos com a premissa de suprir as necessidades das gerações atuais e futuras sem, no entanto, retardar o progresso socioeconômico. Deste conceito, na Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente de 1987 surgiu o termo "Desenvolvimento Sustentável". E, a partir dessa demanda, a sociedade passou a pensar na diversificação da sua matriz energética substituindo gradualmente o uso dos combustíveis fósseis pelas fontes de energia renovável, que são aquelas cujos recursos são naturalmente reabastecidos e sustentáveis a longo prazo (SOARES, 2022).

Das energias renováveis, pode-se afirmar que todas têm sua origem direta ou indiretamente no Sol. De forma mais direta, tem-se a energia solar fotovoltaica, que usa a energia do sol para conversão de energia luminosa em elétrica e a energia solar térmica, que aproveita diretamente o calor do sol como o próprio nome sugere. A energia solar fotovoltaica é uma das mais promissoras dentre as tecnologias conhecidas atualmente e que tem crescido de forma significativa em potência instalada nas últimas décadas. O processo de conversão de energia solar em energia elétrica baseia-se no fenômeno fotovoltaico, no qual a luz do sol absorvida pelas células solares energiza os elétrons dos átomos de um material semicondutor, em sua grande maioria o silício, gerando corrente elétrica contínua que é posteriormente

convertida em corrente elétrica alternada, tornando-a compatível com a rede elétrica e outros dispositivos elétricos.

A fim de aumentar a eficiência deste tipo de conversão energética, o desenvolvimento tecnológico das células solares fotovoltaicas tem sido expressivo. No entanto, em conformidade com toda a história da relação entre as tecnologias e o próprio desenvolvimento humano, as necessidades energéticas atuais são superiores e demandam cada vez mais aprimoramentos e novas tecnologias, deixando claro que os processos e materiais utilizados na indústria atual tem suas limitações. Além da eficiência limitada das células de silício, que em média varia de 15% a 22%, dependendo do tipo de célula, e da concorrência com a indústria de semicondutores pelo silício, outros fatores limitantes também podem ser citados, como o fato de serem rígidas e pesadas, dificultando sua versatilidade em aplicações e exigindo uma quantidade significativa de espaço físico; impactos ambientais na produção e no descarte, e vida útil limitada (ANSELMO, 2019).

Baseando-se nessas limitações, novas pesquisas têm sido desenvolvidas acerca de materiais alternativos para a produção das células solares fotovoltaicas. As tecnologias fotovoltaicas são atualmente classificadas em “gerações”, sendo a primeira, as células de silício, a segunda, as células de filmes finos e a terceira e última geração, as células de material orgânico. As duas últimas gerações são assim classificadas por terem menor participação no mercado solar e estão em sua maioria no campo de pesquisa em laboratórios. Entretanto, essas têm apresentado excelentes resultados teóricos e com potencial de revolucionar e solucionar os problemas das tecnologias de primeira geração.

No Brasil, o potencial de irradiância solar é um dos mais altos do mundo, sendo bem superior ao de países do hemisfério norte, como a Alemanha, conhecida pelo alto investimento em tecnologia e capacidade instalada de energia solar (OLIVEIRA, et al., 2017). A extensa área territorial brasileira permite ainda a exploração da fonte tanto na geração centralizada quanto na distribuída. Mais especificamente no Nordeste brasileiro, devido às condições climáticas, a incidência solar anual, além de alta, também se apresenta constante, favorecendo ainda mais a geração. Em contrapartida, este potencial encontra-se atualmente subaproveitado por falta de investimentos tanto no campo de pesquisa, quanto de políticas de incentivo à implementação e à aquisição de sistemas e novas tecnologias.

Nesse contexto, diante do que fora exposto sobre a problemática da aproximação da limitação de exploração tecnológica em células de silício, da constante necessidade de avanços impulsionada pelas demandas energéticas e ambientais, aliadas ao alto potencial de geração de energia solar fotovoltaica apresentado pela região Nordeste do Brasil, o presente trabalho visou

o estudo das oportunidades, desafios e implicações das novas tecnologias de células fotovoltaicas, em especial as de terceira geração, nesta região. Abordando ainda como essas tecnologias podem representar uma oportunidade positiva para o crescimento socioeconômico e que em poucos anos, com investimento em pesquisas e início da implementação em escala industrial, podem vir a ser tecnologias mais baratas, sustentáveis e cada vez mais acessíveis.

1.1 Objetivos

Os principais objetivos a serem alcançados pelo presente trabalho são:

1.1.1 Objetivo geral

Analisar sob o ponto de vista técnico teórico o potencial e oportunidades oferecidas pelas novas tecnologias de células solares fotovoltaicas, em especial as de terceira geração, para o Nordeste brasileiro como forma de maximizar o aproveitamento do recurso solar nesta região.

1.1.2 Objetivos específicos

- Estudar o potencial de geração solar fotovoltaica na região Nordeste do Brasil e apresentar o cenário atual da potência instalada, indicando o nível de subaproveitamento energético;
- Fazer um estudo comparativo sobre as características positivas e negativas em termos de eficiência, custo e outros critérios relevantes entre as células solares fotovoltaicas tradicionais de silício e as de novos materiais;
- Compreender os desafios e oportunidades para o desenvolvimento e implementação de novas tecnologias na área fotovoltaica e transições de mercado para novos processos e materiais;
- Estudar como novas tecnologias de células solares fotovoltaicas podem se mostrar vantajosas sobre as tradicionais e explorar a oportunidade que elas representam para a otimização do potencial técnico solar do Nordeste brasileiro.

1.2 Estrutura do trabalho

O trabalho desenvolvido divide-se em 5 capítulos. O primeiro capítulo compreende a introdução ao tema investigado, justificando sua relevância e a motivação da pesquisa, além de serem delineados os objetivos gerais e específicos da pesquisa, bem como a presente estruturação do estudo.

O segundo capítulo do trabalho se trata da fundamentação teórica da pesquisa e fornece uma base sólida para compreensão dos conceitos essenciais relacionados à energia solar fotovoltaica. São abordados temas como definição de radiação e irradiação, os diferentes tipos de tecnologia de células solares fotovoltaicas, potencial de geração de energia solar no Brasil e no Nordeste brasileiro, além do cenário atual da potência instalada. Essa seção oferece uma contextualização necessária para a compreensão dos resultados obtidos na pesquisa.

Na sequência, o terceiro capítulo descreve a abordagem metodológica adotada no estudo, incluindo a classificação da pesquisa e o método proposto. Além disso, apresenta a aplicação da metodologia sugerida para estudo do potencial técnico subaproveitado de geração solar fotovoltaica na região Nordeste do Brasil e um estudo comparativo entre diferentes tecnologias de células solares fotovoltaicas, analisando suas eficiências e destacando pontos positivos e negativos. Essas análises visam oferecer uma perspectiva sobre a viabilidade e a implementação de novas tecnologias de células solares para otimizar o aproveitamento do potencial energético na região Nordeste.

Ao final do trabalho, o quarto capítulo apresenta os principais resultados da pesquisa, fornecendo uma análise aprofundada dos dados coletados e discutindo as implicações desses resultados. O trabalho se encerra no quinto capítulo, consolidando as conclusões alcançadas e oferecendo recomendações para estudos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Definição de radiação e irradiação

Antes de dar início a apresentação dos conceitos acerca de sistemas solares fotovoltaicos, é necessário compreender a definição de radiação e de irradiação solar. O Sol é essencialmente um reator nuclear, possuindo $6,96 \times 10^5$ Km de raio e $1,99 \times 10^{30}$ Kg de massa e que opera por meio de reações nucleares de fusão contínua. A fusão nuclear é um processo no qual os núcleos dos átomos se combinam para formar um núcleo mais pesado, neste caso, temos a combinação dos átomos de hidrogênio para formar hélio (DUFFIE; BECKMAN, 2013). Este processo libera uma quantidade enorme de energia, que é emitida como luz e calor para a Terra.

O processo de transferência desta energia na atmosfera denomina-se radiação eletromagnética, que viaja em forma de ondas eletromagnéticas à velocidade da luz (aproximadamente $2,99793 \times 10^8$ m/s). O espectro eletromagnético é composto pela luz visível, raios gama, raios x, luz ultravioleta, radiação infravermelha, micro-ondas, sinais de televisão e ondas de rádio (LIOU, 2022). Cada um desses espectros é utilizado de forma diferente nos processos naturais e no cotidiano humano. No entanto, antes de atingir a superfície terrestre, a intensidade da radiação solar é diminuída ao passar pela atmosfera. De acordo com as pesquisas de Nóbrega Coelho, (2016):

O Sol gera uma energia radiante de aproximadamente $3,94 \times 10^{26}$ Watts dos quais são interceptados pela Terra aproximadamente $1,8 \times 10^{17}$ Watts. Na entrada da atmosfera a intensidade da radiação é modificada por espalhamento em moléculas, poeiras, partículas de aerossóis e vapor de água, pela absorção e pela reflexão na superfície terrestre.

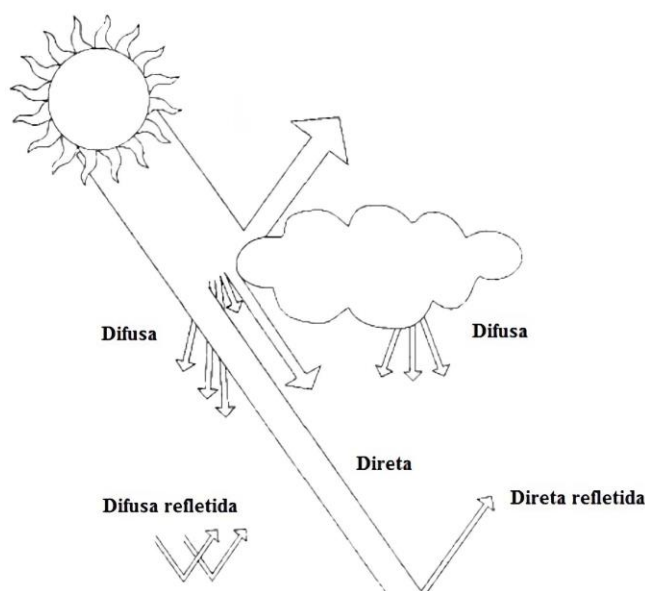
Esta parcela de radiação que chega à superfície terrestre através da interação com a atmosfera e espalhamento é chamada radiação difusa. Já a radiação solar direta consiste na parcela de energia radiante que incide na atmosfera e que chega à superfície terrestre sem sofrer desvios em sua trajetória. A totalidade da radiação solar que chega ao solo é definida como a soma das componentes direta e difusa e denomina-se irradiação solar global.

A taxa de energia radiante que incide em uma superfície por unidade de área (W/m^2 , no SI, Sistema Internacional) caracteriza a densidade de fluxo radiante e é também chamada de

irradiância. Quando as medições das densidades de fluxos incidentes são integradas em um intervalo de tempo (Wh/m^2), recebem o nome de irradiação.

Uma terceira componente da radiação solar que pode ser observada é a radiação refletida após chegar à superfície terrestre. A razão entre a quantidade de radiação refletida por uma superfície e a quantidade de radiação solar incidente sobre ela é chamada albedo e é uma importante característica para mensurar a capacidade de reflexão de uma superfície, sendo as mais escuras as que possibilitam maior absorção e maior aproveitamento da radiação solar (ALMEIDA et al., 2021). A Figura 1 apresenta de forma resumida as componentes da radiação solar.

Figura 1 - Formas de radiação solar na superfície terrestre



Fonte: Coelho, (2016)

2.2 Energia Solar

A energia proveniente do Sol é fornecida à Terra por meio da emissão de radiação eletromagnética e é essencial à existência da vida terrestre, sendo requerida para praticamente todos os processos naturais térmicos, físicos e químicos como a fotossíntese, o ciclo da água e outros fenômenos. Além disso, desde as primeiras civilizações, o homem utiliza o sol como ferramenta para sobrevivência, utilizando-o inclusive para a geração de fogo através de raios solares concentrados. Na atualidade, com o avanço do conhecimento científico e das tecnologias, a energia solar é utilizada para aquecimento ou para geração de energia através do efeito fotovoltaico ou de usinas heliotérmicas. Segundo OTAVIO VIANA, et al., (2022), a

energia solar representa a maior e mais segura fonte de calor e de energia limpa e renovável na atualidade.

Além disso, um fato que reforça a ideia da alta disponibilidade e potencial energético excepcional da energia solar em comparação a outras fontes de energia, é que o Sol existirá por mais pelo menos 6 bilhões de anos, fornecendo todos os dias à Terra cerca de dez mil vezes mais energia do que toda população terrestre consome (MACHADO; MIRANDA, 2015).

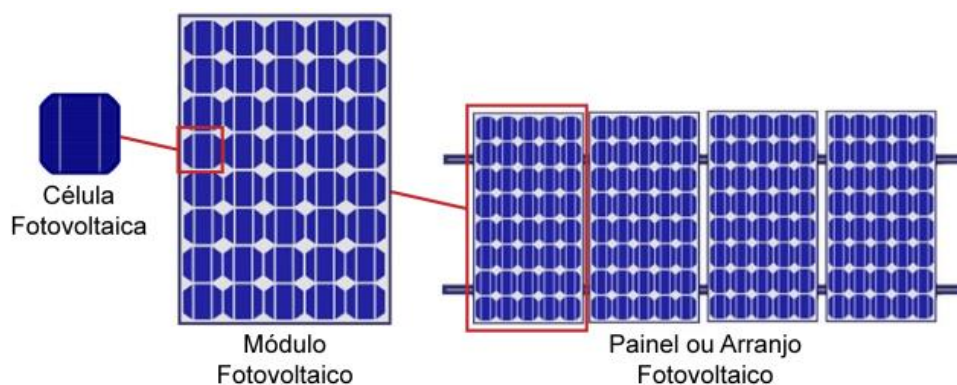
2.2.1 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é definida pelo processo de aproveitamento e conversão direta da radiação solar em energia elétrica e tem como princípio de funcionamento o efeito fotovoltaico, fenômeno que foi observado pela primeira vez em 1839 e tem sua descoberta creditada a Alexandre-Edmond Becquerel, físico francês que ainda com 19 anos no laboratório de seu pai confeccionou e estudou a primeira célula fotovoltaica da história. Becquerel observou que o aparato, composto por dois eletrodos (no experimento, duas placas de latão) imersos em um eletrólito líquido, gerava eletricidade quando exposto à luz solar (MACHADO; MIRANDA, 2015).

2.2.1.1 Sistemas de Geração Fotovoltaica

As células fotovoltaicas são responsáveis pela conversão da energia luminosa em energia elétrica e constituem a base da tecnologia fotovoltaica, sendo ainda a menor unidade de um sistema de geração solar fotovoltaica. No presente trabalho, o funcionamento, tipos e características das células solares fotovoltaicas serão abordadas de forma mais detalhada na seção 2.3. O conjunto de células fotovoltaicas conectadas eletricamente em série e paralelo, envolvidos por uma estrutura de suporte para proteção e fixação é denominado módulo fotovoltaico (CIELLO, 2023). Por fim, um arranjo de módulos fotovoltaicos interconectados formam a base de um sistema fotovoltaico para geração de eletricidade e são conhecidos por painéis fotovoltaicos. As duas últimas definições são comumente confundidas, mas podem ser facilmente distinguidas na figura (2), que ilustra a diferenciação entre os três elementos.

Figura 2 - Célula, módulo e painel fotovoltaico



Fonte: Morais (2020)

Após a conversão de energia e geração de eletricidade em forma de corrente contínua (CC) pelas células solares fotovoltaicas, é necessário transformá-la em corrente alternada (CA) para integrar a energia solar à rede de distribuição elétrica, pois esta é estruturada para transportar e distribuir corrente alternada. Além disso, os dispositivos e eletrodomésticos comumente usados em residências e empresas são projetados para funcionar com corrente CA. Portanto, ao converter a energia solar em CA, pode-se utilizá-la diretamente nesses dispositivos, sem a necessidade de adaptadores ou transformadores extras. O equipamento responsável pela conversão de corrente contínua em corrente alternada em sistemas de geração fotovoltaicos é chamado de inversor e é considerado o “coração” do sistema solar.

Embora a funcionalidade principal de conversão seja a mesma entre os inversores solares fotovoltaicos, eles podem ser divididos entre três topologias de tecnologia que se diferenciam principalmente no processo de instalação e desempenho, são eles: inversores string, microinversores e inversores com otimizadores de potência.

Os inversores string são considerados os mais tradicionais e ainda podem ser encontrados na maioria das instalações residenciais. Com esse tipo de inversor, os módulos são conectados em série entre si e a principal implicação é a ausência da possibilidade de acompanhamento da produção localizada e limitação da eficiência de geração pela menor potência. Em um sistema fotovoltaico, durante a conversão da energia, ocorrem inúmeras perdas, que estão atreladas a condições naturais do processo ou a configurações do próprio sistema. De acordo com um estudo comparativo entre as diferentes tecnologias de conversores fotovoltaicos conectados à rede, segundo SILVA, (2022):

Entre tais perdas, destacam-se as perdas por sombreamento total ou parcial, que geralmente ocorrem de modo previsível, devido às sombras causadas por objetos, árvores, construções, ou imprevisíveis, devido à poeira, sujeira, excrementos de pássaros e salinidade, entre outros fatores. Outras perdas são relativas aos componentes eletrônicos do sistema, cabos (perdas ôhmicas), temperatura, incompatibilidade elétrica (mismatch) e degradação dos módulos.

Desse modo, como nesse tipo de sistema os módulos são conectados em série, as perdas apresentadas em um módulo necessariamente implicam na redução global da string, ou seja, de todos os outros módulos conectados a ele. Assim, mesmo permitindo a instalação do sistema com grandes arranjos, não permite a flexibilidade do design e está sempre suscetível a uma geração reduzida.

Com o objetivo de sanar os problemas da tecnologia de inversores string, surgiu a tecnologia MLPE - sigla do inglês, *module-level power electronics* (eletrônica de potência no nível do módulo, em tradução literal). Esta, engloba tanto os microinversores quanto os inversores com otimizadores de potência e possui uma série de vantagens que estão diretamente relacionadas ao seu tipo de conexão, que neste caso, diferente dos sistemas string, é feita em paralelo geralmente sendo conectado apenas um ou dois módulos por entrada nos microinversores ou otimizadores. Esta configuração permite, como o próprio nome sugere, a otimização e monitoramento da produção de energia a nível de módulo, permitindo que operem no ponto máximo de potência (MPPTs, sigla de *maximum power point tracker* - ou rastreador de ponto de máxima potência, em português).

A diferença entre as duas últimas tecnologias de conversores de energia fotovoltaica citadas é que, enquanto nos sistemas com microinversores é necessário instalar um para cada um a oito módulos (dependendo da tecnologia e modelo), nos sistemas com otimizadores de potência, é possível realizar a instalação com arranjos muito maiores. Isso ocorre porque os otimizadores são equipamentos compactos e funcionam como uma extensão do inversor. Desse modo, a tecnologia dos otimizadores de potência funciona como uma união das melhores características entre inversores de string e microinversores, tornando-se uma opção de custo intermediário, com tecnologia mais avançada e de maior eficiência. A Tabela 1 compara as principais características e diferenças entre os três tipos de tecnologia apresentados.

