

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO  
CAMPUS AVARÉ  
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DE BIOSISTEMAS

JULIA CASSEMIRO BRIQUEZI

ANÁLISE DO AVANÇO TECNOLÓGICO DE CÉLULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS EM  
TERMOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, EXPANSÃO E POTENCIALIDADE DOS  
MATERIAIS

AVARÉ

2023

JULIA CASSEMIRO BRIQUEZI

ANÁLISE DO AVANÇO TECNOLÓGICO DE CÉLULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS EM  
TERMOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, EXPANSÃO E POTENCIALIDADE DAS  
MATÉRIAS-PRIMAS

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Graduação em  
Engenharia de Biosistemas do Instituto  
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia  
de São Paulo Campus Avaré, como requisito  
parcial à obtenção do título de bacharel em  
Engenharia de Biosistemas

Orientador: Prof. Dr. Rafael Aparecido  
Ferreira

AVARÉ

2023

Catálogo na fonte

Instituto Federal de São Paulo- Biblioteca Campus Avaré

Briquezi, Julia Casseiro

Análise do avanço tecnológico de células solares fotovoltaicas em termos de eficiência energética, expansão e potencialidade das matérias-primas/ Julia Casseiro Briquezi.

55 páginas

Orientador: Prof. Dr. Rafael Aparecido Ferreira

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação - Bacharel em Engenharia de Biosistemas) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo –Campus Avaré, 2023.

1. Silício cristalino. 2. Fontes limpas. 3. Painéis de captação solar. I. Rafael Aparecido Ferreira. II. Título.

ATA N.º 24/2023 - CBEB-AVR/DAE-AVR/DRG-AVR/IFSP

### Ata de Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso - Graduação

Na presente data, de **15 de dezembro de 2023**, realizou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado "**Análise do avanço tecnológico de células solares fotovoltaicas em termos de eficiência energética, expansão e potencialidade dos materiais**" apresentado pela aluna **Júlia Cassemiro Briquezi AV301075** do Curso **SUPERIOR EM ENGENHARIA DE BIODISSISTEMAS**, (Campus Avaré). Os trabalhos foram iniciados às **10:00** horas pelo Professor presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

Membros	IES	Presença (Sim/Não)	Aprovação/Conceito
<b>Rafael Aparecido Ferreira (Presidente/Orientador)</b>	IFSP- Câmpus Avaré	Sim	Aprovado/8,1
<b>Larissa Santos Silva (Examinador 1)</b>	IFSP - Câmpus Avaré	Sim	Aprovado/8,1
<b>Marcus Vinicius Maia Rodrigues (Examinador 2)</b>	IFSP- Câmpus Avaré	Sim	Aprovado/8,1

#### Observações:

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo da monografia, passou à arguição do(a) candidato(a). Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pela aluna, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

Aprovado

Reprovado(a)

Nota Final: 8,1

O segundo examinador é avaliador externo:

Sim     Não

Observações: (Acaso existam, se não, suprimir esse campo)

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Campus Avaré,

15 de dezembro de 2023

Documento assinado eletronicamente por:

- **Rafael Aparecido Ferreira, COORDENADOR(A) - FUC1 - CBEB-AVR**, em 15/12/2023 11:44:25.
- **Larissa Santos Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 15/12/2023 11:47:20.
- **Marcus Vinicius Maia Rodrigues, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 15/12/2023 15:16:20.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 15/12/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifsp.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 668943

Código de Autenticação: c542cbd98f



ATA N.º 24/2023 - CBEB-AVR/DAE-AVR/DRG-AVR/IFSP

Dedico este trabalho aos meus pais e aos meus  
queridos amigos, que fizeram parte da minha  
Trajetória.

## **Agradecimentos**

Gostaria de primeiramente agradecer a Deus, pelo privilégio de estar aqui finalizando mais uma etapa da minha vida, tenho plena certeza de que sem ELE não chegaria até aqui, Te agradeço Senhor, pois até aqui me ajudou.

Aos meus pais, Elier e Cristiana, pelo apoio ao longo da minha vida e especialmente nos últimos anos de faculdade ao qual não consegui estar trabalhando, também aos meus irmãos Isabela e Pedro.

Quero aqui dedicar um agradecimento especial aos meus queridos amigos Ivanaira e Laudelino por todo o apoio, ajuda e amizade nesses anos, obrigado por fazerem meus dias especiais.

Aos meus colegas de faculdade aos quais tive o privilégio de conhecer ao longo de meus anos de faculdade.

Também um agradecimento especial aos amigos da Biblioteca, Ana, Elisabeth e Arthur, obrigada pelo companheirismo durante esses anos.

Enfim aos demais professores pelos ensinamentos e amizade, tenho certeza de que a profissional que vou me formar devo tudo a vocês.

“O SENHOR é a minha força e o meu cântico...  
por isso, o exaltarei” - Êxodo 15-2.

## RESUMO

A crescente demanda mundial pelo uso de energia elétrica tem impulsionado as pesquisas por fontes de geração de energia alternativas e menos poluentes, visando a diminuição da dependência de fontes consideradas poluentes que geram sérios impactos ambientais ao planeta. Dentre as fontes alternativas de obtenção de energia elétrica, a energia solar vem se destacando como promissora, além de possuir alta disponibilidade e ser uma fonte limpa, renovável e praticamente inesgotável. Para esse processo de transformação de energia são empregados os painéis solares, os quais são fabricados com silício cristalino que é um material semicondutor responsável pela captação e conversão dos fótons de luz em energia elétrica com uma eficiência energética de até 25%. O processamento do silício é poluente, desse modo, faz-se necessário pesquisas no desenvolvimento de materiais para células solares que reduzam impactos negativos causados pelos processos de fabricação e que permitam obter eficiência energética superior e competitiva à tecnologia existente. Atualmente existem três gerações de células fotovoltaicas desenvolvidas com diferentes tipos de materiais, entre eles: metais, polímeros, óxidos e compostos orgânicos que buscam alcançar a eficiência conseguida nas células de primeira geração (a base de silício); sendo que sempre a perspectiva é a busca por materiais economicamente viáveis e não poluentes. Sendo assim, o presente trabalho tem por objetivo revisar na literatura os materiais empregados na produção de células fotovoltaicas de primeira, segunda e terceira geração, em relação à eficiência energética, viabilidade econômica e a relação entre a composição/estrutura dos materiais e suas propriedades, comparando os potenciais substitutos da célula tradicional de silício.

Palavras-chave: Silício cristalino, Fontes limpas, Painéis de captação solar

## **ABSTRACT**

The growing global demand for the use of electrical energy has driven research into alternative and less polluting energy generation sources, aiming to reduce dependence on sources considered pollutants that generate serious environmental impacts on the planet. Among the alternative sources of obtaining electrical energy, solar energy has stood out as promising, in addition to having high availability and being a clean, renewable and practically inexhaustible source. For this energy transformation process, solar panels are used, which are manufactured with crystalline silicon, which is a semiconductor material responsible for capturing and converting light photons into electrical energy with an energy efficiency of up to 25%. Silicon processing is polluting, therefore, research is needed to develop materials for solar cells that reduce negative impacts caused by manufacturing processes and that allow energy efficiency to be obtained that is superior and competitive to existing technology. There are currently three generations of photovoltaic cells developed with different types of materials, including: metals, polymers, oxides and organic compounds that seek to achieve the efficiency achieved in first generation cells (silicon-based); the perspective is always the search for economically viable and non-polluting materials. Therefore, the present work aims to review in the literature the materials used in the production of first, second and third generation photovoltaic cells, in relation to energy efficiency, economic viability and the relationship between the composition/structure of the materials and their properties, comparing potential replacements for the traditional silicon cell.

**Keywords:** Crystalline Silicon, Clean Sources, Solar Capture Panels

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Total de emissões de CO <sub>2</sub> por energia de combustão e processos industriais e sua mudança anual anos de 1900-2000.....	1
Figura 2: Composição de uma célula de silício.....	11
Figura 3: Componentes de um painel fotovoltaico.....	12
Figura 4: Strings que conectam uma célula a outra.....	12
Figura 5: Caixa de junção localizada atrás do painel.....	13
Figura 6: Diodos by-pass conectados entre as células.....	13
Figura 7: Diodos by-pass na parte posterior da célula.....	14
Figura 8: Potência gerada pela energia solar.....	16
Figura 9: Mercado de silício metálico.....	17
Figura 10: Painéis de silício monocristalino (esquerda) e silício policristalino (direita).....	21
Figura 11: Painéis de silício amorfo.....	24
Figura 12: Painéis de CdTe.....	25
Figura 13: Painéis de CIGS.....	26
Figura 14: Células de GaAs.....	27
Tabela 1: Tabela com os valores de eficiência energética (PCE) das células fotovoltaicas de 1 <sup>a</sup> , 2 <sup>a</sup> e 3 <sup>a</sup> Geração.....	34

## LISTA DE ABREVIATURAS

PCE	Power Conversion Efficiency
CdTe	Telureto de Cádmió
CdS	Sulfeto de Cádmió
CIGS	Seleneto de Cobre, Índio Gálio
DSSC	Dye-sensitized solar cell
GaAs	Arseneto de Gálio
QDSSC	Quantum dot-sensitized solar cells
OPV	Organic Photovoltaic
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de Titânio
Mt	Megatoneladas
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CFC	Clorofluorcarbono
CH <sub>4</sub>	Metano
HNO <sub>3</sub>	Ácido Nítrico
O <sub>3</sub>	Ozônio
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CRESESB	Centro de referência para as energias solar e eólica de Salvo Brito
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
EVA	Etil-vinil acetato
TPU	polivinil termoplástico
TVB	polivinil butiral
Redox	Óxido-redução
SiO <sub>2</sub>	Óxido de silício
HSiCl <sub>3</sub>	Gás triclorossilano
SiCl <sub>4</sub>	Tetracloroeto de silício
Ti	Titânio
V	Vanádio



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	5
<b>2.1 Objetivo Geral</b> .....	5
<b>2.2 Objetivos Específicos</b> .....	5
<b>3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> .....	6
<b>3.1 Levantamento bibliográfico do Referencial Teórico</b> .....	6
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	7
<b>4.1 Revisão da Literatura - Parte I: Energia Solar, Efeito Fotovoltaico, Silício e o seu papel na conversão da energia solar em energia elétrica.</b> .....	7
<b>4.1.2 Energia Solar</b> .....	7
<b>4.1.3 Efeito fotovoltaico e o princípio de funcionamento da célula fotovoltaica</b> .....	9
<b>4.1.5 Silício</b> .....	17
<b>4.2 Revisão da Literatura - Parte II: As tecnologias e os materiais de células fotovoltaicas das três gerações.</b> .....	20
<b>4.2.1 1ª Geração: Tecnologia do Silício</b> .....	20
<b>4.2.2 2ª Geração: Tecnologia dos Filmes Finos</b> .....	21
<b>4.2.2.1 Silício Amorfo</b> .....	22
<b>4.2.2.2 Telureno de Cádmio</b> .....	24
<b>4.2.2.3 Seleneto de Cobre, Índio e Gálio (CIGS)</b> .....	25
<b>4.2.2.4 Arseneto de Gálio</b> .....	27
<b>4.2.3 3ª Geração: tecnologia em evolução:</b> .....	27
<b>4.2.3.1 Células sensibilizadas por corantes – DSSC:</b> .....	28
<b>4.2.3.2 Células sensibilizadas por pontos quânticos – QDSSC:</b> .....	30
<b>4.2.3.3 Perovskita:</b> .....	31
<b>4.2.3.4 Células Orgânicas - OPV</b> .....	32
<b>4.4 Análise da revisão e comparação do avanço tecnológico e do estudo da eficiência energética</b> .....	35

<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	36
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	36

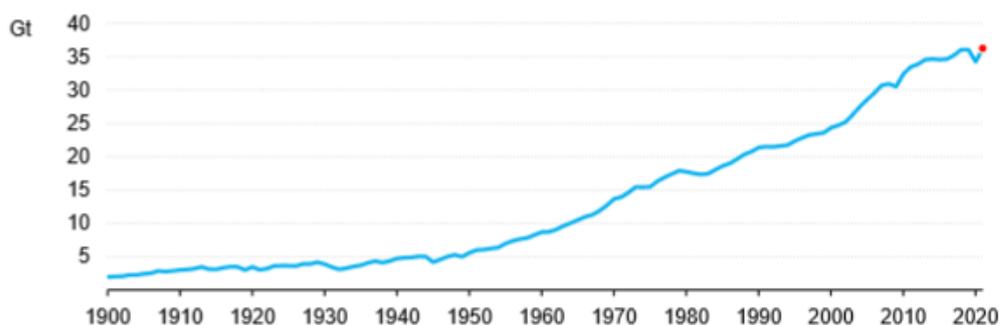
## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda mundial pelo uso de energia elétrica tem impulsionado pesquisas por fontes de geração de energia alternativas e menos poluentes com o objetivo de complementação das fontes de energias já existentes e para a diminuição da dependência de fontes consideradas poluentes e não renováveis, que geram impactos negativos ao meio ambiente e ao planeta (Almeida *et al*, 2016).

Os combustíveis fósseis caracterizam-se por serem fontes de energia abundantes e extremamente poluentes, contudo são amplamente utilizados para a geração de energia atualmente. A queima dos combustíveis fósseis libera quantidades significativas de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Ozônio (O<sub>3</sub>), Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O), Metano (CH<sub>4</sub>) e de Vapor D'água (H<sub>2</sub>O) na atmosfera, contribuindo para o aumento da temperatura do planeta. Esses gases poluentes ficam presos na atmosfera retendo os raios solares e os impedem de serem refletivos de volta para o espaço, ocasionando o aumento da temperatura do planeta (WWF, 2023).

