

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS-UFAL**  
**CAMPUS ARAPIRACA**  
**FÍSICA - LICENCIATURA**

**JADIELSON FLORENTINO DA SILVA**

**ENERGIA SOLAR: UM BREVE ESTUDO DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS E O  
CRESCIMENTO DA ENERGIA SOLAR NO BRASIL**

**ARAPIRACA**  
**2023**

Jadielson Florentino da Silva

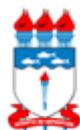
Energia solar: um breve estudo das células fotovoltaicas e o crescimento da energia solar no  
Brasil

Monografia apresentada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Licenciado em Física em Física -  
Licenciatura da Universidade Federal de Alagoas - UFAL,  
*Campus Arapiraca*.

Orientadora: Profa. Dra. Lidiane Maria Omena  
da Silva Leão

Arapiraca

2023



Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
*Campus Arapiraca*  
Biblioteca *Campus Arapiraca* - BCA

S586e Silva, Jadielson Florentino da  
Energia solar: um breve estudo das células fotovoltaicas e o crescimento da energia solar no Brasil / Jadielson Florentino da Silva. – Arapiraca, 2023.  
42 f.: il.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Lidiane Maria Omena da Silva Leão  
Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física.) - Universidade Federal de Alagoas, *Campus Arapiraca*, Arapiraca, 2023.  
Disponível em: Universidade Digital (UD) – UFAL (*Campus Arapiraca*).  
Referências: f. 41-42.

1. Células fotovoltaicas 2. Geração de energia fotovoltaica 3. Coletores solares  
4. Placas fotovoltaicas 5. Energia solar I. Leão, Lidiane Maria Omena da Silva II.  
Título.

CDU 57

JADIELSON FLORENTINO DA SILVA

Energia solar: Um breve estudo das células fotovoltaicas e o crescimento da energia solar no Brasil

Trabalho de conclusão de curso (tcc), apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau de Licenciado em Física pela Universidade Federal de Alagoas — Campus Arapiraca e aprovado em 27 de setembro de 2023.

**Banca examinadora**

Documento assinado digitalmente  
 LIDIANE MARIA OMENA DA SILVA LEAO  
Data: 28/09/2023 17:39:49-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lidiane Maria Omena da Silva Leão  
Universidade Federal de Alagoas  
Campus Arapiraca  
(Orientadora)

Documento assinado digitalmente  
 JOSE PEREIRA LEAO NETO  
Data: 29/09/2023 06:55:14-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. José Pereira Leão Neto  
Universidade Federal de Alagoas  
Campus Arapiraca  
(Examinador)

Documento assinado digitalmente  
 MORENO PEREIRA BONUTTI  
Data: 28/09/2023 19:13:48-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Moreno Pereira Bonutti  
Universidade Federal de Alagoas  
Campus Arapiraca  
(Examinador)

*A vida é como andando de bicicleta. Para manter o seu equilíbrio você deve manter em movimento - Albert Einstein*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela capacidade que me deu para não desistir do sonho de finalizar a graduação.

Dedico e Agradeço essa vitória a minha família com apoio e ter acreditado nos meus objetivos. Quero agradecer aos meus amigos Valter e Ulisses pelo apoio e participação me dando suporte no desenvolvimento do TCC e também agradecer aos amigos Lucas Santana, Henrique Almeida, Davi Cipriano, Jonas, Mateus Cleydson Darlan, Israel, Damião, Jucy , Rosiane, Maria Elielma, Maria Cicera e todos os outros amigos que deram apoio.

Agradecer também a todos os professores do curso de física e um agradecimento especial a professora Lidiane Omena pelas palavras de apoio e sempre aconselhar a me dedicar ao curso e buscar orientar da melhor forma e também por acreditar no desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho busca fazer um estudo sobre os tipos de células fotovoltaicas, com isso analisaremos como são formados e constituídos essas células fotovoltaicas que são de grande importância para a constituição dos módulos fotovoltaicos, pois é a parte principal na obtenção de energia através da radiação solar. Analisaremos também no estudo que tipos de materiais são utilizados para formar as células fotovoltaicas e conseqüentemente veremos um estudo sobre a física envolvida, ou seja, como ocorre o processo de transformação de radiação solar em energia e também veremos quais os benefícios que pode trazer com essa forma de geração de energia através da fonte solar que é uma das fontes renováveis no qual vem crescendo no Brasil. Este trabalho tem como base uma revisão bibliográfica com a utilização de livros, artigos e outras biografias.