Tabela 1 - Comparação entre inversores de string, microinversores e Otimizadores de Potência

Quesitos	Inversores de String	Microinversores	Otimizadores de Potência
Funcionamento	Uma string ou várias são conectadas a um inversor	Geralmente um ou dois módulos FV são conectados a um microinversor	Geralmente um ou dois módulos FV são conectados a um POPS
Sombreamento Parcial	Impacta todo o conjunto de módulos se houver mais de uma string paralelada	Impacta somente os módulos sombreados	Impacta somente os módulos sombreados
Desempenho com sombras	Baixo	Mais eficiente	Mais eficiente
Desempenho com módulos FV em diferentes inclinações (telhados irregulares)	Baixo	Alto	Médio
Monitoramento individual de módulos FV e verificação de problemas	Não é possível	Possível dependendo do fabricante e modelo	Possível dependendo do fabricante e modelo
Redução de Mismatch	Não	Sim	Sim
Número de componentes eletrônicos	Padrão	Elevado	Elevado
Segurança na instalação	Padrão	Alta	Alta
Isolação do Sistema em caso de manutenção	Não é possível	Possível	Possível
Custo	Baixo	Alto	Médio

Fonte: SILVA, (2022)- Adaptado pela autora

Além dos módulos e inversores fotovoltaicos, outros componentes são indispensáveis para montagem, funcionamento e melhoramento do desempenho do sistema fotovoltaico, como as estruturas de fixação, que podem variar de acordo com o tipo de aplicação desejada, podendo ser específica para telhados, solo, cobertura de estacionamentos, (ou *carport*, como é conhecida) ou ainda para soluções alternativas, como montagem de sistemas fotovoltaicos em fachadas de edifícios, no teto de veículos e, até mesmo, em sistemas fotovoltaicos flutuantes. Também podemos incluir na listagem de componentes essenciais, o conjunto de conectores e cabos, caixas de junção e de strings (conhecida como *string box*), disjuntores e Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS).

Em sistemas *on grid*, que são aqueles conectados à rede elétrica, ressalta-se a importância do medidor bidirecional, que está presente na etapa final de conexão do sistema fotovoltaico à rede da concessionária. Esse dispositivo é responsável por registrar a energia líquida do sistema, ou seja, a diferença entre o que é consumido e o que é injetado na rede, em kWh (STUMPF TONIN, 2017). Desse modo, dentro do sistema de compensação, regulamentados através da Resolução Normativa 482/2012 e da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), é possível utilizar a energia excedente para abatimento posterior do consumo. Para sistemas fotovoltaicos conectados à rede, de acordo com ALMEIDA et al., (2021):

Para utilizar o Sistema Interligado Nacional (SIN), o padrão de tensão deve estar em conformidade com a amplitude, frequência e fase da rede elétrica da concessionária. Além disso, por determinação das normas técnicas, os inversores devem possuir certificação do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO)

Já em sistemas *off grid*, que por sua vez são aqueles isolados, ou seja, que não são conectados à rede elétrica da concessionária, além dos componentes essenciais já mencionados, para o aproveitamento da energia solar nessa modalidade, faz-se necessário o uso de baterias ou acumuladores, como também são chamadas. Sua função principal é o armazenamento da energia gerada, visto que dificilmente geração e consumo de energia coincidem. Desse modo, é possível atender a demanda energética da unidade em períodos em que não há incidência de luz solar. Além disso, o armazenamento da energia gerada também permite à unidade sua segurança energética, uma vez que não tem ligação com o SIN. Segundo RIBEIRO, (2023):

Sistemas *off-grid* são sistemas isolados da rede de distribuição energética e geralmente são utilizados em locais que não possuem distribuição de energia elétrica como em zonas rurais muito distantes da cidade, ilhas, praias e outros locais remotos. Este modelo é ainda uma opção para estabelecimentos que não podem ter o seu fornecimento energético interrompido, mas estão situados em locais com constantes apagões.

Neste caso, é importante destacar que mesmo sendo uma excelente solução e com a conquista cada vez maior de espaço e investimento no mercado solar, as baterias para sistemas de energia solar fotovoltaica ainda apresentam altos custos e é uma tecnologia pouco acessível. Outro componente essencial em sistemas *off grid* são os controladores de carga, que, como o nome sugere, atuam no controle e gerenciamento da carga e descarga da energia nas baterias. Eles regulam a corrente e a tensão que fluem entre as baterias, os painéis solares e a carga solicitada. Esses controladores são dispositivos eletrônicos essenciais para proteger, otimizar a eficiência do carregamento e aumentar a vida útil da bateria.

Por fim, a última classificação quanto à conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica é a híbrida, que representa uma combinação dos dois tipos anteriores. Nos sistemas híbridos, existe tanto a conexão com a rede quanto o armazenamento por meio de baterias da energia gerada.

Além disso, as usinas fotovoltaicas podem ser ainda classificadas quanto ao porte e abordagem da implantação. Com relação ao porte, há três categorias principais: pequena escala,

que se configuram os projetos de micro e minigeração e têm capacidade instalada de até alguns megawatts (MW), atendendo geralmente a comunidades, empresas ou propriedades individuais; as usinas de médio porte, que variam de alguns megawatts a dezenas de megawatts, abastecendo áreas geográficas mais amplas ou contribuindo para a rede elétrica local. Já as usinas de grande escala possuem uma capacidade instalada de dezenas de MW a centenas de gigawatts (GW), representando uma parte significativa da produção de energia de uma região e está associada a grandes investimentos.

No contexto solar fotovoltaico, as usinas de grande escala são frequentemente consideradas geração centralizada. Essas usinas são instaladas em locais estratégicos, muitas vezes em áreas remotas ou menos densamente habitadas, e a energia gerada é transmitida por meio de linhas de transmissão para as áreas de consumo, sendo a energia gerada destinada ao Ambiente de Contratação Regulado (mercado cativo ou regulado) e/ou ao Ambiente de Contratação Livre (mercado livre de energia).

Por outro lado, a geração distribuída geralmente ocorre em uma escala menor, com sistemas instalados em telhados de edifícios, terrenos ou áreas urbanas. Nesses casos, a energia gerada é consumida localmente ou pode ser injetada na rede elétrica, atendendo às necessidades de energia de uma residência, empresa ou comunidade específica.

2.3 Células solares fotovoltaicas

Nesta seção, aprofundamos a pesquisa sobre células solares fotovoltaicas, que constituem o elemento central do objeto de estudo do presente trabalho.

Após a descoberta do fenômeno fotovoltaico por Edmond Becquerel, dentre diversos estudos e descobertas que contribuíram para a evolução da exploração solar para conversão de energia elétrica, podemos citar a criação da primeira célula solar, construída em 1883 pelo cientista norte-americano Charles Fritts, que usou películas de selênio para produzir eletricidade a partir da luz solar. Mesmo com a eficiência de conversão elétrica de apenas 1%, a invenção ganhou bastante repercussão pois as pessoas não acreditavam na época que era possível gerar energia sem a queima de combustíveis fósseis (MACHADO; MIRANDA, 2015).

Durante e após a Segunda Guerra Mundial, houve avanços significativos na compreensão dos semicondutores, um elemento crucial para melhorar a eficiência das células solares. Este fato abriu espaço e permitiu que em 1954 os físicos cientistas da Bell Labs: Gerald Pearson, Daryl Chapin e Calvin Fuller, desenvolvessem a primeira célula solar de silício eficiente, atingindo uma eficiência de cerca de 6%. Esse avanço marcou o início da era moderna

da energia solar fotovoltaica. Desde então, as pesquisas e inovações no ramo fotovoltaico com o intuito de progredir e atingir eficiências cada vez mais altas não pararam mais. De acordo com um estudo feito sobre novas tecnologias emergentes de células solares fotovoltaicas por RAPHAEL et al., (2018):

Na avaliação de células solares, a eficiência e o custo são os parâmetros mais importantes a serem considerados; dentro desse contexto, os tipos de materiais utilizados na confecção, a geometria e a estrutura da célula são fatores-chave para obtenção de um elevado desempenho com redução de custos, fato que pode ser observado na evolução das tecnologias das células solares.

No aspecto do custo da tecnologia, podemos afirmar que o investimento na pesquisa e desenvolvimento de células solares para uso em espaçonaves e satélites durante as décadas de 1960 e 1970 realizados pela NASA e outras organizações foi um impulso tecnológico essencial para reduzir os custos e melhorar a eficiência das células solares que conhecemos hoje. Além disso, a crise energética dos anos 1970 e o aumento do interesse na sustentabilidade impulsionaram o desenvolvimento da energia solar. Houve então um aumento significativo na produção e aplicação de painéis solares em residências e empresas, além de avanços significativos em termos de eficiência, custo e aplicabilidade da energia solar fotovoltaica. Assim, a pesquisa contínua neste ramo está focada em tornar a tecnologia cada vez mais acessível, eficiente e ambientalmente amigável.

2.3.1 Estrutura e Funcionamento básico de Células Solares Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas, independentemente do material utilizado, como já mencionado anteriormente, operam com base no princípio do efeito fotovoltaico. Quando a luz solar incide sobre a célula, fótons de luz transferem sua energia aos elétrons nos átomos do material semicondutor presente na célula, permitindo a criação de pares elétron-buracos. Esses pares excitados geram uma corrente elétrica quando se movem através do material semicondutor.

A estrutura básica das células fotovoltaicas inclui uma camada frontal com contatos transparentes para permitir a entrada da luz solar, uma camada ativa onde a absorção e a geração de elétrons excitados ocorrem, e uma camada traseira com contatos metálicos para coletar os elétrons e buracos gerados. Além disso, outras camadas podem ser adicionadas para melhorar a eficiência, como camadas antirreflexivas para minimizar a perda de luz por reflexão ou

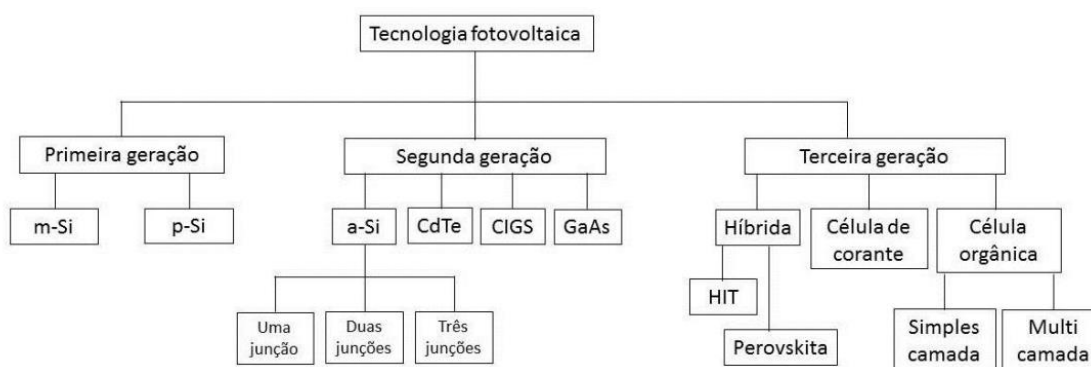
camadas de junção PN para facilitar a separação das cargas. Diferentes materiais semicondutores resultam em estruturas e funcionamentos variados, mas o objetivo é sempre o mesmo: transformar a energia solar em eletricidade utilizável de maneira eficiente. Segundo LIMA et al., (2020):

Uma célula solar eficaz deve contar com os seguintes ingredientes essenciais: i) materiais fotoativos, capazes de absorver a radiação eletromagnética incidente produzindo portadores de carga (elétron-buraco) e ii) um campo elétrico interno forte o suficiente capaz de dissociar os portadores gerados pela luz, antes que esses se recombinem.

2.3.2 Tipos de Células Solares Fotovoltaicas

Atualmente, as tecnologias de células solares fotovoltaicas são classificadas em três tipos, a saber: Células Solares de primeira, segunda e terceira gerações, as quais são diferenciadas basicamente pelos materiais e tecnologias de processamento utilizados em sua fabricação e que podem oferecer caminhos promissores quanto ao custo, a eficiência e a sustentabilidade. Na Figura 3, são apresentados os tipos de materiais que compõem as células fotovoltaicas alocados em cada geração a que se referem.

Figura 3 - Principais tecnologias de células fotovoltaicas existentes.



Fonte: BÜHLER; GABE, (2018)

2.3.2.1 Células Solares Fotovoltaicas de 1ª Geração

As células fotovoltaicas de primeira geração consistem em células solares baseadas em wafers de silício e recebem esse nome porque correspondem às primeiras tecnologias de células

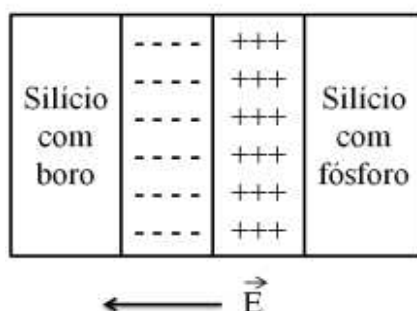
fotovoltaicas a serem desenvolvidas, que obtiveram uso comercial a partir dos anos 50 e que até hoje são as que têm a maior participação no mercado internacional, podendo representar cerca de 90% do mercado dos dispositivos fotovoltaicos. Essa geração é a tecnologia de fotovoltaicos mais antiga e popular devido à sua alta eficiência de conversão e desempenho a longo prazo. Além disso, devido ao crescente investimento no setor fotovoltaico, essa tecnologia apresenta os preços mais baixos no mercado mundial (LIMA et al., 2020).

As células de silício, são dispositivos semicondutores projetados para converter a energia da luz solar em eletricidade. Seu funcionamento é baseado na absorção de fótons de luz solar, que excitam elétrons na estrutura de silício, gerando pares elétron-lacuna. Para isto, é necessário realizar um processo de dopagem no material, que envolve a introdução controlada de impurezas no silício com o objetivo de modificar suas propriedades elétricas e de criar camadas de tipo p e n.

No processo de dopagem do silício, quando é introduzido um elemento como o fósforo, que possui um elétron adicional em sua camada de valência, o silício resultante se torna um semicondutor do tipo n. Isso resulta em um excesso de elétrons na estrutura do silício, tornando a região n-dopada altamente condutora de elétrons. Por outro lado, se dopamos o silício com um elemento como o boro, que tem um elétron a menos em sua camada de valência, obtemos um semicondutor do tipo p. Que por sua vez, é uma região caracterizada por ser bastante receptora de elétrons (GUEDES; TORRES, 2019).

A combinação dos semicondutores tipo p e n, com suas respectivas características de 3 e 5 elétrons na camada de valência, desempenha um papel crucial na criação de uma diferença de potencial. Quando se forma a junção p-n no material, ela induz a formação de um campo elétrico permanente na área da junção. Esse campo elétrico surge devido ao movimento de elétrons livres do lado n (carga negativa) em direção ao lado p (carga positiva). Essa configuração pode ser visualizada na Figura 4.

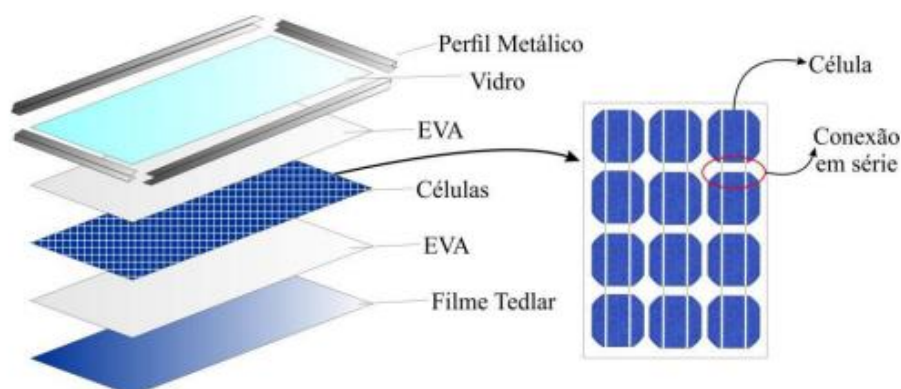
Figura 4 - Acúmulo de cargas na junção p-n após o processo de dopagem do silício



Fonte: MACHADO; MIRANDA, (2015)

Para capturar e utilizar essa eletricidade, são empregados fios condutores conectados em ambos os lados das células solares, completando o circuito e tornando a eletricidade gerada prontamente utilizável. Para formação dos módulos comercializáveis, as células são conectadas em série através de fios condutores e envolvidas em camadas de materiais específicos. Primeiro, elas são encapsuladas em folhas de acetato de vinil etileno (EVA). Em seguida, recebem uma cobertura frontal feita de vidro temperado para proteção contra intempéries e danos físicos. Na parte de trás, são revestidas com um filme de fluoreto de polivinila (PVF), conhecido como Tedlar, para fornecer uma camada protetora adicional. Este conjunto laminado é então montado em uma estrutura metálica, geralmente feita de alumínio. Esse conjunto laminado é montado em um perfil metálico, geralmente de alumínio. O esquema desse módulo pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - Esquema de módulo fotovoltaico



Fonte: MACHADO; MIRANDA, (2015)

As células de silício de primeira geração podem ser divididas em duas categorias que se diferenciam no processo de fabricação, as de silício monocristalino e policristalino e serão mais bem definidas a seguir.

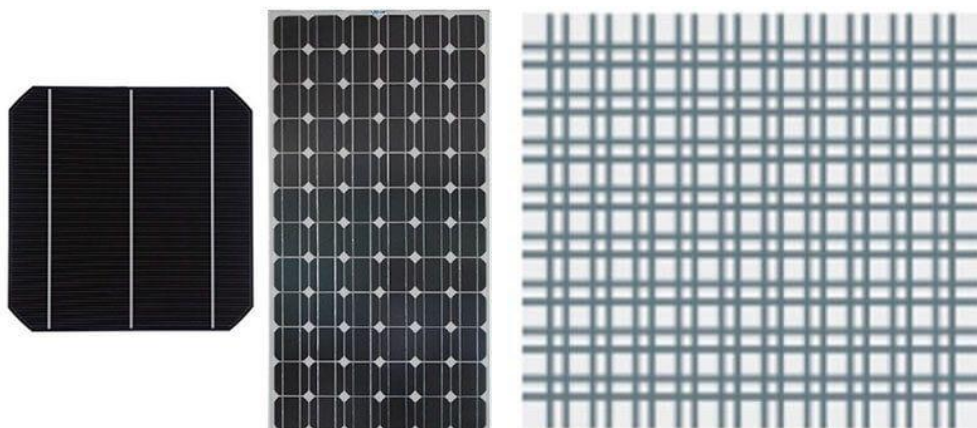
2.3.2.1.1 Células de Silício Monocristalino (m-Si)

Com relação a estrutura e composição das células de silício monocristalino, são formadas por um único cristal de silício, com alto grau de pureza, ou seja, impurezas representam apenas algumas partes por milhão. O processo de crescimento do cristal de silício se dá através do método Czochralski (BÜHLER; GABE, 2018), no qual o cristal é puxado por

uma haste, levando à formação de um cilindro (lingote) de silício monocristalino. Durante o crescimento, o cristal recebe pequenas quantidades de boro, formando um semiconductor dopado do tipo p. O lingote preparado é cortado em discos finos (da ordem de 100 μm) e levado para o forno de difusão, onde recebe a altas temperaturas, a dopagem com fósforo, formando assim a junção p-n. Como a estrutura formada é uniforme por se tratar de um único cristal, o transporte de elétrons se dá de forma mais fluida e sem barreiras, estando este fato, portanto, diretamente relacionado à eficiência da célula fotovoltaica.

Na Figura 6 é possível visualizar uma célula fotovoltaica de silício monocristalino, bem como um conjunto de células dispostas em um módulo e a representação da estrutura atômica do material monocristalino.

Figura 6 - Célula, módulo fotovoltaicos e estrutura atômica de silício monocristalino



Fonte: E4 Energias Renováveis, (2018)

A eficiência de conversão de um dispositivo fotovoltaico é determinada pela Equação (1). No caso de um módulo fotovoltaico, a eficiência é maximizada ao aumentar a área preenchida com material fotovoltaico. Por isso, para alcançar esse objetivo, os discos resultantes da laminação do tarugo de silício monocristalino são ainda cortados em quatro lados, de modo a dar ao módulo uma forma quadrada, minimizando a área do módulo que não está preenchida com material fotovoltaico.

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{P_m}{G_{std} A_m} \quad (1)$$

Onde: η é a eficiência do módulo, E_{out} é a energia de saída do módulo, E_{in} é a energia de entrada do módulo, P_m é a máxima potência do módulo, G_{std} é a irradiância na condição padrão de ensaio (1000 W/m², com distribuição espectral AM1.5) e A_m é a área do módulo, medida desde a moldura do mesmo, caso essa exista (BÜHLER; GABE, 2018).

Em geral, os módulos de silício monocristalino exibem melhor desempenho em relação aos dispositivos utilizando silício policristalino e apresentam eficiências entre 15% e 22%, sendo considerada a maior eficiência de conversão para módulos comerciais. No entanto, o recorde de eficiência para um módulo solar fotovoltaico de silício monocristalino é um pouco mais elevado, atingindo 26,40%, conforme relatado pela marca Jinko Solar (Portal Solar, 2022).