Segundo dados da *International Energy Agency (IEA)*, o carvão, seguido pelo petróleo e seus derivados representam 26,8% e 29,5%, respectivamente, da matriz energética mundial e por sua vez, o gás natural representa 23,7% (IEA, 2022). Essas fontes de energia possuem alto rendimento energético, o custo de geração do MW/h é atrativo economicamente e sua cadeia produtiva gera empregos o que reflete na construção de infraestruturas próprias, como usinas, dutos, ferrovias e rodovias. Essas fontes são denominadas “não renováveis” ou convencionais formando a base da matriz energética mundial, porém, a sua reposição na natureza é lenta ou quase inexistente (Elias, 2009).

Ainda falando dessas fontes, na Figura 1 a seguir pode-se observar como ocorreu de forma praticamente exponencial as emissões de CO<sub>2</sub> nos últimos 100 anos.



**Figura 1: Total de emissões de CO<sub>2</sub> por combustão e processos industriais e sua mudança anual no período de 1900-2021 (IEA, 2022).**

**Fonte: IEA, 2022.**

O aumento da industrialização devido ao atendimento das necessidades, principalmente as de consumo associado a um maior acesso da população as tecnologias são apontadas como a razão para esse aumento. Importante notar que a Figura 1 acima revela que no período de Pandemia de Covid-19 houve uma redução de 5,1% nas emissões de CO<sub>2</sub> devido as medidas fitossanitárias de distanciamento social e confinamento - “*Lockdown*” - que geraram uma redução nas emissões. No entanto no ano seguinte alcançou o mais alto nível, com 6% de crescimento, representando uma rápida recuperação econômica, e também pelas condições climáticas adversas. Com relação a números o crescimento em 2021 as emissões de CO<sub>2</sub> representam um aumento de 180 Megatoneladas (Mt) acima do nível registrado em 2019, ainda período pré-pandemia em 2019, o que reflete que existe uma tendencia de aumento.

Com a crise do petróleo de 1973, nos anos subsequentes intensificaram-se as pesquisas por fontes de energia alternativas, como modo de transição e complementação das fontes de energia não renováveis. Até o presente momento, avanços importantes têm sido alcançados com o desenvolvimento de fontes de energia bastante complexas e diversas, desde a obtenção de energia por meio das marés dos oceanos (maremotriz) até por meio do bagaço de cana-de-açúcar (biomassa).

As chamadas “fontes renováveis” possuem considerável importância na diversificação da matriz energética mundial, pois elas são responsáveis pela diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> em 2020 continuarão até o ano de 2030, condizentes no Cenário de Emissões Líquidas Zero até 2050, tendo como principais implantações delas nos setores de energia, aquecimento e transporte (IEA,2022). Dentre as fontes renováveis que desempenham um importante papel na matriz energética mundial, destacam-se as principais as fontes hídricas (2,7%) e de biomassa (9,8%), que possuem as maiores parcelas de contribuição. Ademais, a energia solar, eólica, geotérmica e oceânica junta representam 2,5% da matriz energética mundial 2020 (IEA,2022). Contudo, apesar dos avanços tecnológicos recentes, a eficiência energética das fontes renováveis ainda são menores em comparação às principais fontes fósseis (petróleo, carvão e gás natural), não solucionando a questão primária que é a substituição das fontes não renováveis por fontes renováveis.

Nessa corrida constante por busca de novas fontes de energia limpas e renováveis destaca-se a energia solar, que é considerada como uma fonte limpa e renovável. Dados compilados no período de 2007 a 2017 apontaram que neste período houve uma maior produção científica no cenário nacional tendo ênfase aumento da eficiência energética de células fotovoltaicas a partir da captação da energia da radiação solar incidente. Dentre as publicações analisadas destacam-se como pontos principais a viabilidade técnica financeira e/ou econômica da implementação dos sistemas fotoelétricos, mecanismos de incentivos e aspectos ambientais e jurídicos (Lago & Delaneta, 2018). A grande maioria das publicações demonstraram serem projetos de implantação inviável devido e ao alto custo de produção e a falta de regulamentação governamental. No entanto só apenas em 2012 foi regulamentado a resolução normativa que possibilitou a comercialização de fontes de energia renováveis, a partir daí houve uma maior expansão dos sistemas solares no Brasil (Solled, 2022).

Dados recentes da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2023) a respeito da produção de energia a partir de fontes renováveis registraram um crescimento expresso significativo de quase 7,0 GW no ano de 2023 com relação ao ano anterior, sendo que 1238,6 MW registrados somente no mês de agosto, tendo as fontes solar e eólica somando 97,5% desse crescimento (ANEEL, 2023). Ambas as fontes de energia responderam por 6229,1 MW instalados em 2023, representando 89,9% da expansão verificada no período. Apenas em agosto de 2023 15 centrais solares entraram em operação, com capacidade de geração de 477,4 MW total. Com os resultados promissores alcançados, a ANEEL espera cumprir até o final do ano de 2023 a meta de 10,3GW de energia geradas a partir de placas de captação solar.

Alguns fatores contribuem para maior expansão e aceitabilidade das pessoas e empresas relativo aos sistemas fotovoltaicos, os quais englobam desde fatores climáticos aos tributários. Naturalmente, o Brasil possui bons níveis de incidência solar, média de 1200 a 2400 kWh/m<sup>2</sup>/ano, em todo o território brasileiro, com destaque às regiões Nordeste com 5,5 kWh/m<sup>2</sup>, sudeste e Centro-Oeste com 5,0 kWh/m<sup>2</sup> (Pereira et al, 2017). No início de seu desenvolvimento, os painéis de silício era uma fonte de energia considerada cara devido aos métodos de obtenção da matéria-prima que elevavam o preço do produto final, no entanto o avanço em pesquisas para o desenvolvimento desta tecnologia levou à redução dos custos envolvidos na produção dos painéis, ampliando o acesso da população e corporações à tecnologia.

Considerando esse contexto, esse Trabalho de Conclusão de Curso visa revisar na literatura quais os tipos de materiais que podem ser empregados nas células fotovoltaicas, uma

fonte renovável de produção de energia elétrica, avaliando a eficiência na conversão da energia solar em energia elétrica desses materiais quando utilizados nas placas solares.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Este trabalho de conclusão de curso tem por objetivo geral realizar uma revisão qualitativa na literatura sobre células fotovoltaicas de 1ª, 2ª e 3ª geração destacando-se pontos importantes, tais como: a eficiência energética, a possibilidade de comercialização das tecnologias e a potencialidade de cada material utilizado para a fabricação.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Abordar os antecedentes históricos da necessidade de pesquisas por energias renováveis e descrever o nascimento da utilização da energia elétrica no mundo quando gerada a partir da energia solar;
- Relatar como se deu a construção das primeiras usinas solares instaladas no Brasil, bem como, dos primeiros painéis solares a serem desenvolvidos e comercializados no país;
- Elucidar os processos de obtenção do silício em grau industrial e as outras formas de extração e purificação do semicondutor para utilização em painéis solares;
- Descrever detalhadamente as componentes das células fotovoltaicas típicas de silício e as de um sistema solar fotovoltaico e especificar as etapas do processo de fabricação e os materiais empregados;
- Apontar os impactos ambientais da produção de painéis de silício;
- Fazer a comparação entre células fotovoltaicas alternativas ao silício, no que diz respeito a eficiência e a viabilidade econômica e utilização para a substituição da célula tradicional de silício.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

#### 3.1 Levantamento bibliográfico do Referencial Teórico

Para a realização deste trabalho, como sendo uma revisão bibliográfica, as principais fontes de pesquisas foram o Google Acadêmico e o site da Associação Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) através das seguintes palavras-chaves: “*Células solares*”, “*Células Orgânicas*”, “*Células de Perovskita*”, “*Células sensibilizadas por corantes*”, “*Células sensibilizadas por pontos quânticos*”, “*Células solares fotovoltaicas*”, “*Células de terceira geração*”, “*Silício*”. No total foram analisados 25 artigos científicos para a construção de toda a introdução e da revisão/resultado deste trabalho científico, alguns dos quais são publicações de revistas científicas virtuais ou não e internacionais, tais quais: *Matéria*, *Ambiente Brasil*, *Processos Químicos*, *Revista Virtual de Química*, *Journal of Physics*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications e Communications Materials*. Dados estatísticos foram retirados das principais instituições de pesquisa na área de Energias Renováveis e Engenharia, dentre as principais estão: *International Energy Agency –IEA* ; *Centro de referência para as energias solar e eólica de Salvo Brito –CRESESB* ; *Internacional Renewable Energy –IRENA* ; *Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL* ; *Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL* e o *Institute of Electrical and Eletronics Engineers –IEEE*. Além das informações dos artigos foram consultados 2 livros: *Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações e Photovoltaic Systems Engineering* e como fontes alternativas de pesquisa foram analisados também blogs e bibliotecas digitais.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 Revisão da Literatura - Parte I: Energia Solar, Efeito Fotovoltaico, Silício e o seu papel na conversão da energia solar em energia elétrica.**

#### **4.1.2 Energia Solar**

Foi por intuição que se descobriu que a energia proveniente do sol poderia ser usada além do aquecimento e da iluminação, na Grécia antiga os habitantes projetavam suas casas de forma a se aproveitar mais a incidência solar durante o inverno. Os romanos aperfeiçoaram a invenção dos gregos construindo com tetos feitos de materiais como mica ou vidro para impedir o escape da energia solar incidida durante o dia. O primeiro protótipo de coletor solar para aquecimento de água é relatado de 1760 com a criação de uma caixa retangular isolada com vidro pelo cientista suíço Horace de Saussure (Jones & Bouamane, 2012).

A ideia de se utilizar a energia solar para produção de energia elétrica ocorreu em meados do século XIX com a descoberta do efeito fotovoltaico estudado por Edmund Becquerel em 1839, que notou a presença de uma tensão elétrica resultante da incidência da luz sobre eletrodos metálicos imersos em uma solução química, concluindo que há certos tipos de materiais que podem gerar corrente elétrica quando expostos a luz, após essa descoberta e sua disseminação outros cientistas se interessaram pelo fenômeno e suas possíveis aplicações, como a invenção de um motor a vapor movido a energia solar, criado por August Mouchet datado de 1878, além de outras tecnologias que se serviram de base para os sistemas atuais (Jones & Bouamane, 2012).

Em 1884 Charles Fritz produziu a primeira célula fotovoltaica tendo como principal semicondutor o selênio, mas sua eficiência não passou de 1%. Em 1940 veio a primeira comprovação que o silício possuía boa condução elétrica, Russel Ohm em seu trabalho realizado com semicondutores desenvolveu a primeira célula de silício ao qual foram adicionados um elemento em uma rede cristalina para melhorar suas características de absorção, tal processo é dado o nome de dopagem. Anos depois tivemos o primeiro módulo fotovoltaico de silício produzido em 1954 por um grupo de cientistas americanos, são eles: Calvin Fuller, Gerald Pearson e Daryl Chapin do laboratório de Bell localizado em Murray Hill, New Jersey-EUA. Com eficiência de 6%, com dimensão de apenas 2cm<sup>2</sup> a célula de silício gerou 5mV de tensão elétrica, após a demonstração pública um artigo foi publicado no New York Times

predizendo que a criação das células solares iria liderar a realização de um dos sonhos mais queridos da humanidade (Portal Solar; Jones & Bouamane, 2012).

Após esse feito houve um interesse do programa espacial dos Estados Unidos que viu esse projeto como a solução para o suprimento de energia para seus satélites e em 1958 as células fotovoltaicas já estavam sendo largamente utilizadas nesses programas e seguiu até o final da década de 70 quando a utilização terrestre superou o espacial com o advento da crise mundial de energia de 1973.

As primeiras células fotovoltaicas comercializadas pertenciam a uma pequena empresa nos Estados Unidos, a *Hoffman Eletronics*, localizada em Los Angeles e fundada por Leslie Hoffman que adquiriu a patente original do laboratório de Bell para fabricação de painéis para satélites inicialmente. A empresa de Leslie conseguiu fazer alterações para aumentar sua eficiência e os painéis tiveram aumento de 8% de eficiência para 14%, mas um dos primeiros problemas encontrados era que os painéis sofriam um sobreaquecimento, esse problema foi solucionado pelo empreendedor americano Alfred Mann, que iniciou sua própria produção de painéis solares com revestimento (Jones & Bouamane, 2012).

Durante o período do pós-guerra houve um impulsionamento dos investimentos para essa nova tecnologia e em meados dos anos 1970, Estados Unidos, Japão e Alemanha eram os que mais tiveram apoio governamental através de programas de apoios subsidiários. Em 1988 empresas europeias e japonesas dominavam a produção de células fotovoltaicas (Jones & Bouamane, 2012).

No Brasil a primeira usina solar foi construída em 2011, a cidade escolhida foi Tauá à 340 km de Fortaleza no Ceará, região Nordeste no Brasil, o motivo da escolha foi a alta incidência de raios solares durante todo o ano naquela região, que segundo o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica a CRESESB (2023) variam de 6,21 para 5,67 kWh/m<sup>2</sup> por dia em julho e novembro, respectivamente. A usina possui uma área de aproximadamente 12 mil m<sup>2</sup> e trabalha com 4.680 painéis solares, teve capacidade inicial de geração de 1 MW no ano de inauguração e em 2015 atingiu 50MW, apresentando bons resultados desde sua inauguração segue crescendo em pesquisa e desenvolvimento passando a ser uma das líderes do setor (99 Energia, 2023).