**Palavras-chave:** células fotovoltaicas; energia; placas fotovoltaicas.

## **ABSTRACT**

This work seeks to study the types of photovoltaic cells, with this we will analyze how these photovoltaic cells are formed and constituted, which are of great importance for the constitution of photovoltaic modules, since it is the main part in obtaining energy through solar radiation. We will also analyze in the study what types of materials are used to form photovoltaic cells and consequently we will see a study on the physics involved, that is, how the process of transforming solar radiation into energy occurs and also see what benefits it can bring with this form of energy generation through the solar source which is one of the renewable sources in which it has been growing in Brazil. This work is based on a bibliographic review with the use of books, articles and other biographies.

**Keywords:** photovoltaic cells; energy; photovoltaic plates.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos energias renováveis no mundo . . . . .	12
Figura 2 – Junção P-N estabilizada . . . . .	16
Figura 3 – Corte transversal de uma célula fotoelétrica mostrando a junção P-N . . . . .	16
Figura 4 – Lingote de silício monocristalino . . . . .	18
Figura 5 – Célula fotovoltaica monocristalino . . . . .	18
Figura 6 – Lingote de silício policristalino . . . . .	19
Figura 7 – Célula de silício policristalino . . . . .	20
Figura 8 – Da esquerda para a direita: célula fotovoltaica filme fino silício amorfo, CIGS e CdTe . . . . .	21
Figura 9 – Célula Híbrida . . . . .	23
Figura 10 – Painel solar orgânico . . . . .	24
Figura 11 – Bandas de condução e valência em materiais condutores, semicondutores e isolantes . . . . .	27
Figura 12 – Substituição de um átomo de silício por um átomo de fósforo (cuja valência é 5)	28
Figura 13 – Substituição de um átomo de silício por um átomo de alumínio (cuja valência é 3) . . . . .	28
Figura 14 – Junção P-N . . . . .	29
Figura 15 – Experimento de dupla fenda . . . . .	31
Figura 16 – Efeito fotoelétrico . . . . .	32
Figura 17 – Geração elétrica por fonte no Brasil (GWh) . . . . .	35
Figura 18 – Localização da área de estudo . . . . .	36
Figura 19 – Imagens da Miniusina Solar da UFAL . . . . .	37

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Nome</b>	<b>Unidade (S.I.)</b>
$\vec{E}$	Campo elétrico	$N/C$
$\vec{B}$	Campo magnético	$T$
$V$	Potencial elétrico	$V$
$P$	Potência elétrica	$W$
$K$	Energia cinética	$J$
$E_e$	Energia elétrica	$GWh$
$h$	Constante de Planck	$J \cdot s$
$f$	Frequência	$Hz$
$\rho$	Densidade de carga	$C/m$
$\vec{J}$	Densidade de corrente elétrica	$A/m^2$
$\epsilon_0$	Permissividade elétrica no vácuo	$C^2/Nm^2$
$\mu_0$	Permeabilidade magnética no vácuo	$N/A$

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AS	Arsênio
A-SI	Silício Amorfo
CU	Cobre
CD	Cádmio
CdTe	Telureto de Cádmio
CIS	Deceleneto de Cobre e Índio
CIGS	Disseleneto de cobre, índio e gálio
GA	Gálio
GAAS	Arseneto de Gálio
GEE	Gases do efeito estufa
HIT	Junção heterogênea com camada fina intrínseca
HCI	Células de heterojunção com camada intrínseca
IN	Índio
M-SI	Silício Monocristalino
OPV	Células fotovoltaicas orgânicas
P-SI	Silício policristalino
P3HT	Poli 3-Hexiltiofeno