Em contrapartida, apesar da produção em larga escala e da elevada eficiência apresentada pelas células de silício monocristalinas, existem ainda uma série de barreiras a serem superadas, como a redução de custos, visto que é o mais elevado em comparação com a maioria das tecnologias fotovoltaicas existentes. Isso se deve à alta complexidade, sofisticação e ao alto custo do processo de fabricação das células de silício monocristalino, que exigem um alto grau de pureza no processamento dos materiais. Além disso, outros desafios atrelados ao processamento e fabricação dessas células são a quantidade de matéria prima requerida e a quantidade de energia consumida no processo de fabricação (GUEDES; TORRES, 2019).

2.3.2.1.2 Células de Silício Policristalino (p-Si)

Diferentemente das células de silício monocristalino, essa tecnologia não depende de altos níveis de pureza dos materiais ou de cristais perfeitos. O silício policristalino pode ser produzido em diferentes graus de pureza, dependendo do tipo de aplicação desejado. O silício de grau eletrônico (SiGE), por exemplo, que, como o nome sugere, é usado nas indústrias de eletrônicos, apresenta o mais alto grau de pureza e requer mais energia para sua purificação em comparação com o silício de grau solar (SiGS), de pureza inferior, que é utilizado para fabricar lingotes ou faixas policristalinas com as quais se produzem as células fotovoltaicas.

Como é dispensada a alta pureza do material no processo de fabricação deste tipo de célula, o processo torna-se, conseqüentemente, mais econômico e menos rigoroso, uma vez que não depende de tanta complexidade na produção do cristal (GUEDES; TORRES, 2019). Esse cristal, por sua vez, é obtido a partir da fusão do silício em moldes, onde o material passa por um lento processo de solidificação, formando um cubo que possui estrutura formada por múltiplos cristais com superfícies de separação entre eles e que pode então ser cortado em células quadradas. Após esse processo, assim como o silício monocristalino, o material passa pelo mesmo processo de dopagem com o fósforo, gerando uma junção p-n.

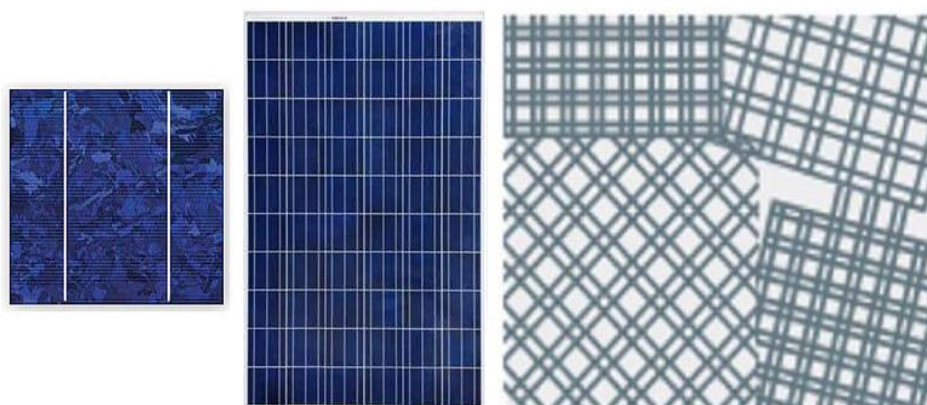
Na estrutura policristalina, os cristais atuam como “barreiras” que fazem com que o fluxo de elétrons seja menos eficiente. Por este motivo, as células de silício policristalino possuem menor eficiência em relação às células silício monocristalino, sendo geralmente de

12% a 20%. Esta eficiência está diretamente relacionada ao tamanho e quantidade dos cristais formados. Portanto, quanto maiores forem os cristais que constituem a estrutura policristalina, maior será a eficiência.

Por outro lado, como as células podem ser cortadas em quadrados, a área de um módulo efetivamente preenchida com material fotovoltaico é maior no caso do p-Si em comparação ao m-Si. Por essa razão, baseando-se ainda na Equação (1) apresentada, em geral, a eficiência de um módulo de silício policristalino se aproxima da de um módulo de silício monocristalino (BÜHLER; GABE, 2018).

Na Figura 7 é possível visualizar uma célula fotovoltaica de silício policristalino, bem como um conjunto de células dispostas em um módulo, além da representação da estrutura atômica do material policristalino.

Figura 7 - Célula, módulo fotovoltaicos e estrutura atômica de silício policristalino



Fonte: E4 Energias Renováveis, (2018)

No cenário atual, as células de silício policristalino ocupam a posição de destaque como a tecnologia mais prevalente no mercado fotovoltaico global. Isso se deve a diversos fatores, sendo a economia de custos de produção um dos principais motivos. Um aspecto a ser destacado é a considerável redução no consumo de energia durante o processo de fabricação, o que representa uma vantagem de mercado significativa em relação às células de silício monocristalino.

2.3.2.2 Células Solares Fotovoltaicas de 2ª Geração

A segunda geração de células solares fotovoltaicas teve o início do seu desenvolvimento em 1970 com o objetivo de aperfeiçoar a redução dos custos de produção e corresponde a

tecnologia dos filmes finos. Essa designação deriva da estrutura dessas células, que possuem camadas de absorção de luz com espessuras da ordem de apenas 1 μm (aproximadamente 100 vezes menos espessa do que lâminas de silício cristalino). As células de filmes finos podem ser fabricadas a partir de materiais como silício amorfo (a-Si), células de telureto de cádmio (CdTe), células de arsenieto de gálio (GaAs) e composições dos elementos cobre, índio, gálio e selênio (CIS e CIGS).

O processo de fabricação dessas células é muito diferente do silício cristalino, consistindo basicamente na deposição de uma ou mais camadas de película fina de material fotovoltaico em uma base, que pode ser vidro, plástico, cerâmica ou metal. Essas camadas de filme fino têm espessuras que variam de nanômetros (nm) a micrômetros (μm), tornando-as leves e flexíveis, o que permite uma maior versatilidade do ponto de vista das aplicações. A deposição pode ser realizada por meio de vários processos, como pulverização catódica, eletrodeposição, deposição química por banho (CBD), sublimação em espaço reduzido (CSS) e deposição química a vapor em baixas pressões (LPCVD) (BÜHLER; GABE, 2018).

Independentemente do tipo de processo, a fabricação deste tipo de célula se caracteriza por utilizar pouca matéria prima, possibilitando que o produto final seja mais barato em comparação a tecnologias tradicionais de primeira geração. Além disso, dentre as vantagens das células solares da segunda geração, também podemos destacar a economia de energia durante o processo de fabricação e a redução de desperdícios de material.

Segundo BÜHLER; GABE, (2018), em uma revisão sobre as tecnologias fotovoltaicas atuais:

Uma vez que módulos de filmes finos empregam muito menos material na sua fabricação, essa tecnologia apresenta um alto potencial de redução de custos. Entretanto, até o presente momento, apesar dos custos terem baixado muito nos últimos anos, não se observou um crescimento percentual significativo dos filmes finos no mercado.

Isso se deve principalmente ao fato de que, até o momento, não foi possível alcançar em escala industrial um produto que se aproxime de valores significativos de eficiência de conversão fotovoltaica. Mesmo com eficiências laboratoriais de até 20%, as células de filme fino geralmente apresentam eficiências na faixa de 11% a 18%. A seguir, as principais tecnologias de segunda geração serão melhor abordadas.

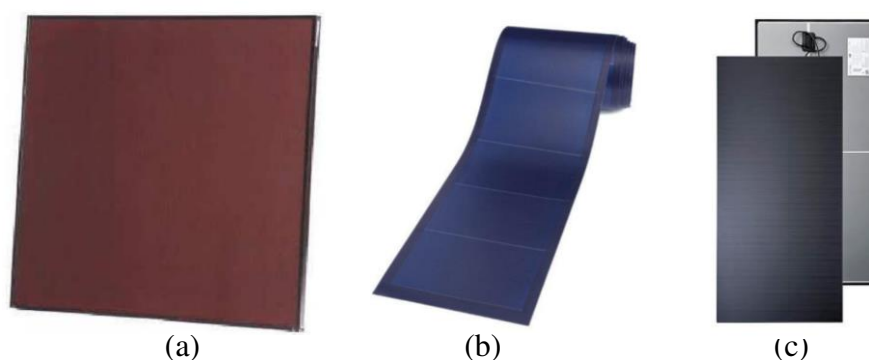
2.3.2.2.1 Células de Silício Amorfo (a-Si).

Na segunda geração, as células de silício amorfo (a-Si) são as mais bem desenvolvidas e as primeiras a serem fabricadas em escala industrial, sendo utilizado pela primeira vez em células solares no ano de 1974. Mesmo sendo também produzidas a partir do silício, ao contrário das células de primeira geração, que se caracterizam pela formação cristalina do material, as células de silício amorfo são dispositivos compostos pela deposição de átomos de Si em uma fina e homogênea camada de substrato, e por este motivo são conhecidas como uma tecnologia fotovoltaica de filmes finos. Além disso, como o processamento desse tipo de célula se dá em baixas temperaturas (inferiores a 300°C), é possível utilizar uma ampla gama de substratos. Essa característica possibilita a produção de células flexíveis, tornando-as ideais para superfícies curvas.

No caso das células solares de silício amorfo, a dopagem pode comprometer a qualidade de absorção da camada de silício, introduzindo imperfeições na estrutura do sólido que resultam em recombinações. Ao mesmo tempo, o silício amorfo por si só não fornece uma boa difusão de elétrons. Para aumentar o fluxo de elétrons, Carlson e Wronski em 1976 apresentaram o conceito de junção p-i-n (MACHADO; MIRANDA, 2015). A função da junção p-i-n é gerar um campo elétrico ao longo da camada de a-Si intrínseco, assim o fluxo de elétrons ocorre através de um mecanismo de tração devido ao campo elétrico gerado. A estrutura das células de a-Si, com a junção p-i-n, é do tipo junção única.

Existem ainda as células com estrutura de junções múltiplas. A função dessas junções múltiplas é aumentar a eficiência da célula, já que elas têm a capacidade de absorver uma porção maior do espectro solar. Na Figura 8 é possível visualizar uma célula fotovoltaica de silício amorfo de junção única e múltiplas junções, bem como um módulo de silício amorfo.

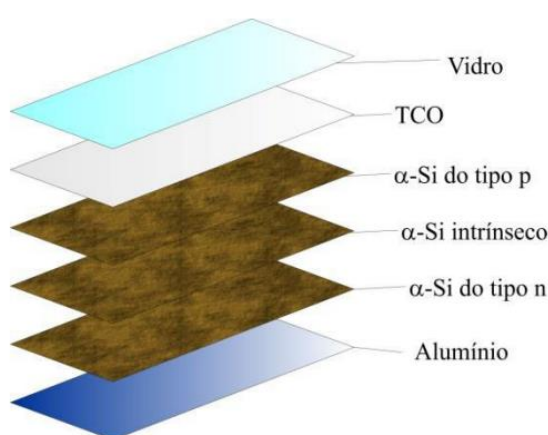
Figura 8 - Célula de silício amorfo de junção rígida (a), de tripla junção flexível (b) e módulo comercial de silício amorfo (c)



Fonte: (BÜHLER; GABE, 2018) e (GODOI, 2018) - Adaptado pela autora

Essas células, como mostra a Figura 9, são formadas por três camadas sobrepostas de silício amorfo, sendo a primeira um filme dopado do tipo p seguido por um filme de silício intrínseco, ou seja, puro, e por fim, um filme dopado do tipo n. A condução da corrente produzida ocorre por meio de uma folha de alumínio na parte posterior da célula e por um óxido condutor transparente (TCO) na parte frontal da célula, geralmente SnO_2 . Para proteger esse conjunto, emprega-se vidro transparente na parte frontal, enquanto na parte posterior, a função protetora é desempenhada pelo próprio alumínio.

Figura 9 - Estrutura da célula de silício amorfo (a-Si)



Fonte: MACHADO; MIRANDA, (2015)

O silício amorfo tem uma elevada e mais eficaz absorção da luz que o silício cristalino, podendo ser até 40 vezes maior, o que permite que uma lâmina de apenas 1 μm seja capaz de absorver 90% da energia solar útil (BÜHLER; GABE, 2018). Além disso, apresenta ainda ótimas propriedades eletrônicas quando depositado sobre o substrato aquecido entre 200 e 400°C. Essas características barateiam significativamente os custos de produção dessas células. Em contrapartida, esse material apresenta um fenômeno de degradação induzido pela luz, chamado de efeito Staebler–Wronski (SW) em que a potência da célula é reduzida desde o início da operação até sua estabilização depois de alguns meses (MACHADO; MIRANDA, 2015). Ainda segundo BÜHLER; GABE, (2018):

Existe, porém, outro efeito importante que ocorre com o a-Si chamado de thermal annealing (recozimento térmico). Basicamente, o que ocorre é que uma vez exposto a altas temperaturas, que podem ser atingidas durante a exposição dos módulos a irradiação solar, parte da degradação causada pelo efeito Staebler-Wronski é revertida, fazendo assim com que a eficiência dos módulos aumente. Essa é a principal

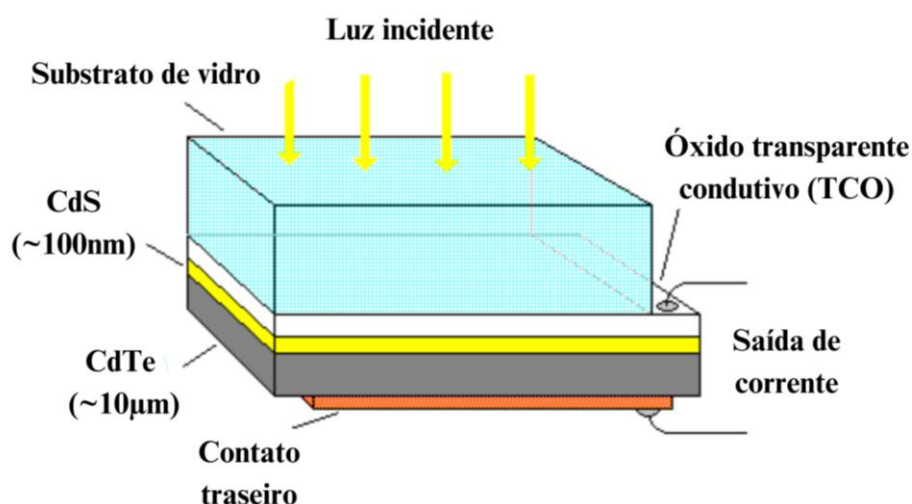
razão pela qual diversos autores afirmam que o a-Si é mais apropriado para regiões de climas quentes.

A maior desvantagem e também o fator que representa o maior desafio apresentado por esse tipo de célula é a baixa eficiência. Mesmo atingindo valores por volta de 12,5% em laboratório, elas geralmente possuem eficiência entre 4% e 9% em larga escala.

2.3.2.2.2 Células de Telureto de Cádmio (CdTe).

As células fotovoltaicas de Telureto de Cádmio (CdTe) são representantes da segunda geração de células solares, caracterizadas por sua tecnologia de filmes finos. Essa tecnologia em específico envolve a aplicação de finas camadas de CdTe sobre um substrato, geralmente o vidro, com uma camada de óxido transparente condutivo como contato frontal, onde geralmente é utilizado o óxido de estanho e índio (ITO), por onde a luz solar incide e é transmitida para dentro da camada absorvente, que é onde o efeito fotovoltaico ocorre. Nesse tipo de célula, o telureto de cádmio (CdTe) e o sulfeto de cádmio (CdS) formam a heterojunção (junção p-n), em que o CdTe é o semiconductor tipo p e o CdS é o material tipo n mais utilizado (MACHADO; MIRANDA, 2015). Neste caso, a junção p-n de CdS-CdTe é ativada quando entra em contato com uma atmosfera contendo cloro. O esquema e estrutura de uma célula de CdTe são representados na Figura 10.

Figura 10 - Esquema de uma célula de CdS/CdTe



Fonte: (MEZA ALFONSO; MIGUEL ANDRES; LUIS ENRIQUE, 2017) - Adaptado pela autora

Com relação à representatividade desta tecnologia no mercado atual, segundo BÜHLER; GABE, (2018):

Atualmente o CdTe é a tecnologia de filmes finos com maior importância no cenário mundial. Isto se deve, por exemplo, ao fato de que desde 2007, a cada ano a maior fatia do mercado fotovoltaico entre os filmes finos pertence ao CdTe. Em 2016 foram produzidos 3,1 GW de CdTe contra 1,3GW de CI(G)S e apenas 0,5 GW de a-Si.

Embora existam diversas empresas fabricando módulos de CdTe e uma parcela significativa do potencial instalado no mundo esteja utilizando essa tecnologia, o preço dos módulos para compras em quantidades reduzidas, como para instalações residenciais, ainda é consideravelmente alto. Além disso, embora apresentem vantagens, tais como versatilidade, flexibilidade, leveza, facilidade e baixo custo de processamento dos painéis, juntamente com eficiência próxima às células de p-Si devido ao alto nível de absorvidade óptica, as células de CdTe ainda possuem algumas desvantagens significativas.

Entre elas, destaca-se a instabilidade devido à estreita curva de resposta espectral. No entanto, a principal barreira enfrentada pela tecnologia de células que utilizam o CdTe está relacionada à fabricação dos módulos fotovoltaicos, devido à toxicidade do cádmio, um metal pesado e menos abundante na natureza que o silício. O Telureto de Cádmio, embora seja um composto atóxico, torna-se tóxico apenas durante o processo de fabricação, demandando procedimentos rigorosos de controle para mitigar impactos ambientais.

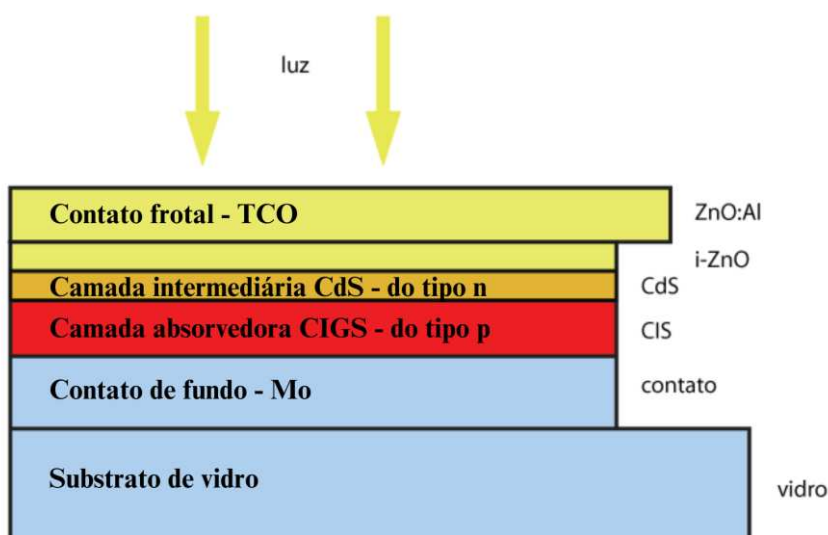
Em relação à eficiência, inicialmente, quando Bonnet e Rabenhorst obtiveram a primeira célula de CdS/CdTe eficiente em 1972, esta apresentou uma eficiência de cerca de 6% (DENISE FALCÃO, 2005). No entanto, a eficiência para este tipo de tecnologia aumentou consideravelmente, situando-se entre 9% e 17% na eficiência de conversão desse módulo em escala de produção. Atualmente, segundo dados atualizados de 2023, o recorde de eficiência da célula de CdTe certificado pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL, do inglês, *National Renewable Energy Laboratory*), dos Estados Unidos, é de 23,3%. O contínuo avanço da pesquisa dentro da comunidade científica busca aprimorar tanto a eficiência quanto a sustentabilidade dessas células solares, consolidando ainda mais sua presença no mercado de energia solar.