Após a normativa nº482 de 2012 promulgada pela ANEEL (2012) permitiu o consumo de energia solar para a população em geral sendo possível gerar a própria energia (microgeração) e/ou a tenha conectada à rede de distribuição (minigeração). Essa normativa também dispõe de um sistema de créditos energéticos, estabelecendo critérios necessários para a conexão à rede. Além disso, medidas do governo ao fomento para o uso das energias renováveis, tais quais, a isenção de impostos para quem possui sistemas de microgeração ou minigeração instalados em sua residência ou empresa, como o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) e o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), financiamento do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e a redução do imposto de importação de matérias-primas (Solled Energia, 2022).

Atualmente o Brasil é o 8º maior gerador de energia solar fotovoltaica, segundo o relatório da *International Renewable Energy Agency* (IRENA, 2023) divulgado no início do ano, o Brasil produziu no ano de 2022 o equivalente a 24.079 MW representando 11.6% da sua matriz elétrica do Brasil, dentre os maiores produtores estão os chamados “pequenos usuários” representados pela população em geral que juntos concentram cerca de 17.200 MW, enquanto as grandes usinas solares representam apenas 7.800 MW dessa fatia.

#### **4.1.3 Efeito fotovoltaico e o princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**

Como dito anteriormente, o pioneirismo da descoberta científica do efeito fotovoltaico é atribuído a Edmond Becquerel em 1839. O efeito fotovoltaico é observado quando os raios solares incidentes sobre um material atravessam sua estrutura e os fótons de luz atingem os elétrons da camada de valência dos átomos do referido material, o qual uma vez energizado torna-se um elétron livre por toda a superfície do material, sem ser ejetado, formando um campo elétrico.

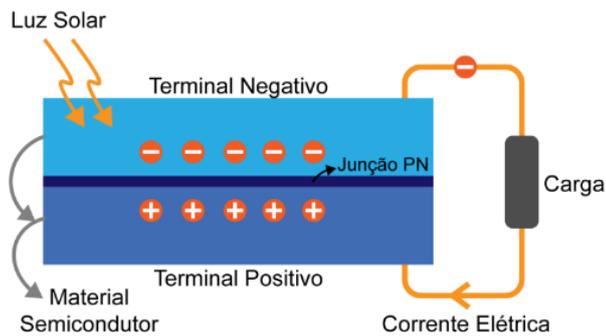
Há 3 tipos de materiais capazes de conduzir corrente elétrica, sendo eles classificados como sendo condutores, semicondutores e isolantes. Os materiais condutores a velocidade de condução é extremamente elevada, isso faz com que a energia do elétron seja desperdiçada na forma de calor, já os isolantes possuem condutividade elétrica baixa da ordem de  $10^{-8}$  a  $10^{-16}$  Siemens<sup>-1</sup> relação baixa em comparação aos condutores que possuem entre  $10^7$  a  $10^6$  Siemens<sup>-1</sup>. Os semicondutores possuem uma condutividade intermediária entre os condutores e isolantes (entre  $10^{-8}$  a  $10^6$  Siemens<sup>-1</sup>), isso faz com que materiais semicondutores sejam utilizados largamente devido as suas propriedades na indústria eletrônica e fotovoltaica, em alguns materiais semicondutores, a dissipação de energia ocorre com uma taxa menor (frequência) que no condutor, e a partir daí eles podem ser usados como materiais que produzem elétrons livres que movimentam pela superfície e geram um movimento ordenado e os raios

solares incididos sobre eles produzem um sistema com produção de campo elétrico sem grandes perdas de energia na forma de calor. Essas propriedades de semicondutividade podem ser melhoradas quando são adicionadas substâncias tipos dopantes de modo a se criar o desequilíbrio de cargas e a formação de um campo elétrico adicional que irá permitir a passagem da corrente de um campo para outro, a dopagem pode ser de dois tipos: a do tipo N e a do tipo P e os elementos inseridos na estrutura cristalina do material podem estar com elétrons em excesso (tipo P) ou deficientes (tipo N).

As primeiras células desenvolvidas com o propósito de conversão dos raios solares em energia eram feitas a partir de selênio, mas sua eficiência em conversão não ultrapassava a 1% (Ambiente Brasil, 2022).

Russel Ohl foi o pioneiro em estudar esse feito em células feitas com silício. Ohl atestou que uma amostra de silício que possuía uma rachadura acidental após exposição aos raios solares transportava corrente elétrica entre as partes da rachadura, após outra tentativa de reproduzir o feito, <sup>1</sup>desta vez derretendo o silício em um cadinho, isolando as impurezas através de uma trinca, constatou que de um lado da trinca havia elétrons em excesso e do outro lado havia falta de elétrons ocasionada pelo isolamento das impurezas (regiões p e n denominadas mais tarde). Observando a tendência dos elétrons de migrarem da região p para a n por atração natural, após exposição essa migração tornou-se mais efetiva pois a luz solar fazia movimentar os elétrons das regiões p e n do silício fluindo-os entre a trinca.

O silício em si não é um bom condutor, e para seu uso na produção de painéis solares passa pelo processo de dopagem com o propósito de maximizar sua condutividade. As células no geral possuem duas camadas de silício dopado tipo n e p sobrepostas, as duas regiões quando colocadas em contato uma com a outra formam um campo elétrico que facilitam a movimentação dos elétrons entre as placas. Os fótons se chocam com os elétrons livres da região p do painel de silício dopado, nessa colisão é fornecida energia aos elétrons livres que tendem migrarem-se para a região n do painel orientada pelo campo elétrico (Nascimento, 2004).



**Figura 2: Composição de uma célula de silício.**

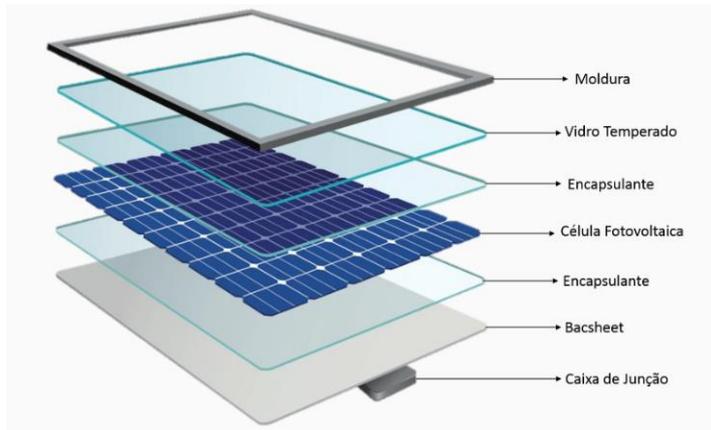
**Fonte: Blog Eletrônica de potência**

As placas convencionais são dotadas de um condutor externo ligadas as camadas p e n da célula para manter um fluxo de elétrons sobre a placa. Cada célula fotovoltaica tem a capacidade de geração de tensão elétrica da ordem de 0,4 a 0,5 Volt e a associação em série de várias células permite que o valor da tensão aumente. Tão importante como ter um sistema que capta a energia solar e a transforma em energia elétrica é ter um sistema de armazenamento de energia dimensionados de acordo com a potência e a confiabilidade do sistema, no geral são baterias que armazenam a energia produzida e não consumida para uso posterior e as baterias destinadas precisam ser de alto rendimento energético e mínima necessidade de manutenção (Imhoff, 2007).

#### **4.1.4 O painel fotovoltaico**

Um painel fotovoltaico tem um número variável de células conectadas em arranjos, normalmente em série ou em paralelo para a produção de tensão e corrente em níveis desejáveis para a utilização, o número de células por painel dependerá do tamanho da placa e da quantidade de watts a ser requerida. Os painéis que possuem uma bateria acoplada precisam de no mínimo uma tensão de 12V para o completo carregamento da bateria e os painéis para essa finalidade precisam possuir no mínimo 36 células fotovoltaicas para gerar uma tensão de 18V de tensão máxima e potência de 21W (Solfacil,2023). Cada célula é conectada uma à outra através de um fio de material condutor feito de cobre ou alumínio formando os denominados *strings* (junção de células conectadas), as conexões são soldadas de modo a criar uma ligação elétrica entre elas. Um painel tem várias camadas: a primeira camada é feita de vidro temperado ou filmes poliméricos revestidos com uma substância antirreflexiva responsável pela resistência mecânica da placa, a segunda camada é o encapsulante que funciona como um adesivo entre os strings e o vidro, também tem como função a proteção contra as degradações causadas pela excessiva

exposição aos raios UVs garantindo que o máximo de luz atinja o painel, dentre os materiais usados para a fabricação deste componente estão o etil-vinil acetato (EVA –principal utilizado), polivinil termoplástico (TPU) e o polivinil butiral (TVB), duas camadas de encapsulante são colocadas entre a junção de strings, na parte inferior fica o backsheet que é um material plástico branco de três camadas em sua composição que fornece suporte e proteção as células do string e aos outros componentes internos, também atua como isolante térmico (Solfacil,2023).



**Figura 3: Componentes de um painel fotovoltaico.**

**Fonte:Agroalimentando**



**Figura 4: Strings que conectam uma célula a outra.**

**Fonte: Acervo pessoal**

A caixa da junção são conexões elétricas que levam a corrente para o exterior do painel, localizada em sua parte posterior estão conectadas aos strings por meio de cabos ou conectores especiais que possuem diversas finalidades. Dentre os principais dispositivos e suas respectivas funções estão: os díodos de bypass evitam a ocorrência de “pontos quentes” no painel, oferecendo uma rota alternativa para a corrente limitando a dissipação de potência quando as células recebem pouca radiação causando danos ao painel e as células, isto irá acontecer pois a potência do díodo é o equivalente a potência máxima dissipada por

um conjunto em série ao qual ele está interligado. Também chamado de diodos de desvio, estes se encontram conectados em antiparalelo em um conjunto de 15 a 30 células.

Os diodos de bloqueio em sua maioria são usados em células em série interligadas em paralelo com outros painéis, sua função é impedir o fluxo de corrente entre conjuntos com maior tensão para conjuntos com menor tensão, em sistemas que possuem baterias de armazenamento os diodos protegem contra descargas noturnas, pois durante o período noturno os painéis são susceptíveis a uma corrente reversa que embora pequena contribui para a total descarga da bateria de armazenamento. Para cada conjunto em série, instala-se um diodo de bloqueio que deve suportar a corrente de curto-circuito produzida pelo painel e a tensão reversa em até duas vezes (CEPEL,2014).



**Figura 5: Caixa de junção localizada atrás do painel**

**Fonte: Acervo pessoal.**

As conexões em série também se dispõem de fusíveis de proteção fotovoltaica que os protege contra um fluxo de corrente reversa de um conjunto com maior tensão para um de menor tensão. Estes estão conectados nas saídas dos polos positivos e negativos das conexões em série, estudos apontam uma maior efetividade em comparação aos diodos de by-pass que apresentam alto índice de falhas (CEPEL,2014)



**Figura 6: Diodos by-pass conectados entre as células**

**Fonte: Acervo pessoal**



**Figura 7: Diodos by-pass na parte posterior da célula.**

**Fonte: Acervo pessoal**

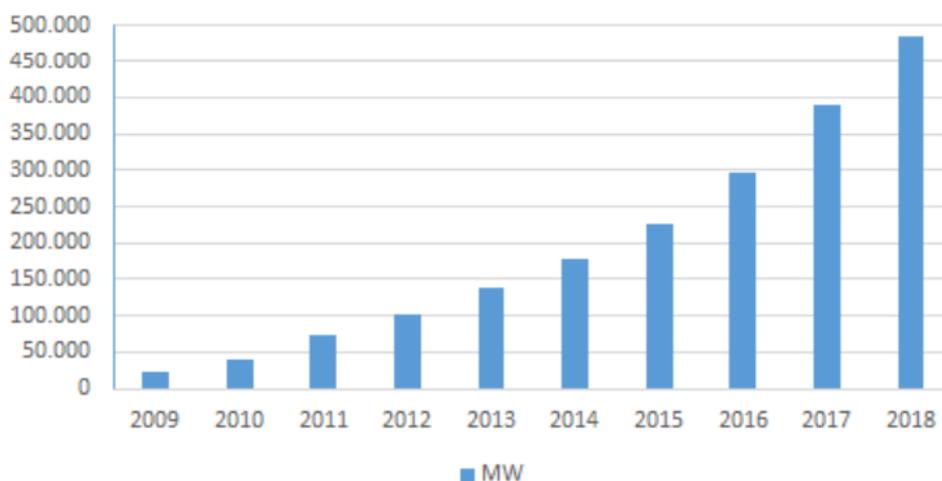
Como dito anteriormente nos sistemas fotovoltaicos há a necessidade de armazenamento da energia proveniente das células, para isso, um dos componentes essenciais do sistema é a bateria recarregável ou “acumuladores químicos”, elas possuem a função de armazenar energia elétrica por meio de reações de óxido-redução (Redox), ou seja, convertendo energia química na forma de energia elétrica gerando corrente contínua que é armazenada pela bateria. O tipo de bateria mais utilizado para esse fim é a de Chumbo-Ácido que possuem eficiência de 80 a 94% e vida útil de 100 a 1500 ciclos, ou seja, de 3 a 15 anos, também tem controladores de carga que são dispositivos eletrônicos que controlam o fluxo de potência e inversores para transformar a carga de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) (Imhoff, 2007), m contrapartida seus índices de carga e descarga afetam a performance da bateria e sua eficiência de carga e descarga é de 90% (Messenger & Ventre, 2010), já as baterias de Níquel-Cádmio são mais robustas que as de Chumbo-Ácida tendo vantagens como o completo descarregamento da bateria e possuem menos afeitos de sobrecarregamento, no geral locais de difícil acesso a manutenção e áreas remotas que utilizam sistemas de captação solar seu emprego é mais utilizado, justificando o seu alto custo em relação as demais. Outros tipos de baterias que embora não muito usadas mostram ser promissoras para o futuro, destacam-se: Níquel-Zinco uma combinação entre os sistemas Ni-Cd e Cu-Zn, possuem boa capacidade e longa duração, já as de Níquel-Hidreto metálico tem um maior armazenamento de energia e vida útil dependendo do objetivo e seu design (Messenger & Ventre, 2010). A fabricação dos painéis solares envolve vários processos minuciosos pois são necessários que cada etapa seja executada corretamente ou acarretará impacto diretamente na vida útil do produto.

O vidro utilizado na primeira camada possui uma composição especial e diferentemente dos demais utilizados para as demais aplicações, precisa ser ultrapuro e com baixo teor de ferro é desenvolvido para permitir a passagem da luz através dele e ter pouca reflexão da luz. Seu processo de limpeza é a primeira etapa essencial para prevenir a formação de bolhas depois do processo de laminação e acabamento do painel danificando-o, o processo de lavagem é feito por maquinário específico que utiliza água obtida por osmose reversa para a lavagem do vidro (Solfacil,2023).

A interconexão das células fotovoltaicas é a mais crítica de todos os outros processos, representando 60% de todo o sistema fotovoltaico, cada célula fotovoltaica são estruturas finas e que podem trincar com facilidade, elas são conectadas umas às outras com fios condutores que precisam ser soldados por máquina de solda de “contato leve”.

Na montagem temos o posicionamento das séries interconectadas o encapsulante e o vidro (processo também chamado de Layup) é um procedimento delicado que é realizado de modo a garantir o perfeito alinhamento das células no painel e evitar que eles se quebrem e todos devem funcionar em perfeita harmonia para garantir qualidade e velocidade, nesse processo acontecem a soldagem das séries de células criando uma ligação elétrica entre elas, pode ser manual ou automatizado feitas por máquinas especiais denominadas de Stringers. Após a interconexão da parte frontal do painel este é disposto sobre uma segunda folha de encapsulante e o backsheet e a partir daí o aparato estará pronto para o processo de laminação que lhe confere impermeabilidade e proteção. Dentro da máquina de laminação acontece o derretimento do encapsulante e a fundição aos strings para a proteção de quaisquer ações do tempo, essa etapa é crítica pois sua efetividade impacta na duração do painel, ao sair da laminadora é feita o corte de rebarbas e a instalação da caixa de junção ao painel e também a fixação das molduras de alumínio anodizado projetadas para conferir firmeza, integridade as condições externas e proteção ao painel (Solfacil,2023).

A última etapa de fabricação são testes indispensáveis de qualidade e segurança: o flash test e o teste de eletroluminescência, no primeiro é possível medir potência, eficiência, tensão e corrente do painel em uma fração de segundos e o segundo teste consiste na detecção de microfissuras e outras irregularidades e anomalias. Após passarem por esses testes os painéis estão aptos para comercializados (Solfacil,2023). A utilização de painéis fotovoltaicos para geração e produção de energia vem crescendo nos últimos anos de 23.371MW em 2009 para 485.826MW em 2018 segundo dados da IRENA. O gráfico a seguir mostra o crescimento em potência gerada pelos painéis solares de 2009 a 2018, á esse crescimento deve-se ao fato do crescimento do mercado de painéis solares e as normativas da ANEEL promovendo um crescimento acelerado deste mercado.



**Figura 8: Potência Gerada pela Energia Solar.**

**Fonte: IRENA, 2019**

Com o crescimento da utilização dos painéis solares se tem a preocupação de como os materiais usados na confecção desses painéis estão sendo descartados na natureza, recentemente Silva e colaboradores (2020) publicaram um artigo de estudo de impactos ambientais gerados pelas placas solares ao longo de todo o processo desde a extração do silício até o pós-uso das placas solares. O artigo aponta que o silício, principal componente dos painéis solares é o principal causador dos impactos gerados pelos painéis solares, sua extração causa redução da biodiversidade e poluição de rios e córregos, os processos de purificação utilizados pelas indústrias também acarretam poluição dos rios e córregos pois são descartados irregularmente pelas fábricas e a poluição do solo, na confecção das células solares de silício monocristalino temos os resíduos dos processos de corte das células que são confeccionadas em formato octogonal e por fim nos sistemas fotovoltaicos temos a utilização de baterias para armazenamento de carga, essas baterias não possuem a mesma vida útil que os painéis (os painéis possuem vida útil de 20 a 25 anos dependendo da qualidade do processo de fabricação e o tipo de bateria mais usado são de chumbo-ácida que possuem durabilidade média de 2,5 anos) necessitando de várias trocas ao longo do tempo de uso do painel, essas baterias são descartadas em lixões comuns contaminando o solo e lençóis freáticos. Os painéis solares possuem em sua composição diversificadas de elementos químicos considerados tóxicos e o descarte inapropriado geram consequências ambientais irreparáveis para o solo, a água e a saúde humana (SILVA, 2020). Dentre as várias sugestões e soluções para a mitigação dos impactos gerados pela produção dos painéis destaca-se o principal ponto de discussão deste trabalho que é a substituição das placas convencionais de silício por outros tipos de materiais, tais como os orgânicos e menos prejudiciais a natureza.

Os painéis fotovoltaicos desenvolvidos a partir do silício caracterizam-se na 1ª geração de painéis fotovoltaicos, representando assim 85% de todo o mercado, mas com os avanços das pesquisas na obtemos a 2ª e 3ª geração de painéis solares (SILVA, 2020).

#### 4.1.5 Silício

Localizado no grupo 14 e 3º período da tabela periódica, número atômico 14 e massa atômica de 28,08 g/mol aproximadamente e pertencente a categoria dos semi-metais. O silício é o segundo elemento abundante na crosta terrestre, representando 27,5% dela (Infopédia, 2023). Possui estrutura sólida dura, cor cinza escuro, sua estrutura cristalina se assemelha ao diamante, na natureza. O silício é encontrado na forma de compostos minerais como quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), caulita (silicato de alumínio) e montmorillonita (silicatos de alumínio, magnésio e cálcio) e nas rochas que compõem a crosta terrestre, tais como arenitos e granitos (Carvalho et al,2014).

A comercialização do silício é feita na forma de silício metalúrgico e liga de ferrosilício e sua produção chegou a 8.500 mil toneladas em 2021 segundo a o resumo de commodities minerais de 2022 da U.S. Geological (2022). O ferrosilício é usado pelas siderúrgicas e indústrias de ferro fundido enquanto o silício metálico é usado pelas indústrias químicas para usos gerais, destacam-se a produção de materiais eletrônicos, ligas metálicas e painéis solares.

Ainda segundo o relatório destacam-se os países com maior produção e reservas de silício a China (6.000 mil), Rússia (580 mil), Brasil (390 mil), Noruega (350 mil) e Estados Unidos (310 mil).



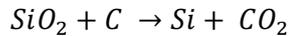
**Figura 9: Mercado de silício metálico**

**Fonte: Mordor Intelligence**

Da produção mundial de silício metalúrgico, uma parcela significativa de 8 a 10% são usados para a fabricação de painéis solares que utilizam o silício em suas estruturas cristalinas mono, poli e amorfa, com a produção de painéis com estes tipos de estruturas a eficiência na conversão fotovoltaica é de máximo 24% para o silício monocristalino, 11-14% para o silício policristalino e 6-7% para o silício amorfo.

Para ser usado para a fabricação de painéis solares, é necessário que o silício possua alta pureza (99%) que é obtido a partir do quartzo, quartzitos ou areia silicosas, no processo de extração é utilizado um

coque de petróleo, carvão mineral (ou vegetal) como agentes redutores que é realizada em fornos de arco elétrico a uma temperatura de 1900°C fazendo a redução do óxido de silício a silício, a reação se procede conforme mostrado abaixo:

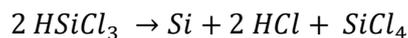


O silício acumulado no fundo do forno é extraído e resfriado. A partir daí tem-se o silício metálico ou de grau metalúrgico de pureza de até 99,5% (Carvalho et al, 2014).

O silício metálico é a matéria-prima básica na produção de células fotovoltaicas, porém é necessário passar por mais um processo de purificação até atingir a pureza de 99,9%. A purificação do silício metálico é feita por vias físicas e químicas, sendo a última capaz de obter o maior grau de pureza (99,99999%).

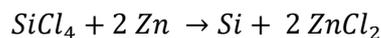
Os métodos físicos consistem na solubilização e solidificação das impurezas contidas no silício líquido por meio de aplicação de calor, foi o primeiro método de obtenção industrial durante a Segunda Guerra Mundial (Carvalho et al, 2014).

Os métodos químicos de purificação do silício metálico têm como 2 principais metodologias as de Siemens e DuPont. O processo de Siemens o silício obtido possui teor de 99,9999999%, o silício metalúrgico é exposto a uma temperatura de 1.150°C ao gás triclorossilano ( $HSiCl_3$ ) decompondo-se e depositando-se como silício puro na superfície da barra, como a seguinte reação:



O silício obtido por esse método denomina-se silício policristalino (Carvalho et al, 2014).

Já no processo de DuPont o solvente utilizado é o tetracloreto de silício ( $SiCl_4$ ) ao qual é submetido à temperatura de 950°C, durante essa operação é utilizado vapores de zinco para obter silício policristalino. Essa reação está demonstrada a seguir:



Esse método possui desvantagens, dentre o principal a formação do subproduto de reação (cloreto de zinco) que causa obstrução das linhas de produção, por essa razão esse método é pouco usado sendo substituído pelo método de Siemens (Carvalho et al, 2014).

O método de Czochralski é utilizado para a produção de silício de grau eletrônico, raramente utilizado nas indústrias de semicondutores e fotovoltaicas. Espera-se que após passar pelos métodos anteriores o silício obtenha uma pureza mínima de 99,999% para ser utilizado para a confecção de células solares.

É de extrema importância atingir esse grau de pureza, pois elas podem interferir em sua eficiência de diversas maneiras, tais quais a indução a discordância e contornos dos grãos do elemento, a presença de precipitados nas células, a formação de centros de recombinação que causam perdas de correntes e reduzindo a vida útil dos portadores de carga. Os processos de obtenção de silício de alta pureza são demasiadamente caros e inviáveis comercialmente encarecendo no produto final. Várias alternativas têm sido utilizadas para a redução dos custos do processamento do silício, dentre eles a apresentada por Pires e Mei (1999) que é a fusão através do forno de feixe de elétrons sob alto vácuo. Nesse processo o silício passa por dois processos de purificação para obter o silício policristalino de grau solar, o primeiro é o deslocamento do feixe de elétrons sobre o material no segundo acontece a evaporação das impurezas pelo vácuo, porém o presente processo apresenta algumas limitações, dentre elas o efeito nulo sobre impurezas com baixo coeficiente de segregação, mas se mostra eficiente na remoção de impurezas com alta pressão de vapor. No trabalho proposto por eles (Pires & Mei, 1999) o silício de grau metalúrgico lixiviado em forma de pó foi submetido a esses dois processos de purificação mencionado anteriormente visando um estudo de comprovação do limite de purificação. Como conclusões finais o método de fusão em forma de feixes elétricos mostrou-se eficiente na redução de elementos danosos a célula (Ti e V), e outros elementos que apresentam altas concentrações no material de partida (silício bruto), constituindo assim em um método viável para a obtenção de silício em grau elevado atingindo resultados de 99,999% em massa de silício por quase toda a amostra do material, exceto sua região central que demonstrou grau de pureza de 99,996% (Pires & Mei, 1999).

Posteriormente a seu uso como matéria-prima em células solares, o silício passa pelo processo de “dopagem” que é a adição de impurezas a sua rede cristalina para tornar-se eficiente a captação dos elétrons vindos dos fótons de luz solar, pois o cristal não possui elétrons livres na camada de valência necessitando a adição de outros elementos de modo ter elétrons livres para tornar a condução propícia. Essas impurezas são elementos pertencente a mesma classe dos semimetais que possuem tendência no compartilhamento de elétrons. A célula fotovoltaica é inteiramente dopada com impurezas, é composta por duas camadas de silício dopado sobrepostas uma à outra, em uma das camadas é introduzido em sua rede cristalina um elemento trivalente que ao fazer o compartilhamento de elétrons com os átomos de silício geram lacunas na rede caracterizada como dopagem do tipo p e possui uma espessura maior, elementos como Boro, Alumínio, Gálio e Índio são geralmente usados como impurezas aceptoras de elétrons. Em contrapartida a dopagem do tipo n é a camada de menor espessura onde temos a introdução à rede cristalina do silício elementos pentavalentes que formam ligações com o silício ocorrendo a ocorrência de elétrons livres na camada, os elementos geralmente usados pra esse tipo de dopagem são denominados impurezas doadoras de elétrons podendo ser o fósforo, o arsênio e o antimônio. A concentração das impurezas dopantes tem que ser inferior as do silício de modo a se criar regiões de predominância de cargas livres negativas e positivas facilitando o deslocamento, em termos numéricos

elas variam de  $1:10^7$  para dopagem do tipo n e  $1:10^3$  na dopagem do tipo p. Ao serem colocadas juntas forma-se um campo elétrico devido aos elétrons livres da região n que migram para ocuparem as lacunas da região p, na incidência de luz sobre a célula de silício fótons chocam-se com os elétrons livres da célula fornecendo energia e transformando-os em condutores, influenciado pelo campo elétrico da junção p-n ocorre um fluxo de elétrons da região p para a região n da célula gerando corrente elétrica (Nascimento, 2004).