2.3.2.2.3 Células de Disseleneto de cobre-índio-gálio (CIGS).

As células fotovoltaicas de Disseleneto de Cobre-Índio (CIS) e Cobre-Índio-Gálio (CIGS) possuem uma estrutura semelhante àquelas compostas por Telureto de Cádmio (CdTe). Essa configuração é constituída por diversas camadas funcionais. Inicialmente, há um substrato, como vidro, folhas de aço inoxidável, polímeros ou metais flexíveis, seguido por um contato de fundo composto por molibdênio (Mo). Em seguida, encontra-se o CIGS, que desempenha o papel de uma liga semicondutora do tipo p, especificamente $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$. Essa camada é responsável pela absorção da luz solar.

Adicionalmente, integra-se o Sulfeto de Cádmio (CdS), que por sua vez atua como um semicondutor tipo n na junção fotovoltaica. Para o contato frontal, utiliza-se um óxido transparente e condutor (TCO), como o óxido de zinco (ZnO). Além disso, é também incluída uma camada anti refletora (ARC), tal como o fluoreto de magnésio, que é aplicada para minimizar reflexões indesejadas. A célula é então finalizada com uma grade de contato metálica para a coleta de corrente. Uma possível variação da montagem deste tipo de célula inclui a adição de enxofre à camada absorvedora, substituindo o selênio, resultando na designação CIGSS, uma liga com a composição $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{Se,S})_2$ (LIMA et al., 2017). O esquema de uma célula de CIGS é representado na Figura 11.

Figura 11 - Esquema de uma célula de CIGS



Fonte: BlueSol, (2023) - Adaptada pela autora

Os compostos de CIGS representam uma forma multicristalina de filmes finos, cujas propriedades vêm sendo objeto de estudo desde a década de 1980. Esses semicondutores possuem um elevado coeficiente de absorção, absorvendo cerca de 90 % dos fótons incidentes,

o que implica que camadas mais finas do material podem ser integradas nas células solares sem comprometer a eficiência dos dispositivos, diminuindo custos e ainda sendo possível a deposição dos compostos em substratos flexíveis.

Em contrapartida, como as técnicas empregadas para a fabricação deste tipo de célula geralmente dependem de altas temperaturas, as possibilidades de utilização de materiais são reduzidas, não sendo possível utilizar polímeros orgânicos, por exemplo. O CIGS pode ser depositado através de técnicas comuns como sputtering, evaporação, impressão e deposição por feixe de elétrons (LIMA et al., 2019).

Como principais vantagens deste tipo de célula, além da leveza e flexibilidade, podemos citar o longo tempo de vida útil, boa resistência ao aquecimento, e baixa degradação. Diferentemente das células de silício amorfo, as células de CIGS não sofrem degradação quando expostas à luz. No entanto, é crucial garantir um selamento robusto para prevenir a degradação do óxido de zinco, o que poderia comprometer a eficiência do módulo solar. Além disso, de acordo com TITTON; et al., (2015):

Esta tecnologia merece destaque na ampla faixa de resposta espectral, o que acarreta em baixas variações da eficiência de conversão ao longo do ano, superando, inclusive, os módulos de silício cristalino e outras tecnologias de filmes finos, como a-Si e CdTe. Em locais onde a variação espectral ao longo do ano é muito grande, o CI(G)S pode ser a melhor opção.

Quanto à eficiência de conversão, esta tem evoluído significativamente ao longo dos anos por se tratar de uma tecnologia promissora no mercado. Embora a eficiência seja ainda menor se comparada aos módulos de silício, uma tecnologia que já vem sendo estudada há muito tempo, as células que contêm o composto CIGS têm alcançado recordes de eficiência registrados pela NREL de 23,6%. Já os valores típicos de eficiência de conversão fotovoltaica para os módulos desta tecnologia geralmente se situam entre 13% e 14%.

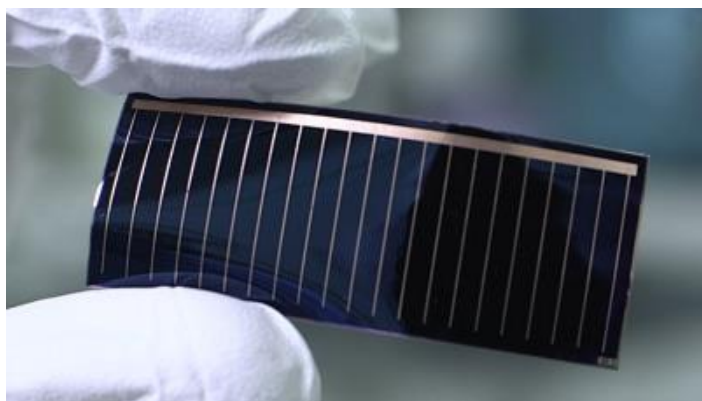
2.3.2.2.4 Células de Arsenieto de Gálio (GaAs).

As células fotovoltaicas que têm como base o arsenieto de gálio (GaAs) são constituídas por uma combinação de gálio (Ga) e arsênio (As) como materiais semicondutores. Essas células possuem uma estrutura cristalina e podem ser depositadas na forma de filmes finos, seguindo a tendência de outras tecnologias da mesma geração. Neste caso, o substrato mais utilizado é o Germânio (Ge). O GaAs apresenta também uma capacidade de absorção de luz solar em níveis

mais altos do que muitos outros materiais semicondutores sendo necessária apenas uma espessura de alguns micrômetros para efetuar a absorção da luz solar de forma satisfatória. Essa característica contribui para bons valores de eficiência das células de GaAs, alcançando uma taxa de conversão máxima de 31,6%, conforme reconhecido pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL).

Além de sua eficiência notável, as células de GaAs oferecem vantagens em termos de peso, sendo mais leves em comparação com o silício cristalino. Além disso, uma característica distintiva do GaAs é sua alta resistência térmica. No entanto, o custo de fabricação deste tipo de célula é consideravelmente mais elevado. Em função disto, o GaAs é empregado principalmente em casos específicos caracterizados por requerer um alto índice de radiação e temperatura incluindo células de multi-junção, sistemas com concentração, satélites e carros solares (BÜHLER; GABE, 2018) Na Figura 12 é possível visualizar uma célula fotovoltaica de GaAs desenvolvida como um protótipo para um projeto da famosa marca de carros, Audi, em conjunto com o fabricante solar de filmes finos Hanergy com o objetivo de levar as células solares a serem integradas a um teto de vidro panorâmico e, posteriormente, na maior parte da superfície do teto do automóvel lançado pela marca.

Figura 12 - Célula solar fotovoltaica de GaAs



Fonte: Ecosol energia solar, (2017)

2.3.2.3 Células Solares Fotovoltaicas de 3ª Geração

As células solares fotovoltaicas de terceira geração surgiram com o objetivo de unir vantagens da primeira e da segunda geração, aliando o alcance de níveis cada vez mais altos de eficiência a menores custos de produção. A terceira geração é assim chamada porque representa o grupo de tecnologias de células fotovoltaicas que estão em fase de pesquisa e

desenvolvimento dentro da comunidade científica, porém ainda com pouca participação no mercado em escala industrial. Essas células se caracterizam também por suas configurações e técnicas de fabricação distintas e ainda por serem compostas por materiais alternativos aos tradicionais, oferecendo diversas vantagens, tais como flexibilidade mecânica, baixo custo e facilidade de processamento; sendo elas a à base de materiais orgânicos, corantes, pontos quânticos ou Perovskita, e também englobam estruturas mais complexas como as células tandem (ou multi-junção), células de portadores quentes e tecnologias de upconversion.

A terceira geração de células solares, como formas de tecnologias alternativas, oferece a possibilidade de ultrapassar os limites teóricos de eficiência de Shockley e Queisser (S-Q), que designa a máxima eficiência teórica de uma célula fotovoltaica baseada numa união p-n. De acordo com CUNHA, (2018):

Em 1961 William Shockley e Hans J. Queisser demonstraram que com uma junção pn simples não seria possível atingir uma eficiência acima de 33%, onde os principais problemas pontuados foram: 1) apenas fótons com energia maior ou igual ao gap podem produzir corrente, logo, todo o resto é desperdiçado por transmissão; 2) a diferença entre a energia do fóton que incide com energia muito maior que o gap do material e a energia do gap se converte em calor em um fenômeno denominado termalização.

Atualmente, as tecnologias emergentes de células solares têm apresentado evolução significativa em termos de estrutura e valores para eficiência de conversão fotovoltaica, sendo o valor mais recente certificado o de 33,7%, de acordo com dados de 2023 do Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL) dos Estados Unidos. A seguir, serão apresentadas mais detalhadamente as principais tecnologias da terceira geração.

2.3.2.3.1 Células Solares Sensibilizadas por Corante (DSSC)

As células solares sensibilizadas por corante, (do inglês *Dye-Sensitized Solar Cell* - DSSC), são também referidas como células de Grätzel, em homenagem ao trabalho pioneiro realizado nesta tecnologia. Esse reconhecimento decorre de um artigo publicado por Grätzel em 1991, que contribuiu significativamente para o desenvolvimento e compreensão dessas células.

As DSSCs têm seu princípio de funcionamento baseado na utilização de um corante capaz de transferir um elétron no estado excitado para um óxido semiconductor, iniciando o

processo que leva à geração de corrente dentro da célula. De acordo com ANTONIO; TEIXEIRA; RAMOS, (2021), em uma revisão sistemática da literatura sobre as perspectivas de novos materiais alternativos ao silício para produção de células solares fotovoltaicas, as DSSCs:

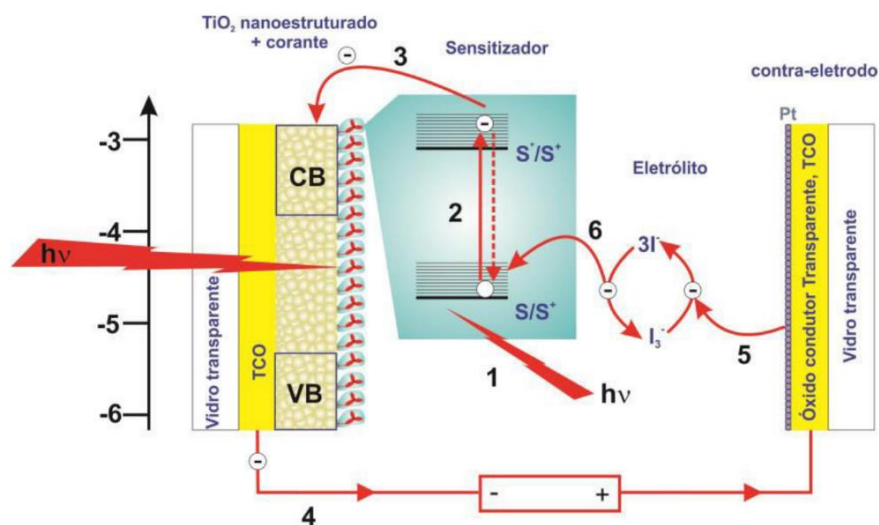
Combinam materiais orgânicos e inorgânicos, são mecanicamente resistentes, requerem matérias primas de baixo custo e são facilmente processadas. As células DSSCs são leves, podem ser produzidas em substratos flexíveis e podem ser coloridas de acordo com o corante utilizado se comparado às células de silício.

Além disso, outra vantagem evidente deste tipo de célula é a possibilidade de aplicação tanto em ambientes internos quanto externos, uma vez que são capazes de converter luz de diversas fontes, sendo elas artificiais ou naturais, em eletricidade. O dióxido de titânio emerge como um dos materiais mais prevalentes nas Células Solares Sensibilizadas por Corante (DSSCs), sendo frequentemente empregado em conjunto com elementos como fluoreno e cumarina. Esse esforço busca desenvolver corantes orgânicos isentos de metais pesados.

A estrutura das DSSCs em geral consiste em duas faces de um fotoanodo composto por um substrato de vidro condutor transparente, formado de óxido de estanho dopado com flúor (do inglês: *Fluorine doped Tin Oxide* – FTO) ou índio (do inglês: *Indium doped Tin Oxide* – ITO). Em uma dessas faces é depositada uma camada de óxido semiconductor, em geral TiO_2 sensibilizada por um corante; enquanto na outra é depositada uma fina camada de platina, que atua como contra eletrodo da célula. As duas partes são unidas em um arranjo tipo sanduíche e o eletrólito é inserido.

Em resumo, a absorção de fótons pelo sensibilizador, a injeção de elétrons no semiconductor, o transporte externo até o contra eletrodo, a oxidação do corante e a regeneração pelo eletrólito são os elementos essenciais do mecanismo de conversão, culminando na produção de corrente elétrica dentro da célula em resposta à luz solar (MACHADO; MIRANDA, 2015). O esquema de montagem e funcionamento de uma DSSC é representado na Figura 13.

Figura 13 - Esquema de estrutura e funcionamento de uma célula sensibilizada por corante



Fonte: MACHADO; MIRANDA, (2015)

Em 1887 o primeiro fenômeno de fotossensibilização por corantes orgânicos foi relatado, no entanto, somente em 1991, com o desenvolvimento da primeira célula desta tecnologia através do trabalho de Grätzel e O'Regan, com uma eficiência notável de aproximadamente 7-8%; essas células receberam maior atenção da comunidade científica. A partir de então, as DSSCs têm despertado interesse significativo de pesquisadores e setores industriais a nível global, todos visando a criação de células solares que sejam acessíveis em termos de custo, simplicidade de fabricação e altas eficiências.

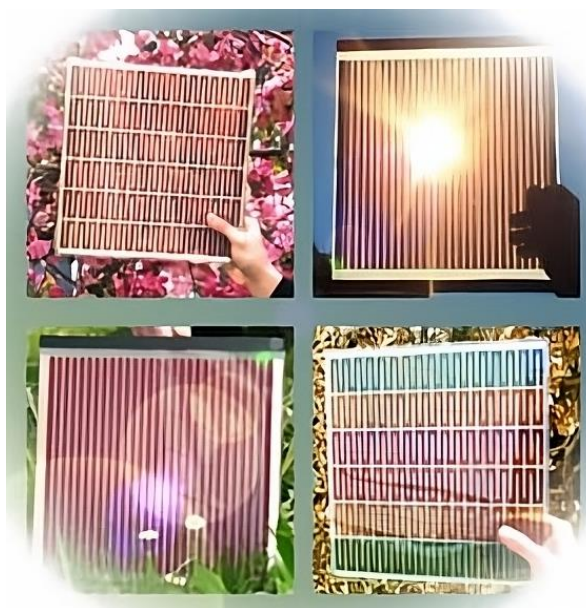
Assim, para essa tecnologia, já é possível afirmar que os objetivos estão à vista, pois, além de atenderem aos requisitos de baixo custo e processo de fabricação simplificado, muitos pesquisadores alcançaram eficiências notáveis em seus dispositivos, enquanto novos compostos continuam a ser desenvolvidos para aprimorar a eficiência das DSSCs. Segundo MACHADO; MIRANDA, (2015):

Outros fatores que podem melhorar a performance das DSSCs são periodicamente discutidos na literatura, por exemplo, a substância usada como eletrólito, a morfologia do TiO_2 e as superfícies dos eletrodos.

No cenário atual, as células solares sensibilizadas por corante destacam-se como o único tipo de célula da terceira geração com uma presença comercial significativa. Exemplos concretos dessa implantação incluem instalações na Suíça capazes de gerar até 2000 kWh por ano (LIMA et al., 2019). No que diz respeito à eficiência de conversão dessas células, conforme

é típico das tecnologias de terceira geração, elas se apresentam altamente promissoras, geralmente variando entre 8% e 14%. Registros de eficiência notáveis, certificados pelo NREL, corroboram essa promissora performance, evidenciando também a estabilidade a longo prazo dessas células solares. Na Figura 14 é possível visualizar uma DSSC.

Figura 14 - Célula solar fotovoltaica sensibilizada por corante



Fonte: SILVA, et al., (2018)

2.3.2.3.2 Células Solares baseadas em pontos quânticos (QDSSC)

As células solares sensibilizadas por pontos quânticos (QDSSC, do inglês *Quantum Dot-Sensitized Solar Cells*) podem ser consideradas derivadas das DSSCs. Nesta tecnologia, pontos quânticos (PQs), que são nanocristais semicondutores com tamanho reduzido o suficiente para apresentar propriedades quânticas, substituindo os corantes como sensibilizadores com o objetivo de melhorar a eficiência das células solares. Os pontos quânticos apresentam o efeito de confinamento quântico, o que os caracterizam como materiais intermediários entre átomos, moléculas e um corpo massivo. Estes dispositivos apresentaram considerável estabilidade, baixo custo e a eficiência de conversão certificada pelo NREL é de 18,1%.

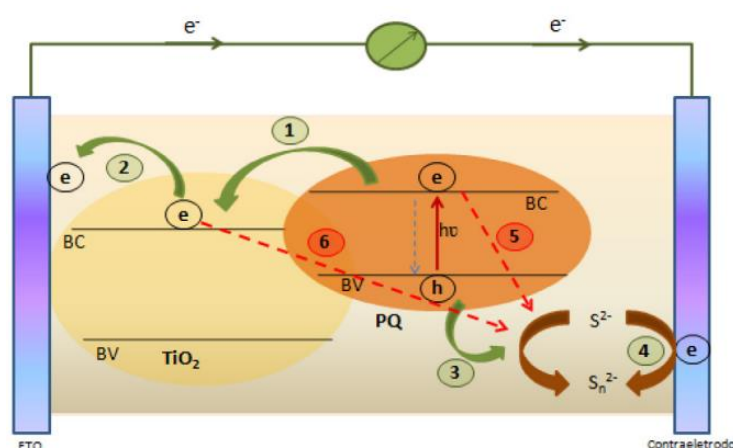
As principais vantagens deste tipo de célula se dão devido às propriedades optoeletrônicas desses nanocristais como a *bandgap*, diferença de energia entre a banda de valência e a banda de condução, que neste caso varia em função do tamanho da nanopartícula, elevado coeficiente de absorção e maior estabilidade química da célula. Além disso, quando a

QDSSC é exposta à luz solar, ocorre a emissão de múltiplos éxcitons. Esse fenômeno acontece quando os elétrons na banda de valência dos pontos quânticos adquirem energia suficiente da luz para saltar para a banda de condução.

De forma semelhante ao que ocorre nas DSSCs, as células solares sensibilizadas por pontos quânticos são constituídas por um fotoanodo, geralmente feito de vidro condutor transparente, uma camada de semiconductor, comumente o TiO_2 e uma camada de PQs adsorvidos a esse semiconductor. Além disso, incluem um eletrólito redox e um contra eletrodo depositado em vidro condutor. Para o funcionamento do dispositivo, os pontos quânticos absorvem a radiação solar, transferindo elétrons da banda de condução do ponto quântico para a banda de condução do TiO_2 . Em seguida, esses elétrons fluem para o substrato de vidro condutor, gerando corrente elétrica no circuito. Assim como nas DSSCs, os buracos formados nos pontos quânticos são regenerados por reações redox no eletrólito, que, por sua vez, depende do contra eletrodo para sua regeneração (VITORETI et al., 2016).

Embora a platina seja frequentemente usada como contra eletrodo devido à sua eficiência na transferência de carga, ela pode ser prejudicada em contato com eletrólitos polissulfatados. Alternativas como ouro, carbono e sulfetos metálicos, como Cu_2S , são empregados para superar esses desafios e melhorar a estabilidade do sistema. As QDSSC podem ser esquematizadas como a apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Esquema de uma célula solar sensibilizada por pontos quânticos com os processos de transferência de cargas envolvidos



Fonte: VITORETI et al., (2016)

De acordo com (VITORETI et al., 2016)

Ainda são poucos os grupos de pesquisa no Brasil que têm trabalhos com células solares sensibilizadas por pontos quânticos, dentre os quais podemos citar o Grupo de Pesquisa em Química de Materiais (GPQM) da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), o Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI), o Laboratório de Materiais Aplicados e Interfaces (LAMAI) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), o Núcleo de Tecnologia em Energia Solar (NT-Solar) da PUCRS), o Centro de Tecnologia Estratégicas do Nordeste (CETENE) e o Laboratório de Nanotecnologia e Energia Solar (LNES) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

2.3.2.3.3 Células Solares Híbridas - HIT e Perovskitas

A tecnologia de células solares híbridas é caracterizada pela integração de propriedades em uma junção entre semicondutores orgânicos e inorgânicos. Nesse tipo de dispositivo, os materiais orgânicos, como polímeros conjugados que têm a capacidade de absorver luz, desempenham o papel de camada doadora, facilitando o transporte de lacunas. Enquanto isso, os materiais inorgânicos são empregados como camada aceitadora e para o transporte de elétrons. Esses dispositivos híbridos não apenas têm o potencial de serem economicamente acessíveis, mas também demonstram capacidade para a conversão de energia solar em larga escala (LIMA et al., 2019).