## **4.2 Revisão da Literatura - Parte II: As tecnologias e os materiais de células fotovoltaicas das três gerações.**

### **4.2.1 1ª Geração: Tecnologia do Silício**

O silício representa a maior parte do mercado de painéis solares desenvolvidos, eles podem ser de 2 formas distintas: o silício monocristalino e policristalino, as duas formas obtidas a partir do silício em seu formato cristalino. Embora obtidos a partir do mesmo material as células se diferenciam entre si, primeiramente pela eficiência, sendo que a célula de silício policristalino tem uma eficiência menor mas seu processo de fabricação é mais barato que as células de silício monocristalino, também o design das células são perceptíveis, pois painéis de silício monocristalino possui uniformidade, de coloração azul escuro ou preto dependendo do tratamento antirreflexivo, já as feitas com silício policristalino as células possuem manchas devido à natureza do silício usado para a sua fabricação, apresenta coloração azul metálico e brilhoso. A coloração dos cristais é decorrente do grau de pureza do silício (Ogbomo et al, 2017)

Ambas constitui-se em células rígidas e quebradiças, necessitando de uma base sólida para fixação.(Villalva,2017).Apesar de seus processos de fabricação serem diferentes, ambas possuem uma vida útil estimada de 30 anos segundo Ogbomo et al (2017), mas em termos de eficiência energética (*Power Conversion Efficiency -PCE*) as células de silício monocristalino possuem até 25% em eficiência enquanto do que as células produzidas a partir do silício policristalino que tem PCE máxima de 20% (Teixeira, 2019).Em termos de mercado as tecnologias de primeira geração lideram , representando 54% para painéis de células de silício policristalino e 30% para painéis com células de silício monocristalino .O fato de células de silício policristalino serem as mais comercializadas embora sua eficiência seja menor é devido ao custo de produção poucos sofisticados e pelo menor desperdício durante o processo de corte a partir dos lingotes de alta pureza – as células de silício policristalino possuem um formato quadrado, diferentemente das células de silício monocristalino que são cortadas em formato octogonal para otimizar a densidade celular.(Ogbomo et al, 2017).



**Figura 10: Painéis de silício monocristalino (esquerda) e silício policristalino (direita).**

**Fonte: Canal Solar**

#### **4.2.2 2ª Geração: Tecnologia dos Filmes Finos**

Considerada como sendo uma tecnologia recente, os filmes finos foram desenvolvidos após a consolidação das tecnologias cristalinas (Villalva, 2017) como sendo um processo barato e econômico por consumir pouca matéria-prima e ao uso de diferentes tipos de materiais e técnicas de fabricação, destacam-se também por serem células mais leves, flexíveis, inquebráveis e versáteis comparada as de silício convencionais (Alvarenga, 2004). O processo de fabricação das células é feita por deposição de finas camadas de materiais em comprimentos que variam de nanômetros (nm) a micrômetros ( $\mu m$ ) em uma base rígida ou flexível que podem ser de vidro, aço inox e alguns plásticos (Alvarenga, 2004). Outro fator importante a ser considerado é que as células de filmes finos possuem um bom desempenho em altas temperaturas e são pouco afetadas por ela e pelo sombreamento, isso é devido ao seu baixo coeficiente de temperatura de saída de potência ( $p_{max}$ ) que é em torno de 0,25% para os filmes finos enquanto que as células de silício monocristalino tem  $p_{max}$  de -0,5% demonstrando mal desempenho em altas temperaturas e pouco desempenho para painéis de silício monocristalino (Ogbomo et al., 2017).

O método de deposição utilizado é o método de eletrodeposição, na eletrodeposição os materiais semicondutores são depositados sobre o substrato na forma de filmes pela aplicação de corrente elétrica, em seguida no substrato é colocado como sendo o cátodo de uma cuba eletrolítica que tem como eletrólito o semicondutor a ser depositado, no ânodo utiliza-se um eletrodo inerte, que se oxidam durante o processo e repondo a concentração usando a solução eletrolítica, ela pode ocorrer por 2 métodos diferentes: o galvanostático e o potenciostático, a diferença entre eles se deve pois no método galvanostático temos uma fonte externa fornecendo uma corrente elétrica durante o processo de galvanoplastia do filme e no método potenciostático é feita pela diferença de potencial fornecida pela fonte ao qual é mantida constante durante o processo de deposição (Melo, 2016).

O trabalho desenvolvido por Romero & Garuzzi(2015) destaca os vários métodos de revestimento utilizadas para a fabricação dos filmes finos, a técnica consistem na aplicação do líquido a um substrato e em seguida a aceleração em alta velocidade, essa técnica é a de spin-coating, a segunda técnica é a de ink jet printing que possui seu funcionamento similar ao de uma impressora de jato de tinta, possuem no jato de impressão vários orifícios que despejam gotículas do líquido sobre o substrato por segundo. Dentre os outros métodos que são expostos por eles temos: extrusão (*slot coating*), cortina (*curtain coating*), cascata (*slide coating*), rotação direta (*roll coating*) e rotação inversa (*reverse roll coating*).

Segundo Teixeira (2019) as tecnologias de painéis solares de segunda geração disponíveis no mercado destacam-se as de Silício Amorfo, Telureno de Cádmio (CdTe), Seleneto de Cobre, Índio Gálio (CIGS), e Arseneto de Gálio (GaAs).

#### **4.2.2.1 Silício Amorfo**

As células desenvolvidas a partir do silício amorfo diferem-se das células de primeira geração por possuírem um maior grau de desordem dos átomos em sua estrutura possibilitando uma maior eficiência na captação de luz solar em comparação as células tradicionais de primeira geração. O silício amorfo possui melhores desempenho em relação ao silício cristalino, dentre eles destacam-se melhores desempenho em condições de alta temperatura e sombreamento, apresenta boa resistência ao calor e na confecção das células utilizam pouco material em uma relação de 1:600 para as células de silício cristalino (Ogbomo et al., 2017)

No entanto os painéis de silício amorfo possuem células mais frágeis, maiores e mais pesadas e conseqüentemente sua aplicabilidade fica restrita a lugares mais espaçosos e aplicações onde a potência requerida é baixa, a vida útil do painel é de 25 anos, mas nos primeiros 12 meses de uso tem sua degradação induzida pela luz (Villalva, 2017) conhecida como efeito Staebler-Wronski, esse efeito se deve a quebra das ligações fracas com a incidência prolongada de luz produzindo defeitos que servem como armadilhas aos portadores de carga e diminuindo a corrente e conseqüentemente o rendimento do painel (Gomes, 2009), . Dentre as vantagens dessa tecnologia estão relacionados ao custo da produção e a quantidade de matéria-prima utilizada. Há diversos tipos de células desenvolvidas a partir do silício amorfo, dentre elas cabem citar as de silício hidrogenado amorfo inicialmente estudados por Chittick, Alexander e Sterling em 1969(GOMES, 2009), ao qual tem-se a incorporação de hidrogênio a estrutura por descarga luminescente ou deposição em reatores de plasma a uma temperatura variante de 220° a 250°C (Blue sol, 2023)de modo a aliviar as tensões internas possibilitando uma melhor organização dos átomos, a diminuição dos defeitos causando uma melhoria das características opto elétricas do material(GOMES,2009), possui fatores de fotoluminescência e fotocondutividade comum aos demais semicondutores cristalinos, o que o torna um dos materiais promissores a produção de filmes finos de

baixo custo, entretanto sua PCE é inferior quando comparada as células convencionais e as células sofre degradação nos primeiros meses de operação(GOMES, 2009).

A célula de silício amorfo hidrogenado possui uma camada frontal de camadas de Dióxido de estanho ( $\text{SnO}_2$ ) e Óxido de Zinco ( $\text{ZnO}$ ) na parte abaixo das camadas de silício, essas camadas tem como funções o aumento de transmitância e condutividade elétrica, também espalham a luz incidente sobre toda a placa na parte absorvente de silício e ao mesmo tempo permanecendo inerte (Guimarães, 2013) , no meio delas há uma sobreposição de camadas de silício amorfo dopado e não dopado, ou seja, a película não dopada fica entre as películas dopadas(regiões p e n) de modo a manterem cargas elétricas por mais tempo, pois as regiões p e n os elétrons livres recombina-se com outros elétrons e por essa razão não ficam livres o suficiente para gerarem uma corrente elétrica. (Bluesol,2023)

Estudos realizados com o objetivo da eliminação do efeito Staebler-Wronski sobre as células produzidas a partir do silício amorfo acarretou no desenvolvimento de uma célula de composição mista, ou seja, pequenos cristais de silício cristalino incorporados na matriz amorfa feita através de elevadas diluições do gás utilizado no processo, observou-se que a presença de cristais na matriz amorfa torna o material mais absorvente e pouco degradante devido a presença dos cristais esse protótipo é denominado células de silício micro/nanocristalino (Gomes, 2009) referente ao tamanho dos cristais. Suas propriedades físicas se assemelham a do silício cristalinos e superior a do silício amorfo, destacando uma maior estabilidade sob intensa iluminação solar e boa eficiência na absorção.

Os processos de fabricação dos filmes de silício (amorfo, hidrogenado, micro/nanocristalino) são diversas e que envolvem processos químicos e físicos. As principais técnicas são: sputtering, pulverização catódica e evaporação são processos físicos de deposição, deposições químicas são CVD –*Chemical Vapor Deposition*, Foto-CVD –*Foto Chemical Vapor Deposition*, HWCVD – *Hot Wire Chemical Vapor Deposition* e PECVD – *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*, apontados por GOMES (2009).

A nível laboratorial as células de silício amorfo de junção simples apresentam uma PCE de 12,2%, mas tem sua eficiência reduzida para 10,5% pelo efeito Staebler-Wronski(Kumar &Kumar, 2017), já as células de silício micro/nanocristalino atingem PCE de 8,5% (Gomes, 2009) e as células de silício amorfo hidrogenado de dupla e tripla junção possuem a PCE de 5,5%.



**Figura: Painéis de silício amorfo**

**Fonte: Eco Inventos**

#### **4.2.2.2 Telureno de Cádmio**

As células de Telureto de Cádmio (CdTe) possuem um processo de fabricação simples e barato em comparação com outras tecnologias de filmes finos e seu custo por Watt é similar ao silício cristalino e seu fator eficiência é se mostra competitivo as tecnologias de 1ª geração. O Cádmio é oriundo da extração do zinco é usado em sua forma ligada ao telúrio formando o composto Telureto de Cádmio, embora o Cádmio esteja entre os seis materiais mais tóxicos presentes na natureza, seu uso em painéis solares representa menos de 7g por metro quadrado, além do mais, o composto é possui uma maior estabilidade, é pouco solúvel em comparação ao cádmio elementar e menos tóxico. Entretanto o Telúrio é um elemento escasso e raro encarecendo o preço das células de CdTe(Ogbomo, 2017). Para a produção de células solares, os compostos precisam passar pelos processos de derretimento e atomização afim de conseguir o grau metalúrgico necessário (99,99% de pureza, segundo Fthenakis, 2004), após ambos estarem com elevado grau de pureza a síntese de CdTe é feita por métodos registrados e patenteados. A produção de células solares de Telureto de cádmio pode ser feita por meio de dois métodos: a eletrodeposição que é a combinação de CdTe com sulfeto de cádmio(CdS) á uma alta pressão de vapor em um substrato ao qual está acoplado a um sistema eletrolítico submerso a soluções aquosas de sulfato de cádmio(CdSO<sub>4</sub>) e dióxido de telúrio(TeO<sub>2</sub>) que mantém a deposição de íons cádmio e telúrio nos eletrodos em concentrações de 0,1/1,2 M e 0,0004M respectivamente a um pH variando de 2 a 3 (Fthenakis, 2004).Outro método de produção de filmes de CdTe é por meio de deposição por vapor de transporte ao qual o CdS e o CdTe em forma de pó por vaporização em um reator de espaço fechado.

Na confecção da célula o substrato utilizado é o vidro revestido de uma camada de condutor de Óxido de Estanho ou Índio, como contato frontal é usado o Sulfeto de Cádmio, com dopagem do tipo n, seguido pela camada do condutor fotovoltaico principal o CdTe com dopagem do tipo p , essas camadas são encapsuladas em folhas de vidro ou plástico (Bluesol,2023) .Como os demais painéis de 2ª Geração

caracterizam-se por serem duráveis e de pouquíssima emissão de gases ou resíduos tóxicos durante sua fabricação e operação, pois o ponto de fusão do CdTe é relativamente alto, no entanto impossíveis de liberarem vapores tóxicos durante sua operação (Fthenakis, 2004). A vida útil de um módulo de segunda geração de Telureto de cádmio é pouco superior ao de primeira geração, atingindo o máximo de 30 anos, mas um de seus problemas ambientais está justamente após seu uso, pois a maioria são descartados em aterros comuns, liberando consideráveis quantidades de metais pesados ao ambiente, poluindo o solo e as águas. Em termos de eficiência energética os painéis de CdTe demonstram uma eficiência máxima de 21,0% segundo dados de Green et al (2015), porém esta tecnologia é sujeita a redução em sua eficiência devido aos defeitos nos grãos da célula, fazendo com que estes se recombinem-se reduzindo a vida média dos portadores minoritários reduzindo assim a eficiência do painel (Kumar & Kumar, 2017).



**Figura 12: Painéis de Telureto de Cádmio.**

**Fonte: HiSoUR arte, cultura e exposição.**

#### **4.2.2.3 Seleneto de Cobre, Índio e Gálio (CIGS)**

A tecnologia de filmes finos CIGS possuem os seguintes semicondutores: Cobre, Índio, Gálio e Disselenito, também podem ser produzidas com a seguinte combinação: Cobre, Índio e Selênio (células CIS) (Teixeira, 2019). As células de CIGS/CIS são produzidas por deposição, o método mais utilizado é o de deposição física de vapor (ou PVD – physical vapor deposition) que faz a deposição do material semiconductor através de vaporização em uma câmara de vácuo aquecida usando o vidro como substrato (Canal Solar, 2020), mas também pode ocorrer por co-evaporação em 3 estágios: o primeiro estágio é a fase  $(\text{In, Ga})_2\text{Se}_3$  feita a partir de Índio e Gálio em um fluxo de Selênio, a segunda o Cobre é evaporado sobre a camada  $(\text{In, Ga})_2\text{Se}_3$  até a formação da fase  $\text{Cu}(\text{In, Ga})_3\text{Se}_5$  e a terceira é a formação da fase final  $\text{Cu}(\text{In, Ga})\text{Se}_2$ , durante essas etapas o controle da temperatura é fundamental para a efetividade dos estágios, os métodos de eletrodeposição e pulverização catódica são aceitos (Lima et al, 2017). De acordo com o mesmo autor, destacam-se os componentes de uma célula de CIGS e suas

respectivas funções: a primeira camada de Molibdênio que atuam como contato de fundo, seguido pela camada principal (o CIGS), uma liga semicondutora tipo p composto pela liga  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  que é a camada absorvedora de luz, o semicondutor do tipo n da célula é formada pelo sulfeto de cádmio (CdS), como contato frontal temos o Óxido de Zinco dopado com Alumínio usado para melhorar a transmitância e capacitância da célula, bem como, na distribuição da luz solar incidida por toda a placa, células são dispostas com uma camada antirrefletora, sendo usado o Fluoreto de Magnésio( $\text{MgF}_2$ ) e é finalizada com uma grade de contato metálica para coleta de corrente. Em algumas confecções é usado o enxofre para a substituição do selênio(Green et al,2017).Para não sofrer a degradação pelo sol e evitar a degradação do Óxido de Zinco presente as células são seladas robustamente (BLUESOL, 2023).Possuem uma PCE competitiva com a tecnologia de primeira geração, em torno de 21% em níveis laboratoriais, mas comercialmente seus painéis não alcançam 20%, possuindo somente de 7-16% .Um dos principais problemas de sua produção está na escassez de Índio limitando a sua produção(Kumar & Kumar, 2014) e ao fato de sua performance ser ligeiramente afetada pelo sombreamento (Ogbomo et al, 2017).Em termos de custo de produção as células CIGS possuem um custo menor que as de 1ª geração, porém são mais caras em comparação das de CdTe, várias linhas de pesquisa tem como objetivo a diminuição ou substituição de alguns dos materiais utilizados e buscando o aumento da eficiência, dentre os quais devemos citar a diminuição da camada de sulfeto de cádmio para 50-80nm para aumentar a respostas espectral das células em regiões de baixos comprimentos, a substituição da camada de Óxido de zinco dopado com de alumínio por uma bicamada na camada frontal de Óxido de Zinco e Óxido de zinco dopado e a substituição do Sulfeto de Cádmio por Óxido de Zinco e Magnésio( $\text{Zn,Mg}$ ) (Lima et al, 2017).

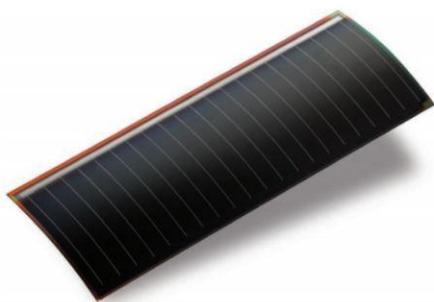


**Figura 13: Painéis de CIGS**

**Fonte:Solarbuy.com**

#### 4.2.2.4 Arseneto de Gálio

O composto Arseneto de Gálio (GaAs) é caracterizado como sendo um composto intermetálico, possuindo propriedades semicondutoras superiores ao silício e o germânio, tais quais uma velocidade de fluxo de elétrons superior aos demais, sendo utilizado para a fabricação de vários equipamentos de telecomunicação e computadores, porém constitui-se em um composto carcinogênico e de alta toxicidade e de alto risco para quem é exposto a ele (Webb et al, 1984). O composto químico é feito pela combinação de 2 elementos; o Gálio e o Arsênio. O primeiro é um elemento raro na natureza e é obtido como subproduto do zinco e alumínio, já o Arsênio é considerado um elemento venenoso, porém o composto por ele formado é instável (Ogbomo, 2017). As células de GaAs possuem alta capacidade de absorção de fótons do que as células de silício cristalino, em termos comparativos uma célula de GaAs de poucos micrometros de espessura absorve uma quantidade significativa de luz equivalente a uma célula de silício cristalino de 100 micrometros de espessura. No geral caracterizam-se por serem células resistentes ao calor e a radiação, são flexíveis, leves e possuem uma boa plasticidade de formas (DS Energia, 2023), não possuem perdas de desempenho com o aumento da temperatura, e podem gerar eletricidade em condições de pouca luz (DS Energia, 2023). A PCE é a mais alta conseguida por uma célula solar que é de 29%, mas devido a fatores como os preços de fabricação altos e a disponibilidade dos materiais tornam inviáveis sua comercialização, representando 1% de participação no mercado, outro fato importante é que células de filmes finos no geral possuem uma coloração escura decorrente aos processos de fabricação, devido a esse fato os efeitos térmicos são afetados, em seus primeiros anos de uso elas apresentam degradação de 10 a 20% (DS Energia, 2023).



**Figura 14: Célula de GaAs.**

**Fonte: DS New Energy**

#### 4.2.3 3ª Geração: tecnologia em evolução:

Definidas como sendo a última geração de células solares, estas permitem a utilização mais eficiente da luz solar obtida pela combinação de materiais que fazem um maior aproveitamento do espectro solar (Mello, 2016), em comparação as demais tecnologias que se baseiam em um único bandgap

eletrônico, caracterizam-se por serem altamente eficientes, de baixo custo e por utilizarem materiais abundantes e de baixa toxicidade (IEEE, 2014). Além do baixo custo, possuem flexibilidade mecânica e baixo peso. Esta tecnologia emergente ainda está em fase de experimentação e sua participação no mercado é pouca ou quase inexistente, diferentemente das outras gerações a 3ª geração possui uma variedade de componentes que são utilizados para a fabricação das células em sua maioria sendo orgânicos e organometálicos (Ogbomo, 2017).

Um dispositivo fotovoltaico de terceira geração a absorção da luz ocorre pela camada de corante (ou sensibilizador) que captando-o os fótons transfere-os para a camada com o semicondutor, diferentemente de dispositivos de segunda e terceira geração onde o semicondutor é o responsável pela absorção da luz (Mello, 2016)

As primeiras células de terceira geração foram desenvolvidas em 1991 com o trabalho de Gratzel e O'Regan, uma célula de eficiência de 7,1% denominada células sensibilizadas por corantes (*Dye-sensitized solar cell –DSSC*), ao longo dos anos tem sido desenvolvida também as células sensibilizadas por pontos quânticos (*Quantum dot-sensitized solar cells –QSSC*), Células de Perovskita (*Perovskite Solar Cells - PSC*), e Células Orgânicas (*Organic Photovoltaic –OPV*).

#### **4.2.3.1 Células sensibilizadas por corantes – DSSC:**

O primórdio do desenvolvimento em células de terceira geração ocorre com o trabalho publicado por Gratzel e O'Regan (1991) que reportaram células fotovoltaicas de baixo custo com alta eficiência - 7,9% primeiramente e 11,9% segundo dados de Green et al (2014).

As células sensibilizadas por corantes ou DSSC é composta por um foto anodo de vidro transparente recoberto por um substrato condutor transparente de Óxido de Estanho (SnO) dopado com Flúor (*FTO – Fluoride doped Tin Oxide*), ou também dopado com Índio (*ITO – Indium doped Tin Oxide*) que são constituídos de nanopartículas com alta porosidade e área superficial, nas partes subsequentes é composta por uma fina de camada de nanopartículas de Dióxido de Titânio nanocristalino (*TiO<sub>2</sub>*) ao qual está sobreposta a uma camada de um material ativo denominado sensibilizador ou corante sensibilizador, é o elemento ativo oriundo de materiais orgânicos com diversas funcionalidade, dentre as mais importantes de melhorar a absorção de luz nos comprimentos de onda de 400nm a 800nm, aperfeiçoando o caminho óptico entre o sensibilizador e o semicondutor fazendo com a conversão da energia luminosa em eletricidade pela transferência de elétrons e também pela capacidade de gerar elétrons e transferi-los para a banda de condução do óxido condutor (Jesus et al, 2019). Para que os corantes sejam utilizados como sensibilizadores estes precisam possuir uma banda de condução superior a do semicondutor, a presença de grupos de ancoragem que se ligam fortemente ao semicondutor e

facilitam a injeção de elétrons para o semicondutor, sendo os mais comuns:  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $-\text{SO}_3\text{H}$ , entre outras, outro ponto importante é a presença de complexos metálicos a sua composição, são íons metálicos com características fotossensibilizantes possuidoras de pelo menos um grupo de ancoragem responsáveis pela absorção da luz na região do visível do espectro solar (Vitoriati et al,2017).Após as primeiras camadas há uma camada de eletrólito que é de um líquido não aquoso de acetonitrila com íons iodo em solução( $\text{CH}_3\text{CN}/3\text{-metil-2-oxazolidinona(NMO)}$ ) para fazer a regeneração do corante , o contra eletrodo funciona como um catalisador feito de platina ou outros materiais derivados de grafite formando um arranjo tipo sanduíche -  $\text{TiO}_3$  + corante, eletrólito e contra eletrodo (Ogbomo et al; Raphael et al ; Teixeira ; Mello). Fótons incididos sobre o dispositivo são absorvidos pelo corante passando para seu estado excitado, o corante passará os elétrons para o semicondutor ( $\text{TiO}_3$ ) se a energia for maior que a energia da banda de condução do semicondutor e possuir um bom alinhamento espacial da orbita para que o elétron chegue próximo a superfície dele, estes serão transferidos para o semicondutor que o carrearão por difusão para o foto anodo ao qual o coletando as cargas o jogará para o circuito externo (Mello , 2016).Após o transporte de cargas ocorre a oxidação do corante, este é regenerado pelos elétrons do eletrólito recebidos do contra eletrodo.

As células DSSCs é uma tecnologia de baixo custo e eficientes na conversão de energia solar, em função da fácil montagem e da variabilidade de materiais que podem ser utilizados na confecção das células resultou em um acelerado crescimento nas pesquisas para o aperfeiçoamento dessa tecnologia e adaptabilidade ao mercado como um possível substituto das células de primeira geração (Mello , 2016).Um dos pontos positivos é que o óxido de grafeno possui diversas aplicabilidades na indústria e é de fácil sintetização, ele apresenta excelente condutividade e de estabilidade química , o dióxido de titânio usado como semicondutor principal possui também excelentes propriedades de conversão de energia solar e apresenta boa absorção de luz solar na faixa do ultravioleta, possui três fases polimórficas (anatase rutilo e brookita) e a mais utilizada na confecção de células fotovoltaicas é conhecida como P25 ao qual possui as fases anatase e rutilo e por ser uma fonte barata de nanopartículas (Jesus et al,2019). Embora de fabricação simples e materiais de fácil acesso as células DSSC são sensíveis ao ar atmosférico, umidade e temperatura degradando-se rapidamente e por ações corrosivas, seu tempo de vida útil estimado é de 10 anos e por possuírem chumbo em sua composição caracterizam-se por serem tóxicos (Ogbomo, 2017). Porém a tecnologia dos DSSC's está em fase de experimentação e pesquisa para uma maior expansão e comercialização.

#### 4.2.3.2 Células sensibilizadas por pontos quânticos – QDSSC:

As QDSSCs surgiram como a tecnologia derivada da tecnologia DSSC, em que temos a substituição dos corantes por pontos quânticos semicondutores com o objetivo de aumentar a eficiência das células colares devido as suas propriedades optoeletrônicas, tais quais, um bandgap que varia em função do tamanho das nanopartículas, um elevado coeficiente de absorção, maior estabilidade da célula, e menor taxa de dissipação pois os semicondutores de pontos quânticos são confinados dentro de um volume reduzido, aumentando suas interações e a formação de éxcitons (pares de elétron-buraco)(Raphael et al; Vitoriati et al).

Em um dispositivo utilizando semicondutores de pontos quânticos o mecanismo de ação é semelhante ao das células DSSCs que quando são expostos à luz solar, os fótons são absorvidos pelos pontos quânticos que os transferem para a banda de condução do  $\text{TiO}_3$  em seguindo para o substrato de vidro condutor que gera corrente elétrica no circuito (Vitoriati et al, 2017). Essa transferência gera buracos no semicondutor quântico, ao qual é regenerado pelos elétrons do contra eletrodo (Raphael et al,2017).

Os pontos quânticos sensibilizadores possuem diâmetro variando de 1 a 10nm, os mais utilizados para as células DSSCs destacam-se o Seleneto de Cádmio (CdSe), Sulfeto de Cádmio (CdS), Sulfeto de Chumbo (PbS) e o Dissulfeto de cobre e Índio ( $\text{CuInS}_2$ ), as melhores eficiências são alcançadas nas células QDSSC que utilizam metais tóxicos como Cádmio e Chumbo(Vitoriati et al, 2017) que atualmente é de 11,3% (Green et al, 2021).Dentre as características que os diferenciam dos demais semicondutores destacando-se a fotoluminescência dependente do tamanho das partículas, ampla absorção de luz, alta intensidade de luminescência e boa estabilidade química (Vitoriati et al, 2017).