Há várias abordagens para criar células solares híbridas, e elas geralmente são projetadas para superar as limitações individuais de cada tecnologia, melhorar a eficiência global e proporcionar uma produção de energia mais estável. Dentre as categorias de células solares híbridas, o presente estudo abordará as características das células solares de heterojunção com uma fina camada intrínseca (HIT, do inglês, *Heterojunction with Intrinsic Thin layer*) e as células solares de Perovskita (PSC, do inglês *Perovskite Solar Cell*).

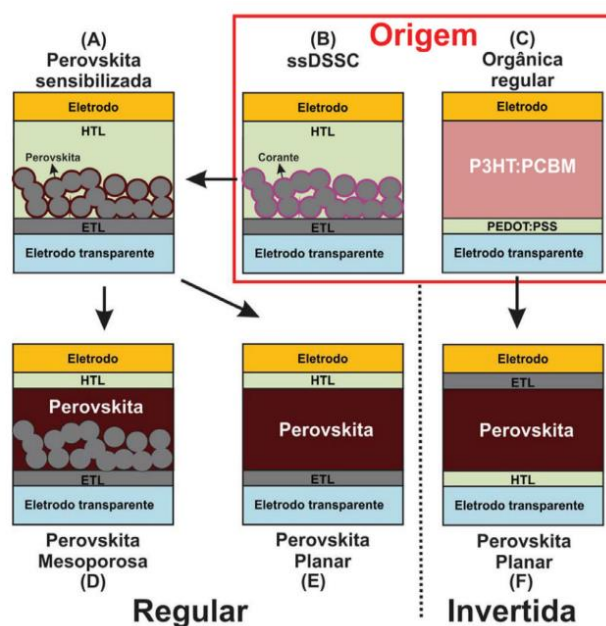
No caso das células solares híbridas HIT, a tecnologia corresponde a associação do silício cristalino e o silício amorfo a uma película fina adicional não contaminada (camada fina intrínseca). Uma pastilha monocristalina forma o núcleo da célula HIT e é revestida em duas camadas ultrafinas de silício amorfo (TORRES, 2012). No caso das células HIT, eficiências consideravelmente altas são obtidas, tendo a melhor célula uma eficiência de 26,8% certificada pela NREL e o módulo mais eficiente 19,5 % (BÜHLER; GABE, 2018).

Já a tecnologia de células solares de Perovskita, originou-se das DSSCs e utilizam Perovskita como agente sensibilizador. A Perovskita representa uma classe de compostos ABX₃ em que A geralmente é um pequeno cátion molecular orgânico-inorgânico, B é um íon

metálico como chumbo, estanho ou germânio, e X é um halogênio como iodo, bromo ou cloro. Esses materiais híbridos orgânico-inorgânicos são altamente promissores devido às suas notáveis propriedades físicas, incluindo ferroeletricidade, ferromagnetismo, magnetoeletricidade, magnetorresistência, luminescência e (RAPHAEL et al., 2018). Uma vantagem adicional é a facilidade de preparação desses materiais por meio de processos químicos, que têm potencial para aplicação em larga escala devido ao baixo custo e às baixas temperaturas necessárias (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018).

Em uma típica PSC, a camada ativa, composta pela Perovskita, absorve a radiação e é posicionada entre uma camada transportadora de elétrons (ETL, do inglês *Electron Transport Layer*), como TiO_2 ou fulereno, e uma camada transportadora de buracos (HTL, do inglês *Hole Transport Layer*). Essas camadas são colocadas sobre um eletrodo condutor transparente, como FTO ou ITO. O dispositivo é completado depositando um metal (Au, Ag ou Al) sobre a outra camada. Existem duas configurações principais: a regular, originada das DSSCs de estado sólido, com a ordem FTO/ETL/Perovskita/HTL/metal, e a invertida, originada de células solares orgânicas regulares, com as camadas ETL e HTL invertidas, em que o eletrodo condutor transparente utilizado geralmente é o ITO. A Figura 16 resume a origem das diferentes configurações das células solares de Perovskitas (RAPHAEL et al., 2018).

Figura 16 - Diferentes configurações de células solares de Perovskita



Fonte: RAPHAEL et al., (2018)

Descobertas por Gustav Rose em 1839, as Perovskitas constituem uma classe de materiais com propriedades únicas que estão sendo cada vez mais exploradas em diversas aplicações em dispositivos tecnológicos. Sua primeira aplicação em células solares foi em 2009, inicialmente com uma eficiência de conversão de energia de 3,8%. Atualmente, de acordo com o NREL, essa eficiência alcança 33,7%, experimentado um rápido avanço e aumento de desempenho em um curto intervalo de tempo, destacando-se em relação às outras tecnologias solares convencionais. Segundo RAPHAEL et al., (2018):

Para as células solares de Perovskitas, é esperado um futuro promissor, com significativos progressos e altas eficiências de conversão de energia. Entretanto, para isso, são necessários mais estudos para melhorar a estabilidade dos dispositivos e outros problemas ainda enfrentados, para então poder alcançar uma comercialização nos próximos anos.

Além disso, é crucial evitar o uso de materiais raros e tóxicos, como o chumbo, um componente-chave das Perovskitas. Apesar de sua abundância, o chumbo apresenta preocupações significativas relacionadas à sua toxicidade (LIMA et al., 2019). As células solares de Perovskitas também enfrentam desafios relacionados à umidade, presença de oxigênio, exposição à luz UV, processo de produção em solução e temperatura. Esses fatores dificultam a fabricação e prejudicam as propriedades de transporte de carga, afetando, assim, a eficiência do dispositivo. Pesquisas estão em andamento para aprimorar a estabilidade das Perovskitas e torná-las mais robustas. No Brasil, já existem alguns grupos trabalhando na elaboração de células de Perovskita. Como exemplo cita-se a Universidade de Campinas e a UNESP.

2.3.2.3.4 Células Solares Orgânicas

As células solares orgânicas fazem uso de polímeros conjugados como camada ativa. Este tipo de polímero ganhou notoriedade em 1977, quando Shirakawa e sua equipe descobriram que tais polímeros possuem características semicondutoras ao dopar o polímero poliacetileno com iodo (ROSA; TOLEDO, 2021). Os polímeros conjugados atraem enorme interesse como camada semicondutora devido às suas características de absorção, flexibilidade mecânica, baixo peso molecular, compatibilidade com diversos substratos, solubilidade em vários solventes, além de baixo custo e facilidade de processamento.

Esses polímeros destacam-se ainda por sua capacidade de serem depositados por meio de técnicas simples, sem a necessidade de altas temperaturas de processamento. O Poli(3-hexiltiofeno) (P3HT) e o PEDOT:PSS são exemplos de polímeros condutores utilizados em células solares (LIMA, et al., 2019). Além disso, esse tipo de célula também pode ser constituído por outras moléculas orgânicas conjugadas como pentaceno, ftalocianina de Cobre, polifenileno vinileno e fulerenos de carbono, conhecidos por serem compostos de moléculas pequenas (100 nm) (BÜHLER; GABE, 2018).

Assim como as células solares de Perovskita, as OPV apresentaram avanços significativos em termos de eficiência em um curto período, passando de 2% no início dos anos 2000 e chegando a uma eficiência certificada pela NREL de 19,20% em 2023. (ROSA; TOLEDO, 2021). Segundo LOURENÇO et al., (2020) em seu estudo sobre células orgânicas, mesmo com vantagens significativas da tecnologia sobre as tradicionais, ainda existem muitos desafios a serem superados para serem integradas em produção de escala industrial.

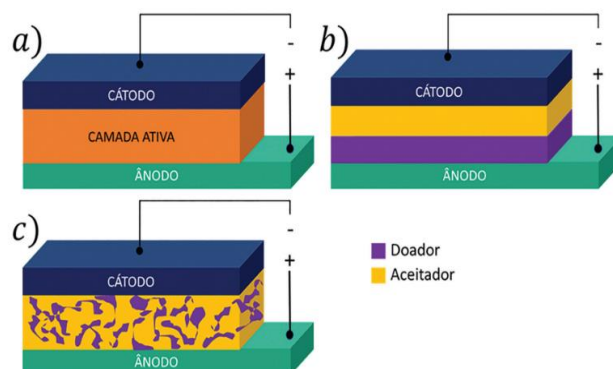
Entretanto alguns procedimentos como os tratamentos feitos em altas temperaturas, com vácuo e utilizando solvente altamente nocivos à saúde ainda ficam restritos a pesquisa. Muitos dos materiais poliméricos utilizados sofrem degradação sobre a ação da luz, exigindo cuidados especiais durante sua manipulação, o que pode ser complexo em termos de grandes quantidades de material.

As células solares orgânicas, em sua forma mais básica, consistem em dois eletrodos com um semicondutor orgânico atuando como camada ativa entre eles. Quando essa estrutura contém apenas um material como camada ativa, é denominada monocamada. O primeiro eletrodo (ânodo), é transparente, permitindo a passagem de luz para que os fótons possam ser absorvidos pela camada ativa do dispositivo. Para desempenhar essa função, materiais como ITO (óxido de índio estanho), TO (óxido de estanho) ou FTO (óxido de estanho dopado com flúor) são comumente utilizados. O segundo eletrodo (cátodo), é metálico e, além de capturar as cargas livres geradas no dispositivo, contribui para a reflexão da luz que atravessa a camada ativa. Isso aumenta as chances de a camada ativa absorver fótons e gerar cargas livres, melhorando assim a eficiência da célula solar orgânica (ROSA; TOLEDO, 2021).

Uma célula orgânica possui, além dos eletrodos e da camada ativa, camadas adicionais conhecidas como camadas buffer. Essas camadas, conhecidas como HTL e ETL, já mencionadas anteriormente, facilitam a dissociação de éxcitons e o transporte de cargas entre a camada ativa e os eletrodos, aproveitando as diferenças de níveis energéticos para melhorar o

desempenho das células orgânicas. Existem variações estruturais na camada ativa de células orgânicas (ROSA; TOLEDO, 2021). A Figura 17 ilustra três variações que podem ocorrer.

Figura 17 - Variações estruturais de células solares orgânicas

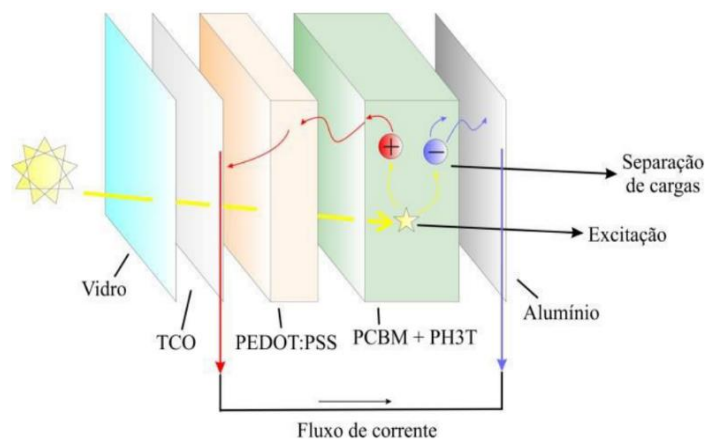


Fonte: ROSA; TOLEDO, (2021)

a) Dispositivo monocamada, b) Dispositivo bicamada c) Dispositivo bicamada e heterojunção de volume (BHJ, do inglês bulk Heterojunction)

O mecanismo de funcionamento das células solares orgânicas é análogo ao de materiais inorgânicos, mas com uma complexidade adicional. Quando a luz atinge a célula, um fóton excita a fase elétron doadora, formando um par elétron-buraco na interface entre as fases doadora e aceitadora. O elétron migra para a fase aceitadora, encontrando o eletrodo de alumínio, enquanto o buraco se desloca para a fase PEDOT:PSS, que o transporta até o óxido condutor transparente. O buraco, então, move-se em direção ao óxido condutor, fechando o circuito e gerando corrente elétrica. A Figura 18 mostra o esquema de funcionamento dessa célula (MACHADO; MIRANDA, 2014).

Figura 18 - Esquema de funcionamento de uma célula solar orgânica



Fonte: MACHADO; MIRANDA, (2015)

As células solares orgânicas, assim como as células de filmes finos, são caracterizadas por sua leveza e flexibilidade, destacando-se por terem um custo de fabricação mais baixo e utilizar matéria-prima mais acessível. Com os avanços na pesquisa científica sobre essa tecnologia, diversas aplicações e inovações têm emergido na área fotovoltaica. As células orgânicas, em particular, demonstram que a criatividade não tem limites, abrindo espaço para uma ampla gama de possibilidades e desenvolvimentos inovadores. Podemos citar por exemplo as árvores solares, Figura 19, já presentes em diversos estados do Brasil implementadas pelas concessionárias de energia em parceria com fabricantes de módulos. Essas árvores solares operam de forma isolada e foram projetadas para servir como ponto de recarga de dispositivos móveis, fornecer Wi-Fi gratuito e iluminação (ANTUNES; CAMPOS, 2022).

Figura 19 - Árvore solar com folhas de células solares orgânicas



Fonte: Enel, (2021)

Outra inovação tecnológica que merece destaque no âmbito das células solares orgânicas são os painéis desenvolvidos pelo estudante filipino de engenharia elétrica Carvey Ehren Maigue e que receberam o nome de AuREUS. Esses painéis abordam a intermitência da energia solar em dias nublados e utilizam resíduos de plantas para captar a radiação ultravioleta (UV) invisível que atravessa nuvens densas. Além de aproveitar a luz indireta, os painéis AuREUS são duplamente sustentáveis, sendo feitos de resíduos vegetais reciclados, provenientes de agricultores locais afetados pelas mudanças climáticas. Essa inovação oferece a possibilidade de aplicação em janelas e fachadas, transformando edifícios em geradores solares e proporcionando uma solução inovadora para reaproveitar colheitas mal sucedidas, evitando o desperdício e beneficiando produtores locais (Inova Social, 2022). Os painéis AuREUS podem ser observados na Figura 20.

Figura 20 - Um painel AuREUS (à direita) e sua aplicação para janelas solares



Fonte: Inova Social, (2022)

A Universidade Federal do Paraná (UFPR) também apresentou recentemente uma inovação para a produção de células solares orgânicas, a qual teve inclusive patente concedida pelo Instituto Nacional de Propriedade Industrial (Inpi). A nova tecnologia foi desenvolvida pelo Grupo de Dispositivos Nanoestruturados da UFPR e envolve a produção de células solares formadas por filmes finos aplicados camada a camada, utilizando polímeros semicondutores. Essas células apresentam maior versatilidade, podendo ser fabricadas em impressoras de rolo para rolo, o que facilita a produção em larga escala. Além disso, devido a sua flexibilidade e independência do ângulo de incidência solar, permitem aplicações em diversas formas, como mobiliários urbanos, estufas, fachadas de prédios e até mesmo em mochilas e casacos. Na figura 21, é possível ver a aplicação desses painéis na própria UFPR. O novo método patenteado melhora ainda a eficiência na conversão luminosa em elétrica, representando um avanço significativo para superar as limitações de durabilidade e eficiência das células solares orgânicas (Ciência UFPR, 2022)

Figura 21 - Placas solares orgânicas instaladas no Departamento de Física da UFPR



Fonte: Ciência UFPR, (2022)

2.4 Potencial de geração de energia solar no Brasil

No contexto da exploração de energia solar fotovoltaica no mundo, o Brasil se destaca como um dos países com um dos maiores potenciais de exploração da fonte. Segundo dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), (SAUAIA, 2019) compara o potencial técnico entre as diferentes fontes de geração de energia e destaca que o maior potencial indubitavelmente é o da energia solar fotovoltaica, com um potencial técnico de 28.519 GWp para a fonte solar em projetos centralizados. É importante observar que este potencial técnico solar já exclui áreas de preservação ambiental, terras indígenas, comunidades quilombolas e outras áreas sensíveis como Amazônia, Pantanal e Mata Atlântica.

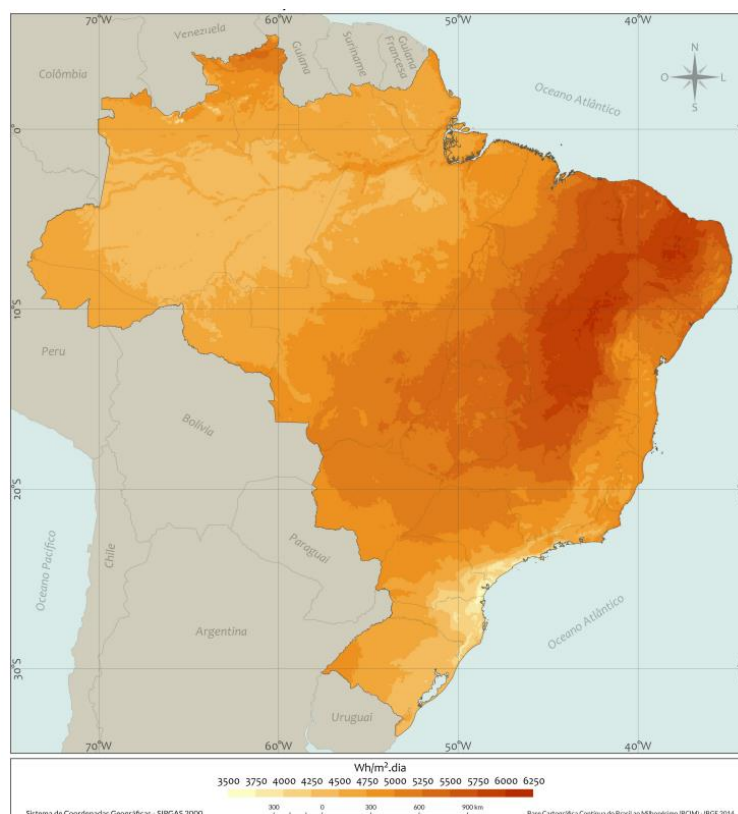
Já segundo SANTOS; LUCENA, (2020) em seu estudo sobre o potencial técnico e de mercado de energia solar fotovoltaica de geração distribuída no setor residencial brasileiro, o total é de 469,32 GWp para projetos residenciais de geração distribuída.

Dentre os fatores naturais que tornam o Brasil extremamente favorável para a exploração da energia solar fotovoltaica, podemos citar a ampla cobertura geográfica, visto que o país tem uma extensa área territorial com variadas condições climáticas e geográficas que permitem a instalação de usinas solares em diferentes regiões, aproveitando a luz solar de maneira eficaz em todo o território; o clima tropical predominante, caracterizado por céus limpos e ensolarados na maior parte do país, favorecendo uma geração solar consistente. Além disso, a baixa ocorrência de desastres naturais minimiza os riscos para as instalações solares.

Aliado a todos esses fatores, temos o mais evidente e importante deles: a alta Irradiação Solar. Devido à sua localização geográfica próxima à linha do Equador, o Brasil está situado em latitudes adequadas para receber altos níveis de radiação solar durante todo o ano. Isso

resulta em uma enorme quantidade de luz solar disponível para a geração de energia solar. A Figura 22 apresenta os valores médios anuais de irradiação solar no Brasil segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar, publicado em 2017 pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

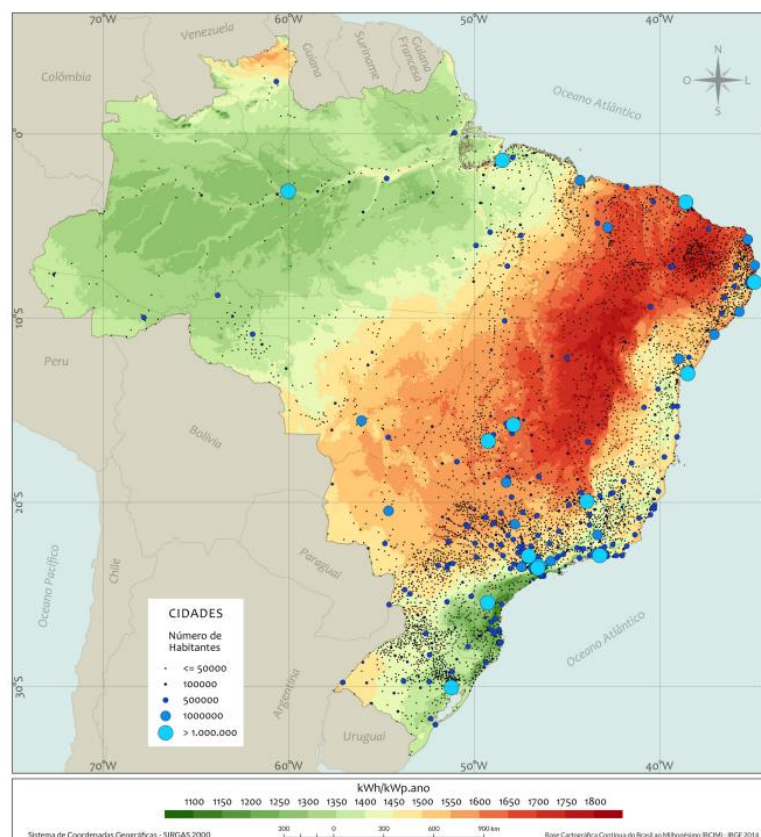
Figura 22 - Média anual da irradiação solar global horizontal no Brasil



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017)

Ainda segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017), o rendimento energético anual máximo (medido em kWh de energia elétrica gerada por ano para cada kWp de potência fotovoltaica instalada) em todo o território nacional, tanto para usinas de grande porte centralizadas e instaladas em solo, como para a geração fotovoltaica distribuída integrada em telhados e coberturas de edificações, é apresentado no mapa da Figura 23. É importante ressaltar que para este levantamento, de modo a simplificar a análise e representar o desempenho de um gerador solar fotovoltaico bem projetado e instalado com equipamentos de boa qualidade e etiquetados pelo INMETRO, foi adotada a taxa de desempenho médio anual de 80%.

Figura 23 - Potencial de geração solar fotovoltaica em termos de rendimento energético anual para o Brasil



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017)

2.5 Potencial de geração no Nordeste brasileiro

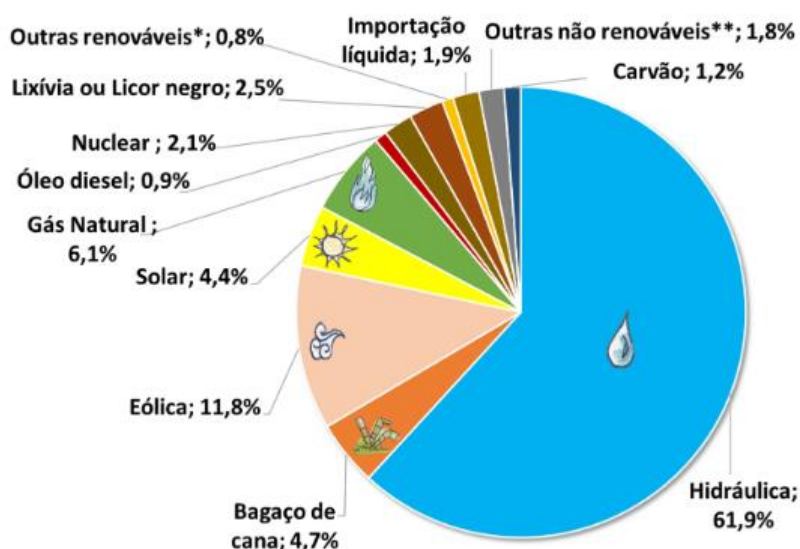
Entre os dados apresentados nas Figuras 22 e 23, destaca-se o potencial energético solar da região Nordeste do Brasil, que além de possuir os mais altos valores médios totais diários de irradiação global horizontal, sendo de aproximadamente $5,49 \text{ kWh/m}^2$ e da componente direta normal de $5,05 \text{ kWh/m}^2$ ao longo de todo o ano, sendo estas condições ideais para a geração solar, ainda apresenta a maior estabilidade e menor variabilidade desses valores, se destacando como a melhor região para exploração da fonte solar no país. Segundo DINIZ BEZERRA, (2021):

Por essa razão, essa Região, em particular sua porção semiárida, onde a elevada irradiação está associada à ocorrência de baixa precipitação e menor cobertura de nuvens ao longo do ano, se credencia a ser o destino prioritário de investimentos em geração de energia elétrica a partir da fonte solar, como já se observa nos leilões públicos e privados.

2.6 Cenário atual da potência instalada

No contexto energético nacional, a principal fonte de geração de energia elétrica é a hidráulica (ANEEL, 2022). No entanto, embora esta seja considerada uma fonte de energia renovável, existem questões importantes a serem levantadas com sustentabilidade, ao meio ambiente e ao bem-estar das comunidades afetadas. Além disso, a dependência das condições climáticas torna o fornecimento de energia suscetível a variações sazonais. Todos esses fatores justificam e evidenciam cada vez mais a busca pela diversificação na matriz elétrica do país e podemos observar o resumo atual da contribuição percentual de cada fonte para a matriz elétrica brasileira no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Matriz Elétrica Brasileira em 2022



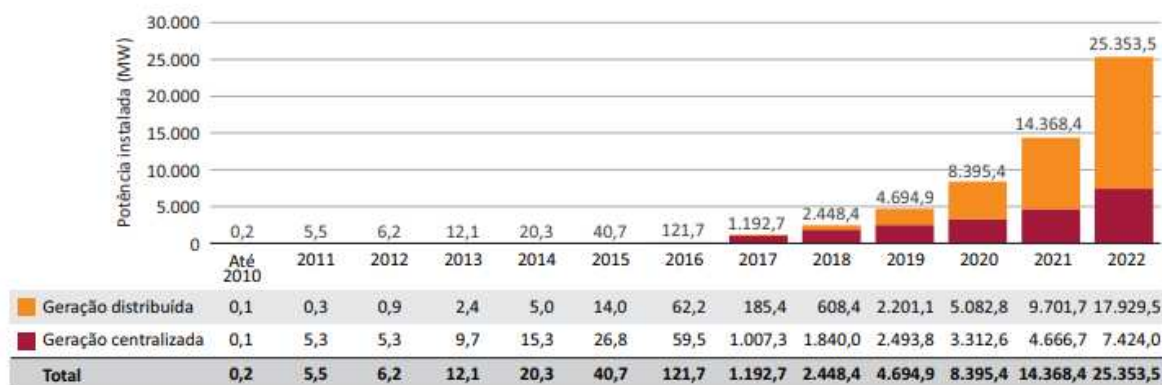
Fonte: EPE (2023)

*incluindo lenha, biodiesel e outras renováveis; **incluindo óleo combustível, gás de coqueria, outras secundárias e outras não renováveis)

Em 2012, a energia solar no Brasil teve grande impulso, em razão dos avanços no marco legal da geração distribuída estabelecida através da Resolução Normativa n° 482, com a maioria das conexões ligadas a rede elétrica residencial. Além disso, nos últimos anos, houve notória queda no preço dos equipamentos fotovoltaicos. Pode-se notar através do Gráfico 2, que a partir de 2017, a capacidade instalada de energia solar tanto de geração distribuída quanto centralizada

apresentou crescimento significativo, chegando a atingir 25,353,5 MW de potência instalada no final de 2022.

Gráfico 2 - Evolução da capacidade instalada de sistemas de geração de energia solar no Brasil (MW)



Fonte: DINIZ BEZERRA, (2023) -BNB/Etene

O Nordeste, em consonância com o restante do país, acompanhou nos últimos anos o crescimento considerável em investimentos em energia solar, possibilitando que a partir de 2020, a região apresentasse crescente superávit na geração de energia elétrica de fonte solar. Com relação ao cenário atual da potência instalada solar fotovoltaica apresentado na Tabela 2, segundo dados da Aneel até o final de 2022, referente a geração distribuída no Brasil corresponde a 17.929,5 MW, dos quais 3.395,40 MW no Nordeste, destacando-se os estados da Bahia, Ceará e Pernambuco. Quanto à potência fotovoltaica centralizada, compreende 7.424 MW no País, dos quais 4.597,30 no Nordeste, com liderança da Bahia, seguida do Piauí e do Ceará.

Tabela 2 - Potência instalada de geração solar fotovoltaica no Brasil, Nordeste e estados da Região

Unidade Geográfica	Geração distribuída		Geração centralizada		total	
	Potência (MW)	% Brasil	Potência (MW)	% Brasil	Potência (MW)	% Brasil
Brasil	17.929,5	100,00	7.424,0	100,00	25.353,5	100,00
Sudeste	5.747,7	32,06	2.716,7	36,59	8.464,5	33,39
Sul	5.022,0	28,01	36,7	0,49	5.058,7	19,95
Centro-Oeste	2.667,3	14,88	35,0	0,47	2.702,3	10,66
Norte	1.097,1	6,12	38,3	0,52	1.135,4	4,48
Nordeste	3.395,4	18,94	4.597,3	61,92	7.992,8	31,53
Alagoas	160,2	0,89	3,7	0,05	163,9	0,65
Bahia	744,3	4,15	1.359,1	18,31	2.103,4	8,30
Ceará	541,4	3,02	709,0	9,55	1.250,4	4,93
Maranhão	381,0	2,12	2,3	0,03	383,2	1,51
Paraíba	256,4	1,43	460,7	6,21	717,1	2,83
Pernambuco	531,1	2,96	318,9	4,29	850,0	3,35
Piauí	304,3	1,70	1.376,1	18,54	1.680,4	6,63
Rio Grande do Norte	372,4	2,08	366,8	4,94	739,2	2,92
Sergipe	104,5	0,58	0,8	0,01	105,3	0,42

Fonte: DINIZ BEZERRA, (2023) -BNB/Etene. Notas: elaborado através de dados registrados até o dia 31/12/2022 fornecidos pela Aneel (2023)

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são abordadas as características da metodologia da pesquisa empregada no presente estudo, e em seguida, é apresentado o detalhamento do método proposto para atingir os objetivos do trabalho.

3.1 Classificação da Pesquisa

Segundo Córdova e Silveira (2009), a pesquisa é um processo permanentemente inacabado que possibilita uma aproximação e entendimento da realidade com o objetivo de resolver um problema recorrendo a procedimentos científicos. Também definem que a pesquisa científica pode ser classificada quanto à abordagem, à natureza, aos objetivos e aos procedimentos.

Com relação à abordagem, embora se caracterize prioritariamente como qualitativa, buscando, por meio de fontes bibliográficas, compreender aspectos subjetivos acerca do problema apresentado, bem como levantar discussões e potenciais teórico sobre a aplicabilidade de uma solução proposta, a pesquisa também pode ser definida como quantitativa. Isso porque parte dos objetivos do trabalho propõe-se a estudar e interpretar dados mensuráveis de potencial e disponibilidade.

A natureza da pesquisa realizada neste trabalho é do tipo aplicada, uma vez que objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos, envolvendo verdades e interesses locais, de acordo com os conceitos de Córdova e Silveira (2009), discorrendo sobre o potencial, desafios e implicações da adoção de novas tecnologias de células solares fotovoltaicas como uma solução para aproveitar o potencial solar subexplorado do nordeste brasileiro, visando ainda promover o progresso tecnológico popular e o acesso democrático aos recursos energéticos.

Quanto aos objetivos, a pesquisa é classificada como exploratória, uma vez que segundo Silva e Menezes (2001) uma pesquisa exploratória visa proporcionar familiaridade com o problema de modo a torná-lo explícito ou a construir hipóteses, geralmente por meio de levantamento bibliográfico. No presente estudo, objetiva-se ainda compreender a situação atual das tecnologias de células solares fotovoltaicas empregadas no mercado e quais são os desafios e perspectivas futuras de transição para novas tecnologias, avaliando a viabilidade e implicações do seu emprego no nordeste do Brasil. Além disso, também pode ser considerada como descritiva, com a análise e o estabelecimento de relações entre variáveis quantitativas sob

o aspecto técnico das novas tecnologias de células solares, potencial e capacidade instalada de sistemas solares fotovoltaicos.

Por fim, no que se refere aos procedimentos técnicos, esta pesquisa é do tipo bibliográfica visto que as informações utilizadas para a construção deste estudo advêm principalmente do levantamento de referências teóricas já analisadas e publicadas por meios escritos e eletrônicos como livros, teses, monografias, artigos científicos de periódicos e páginas de websites (GERHARDT; SILVEIRA, 2009).

Ademais, o presente trabalho visa não apenas a identificação de problemas, mas também a proposição de melhorias com a aplicação do estudo, apresentando ainda a descrição do contexto da investigação e o desenvolvimento de análises qualitativas. Desse modo, a pesquisa pode ser ainda classificada como um estudo de caso relacionado à temática abordada no trabalho.

3.2 Método Proposto

Seguindo as características apresentadas da metodologia adotada para a presente pesquisa, o estudo será dividido em três etapas. A primeira delas, inicia-se com o estudo do potencial técnico subaproveitado de energia solar fotovoltaica no Nordeste brasileiro, destacando oportunidades para otimização e evidenciando a abundância dos recursos naturais para o aproveitamento da fonte na região. Em seguida, o estudo avança para uma análise comparativa entre as tecnologias de células solares fotovoltaicas, examinando ainda a eficiência de diferentes tipos de células. Esta sequência é estrategicamente organizada para primeiro estudar o potencial, fornecendo um contexto para a análise comparativa das tecnologias que justificam oportunidades de implementação para novas tecnologias. Por fim, o trabalho aborda os desafios e oportunidades específicos para a aplicação de tecnologias inovadoras de células fotovoltaicas no Nordeste do Brasil, proporcionando uma visão abrangente e sequencial da pesquisa.

3.3 Estudo do potencial técnico subaproveitado de geração solar fotovoltaica na região Nordeste do Brasil

Para o estudo e cálculo do potencial técnico subaproveitado da geração de energia solar fotovoltaica no Nordeste brasileiro, buscaram-se os dados mais atuais e confiáveis a nível de estado do potencial técnico total, juntamente com suas respectivas considerações para cada tipo

de implementação, bem como os dados de potência instalada atual, levando em consideração a parcela destinada à geração distribuída e à geração centralizada.

Para a geração distribuída, os dados do potencial técnico teórico tiveram como referência os estudos de Santos e Lucena (2020), sobre os potenciais técnico e de mercado de energia solar fotovoltaica de geração distribuída no setor residencial brasileiro. Nesta pesquisa, considerou-se que os sistemas fotovoltaicos serão implementados nos telhados de casas e apartamentos, calculando-se a área sobre a qual os painéis fotovoltaicos serão instalados em cada município estimando-se ainda o número de domicílios por município mais recente, no ano de 2017, com base em EPE (2018) e utilizando-se de coeficientes de redução desta área, visto que existem fatores como orientação, ocupação e sombreamento, que diminuem a área útil de telhados para a instalação de sistemas fotovoltaicos.

Com relação à geração centralizada, os dados do potencial técnico teórico foram levantados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) nos estudos do Plano Nacional de Energia (PNE) - 2050, plano aprovado em 16 de dezembro de 2020 pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e que se trata de um instrumento de suporte ao desenho da estratégia de longo prazo do planejador em relação à expansão do setor de energia. O resumo de dados foi retirado da planilha de Potencial Fotovoltaico por Unidade Federativa da seção de Recursos Energéticos.

Neste estudo, a estimativa do potencial técnico para usinas fotovoltaicas de grande porte considerou critérios específicos para o mapeamento das áreas aptas às instalações tais como áreas com declividade inferior a 3% e dimensões superiores a 0,5 km², adequadas para a instalação de unidades de cerca de 35 MWp. Também foram excluídas do cálculo as áreas sensíveis, como unidades de conservação, terras indígenas, comunidades quilombolas e regiões de Mata Atlântica com vegetação nativa, conforme a Lei nº 11.428/2006. Além disso, áreas urbanas e corpos hídricos também foram excluídos devido às limitações de uso e considerou-se, no final das contas, apenas as áreas antropizadas, excluindo aquelas cobertas com vegetação nativa. Após esse levantamento, da área apta mapeada, descontou-se ainda 20% referente às áreas de reserva legal (RL) e as áreas de preservação permanente (APP).

Para o cálculo do potencial de geração centralizada, considerou-se a área apta calculada e a faixa de irradiação (Wh/m²xdia) para cada localidade. Os dados aproveitados no presente trabalho consistem no somatório do potencial de todas as faixas de irradiação apresentadas para cada Estado.

Já os dados da potência instalada de Geração Solar Fotovoltaica tanto de Geração Distribuída quanto Centralizada por estados da região Nordeste foram compilados por Diniz

Bezerra (2023) no Caderno Setorial do Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste - ETENE, pelo Banco do Nordeste (BNB) através de dados registrados até o dia 31/12/2022 fornecidos pela Aneel (2023). É importante observar que os dados de geração distribuída no site da Aneel podem ser atualizados após a data da consulta desta pesquisa e que para a pesquisa na geração centralizada, a potência informada corresponde à potência outorgada de acordo com a base de dados do Sistema de Informações de Geração da Aneel (SIGA).

Por fim, a Tabela 3 foi elaborada com o intuito de calcular e apresentar o potencial técnico fotovoltaico subaproveitado por estados do Nordeste tanto para geração distribuída quanto centralizada, bem como o valor total para a região. Todos os dados mencionados nesta seção foram apresentados na mesma unidade, em GWp, de modo a facilitar os cálculos e a visualização destes.