Inicialmente desenvolvidos em 1998 e com uma eficiência de 6%, uma célula de QDSSC possui a mesmas composição em camadas que uma célula de DSSC, um dos principais fatores para o sucesso operacional delas se dá ao eficiente transporte dos portadores de carga em relação ao eletrodo bem como a separação de carga entre o eletrólito e semicondutor. O eletrólito utilizado é o polissulfeto à base de sulfeto de sódio, as melhores eficiências relatadas empregam esse eletrólito combinado com  $\text{Cu}_2\text{S}$  em latão, e óxido de  $\text{Cu}_2\text{S}$  utilizando grafeno como contra eletrodo(Vitoriati et al, 2017).Poucas são seus limitantes entretanto o uso do eletrólito líquido podem gerar vazamentos oxidando materiais absorvedores de luz prejudicando a estabilidade das células, com o objetivo de solução desse problema a o eletrólito líquido foi substituído por materiais sólidos transportadores de buracos, HTM *–hole transporting material*, entretanto sua limitação é com relação a penetração na matriz do óxido semicondutor(Vitoriati et al).A tecnologia dos QDSSCs é recente, sendo uma promessa futura para a aplicação em sistemas solares, possuem mais pontos fortes do que limitações e a tecnologia das

nanopartículas é o principal responsável pelo seu sucesso. Existem várias configurações de dispositivos fotovoltaicos de pontos quânticos com os diversos materiais e novos vêm sendo estudados e reportados.

#### **4.2.3.3 Perovskita:**

As células desenvolvidas com perovskitas constituem em uma tecnologia chave para a produção de energia sustentável para os próximos anos, em uma combinação de alto poder de eficiência energética usando materiais de baixo custo (Saif et al, 2021). A Perovskita é um grupo de compostos de estrutura cristalina semelhantes a estrutura da perovskita mineral feito da combinação de cálcio, titânio e oxigênio na forma  $\text{CaTiO}_3$  (Ecicle ; Vitoriati et al) mas também podem conter diversos elementos tais como óxidos, nitretos, haletos e ternários sendo esse último possuidor de propriedades de magnetismo, supercondutividade e magnetorresistência (Teixeira, 2019) e sua disponibilidade no meio ambiente é abundante. É a nova tecnologia em crescimento, devido suas excelentes propriedades elétricas de ópticas, certificada pela primeira vez em 2012 com eficiência de 22,1% e em pouco tempo tem alcançado altos valores de PCE de 25,7% para células de junção simples, 28,0% para células de dupla junção e 29,8% para células conjuntas de perovskitas e silício e em termos de custos de fabricação as células fotovoltaicas de Perovskita é estimada como sendo a metade do custo das convencionais de primeira geração ( Zhang et al, 2022) devido ao fato de seu processo de fabricação não necessitar de nenhum equipamento sofisticado e processos relativamente simples, porém estas células são sensíveis as condições ambientais severas e sua estabilidade é afetada em condições de alta humidade e ao oxigênio degradando-se facilmente quando expostas devido a presença de um grupo higroscópico amina em sua estrutura molecular, por essa razão as células são fabricadas em ambientes com atmosfera e umidades controlados utilizando gases inertes evitando assim a sua degradação e obter melhores eficiências de conversão, outro degradante da perovskitas é a extração de elétrons de Iodo pela camada de  $\text{TiO}_3$  que causam a destruição da estrutura cristalina da Perovskita, como solução uma fina camada de sulfeto de antimônio foi depositada entre o  $\text{TiO}_3$  e a perovskitas para bloquear a reação entre o I e o  $\text{TiO}_3$  (Raphael et al, 2018). Perovskitas híbridas orgânicas-inorgânicas a base de haletos de chumbo são as mais utilizadas na formação de células fotovoltaicas, tendo como vantagem do chumbo o melhoramento da absorção da luz solar, em contrapartida o chumbo é um metal tóxico e seu descarte incorreto acarretam impactos negativos sobre o meio ambiente, mas pesquisas com objetivo de substituir o chumbo por outras substâncias não-tóxicas apontam possíveis substitutos, tais como o estanho e germânio, porém a estabilidade ainda é afetada e esses semicondutores são oxidados mais facilmente do que o chumbo (Raphael et al, 2018). Atualmente pesquisas estão sendo realizadas para melhorar a estabilidade das células de perovskitas, a redução da temperatura de processamento que permitirá o uso de diferentes substratos e a redução do custo do dispositivo e espera-se para os próximos anos significativos

progressos devido as suas semelhanças nas características com o silício sendo considerado um competidor a altura (Raphael, 2019).

#### **4.2.3.4 Células Orgânicas - OPV**

Desenvolvidas recentemente, essa tecnologia vem ganhando destaque por serem feitas de materiais orgânicos, tais como, polímeros condutores, fulerenos, ftalocianina de cobre, nanotubos de carbono, porfirinas, entre outras (Teixeira,2019; Alves, 2011).A classes dos polímeros, inicialmente conhecidas como isolantes revelaram-se com sendo condutores com diversas aplicabilidades (Alves, 2011) Seu processo de fabricação não requer a sistemas complexos como o vácuo, utilizam impressão de última geração em processo contínuo na confecção das células que caracterizam-se por serem flexíveis mecanicamente, semitransparentes e tem pouco impacto ambiental(Kumar & Kumar, 2017).As células orgânicas são compostas por camadas internas e externas em um tipo “sanduíche”: a parte interna possui um eletrodo transparente que funciona como absorvedor da luz incidente, após é a camada fotossensível que é o polímero condutor constitui a camada ativa da célula, as camadas externas são formadas por dois eletrodos condutores(Lourenço Junior et al, 2020).O composto mais utilizado para a confecção das células é o poli(3-hexiltiofeno) ou P3HT considerado um eficiente transportador de buracos e elevada mobilidade de cargas positivas, porém é necessário que ele seja de elevado grau de pureza. A maioria dos dispositivos são produzidos misturando os polímeros condutores na função de absorvedor de elétrons, doador e transportador de buracos e com derivados de fulerenos na função de transportador e receptor de elétrons(Alves, 2011).Células orgânicas tendem a diminuir a performance de operação com o passar dos anos, sendo esse um dos maiores desafios em melhoramento das tecnologias de terceira geração de painéis solares, isso acontece devido as falhas em um ou mais componentes dos painéis solares, podendo ser modificações químicas que estão associadas com as estruturas químicas das moléculas do material, as reações com outros materiais ou compostos que geram oxidações e quebras de ligações, ou podem ser mudanças físicas associadas a modificações estruturais, que ocorre na transformação da estrutura cristalina em amorfa prejudicando a propriedade de transporte de elétrons, no caso de um dispositivo com dois compostos semicondutores as estruturas se reorganizam havendo a separação de fases pelo agrupamento dos componentes individuais(Gevorgyanet et al, 2017), outro fator associado com as degradações dos componentes é a exposição as condições externas, ocasionando a penetração de oxigênio e água fazendo reduzindo a PCE do dispositivo (Kumar & Kumar, 2017). As formas de redução da estabilidade propostas por Gevorgyan et al (2017) está na otimização da arquitetura do dispositivo, melhorando pontos como espessura, ordem das camadas, proteção dos terminais e vedação da borda. Atualmente o mercado dos painéis solares orgânicos não é muito definido devido ao tempo de vida reduzidos dos painéis e a não padronização da arquitetura do dispositivo, o que ainda está sujeito a futuras pesquisas para um melhor desenvolvimento e expansão dessas células. A

PCE de células orgânicas é de 11% em dispositivos com heterojunções da mistura de polímeros conjugados e fulerenos solúveis.

### 4.3 Estudo da eficiência energética

A tabela abaixo faz uma relação das eficiências de conversão energética de todas as tecnologias mencionadas nesse trabalho a fim de compará-las. Segundo a discussão de Teixeira (2019) sobre os principais materiais alternativos ao silício para a produção de células fotovoltaicas nas dimensões ambientais, de eficiência e de custos a perovskitas possui potencial de conseguir eficiências mais altas e custos de produção mais baixos, sendo possível a substituição de painéis comerciais de silício futuramente. As demais células de terceira geração segundo ele possuem que também tem eficiência similar as células de primeira geração e potencialidade para a substituição, porém em um período mais longo dependendo se as eficiências de conversão de energia aumentarem. As células de segunda geração possuem ótima estabilidade a fatores climáticos, porém a indisponibilidade das matérias-primas (CIGS, CdTe e GaAs) inviabiliza a produção e comercialização (Kumar & Kumar, 2017).

**Tabela 1: Valores de eficiência energética (PCE) das células fotovoltaicas de 1ª, 2ª e 3ª geração**

	<b>Material</b>	<b>Eficiência Energética</b>	<b>Fonte</b>
<b>Tecnologias de Primeira Geração</b>	Silício monocristalino	26,7%	TEIXEIRA, 2019
	Silício policristalino	24,4%	TEIXEIRA, 2019
<b>Tecnologias de Segunda Geração</b>	Silício Amorfo	10,5%	Kumar &Kumar, 2017
	Silício micro/nanocristalino	8,5%	GOMES, 2009
	Silício hidrogenado	5,5%	GOMES, 2009
	Telureto de Cádmio (CdTe)	21%	GREEN et al, 2015
	Seleneto de Cu, In, Ga (CIGS)	6-16%	Kumar &Kumar, 2017
<b>Tecnologias de Terceira Geração</b>	Arseneto de Gálio (GaAs)	29%	GREEN et al, 2021
	Células Sensibilizadas por corantes (DSSC)	11,9%	GREEN et al, 2021
	Células Sensibilizadas por pontos quânticos (QDSSC)	11,3%	VITORIATI et al, 2017

Perovskita	25,7%	Zhang et al, 2021
Células (OPU) Orgânicas	15,5%	GREEN et al, 2021

**Tabela com os valores de eficiência energética (PCE) das células fotovoltaicas de 1ª, 2ª e 3ª geração**

#### **4.4 Análise da revisão e comparação do avanço tecnológico e do estudo da eficiência energética**

A crescente demanda energética mundial somada ao avanço no setor da indústria eletrônica nos possibilitou um grande avanço na construção de painéis solares de alta eficiência na conversão da energia do sol em energia elétrica, o silício é o material semicondutor mais empregado na confecção de células solares para painéis de captação, representando 85% do mercado, resultando em uma das matérias-primas básicas mais utilizadas nesse setor. Ele é usado em suas formas cristalinas (monocristalina e policristalina) e amorfa, as formas cristalinas caracterizam-se na primeira geração de células solares por terem sua estrutura cristalina bem definida e por possuírem uma maior PCE, entretanto seu processo de fabricação gera impactos ambientais negativos. Silva e colaboradores (2021) apontam os impactos gerados em toda a cadeia de uso do silício para a produção de células fotovoltaicas: Extração, Purificação do silício em grau eletrônico(99,9999%) e o uso de baterias nos sistemas fotovoltaicos, dentre os principais impactos gerados pela cadeia produtiva, podemos citar a redução da flora e fauna local decorrentes dos processos de garimpagem, a emissão de poluentes aos rios e na atmosfera de metais e compostos tóxicos nos processos de purificação do silício e também no processo de mineração, e por fim no uso das baterias dos sistemas fotovoltaicos, considerando que o tempo de vida do painel não é o mesmo que o da bateria, ao longo da vida útil de um sistema fotovoltaico as baterias deverão ser substituídas 10 vezes, porém o impacto negativo gerado pela troca de baterias está no descarte inapropriado das mesmas gerando contaminação do solo e dos lençóis freáticos. O silício amorfo é uma tecnologia mais viável economicamente para a produção de células fotovoltaicas, porém sua PCE é baixa tornando restrita a utilização dos painéis em pequena escala. Mediante a essa problemática, o principal objetivo desse trabalho foi fazer uma análise das tecnologias de 2ª e 3ª geração de células fotovoltaicas atualmente desenvolvidas ou em processo de aperfeiçoamento e compará-las em relação a tecnologia de 1ª geração.

As células de 2ª Geração foram desenvolvidas com o objetivo da diminuição da quantidade do semicondutor e uso de materiais de baixo custo tais como plásticos, cerâmicas e vidros, seu processo de fabricação também é economicamente viável não necessitando de processos sofisticados e caros sem dizer que o grau de impacto ao meio ambiente é pouco comparado as células de primeira geração. No

geral são células leves, flexíveis, versáteis e inquebráveis, outro ponto importante é o bom desempenho sob altas temperaturas e em locais de sombreamento, pois células de silício possuem desempenho inferior em condições de altas temperaturas e sombreamento. Embora sejam vantajosas seu PCE é inferior se comparada as células de silício e a natureza dos principais semicondutores utilizados são raras (Telúrio, Índio e Gálio) ou tóxicas (Cádmio e Arsênio) que muitas das vezes limitam a produção. A 3ª Geração é uma tecnologia ainda emergente e promissora, pois ela dispõem de uma gama diversificada de materiais que permitem um maior aproveitamento do espectro solar, seu mecanismo de captação de fótons é diferente das outras tecnologias e possuem PCE competitivo com a tecnologia do silício, porém o principal problema das células está na vida útil dos painéis, pois são sensíveis as condições de temperatura, umidade degradando-se facilmente devido à natureza do sensibilizador que são afetadas por ações corrosivas comprometendo assim a eficiência energética das células, também são economicamente viáveis a serem comercializadas, sendo que a natureza de seus principais componentes são abundantes. Até o presente momento podemos concluir que embora bem difundidas as tecnologias de segunda e terceira geração, ainda a tecnologia do silício é predominante no mercado, porém nada diz respeito que as demais tecnologias não podem ser futuramente comercializadas, apesar de ainda possuírem limitações que as impedem de serem difundidas no mercado atualmente e ademais aos avanços tecnológicos acredita-se tornarem-se competitivas futuramente.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Apesar dos avanços tecnológicos as células de primeira geração ainda é a tecnologia mais utilizada para a fabricação de painéis solares, mas isso está prestes a ser revertido graças aos avanços tecnológicos nas células de terceira geração que possuem potencial para ultrapassá-las em eficiência futuramente permitindo a comercialização de painéis mais baratos, eficientes e gerador de impactos positivos ao meio ambiente.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALMEIDA, E.; ROSA, A.C.; DIAS, F.C.L.S.; BRAZ, M.; LANA, L.T.C.; SANTO, O.C.E.; SACRAMENTO, T.C.B.: “Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica”.2016.