Tabela 3 - Potencial Técnico Fotovoltaico Subaproveitado da Região Nordeste do Brasil por estados

Unidade Geográfica	Potencial Fotovoltaico de Geração Residencial (GWp)	Potencial Fotovoltaico de Geração Centralizada (GWp)	Potência Instalada de Geração Solar Fotovoltaica Distribuída (GWp)	Potência Instalada de Geração Solar Fotovoltaica Centralizada (GWp)	Potencial Técnico Fotovoltaico Subaproveitado para Geração Distribuída (GWp)	Potencial Técnico Fotovoltaico Subaproveitado para Geração Centralizada (GWp)
Alagoas	7,09	273,00	0,1602	0,0037	6,93	272,9963
Bahia	35,74	4.888,00	0,7443	1,3591	35,00	4.886,6409
Ceará	16,17	1.038,00	0,5414	0,7090	15,63	1.037,2910
Maranhão	10,67	611,00	0,3810	0,0023	10,29	610,9977
Paraíba	9,48	372,00	0,2564	0,4607	9,22	371,5393
Pernambuco	20,91	651,00	0,5311	0,3189	20,38	650,6811
Piauí	5,51	1.017,00	0,3043	1,3761	5,21	1.015,6239
Rio Grande do Norte	7,37	665,00	0,3724	0,3668	7,00	664,6332
Sergipe	4,49	185,00	0,1045	0,0008	4,39	184,9992
Total	117,43	9.700,00	3,3956	4,5974	114,03	9.695,4026
	Total Potencial Fotovoltaico NE	9.817,43 GWp	Total Potência Instalada NE	7,99 GWp	Total Potencial Subaproveitado NE	9.809,44 GWp

Fonte: Elaborado pela autora

3.4 Estudo comparativo entre as diferentes tecnologias de células solares fotovoltaicas

3.4.1 Análise comparativa entre eficiências

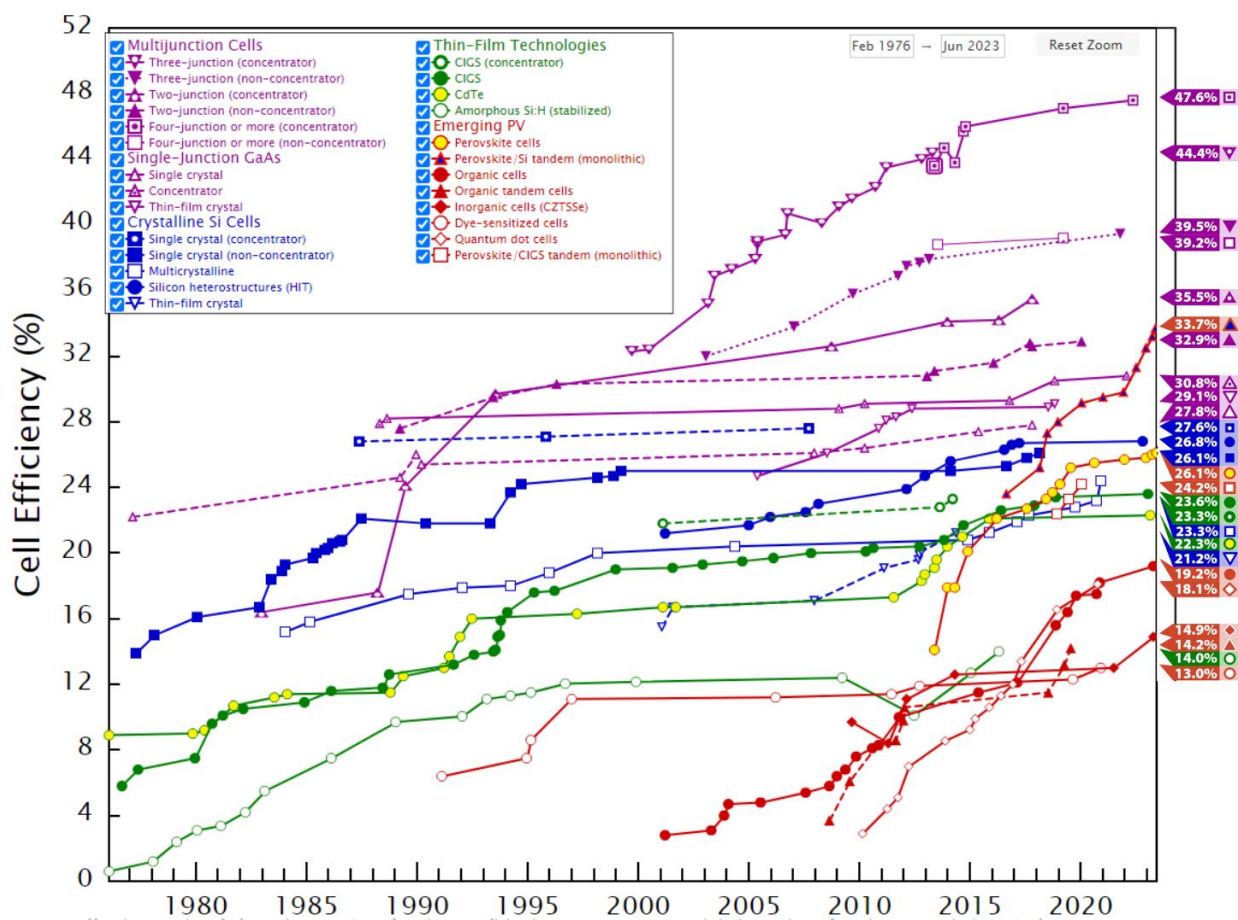
A eficiência de uma célula solar fotovoltaica refere-se à eficácia com que uma única célula converte a radiação solar incidente em eletricidade. Ao longo do tempo, houve melhorias na eficiência observada sobre as tecnologias solares, mas ela varia significativamente dependendo do tipo específico de cada célula. Segundo SOUZA; GRECCO, 2022):

Já a eficiência das células fotovoltaicas é calculada com base na potência nominal obtida em laboratório e área dos módulos, e ainda, depende de vários fatores como:

reflexo na superfície da célula, perdas no espectro infravermelho e ultravioleta, perdas devido à espessura da célula, perdas devido ao fator de tensão e ao fator de forma, perdas devido a recombinação e na resistência em série. Alguns desses fatores de perda de eficiência são determinados por leis da física, de modo que não podem ser reduzidos e, perdas que dependem do processo de fabricação das células podem ser minimizadas à medida que novos processos e tecnologia são empregadas.

O Gráfico 3 exibe as mais altas eficiências de conversão confirmadas para células de pesquisa para uma variedade de tecnologias fotovoltaicas, traçado de 1976 até o presente. O levantamento dos dados foi feito por um laboratório norte-americano especializado em pesquisa e desenvolvimento de energia renovável, o National Renewable Energy Laboratory (NREL), ou Laboratório de Energia Renovável Nacional. O recorde mundial mais recente para cada tecnologia é destacado na borda direita em uma bandeira que contém a eficiência e o símbolo da tecnologia.

Gráfico 3 - Eficiências de conversão de células fotovoltaicas registradas para uma variedade de tecnologias



Fonte: NREL (2023) – Adaptado pela autora

Além disso, é de suma importância para análise comparativa sobre a eficiência de conversão entre diferentes tipos de tecnologias a compreensão das diferenças apresentadas entre as eficiências de células e de módulos solares. Neste último, formado por um conjunto de células, além das eficiências individuais de cada célula, também são levados em consideração o design e estrutura do módulo, conexões elétricas, perdas térmicas, entre outros fatores. Assim, pode-se afirmar que, em geral, a eficiência do módulo é inferior à eficiência da célula, uma vez que engloba perdas e considerações práticas relacionadas ao agrupamento de células em um módulo.

Para fins de padronização e comparação, a eficiência dos módulos fotovoltaicos é ainda calculada com base em sua potência em condições de teste padrão (STC, do inglês *Standard Testing Conditions*) realizados em laboratório e em sua área. De acordo com (PRIEB, 2002)

A norma ASTM E-1036 *Standard Methods of Testing Electrical Performance of Nonconcentrator Terrestrial Photovoltaic Modules And Arrays Using Reference Cells* define como condições padrão de teste, para irradiância e temperatura das células do módulo respectivamente, os valores de 1000W/m^2 e 25°C . Quanto à distribuição espectral as normas ASTM E-891 e E-892 apresentam espectros de referência da irradiância solar terrestre direta normal e global, com massa de ar 1,5 para uma superfície com inclinação de 37° .

A potência e a eficiência dos módulos fotovoltaicos são importantes parâmetros que devem ser destacados nas informações técnicas desses equipamentos. No entanto, é importante considerar que esses valores podem variar em função de fatores ambientais. Esses aspectos devem ser levados em conta durante o planejamento do projeto, uma vez que exercem impacto direto nos resultados da produção de energia elétrica.

Em resumo, é importante reconhecer que, mesmo que um módulo tenha uma eficiência declarada mais alta nas informações técnicas, isso não necessariamente se traduzirá em uma maior geração de energia quando comparado a um módulo de potência equivalente, mas com uma eficiência inferior (SOUZA, 2020). Por este motivo, para uma análise comparativa completa entre os diferentes tipos de tecnologias de células solares fotovoltaicas abordadas no presente estudo, outros critérios também devem ser levados em consideração.

3.4.2 Análise comparativa sob critérios qualitativos

As diferentes tecnologias de células solares fotovoltaicas podem ser classificadas entre diferentes critérios qualitativos que de modo geral, se analisados individualmente, não indicam

superioridade sobre as outras, mas podem indicar importantes vantagens ou desvantagens dependendo do contexto de aplicação desejada. Além disso, a análise da combinação de alguns desses fatores pode justificar e apresentar o potencial que cada tecnologia representa no mercado de energia solar fotovoltaica. Para uma estudo qualitativa de cada tecnologia de célula solar, através de levantamentos bibliográficos, os artigos que serviram de base para o presente estudo tiveram como ano de publicação preferencialmente o período entre os anos de 2017 e 2023 e os seguintes critérios foram considerados:

- **Eficiência:** A eficiência de conversão fotovoltaica é um fator crucial a ser investigado. Quanto maior a eficiência, mais energia elétrica pode ser gerada a partir da luz solar incidente e menor será a área de instalação exigida, bem como quanto mais eficiente for o material utilizado, mais econômico ele será em termos de exigência de disponibilidade de matéria prima. Além disso, uma alta eficiência de conversão se apresenta como fator chave para competitividade da tecnologia no mercado e sustentabilidade a longo prazo;
- **Custo:** Tecnologias mais acessíveis e com menor custo de fabricação têm maior potencial para adoção em larga escala. Compreender o custo de cada tecnologia é essencial para determinar a viabilidade econômica de projetos solares. Isso inclui não apenas o custo inicial de instalação, mas também os custos operacionais e de manutenção ao longo do tempo. Os investimentos em pesquisa de desenvolvimento de melhorias das tecnologias são essenciais para barateá-las. Além disso, é importante destacar que tecnologias de baixo custo estão diretamente relacionadas à democratização do acesso a fontes alternativas e sustentáveis de energia;
- **Impacto Ambiental:** O estudo sobre o impacto ambiental de uma tecnologia de célula solar fotovoltaica é bastante relevante, especialmente em relação a tecnologias que utilizam materiais tóxicos, geram resíduos perigosos ou têm potencial impacto negativo no meio ambiente. No entanto, trata-se de uma área de estudo complexa que envolve inúmeros critérios relevantes a serem observados. Desde a obtenção de matéria-prima na natureza, com a possível necessidade de materiais e recursos variados, até a fabricação, transporte e uso, e finalmente o descarte, que também leva em consideração eficiência energética e ciclo de vida. O estudo do impacto ambiental deve analisar o balanço de energia embutida em cada tecnologia, determinando sua efetividade em termos de energia líquida produzida. Além disso, deve incluir os efeitos positivos na sociedade e no meio ambiente. Neste tópico, também é fundamental destacar a

importância de investimentos e a maturidade da tecnologia, uma vez que melhorias implementadas, especialmente no processo de fabricação das células, são essenciais para garantir a segurança ambiental que a tecnologia representa.

- **Estabilidade e Durabilidade:** O estudo da estabilidade e durabilidade de cada tecnologia de célula fotovoltaica é fundamental para garantir a confiabilidade, sustentabilidade e eficácia a longo prazo da energia solar, contribuindo para sua aceitação generalizada e contínua evolução no cenário energético. É importante levar em consideração que esses critérios são fundamentais para a compreensão do comportamento dessas tecnologias em condições adversas, como variações climáticas extremas. Além disso, a alta estabilidade e durabilidade de uma célula solar maximiza o retorno sobre o investimento, uma vez que tecnologias mais estáveis e duráveis exigem menos manutenção e têm custos operacionais mais baixos.
- **Flexibilidade:** A característica de flexibilidade física das células solares expande as possibilidades de aplicação, design e integração dos sistemas solares em estruturas arquitetônicas curvas ou em áreas que não seriam prontamente aproveitadas por tecnologias mais rígidas, contribuindo para a diversificação do mercado e incentivando a adoção em setores que tradicionalmente não seriam considerados. Além disso, a flexibilidade também está relacionada a leveza, fácil manuseio, o que simplifica o processo de instalação, e maior resistência mecânica. Além disso, a fabricação de células solares flexíveis pode ser mais eficiente e econômica em comparação com tecnologias rígidas, resultando em custos de produção potencialmente mais baixos.
- **Facilidade de processamento:** Refere-se ao grau de complexidade, viabilidade e eficiência nas etapas de processamento de materiais e fabricação de células solares, sendo essencial para a implementação prática e consolidação das tecnologias em larga escala no mercado fotovoltaico. O custo de fabricação também está diretamente relacionado a essa característica, já que algumas tecnologias podem exigir equipamentos especializados e dispendiosos em seu processo, tanto na obtenção e processamento da matéria-prima quanto em etapas necessárias para melhorias, como controle de risco ambiental e degradação. Outros fatores a serem considerados incluem a facilidade de manuseio e instalação, visto que há uma demanda menor por mão de obra especializada, tornando a tecnologia mais acessível. A integração facilitada com as infraestruturas de

fabricação já existentes na indústria também é um fator a ser considerado, facilitando a adoção de determinada tecnologia.

- **Maturidade Tecnológica:** A avaliação da maturidade tecnológica proporciona uma compreensão da confiabilidade e consistência alcançadas ao longo do tempo por cada tipo de célula solar. Tecnologias maduras, por exemplo, geralmente possuem um histórico estabelecido de desempenho, estabilidade, processos e normatização vantajosos e bem definidos. Além disso, as tecnologias mais maduras de células solares se beneficiam de economias de escala, resultando em custos de implementação mais baixos. Isso é crucial para tornar a energia solar mais acessível e competitiva. Por outro lado, essa característica também representa uma barreira para a consolidação de novas tecnologias. Pode-se afirmar, a partir da observação do histórico do desenvolvimento de cada tecnologia, que, em geral, as tecnologias mais maduras são mais baratas, mas são mais baratas porque são mais maduras.

Com base nos critérios acima mencionados e em uma revisão sistemática da literatura sobre as diferentes tecnologias de células solares fotovoltaicas, abordadas ao longo do referencial bibliográfico deste trabalho, a Tabela 4 foi elaborada. Ela apresenta, para cada tipo de célula correspondente a cada geração, a classificação qualitativa entre baixo, moderado ou alto para cada parâmetro proposto.

Tabela 4 - Comparação qualitativa entre os diferentes tipos de tecnologias de células solares fotovoltaicas

Tecnologia	Quesitos							
	Eficiência	Custo	Impacto Ambiental	Estabilidade e Durabilidade	Flexibilidade	Facilidade de Processamento	Maturidade Tecnológica	
1ª Geração	m-Si	Alta	Moderado	Moderado	Alta	Baixa	Baixa	Alta
	p-Si	Alta	Moderado	Moderado	Alta	Baixa	Baixa	Alta
2ª Geração	a-Si	Baixa	Baixo	Moderado	Baixa	Alta	Moderado	Alta
	CdTe	Baixa	Alto	Moderado	Baixa	Alta	Baixa	Alta
	CIGS	Baixa	Baixo	Moderado	Moderada	Alta	Baixa	Moderada
	GaAs	Alta	Alto	Moderado	Alta	Moderada	Baixa	Alta
3ª Geração	DSSC	Baixa	Baixo	Moderado	Moderada	Moderada	Alta	Moderada
	QDSSC	Baixa a Moderada	Baixo	Moderado	Moderada	Moderada	Moderado	Baixa
	HIT	Alta	Moderado	Moderado	Moderada	Baixa	Moderado	Moderada
	Perovskitas	Alta	Moderado	Moderado	Moderada	Moderada	Moderado	Baixa
	Células Orgânicas	Moderada	Baixo	Moderado	Moderada	Alta	Moderado	Baixa

Fonte: Elaborada pela autora

3.5 Desafios e oportunidades para novas tecnologias de células fotovoltaicas no Nordeste do Brasil

Apesar do significativo crescimento na potência instalada de sistemas de energia solar fotovoltaica no Brasil, especialmente na região Nordeste do país, a capacidade de geração solar ainda é relativamente baixa em comparação com outras fontes de energia. Isso ocorre devido às diversas barreiras que o processo de transição energética enfrenta para um desenvolvimento mais amplo e uma exploração mais eficaz do potencial solar da região.

É importante destacar que existem fatores tanto adversos quanto favoráveis na maximização do uso da energia solar no Nordeste do Brasil, os quais são comuns tanto à integração de tecnologias tradicionais quanto às novas tecnologias de células solares fotovoltaicas. Ao mesmo tempo, há aspectos que podem inclinar a favor de uma ou outra tecnologia. Começando pelos fatores em comum, em relação aos desafios encontrados pela energia solar na região, destacam-se os relacionados à infraestrutura, regulamentação e custos de implementação.

Sobre a infraestrutura, é notória a necessidade de melhorias no abastecimento elétrico independente da adoção de fontes alternativas de energia, mas é um fator crucial para a integração de sistemas à rede de distribuição. Segundo Viana e Ary (2005), no estado do Maranhão 16% das residências carecem de energia elétrica, enquanto o estado do Piauí apresenta o menor índice de eletrificação do País, com aproximadamente 25% da população sem energia elétrica em todo o Estado. Já a Paraíba, apresenta um percentual maior, atendendo com energia elétrica a 98% dos domicílios. O Estado do Rio Grande do Norte, por sua vez, é totalmente dependente da importação de energia elétrica. Os demais estados da região, em sua maioria são geradores semi ou totalmente autossuficientes, mas com ressalvas de expansão para zonas rurais e comunidades distantes. Portanto, faz-se necessário investir tanto na capacidade de geração quanto na infraestrutura de transmissão de energia elétrica. Ainda assim, é importante reconhecer avanços já alcançados nesse aspecto. Segundo Tolmasquim, (2016):

A partir da década de 1990, a energia fotovoltaica começou a fazer parte da solução para atendimento de localidades afastadas da rede elétrica. Em 1994, o Governo Federal, através do MME, criou o PRODEEM (Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios), que visava promover a eletrificação rural, principalmente via sistemas fotovoltaicos. Mais tarde, em 2003, foi instituído o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica –

Programa Luz para Todos (LpT), que impulsionou a instalação de SIGFIs ao redor do Brasil, incluindo sistemas fotovoltaicos.

Já do ponto de vista regulatório, Segundo Bezerra, (2023) o Brasil é considerado bastante maduro, tanto para a geração centralizada como para a mini e microgeração distribuída (MMGD). No caso da MMGD, está em vigor a Lei 14.300, de 06/01/2022, regulamentada pela Resolução Normativa (REN) Aneel N° 1.059, de 07/02/2023. Nesse sentido, não se visualizam entraves legais que impeçam o desenvolvimento de usinas solares fotovoltaicas no Brasil. No entanto, na prática, tem-se observado que ainda há certo receio e embaraços enfrentados em relação às concessionárias de energia elétrica, as quais, de maneira sutil, impõem bloqueios que dificultam a integração de novas fontes de energia à rede.

No que concerne aos custos de implementação, embora existam algumas poucas fabricantes brasileiras de módulos fotovoltaicos e apesar dos avanços da geração solar no Brasil, é fundamental implementar políticas que promovam a consolidação de um parque industrial competitivo de produtos fotovoltaicos no país. Isso contribuiria significativamente para reduzir a dependência de importações no setor. Ante o potencial solar existente no País, seria oportuno existir investimentos em centros de referência no desenvolvimento tecnológico e de produção nessa área.

De acordo com GREENER, (2022) o silício, matéria-prima dos módulos fotovoltaicos tradicionais, é responsável por cerca de 60% do custo da tecnologia, que representa em torno de 38% a 50% do preço final de um sistema fotovoltaico. Isso significa que a diversificação tecnológica de células solares, a partir de novos materiais, podem contribuir significativamente para a diminuição dos custos relacionados à produção de módulos fotovoltaicos.

Além disso, é importante destacar que, mesmo diante das limitações técnicas e financeiras das tecnologias de células tradicionais, relacionadas aos padrões iniciais de implementação de novas tecnologias, os números de potência instalada em sistemas de micro e minigeração têm estado em constante crescimento, mantendo uma relação de reciprocidade com a também constante queda dos preços de módulos fotovoltaicos. Esse cenário evidencia que, para as tecnologias de células solares emergentes, a tendência é que o mesmo fenômeno ocorra; ou seja, quanto maior for o investimento em pesquisas de melhorias e em implementação a nível industrial, mais viável e acessível ela se tornará.

Com relação à disponibilidade de matéria prima, as tecnologias tradicionais de silício usadas na indústria solar muitas vezes dependem de metais críticos, que são aqueles com reservas globais limitadas ou taxas de mineração significativamente reduzidas. Apesar de o

silício ser um dos materiais mais abundantes do planeta, as células solares ainda precisam de filamentos metálicos feitos de uma liga rica em prata, que é um exemplo de metal crítico. Esses materiais não apenas estabelecem um limite físico para a implementação de tecnologias de aproveitamento solar, mas também enfrentam desafios devido ao conflito com outras aplicações econômicas desses metais (FONSECA et al., 2020). Em contrapartida, neste contexto, diversas tecnologias de células solares emergentes mostram-se mais vantajosas, visto que muitas delas utilizam fontes de matéria-prima mais abundantes e acessíveis. Segundo Tolmasquim, (2016):

O Brasil possui matéria prima de qualidade e indústrias que podem ser adaptadas para a produção de componentes para sistemas fotovoltaicos e plantas heliotérmicas. Promover essa indústria é uma alternativa que pode reduzir custos e impulsionar a participação desta fonte na matriz elétrica nacional, trazendo consigo diversos desdobramentos, como o desenvolvimento tecnológico, econômico e social.