ALVES, J.P.C.: “Estudos fotofísicos e fotovoltaicos de sistemas polímero-fulereno e nanopartículas de CdSe”. Dissertação (Química Inorgânica) Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo, 2011.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Geração. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/matriz-eletrica-brasileira-cresce-mais-de-1-2-gw-em-agosto>.>. Acesso em: 24 de set. 2023.

“As mudanças climáticas”. WWF. Disponível em:<[https://www.wwf.org.br/natureza\\_brasileira/reducao\\_de\\_impactos2/clima/mudancas\\_climaticas2/](https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/reducao_de_impactos2/clima/mudancas_climaticas2/)>. Acesso em: 25 set. 2023.

“A história da energia no Brasil” Solled energia, 2022. Disponível em: <https://www.solledenergia.com.br/a-historia-da-energia-solar-no-brasil/>.

“A história da energia solar no Brasil” Òrigo energia, 2020. Disponível em: <https://origoenergia.com.br/blog/energia/a-historia-da-energia-solar-no-brasil/>.

BROUER, K.A; GRUPTA,C.; HONDA,S.; ZARGARIAN,M. “Methods and concerns for Disposal os Photovoltaic Solar Panels” 2011. 77f. Project Report (Master of Science in Engineering) - Department of General Engineering, San Jose State University, 2011.

CARVALHO, P.S.L.; MESQUITA, P.P.D.; ROCIO, M.A.R.: “A rota metalúrgica de produção de silício em grau solar: uma oportunidade para a industria brasileira?”. BNDS Setorial, ed40, p205-234, 2014).

CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA; CRESESB – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, RJ: Especial 2014.

“Célula fotovoltaica: o guia técnico absolutamente completo”. BlueSol –energia solar. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>. Acesso em: 2 de out de 2023.

“Como são feitas as placas de energia solar”. Solfácil, 2023. Disponível em: <https://blog.solfacil.com.br/energia-solar/como-sao-feitas-as-placas-de-energia-solar/>. Acesso em: 31 de julho de 2023.

“Como é feito um painel solar”. Minha casa solar, 2019. Disponível em:<<http://blog.minhacasasolar.com.br/como-e-feito-um-painel-solar/>>. Acesso em 31 de julho de 2023.

CRESESB –Centro de Referencia para as energias Solar e Eólica Sergio de S. Brito. Potencial Solar, 2023.

“Dados do mercado de energia solar no Brasil. Portal Solar. Disponível em:<<https://www.portalsolar.com.br/mercado-de-energia-solar-no-brasil.html>>. Acesso em 28 de Julho de 2022.

DS New Energy. Célula de GaAs. <https://pt.dsisolar.com/Content/uploads/2021377093/2021022011314295f3c318995049f6b997e4e9b21bf9b4.jpg>.

ELIAS, L.M.: ”Matriz energética brasileira: Impactos ambientais e a saúde”. Dissertação (Ciências Ambientais) -Universidade Católica de Goiás, Goiania, Goiás, 2009.

ELY, F.; SWART, J.W.:”Energia Solar Fotovoltaica de Terceira Geração”.Espaço IEEE. Disponível em: <https://www.ieee.org.br/wp-content/uploads/2014/05/energia-solar-fotovoltaica-terceira-geracao.pdf>. Acesso em 19 out 2023.

ETHW: “Russel Ohl: Biography”. Disponível em: [https://ethw.org/Russell\\_Ohl](https://ethw.org/Russell_Ohl).

“Filmes de CIGS: uma alternativa ao silício cristalino”. Canal Solar. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/filmes-finos-cigs-uma-alternativa-ao-silicio-cristalino/>. Acesso em 5 de out de 2023.

FTHENAKIS, V.M.: “Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe PV production”. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Ed.8 pg.303-334, 2004.

GEVORGYAN, S.A.;HECKLER, I.M.; BUNDGAARD, E.; CORAZZA, M.; HöSEL, M.; SøNDERGAARD, R.R.; BONATTO, G.A.R.; JORGENSEN, M.; KREBS, F.: “Improving, characterizing and predicting the lifetime of organic photovoltaics.”. Journal of Physics D: Applied Physics, vol50, 2017.

“Global Silicon Metal Market”. Mordor Intelligence. 2022. Disponível em > [https://samples.mordorintelligence.com/52840/Sample%20-%20Global%20Silicon%20Metal%20Market%20\(2023%20-%202028\)%20-%20Mordor%20Intelligence1676871394288.pdf](https://samples.mordorintelligence.com/52840/Sample%20-%20Global%20Silicon%20Metal%20Market%20(2023%20-%202028)%20-%20Mordor%20Intelligence1676871394288.pdf)>. Acessado em 15 de Junho de 2023.

GOMES, L.I.P.; “Células Solares semitransparentes de silício amorfo micro/nanocristalino”. Dissertação (mestrado em Engenharia dos Materiais)- Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2009.

GREEM, M.A. ;EMERY, K.; HISHIKAWA, Y.; WARTA, W.; DUNLOP, E.D.:”Solar cell efficiency tables(version 45)”. Progress in Photovolt: Research and Appl. 2015 ed.23, pg1-9.

GREEM, M.; DUMLOP, E.; HOHL-EBINGER, J.; YOSHITA, M.; KOPIDAKIS, N. HAO, X.: “ Solar cell efficiency tables (version 57)”. Progress in Photovolt Research Appl. 2021; 29: 3–15.

GUIMARÃES, G.R.: “Preparo e caracterização de Óxido de Zinco dopado com alumínio e hidrogênio para aplicações em células solares fotovoltaicas”. Dissertação (Engenharia de Superfícies) Rede Temática em Engenharia de Materiais. Ouro Preto- Minas Gerais, 2013.

“Histórico das células fotovoltaicas e a evolução na utilização de energia solar” .Revista Ambiente Brasil. Disponível em:< [https://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/energia\\_solar/historico\\_das\\_celulas\\_fotovoltaicas\\_e\\_a\\_evolucao\\_da\\_utilizacao\\_de\\_energia\\_solar.html](https://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/energia_solar/historico_das_celulas_fotovoltaicas_e_a_evolucao_da_utilizacao_de_energia_solar.html)>. Acesso em: 02 de Julho de 2022.

“Historia e origem da energia solar”. Portal Solar. Disponível em:< <https://www.portalsolar.com.br/noticias/materias/historia-e-origem-da-energia-solar>>. Acesso em 29 out 2023.

HiSoUR. Fotovoltaica de Telureto de Cádmio. <https://www.hisour.com/pt/cadmium-telluride-photovoltaics-39663/>.

IMHOFF, J. “Desenvolvimento de conversores estáticos para Sistemas Fotovoltaicos Autônomos” Dissertação de Mestrado -Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2007.

JESUS, A.S.; BORGES, K.C.M; SILVA, N.C.S.; RODRIGUES, M.H.M.; SANTOS, M.R.C.; GONÇALVES, R.F.; JÚNIOR, M.G.: “Produção de componentes de células fotovoltaicas sensibilizadas de baixo custo de 3ª Geração”. Revista Processos Químicos. Jul/Dez 2019.

JONES, G.; BOUAMANE, L.: “Power from Sunshine: A business history of solar energy.” Harvard Business School Working Paper. Nº12-105. Maio 2012.

KUMAR, M.; KUMAR, A.: “Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: A review” Science Direct: Renewables and Sustainable Energy Reviews. ed.78 -2017 pg.554-587.

LAGO, S.M.S.; DELABENETA, C.; “A produção científica brasileira sobre energia solar fotovoltaica no período de 2007 a 2017” Revista de Administração de Roraima -UFRR, Boa Vista. Vol 8 n.2 p416-441, Jul-Dez 2018.

LIMA, R.M.C.; MEDEIRO, R.A.; FONSECA, M.G. et. al. “Caracterização de células solares de filmes finos CIGS”. Revista Matéria, Suplemento, 2017.

LOURENÇO JUNIOR, O.D.; RAMONI, M.C.; MENEZES, L.C.W.; BAGNES, D.; ROMAN, L.S.: “Células solares orgânicas, a energia que vem dos polímeros”. Revista Virtual de Química, vol 12, ed. 3, pg583-597, 2020.

MELO, P.K.P; “Montagem e caracterização de células solares fotovoltaicas de TiO<sub>3</sub>” Dissertação de mestrado-Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

MESSENGER, R.; VENTRE, J. Photovoltaic Systems Engineering. Boca Raton: CRC. Press, 2010.

MORAES, C.: “Célula Solar Fotovoltaica: tudo o que você precisa saber”. Blog Eletrônica de Potência, 2020.

MORI, V.; SANTOS, R.L.; SOBRAL, L.G.S; “Metalurgia do silício; processos de obtenção e impactos ambientais” CETEM/MCT: Centro de Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro, 2007.

NASCIMENTO, C.A.; “Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica”. Monografia (Departamento de Engenharia) -Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2004.

OGBOMO, O.O.; AMALU, E.H.; EKERE, N.N.; OLAGBEGI, P.O.: “A review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate”. Science Direct: Renewables and Sustainable Energy Reviews. ed 75 -2017 pg1225-1238.

O'REGAN, B., GRATZEL, M. A: “ low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films”. *Nature* **353**, 737–740 (1991). <https://doi.org/10.1038/353737>. Acesso em 20 out 2023.

PEREIRA, E.B.; MARTINS, F.R.; DE ABREU, S.L.; RÜTHER, R.: “Atlas Brasileiro de energia solar, vol.1. São José dos Campos –INPE, 2006.

“Perovskita: promessa da tecnologia fotovoltaica”. ECycle. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/perovskita/>. Acesso em 19 out 2023.

“Portal Solar no Brasil” América do Sol. disponível em:><https://americadosol.org/potencial-solar-no-brasil/>>. Acesso em 28 de Julho de 2022.

”Primeira usina solar do Brasil: Usina de Tauá” 99energia, 2023. Disponível em: <https://99energia.com.br/novidade/primeira-usina-solar-do-brasil-usina-de-taua/>.

“Renewable capacity statistics 2023” IRENA: International Renewable Energy Agency. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2023/03/Irena-relatorio-energia-solar-mundo-2022-21-mar-2023.pdf>.

RAPHAEL, E.; SILVA, M.N.; SZOSTAK, R.; SCHIAVON, M.A.; NOGUEIRA, A.F.:”Células Solares de Perovskitas: uma nova tecnologia emergente”. Revista Química Nova. Vol.41, n1, pg 61-74, 2018.

ROMERO, O.J.; GARUZZI, R.P.; “Redução da espessura de filme na fabricação de células fotovoltaicas”. Ciência & Engenharia, v. 24, n.2, p. 75-84, jul. - dez. 2015.

SAIF, H.; HARO, M.; JUAREZ-PERES, E.J.; TAN, H.:”Degradation and stability of perovskite solar cells”. Communications materials. 2021.

“Silício” Infopédia. Disponível em <[https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/\\$silicio](https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/$silicio)>. Acessado em 14 de junho de 2023.

SILVA, G.S.; PENHA, L.S.; SANTOS, W.C.; “Produção de painéis fotovoltaicos: avaliação dos impactos causados, resíduos gerados e a importância do descarte correto.” Unidade da Serra –ES. Disponível em :<<https://dspace.doctum.edu.br/bitstream/123456789/4050/2/PRODU%C3%87%C3%83O%20DE%20PAIN%C3%89IS%20FOTOVOLTAICOS.pdf>>. Acesso em: 31 de julho de 2023.

SOUZA, J.: “Silício mono ou policristalino; quem vence o duelo?”. Canal Solar. Disponível em:< <https://canalsolar.com.br/silicio-mono-ou-policristalino-quem-vence-o-duelo/>>. Acesso em 18 de janeiro de 2024.

Solarbuy.com. Painéis de CIGS. <https://solarbuy.com/pt/solar-101/cigs-thin-film-solar-panels/>

TEIXEIRA, M.A.C.: “Perspectivas do potencial estratégico de novos materiais alternativos ao silício para a produção de células solares fotovoltaicas”. Dissertação de mestrado (Programa de mestrado em cidades inteligentes e sustentáveis)-Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2019.

U.S. Geological Survey, 2022, Mineral commodity summaries 2022: U.S. Geological Survey p. 150-151.

“Vantagens e Desvantagens das células de GaAs”. DS New Energy. Disponível em: <https://pt.dsisolar.com/info/advantages-and-disadvantages-of-gaas-solar-cel-54235649.html>. Acesso em 19 out 2023.

VILLALVA, M.; GAZOLI, J. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. São Paulo: Erica, 2ªed. Rev e atual p63-72. 2015.

VITORETI, A.B.F.; CORRÊA, L.B.; RAPHAEL, E.; PATROCINIO, A.O.T.; NOGEUIRA, A.F.; SCHIAVON, M.A.: “Células solares sensibilizadas por pontos quânticos”. Revista Química Nova. Vol.40, n4, pg436-446, 2017.

XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECANICA.1999, Águas de Lindóia, São Paulo. PIRES, J.C.S.; MEI, P.R.:“Otimização da purificação di silício via fusão em fornos de feixe de elétrons”.

WEBB, D.R.; SIPES, I.G, CARTER, D.E.:”In vitro solubility and in vivo toxicity of galliumarsenide”. Toxicol Appl Pharmacol 1984;76(1):96–104.

ZHANG,D.; LI, D.; HU,Y.; MEI,A.; HAN.H.:” Degradation pathways in perovskite solar cells ans how o meet international standards”. Commnications Materials. 2022.