A transição para a energia solar pode exigir ainda mudanças significativas no uso da terra, com potenciais impactos em diversas áreas, tais como a competição por espaço com atividades agropecuárias, a qualidade do solo devido ao sombreamento e ainda na estética das paisagens urbanas (ANSELMO, 2019). Para esses quesitos, as novas tecnologias de células solares apresentam vantagens significativas, uma vez que sua flexibilidade, estética e variedade de cores oferecem potencial não apenas para diversificar as aplicações em diversas superfícies e orientações, mas também para se integrarem de maneira bela e harmoniosa a projetos de paisagismo.

Finalmente, no que diz respeito às oportunidades abrangentes proporcionadas pela energia solar fotovoltaica, a maximização de sua utilização no Nordeste do Brasil pode desencadear uma variedade de benefícios econômicos e comerciais, tais como a criação de empregos, a diminuição dos custos de energia elétrica, o fomento ao desenvolvimento da infraestrutura local e a promoção do turismo sustentável. A instalação de painéis solares e a produção de componentes relacionados à energia solar têm o potencial de gerar oportunidades de emprego e impulsionar o crescimento econômico regional (SILVA, 2023). Segundo Tolmasquim, (2016):

O potencial de geração de empregos é especialmente importante, pelo fato das regiões com maior irradiação e, portanto, grande potencial de geração solar, serem, majoritariamente, regiões economicamente pouco desenvolvidas. No âmbito nacional, considerando a cadeia completa de produção da indústria fotovoltaica, o

benefício socioeconômico poderá ser também obtido com a geração de empregos qualificados, o desenvolvimento de um parque industrial competitivo internacionalmente e a criação de uma cadeia de serviços.

No âmbito ambiental, um estudo abrangente sobre os impactos da implementação de usinas solares torna-se crucial. Esta análise vai além da geração de energia, considerando o ciclo de vida completo dos materiais utilizados, e incluindo a análise de resíduos orgânicos como matéria-prima como uma oportunidade positiva para o setor. Paralelamente, a eficiência das células solares em diferentes escalas é um ponto de investigação relevante. Uma pesquisa detalhada sobre as diferenças de eficiência desde o laboratório até a produção em larga escala pode identificar maneiras de melhorar a consistência e eficiência em todas as fases do processo. Adicionalmente, a diversificação de materiais emerge como uma estratégia importante para reduzir custos e promover o desenvolvimento socioeconômico do Nordeste brasileiro. Uma investigação sobre a viabilidade e impacto dessa diversificação, especialmente em relação à redução do uso de metais críticos, pode envolver análises econômicas, ambientais e tecnológicas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Acerca do estudo desenvolvido sobre o potencial técnico fotovoltaico subaproveitado para o Nordeste brasileiro, os valores totais obtidos foram de aproximadamente 9,809,44 GWp. Destes, 9.695,4 GWp representam a potência total que poderia ser instalada em termos de Geração Centralizada, enquanto 114,03 GWp referem-se à Geração Distribuída. Isso quer dizer que menos de 3% da capacidade GD está sendo aproveitada e para GC esse valor é ainda mais baixo, sendo de apenas 0,05%.

No decorrer da pesquisa, foi possível observar que a concentração de publicações sobre as tecnologias de células está em conformidade com a maturidade de cada tipo, sendo as mais recentes desenvolvidas com menos publicações e mais atuais. As células mais tradicionais, por sua vez, possuem uma ampla gama de trabalhos, publicações e pesquisas desenvolvidas. Essa característica se reflete ainda nas informações apresentadas, sendo possível observar que, para as células de terceira geração, em pouco tempo já existem discrepâncias em relação às informações sobre custo e eficiência. E ainda, percebeu-se que a maioria dos estudos recuperados não indicou ou não teve como foco principal estudar os custos, a disponibilidade e o impacto ambiental, mas sim o foco na síntese e fabricação do material mencionado.

Além disso, foi possível perceber que a eficiência varia quando o estudo é realizado a nível de célula, em comparação com uma abordagem a nível de módulo, e que existem diferenças significativas quando esses equipamentos são testados em laboratório, comparados com sua produção em larga escala, e ainda ao longo do tempo de operação. Apesar do aumento considerável nas pesquisas nesse campo para todas as tecnologias, há uma falta de especificidade em relação às fontes e datas dos dados de eficiência apresentados. Em vista disso, para o estudo qualitativo desenvolvido, no critério de eficiências, além da observação do índice de crescimento e do histórico geral das eficiências comumente apresentadas, utilizaram-se os dados mais recentes encontrados de fontes confiáveis e a nível de célula solar de cada tecnologia, especialmente o gráfico de evolução de eficiências certificadas pelo NREL.

Por fim, para o estudo qualitativo desenvolvido entre as diversas tecnologias de células solares, destaca-se o critério de maturidade da tecnologia. Embora possa parecer simples e óbvio, uma vez que as tecnologias são definidamente relacionadas a cada uma das três gerações apresentadas e datadas conforme o marco do seu desenvolvimento, a característica de maturidade da tecnologia é justamente o que marca o potencial de cada uma delas. Isso porque qualquer outro critério avaliado está diretamente relacionado ao seu progresso gerado a partir de investimentos e pesquisas. Para as células tradicionais de silício, marcos históricos de

transição e impulso tecnológico, combinados a uma tendência global inédita de desenvolvimento sustentável, foram pontos-chave para atrair investimentos na área e para a consequente redução de custos da tecnologia.

Por este motivo, de certo modo, pode-se afirmar ainda que a comparação qualitativa de diferentes tecnologias de células em pontos diferentes de maturidade não é imparcial e justa. No entanto, esse mesmo fato acaba por evidenciar uma vantagem para as novas tecnologias de células. Isso porque, mesmo com limitações de investimentos e recursos, essas células já apresentam resultados expressivos e competitivos em relação às tradicionais. Com o aumento de incentivos e projetos de implementação em escala industrial, essas tecnologias têm o potencial para se tornarem ainda melhores. Essa discussão é levantada mais uma vez como oportunidade para solução e otimização para o potencial técnico solar subaproveitado na região. Ademais, essas tecnologias, comprovadamente, apresentam potenciais significativos para serem mais baratas e sustentáveis, especialmente quando podemos explorar diferentes aplicações devido às características de flexibilidade e semitransparência e ainda com a possibilidade do aproveitamento de resíduos orgânicos como matéria prima.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O propósito da pesquisa sobre o potencial subutilizado da energia solar no Nordeste não foi promover a eliminação desse subaproveitamento, mas sim apresentar a oportunidade e o espaço existentes para a implementação desta fonte. Embora os fatores climáticos, de irradiação e área sejam geralmente relevantes para a implementação de sistemas solares, no Nordeste, em específico, não se mostram limitantes. Por essa razão, a presente pesquisa buscou compreender quais são, afinal, os desafios enfrentados pela fonte solar na região nordestina brasileira.

Embora os valores utilizados para referência e cálculo tenham sido os mais atualizados possíveis, levando ainda em consideração fatores extremamente relevantes para o estudo da implementação de uma tecnologia que movimenta não apenas a economia e infraestrutura, mas também o aspecto socioambiental, é preciso destacar que a potência instalada em usinas de energia solar fotovoltaica aumenta a cada dia. Além disso, os fatores estudados na capacidade técnica podem ser ainda mais refinados e aprofundados em pesquisas futuras.

Ainda assim, os resultados obtidos corroboram a tese inicial de que há muitos fatores favoráveis em termos de disponibilidade e um cenário propício de recursos naturais para a implantação de usinas solares tanto de geração distribuída quanto de geração centralizada na região estudada. Ao passo em que persistem alguns obstáculos, principalmente relacionados à carência de infraestrutura e à falta de investimentos em pesquisas de desenvolvimento e na produção de equipamentos fotovoltaicos dentro da indústria nacional. Esses fatores, como discutidos no estudo sobre desafios e oportunidades, não se limitam apenas a novas tecnologias, mas representam um desafio abrangente para a exploração da fonte solar.

Um último aspecto relevante a ser destacado sobre as novas tecnologias de células solares fotovoltaicas é a possibilidade levantadas por pesquisas já desenvolvidas na fabricação de módulos fotovoltaicos a partir de resíduos orgânicos. Ao superar as limitações associadas à implementação em larga escala dessa tecnologia, isso pode representar uma das maiores oportunidades na área fotovoltaica para o Nordeste brasileiro. Através de parcerias com centros de distribuição de alimentos na região e órgãos e associações do setor agrícola, o uso e a implementação da fonte solar poderiam atingir um novo patamar, aliando geração de energia a gestão de resíduos sólidos e redução de desperdícios. Isso implicaria ainda em uma movimentação intensa e assertiva na economia do Nordeste do país. Desse modo, aproveitando o interesse já existente na diversificação da matriz energética, incentiva-se que esta seja feita de maneira inovadora, coerente e sustentável.

A expectativa é que o estudo desenvolvido sirva como estímulo para a condução de pesquisas adicionais e aprofundadas sobre o tema. Para trabalhos futuros, sugere-se analisar e explorar políticas de incentivo, parcerias público-privadas, barreiras regulatórias e estratégias de captação de recursos e implementação para viabilizar o uso de novas tecnologias em larga escala na região, visando o desenvolvimento progressivo e inovador. Além disso, propõe-se levantar a discussão sobre como tornar essas tecnologias mais acessíveis, com o objetivo de promover o desenvolvimento sustentável e aproveitar o potencial energético do Nordeste brasileiro.

Por esse motivo, a diversificação de materiais, especialmente visando a redução do uso de metais críticos, foi apontada como uma estratégia importante para diminuir custos e promover a sustentabilidade. Assim, o presente trabalho, por meio de revisão bibliográfica, estudou e levantou os pontos mais importantes acerca dos diferentes tipos de tecnologias de células solares fotovoltaicas, a fim de obter insumos suficientes para uma comparação qualitativa entre elas. Desta comparação e a partir das discussões levantadas sobre os resultados apresentados, pode-se afirmar que o presente trabalho alcançou todos os objetivos propostos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. A. et al. **Estudo sobre os componentes utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados a Rede**. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 8, p. 77752–77769, 7 ago. 2021.

ANEEL. **Geração Distribuída por Unidade Federativa**. 2023 Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Estadual.asp. Acesso em: 12 de novembro de 2023.

ANSELMO, A. H. **RECICLAGEM OU DESTINAÇÃO FINAL DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS APLICADOS EM GERAÇÃO DE ENERGIA AO FINAL DO CICLO DE VIDA**. Belo Horizonte: [s.n.].

ANTONIO, M.; TEIXEIRA, C.; RAMOS, H. R. **Perspectivas de Novos Materiais Alternativos ao Silício para a produção de Células Solares Fotovoltaicas: Uma Revisão Sistemática da Literatura** Alexandre de Oliveira e Aguiar. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, v. 09, 2021.

ANTUNES, L. C.; CAMPOS, G. A. DO P. C. **ANÁLISE DE DESEMPENHO DE DIFERENTES MODELOS DE ÁRVORE SOLAR FOTOVOLTAICA**. IX Congresso Brasileiro de Energia Solar. Anais...Florianópolis: maio 2022. Disponível em: <<http://g1.globo.com/ceara/noticia/2017/02/uece-inaugura-arvore-solar-que-carrega-ate-10-bicicletas->>

Blue Sol. **Célula Fotovoltaica – O Guia Técnico Absolutamente Completo**. 2023. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>. Acesso em: 24 de setembro de 2023.

BÜHLER, A. J.; SANTOS FERNANDO HOEFLING DOS; GABE, I. J. **UMA REVISÃO SOBRE AS TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS ATUAIS**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Anais...2018.

CASARIN, Ricardo. **Jinko Solar atinge marca recorde de 24,79% de eficiência de conversão em célula solar de silício monocristalino tipo N.**, 2020. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/tecnologia/equipamentos-fv/jinko-solar-atinge-marca-recorde-de-24-79-de-eficiencia-de-conversao-em-celula-solar-de-silicio-monocristalino-tipo-n/>. Acesso em: 24 de setembro de 2023.

CHOINSK, Rodrigo. **UFPR registra sua 100ª patente com inovação para energia solar.** 2022. Disponível em: <https://ciencia.ufpr.br/portal/ufpr-registra-sua-100a-patente-inovacao-melhora-durabilidade-e-triplica-a-geracao-de-energia-em-celulas-solares-organicas/>. Acesso em: 02 de novembro de 2023.

CIELLO, L. A. **Análise da relevância de critérios na escolha da localização de instalações fotovoltaicas para geração de energia.** Florianópolis: [s.n.].

SILVA, C. J.; **ANÁLISE COMPARATIVA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A REDE INSTALADOS EM CURITIBA COM DIFERENTES TOPOLOGIAS.** IX Congresso Brasileiro de Energia Solar. Anais...2022.

COELHO, L. D. N. **MODELOS DE ESTIMATIVA DAS COMPONENTES DE RADIAÇÃO SOLAR A PARTIR DE DADOS METEOROLÓGICOS.** Brasília, DF: [s.n.].

CUNHA, V. DE R. **Otimização de junção de topo de InGaP em células solares de junção tripla para aplicação espacial.** Rio de Janeiro: [s.n.].

DENISE FALCÃO, V. **FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES DE CdS/CdTe.** Rio de Janeiro: [s.n.].

DINIZ BEZERRA, F. **Energia Solar.** Em: Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste - ETENE. [s.l: s.n.].

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes.** 4. ed. New Jersey: Wiley, 2013.

Eco Sol. **Novo teto panorâmico de carros da Audi poderá ter células fotovoltaicas.** 2017. Disponível em: <https://www.ecosolrenovavel.com.br/blog/novo-teto-panoramico-de-carros-da-audi-podera-ter-celulas-fotovoltaicas/>. Acesso em: 27 de setembro de 2023.

Enel. **Árvores Solares: você sabe o que são e como elas funcionam?** 2021. Disponível em: <https://www.enel.com.br/pt-ceara/Sustentabilidade/iniciativas/archive/arvores-solares.html/>. Acesso em: 12 de outubro de 2023.

EPE. **Matriz Energética e Elétrica. 2023.** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>: 07 de novembro de 2023.

FONSECA, W. W. F. et al. **LIMITAÇÕES MATERIAIS E ESPACIAIS DO APROVEITAMENTO DO RECURSO SOLAR FOTOVOLTAICO EM ESCALA GLOBAL**. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Anais...Fortaleza: 2020. Disponível em: <www.tcpdf.org>

GERHARDT. TATIANA ENGEL; SILVEIRA, D. T.; CÓRDOVA, F. P. **Métodos de Pesquisa**. Em: 1. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GODOI, R. **Análise Comparativa de Desempenho de Inversor String e Microinversor**. Uberlândia, SP: [s.n.].

GREENER. **Estudo Estratégico Geração Distribuída**. [s.l: s.n.].

GUEDES, D.; TORRES, B. **CÉLULAS FOTOVOLTAICAS: DESENVOLVIMENTO E AS TRÊS GERAÇÕES**. Revista Técnico-Científica do CREA-PR, mar. 2019.

INOVA SOCIAL. **AuREUS: Um painel solar que usa resíduos orgânicos para gerar energia limpa**. 2022. Disponível em: <https://inovasocial.com.br/solucoes-de-impacto/aureus-painel-solar-residuos-organicos/>Acesso em: 12 de outubro de 2023.

LIMA, A. A. et al. **Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia**. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, ago. 2020.

LIMA, R. DE M. C. et al. **Caracterização de células solares de filmes finos de CIGS**. **Revista Materia**, v. 22, jul. 2017.

LIU, K. N. **An Introduction to Atmospheric Radiation**. 2. ed. San Diego, California: [s.n.].

LOURENÇO, O. D. et al. **Clean and renewable energy, healthy organic electronics**. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 3, p. 583–597, 14 maio 2020.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. **Photovoltaic solar energy: A briefly review**. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 1, p. 126–143, 14 out. 2015.

MEZA ALFONSO, C.; MIGUEL ANDRES, D.; LUIS ENRIQUE, C. A. **Sistema automatizado para el monitoreo de temperatura y presión en un equipo de fabricación de celdas solares de película delgada**. Ciudad de México: [s.n.].

MORAIS. **Célula fotovoltaica: Tudo que você precisa saber**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://eletronicadepotencia.com/celula-fotovoltaica/>. Acesso em: 24 de setembro de 2023.

NREL. **Interactive Best Research-Cell Efficiency Chart**, 2023. Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency.html>. Acesso em: 08 de outubro de 2023.

OLIVEIRA, Othon Garcia; OLIVEIRA, Rafael Henrique; GOMES, Renato Oliveira. **Energia solar: um passo para o crescimento**. REGRAD - Revista Eletrônica de Graduação do UNIVEM - ISSN 1984-7866, [S.l.], v. 10, n. 01, p. 377 - 389, oct. 2017. ISSN 1984-7866.

OTAVIO VIANA, L. et al. **ENERGIA RENOVÁVEL: ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA RESIDENCIAL**. Araraquara: [s.n.]. Disponível em: <<https://doi.org/10.47820/recima21.v3i11.2378>>.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos, SP: [s.n.].

PRIEB, C. W. M. **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE ENSAIO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**. Porto Alegre: [s.n.].

RAPHAEL, E. et al. **CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITAS: UMA NOVA TECNOLOGIA EMERGENTE**. Nova Sociedade Brasileira de Química, 1 jan. 2018.

RIBEIRO, D. DE M. **ESTUDO DE VIABILIDADE DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ON-GRID E OFF-GRID**. Uberlândia: [s.n.].

ROSA, E. H. DOS S.; TOLEDO, L. F. R. B. **Uma revisão dos princípios de funcionamento de células solares orgânicas**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 43, 2021.

SANTOS, A. J. L.; LUCENA, A. F. P. **POTENCIAIS TÉCNICO E DE MERCADO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO SETOR RESIDENCIAL BRASILEIRO**. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Anais...Rio de Janeiro: 2020.

SAUAIA, R. **Energia Solar Fotovoltaica: Panorama, Oportunidades e Desafios**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <www.absolar.org.br/processo-associativo.html>.

SILVA, E. L. DA; MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 3. ed. Florianópolis: [s.n.].

SOARES, Marcelo Negri; BEZERRA, Eudes Vitor; MARQUES, Eduardo Coleta. **ENERGIA SOLAR: BENEFÍCIOS FISCAIS COMO MEIO GARANTIDOR DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E DIREITOS DA PERSONALIDADE**. Revista de Direito Brasileira, [S.l.], v. 33, n. 12, p. 234-247, set. 2023. ISSN 2358-1352.

SOUZA, D. C. D. DE; GRECCO, V. F. **ANÁLISE E COMPARAÇÃO ENTRE ÍNDICES PROJETADOS E SISTEMA REAL IMPLANTADO DE UMA PLANTA FOTOVOLTAICA RESIDENCIAL EM FUNCIONAMENTO**. Campinas/SP: [s.n.].

SØRENSEN, Bent. **Renewable Energy Origins and Flows Editorial Introduction**. In: Renewable Energy. Routledge, 2018. p. Vol1_1-Vol1_20.

TITTON, M. G.; DE BONA, J. C.; BÜHLER, A. J. **MÓDULOS FOTOVOLTAICOS CI(G)S: ANÁLISE DA TECNOLOGIA**. Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 3, pp, out. 2015.

TOLMASQUIM, M. T. **ENERGIA RENOVÁVEL - HIDRÁULICA, BIOMASSA, EÓLICA, SOLAR, OCEÂNICA**. Rio de Janeiro: [s.n.].

TONIN, F. S. **CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA NA CIDADE DE CURITIBA**. Curitiba: [s.n.].

TORRES, R. C. **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais**. São Carlos: [s.n.].

VIANA, F. L. E.; ARY, J. C. A. **INFRA-ESTRUTURA DO NORDESTE: ESTÁGIO ATUAL E POSSIBILIDADES DE INVESTIMENTO**. Fortaleza: [s.n.].

VITORETI, A. B. F. et al. **Células solares sensibilizadas por pontos quânticos**. Química Nova, 27 nov. 2016.

ZANI, Victor. **Como Funciona a Célula Fotovoltaica**, 2018. Disponível em: <https://www.e4energiasrenovaveis.com.br/artigos/celula-fotovoltaica>. Acesso em: 12 de outubro de 2023.