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>TIPOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA</b> . . . . .	<b>11</b>
2.1	AS ENERGIAS RENOVÁVEIS . . . . .	11
2.1.1	Energia Solar . . . . .	12
2.1.2	Energia Eólica . . . . .	12
2.1.3	Biomassa . . . . .	13
2.1.4	Hidráulica . . . . .	13
<b>3</b>	<b>ESTRUTURA DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS</b> . . . . .	<b>14</b>
3.1	FUNCIONAMENTO DAS CÉLULAS SOLARES . . . . .	14
3.2	TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS . . . . .	16
3.2.1	As tecnologias das células de primeira geração . . . . .	17
3.2.2	As tecnologias das células de segunda geração . . . . .	20
3.3	As tecnologias das células de terceira geração . . . . .	22
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DA FÍSICA ENVOLVIDA NAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS</b>	<b>26</b>
4.1	CONDUTORES, ISOLANTES E SEMICONDUTORES . . . . .	26
4.2	SEMICONDUTORES DOPADOS . . . . .	27
4.3	UM ESTUDO SOBRE A LUZ . . . . .	29
<b>5</b>	<b>GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR NO BRASIL NOS ÚLTIMOS ANOS</b>	<b>33</b>
5.1	REGIÃO NORDESTE E O SEU POTENCIAL PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA . . . . .	36
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>38</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>40</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No estudo elaborado buscamos analisar de forma simples e direta vários fatores relacionados às células fotovoltaicas que são os constituintes dos módulos ou placas fotovoltaicas, como se sabe o Brasil é um país que é propício para a geração de energia solar. Inicialmente discutiremos sobre os tipos de energia que são consideradas renováveis e entre estas encontra-se a energia solar. Consequentemente iremos abordar e discutir a formação, constituição e materiais utilizados nas células fotovoltaicas e aborda de forma teórica a física envolvida no processo de conversão de radiação em energia. Discutiremos também a física que está relacionada aos materiais semicondutores que são os intermediários entre os materiais condutores e isolantes. Estudar também o comportamento das ondas que são importantes, pois só a conversão devido a luz, ou seja, a radiação solar que pode ser interpretada de forma dual.

Buscamos com este trabalho abordar um breve estudo sobre os tipos de células fotovoltaicas analisando as gerações de células e focando nas células de primeira e segunda geração e também com uma simples análise da terceira geração, iremos buscar discutir sobre o crescimento da energia solar no Brasil.

## 2 TIPOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA

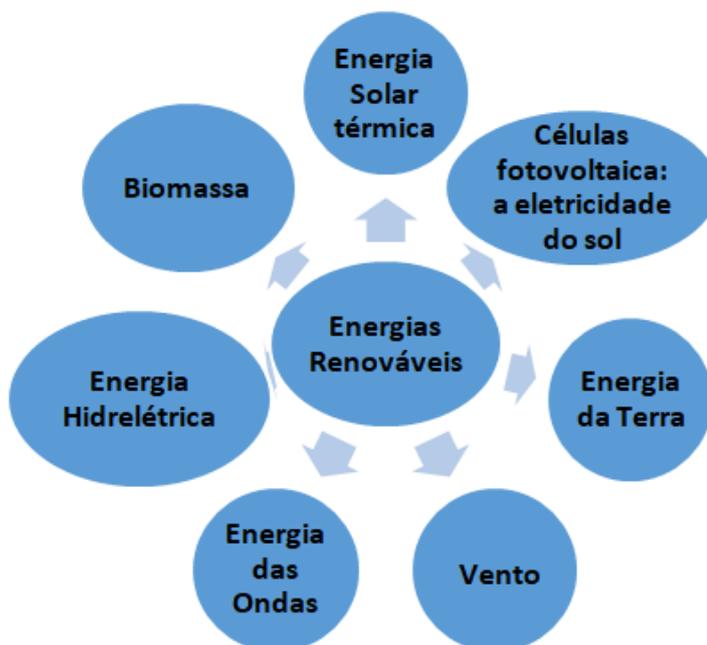
Atualmente o uso de energia na sociedade é muito importante para as necessidades dos seres humanos, tanto no trabalho, em casa ou seja no cotidiano. Mas as formas de obtenção de energia na maioria das vezes prejudica bastante o meio ambiente, podemos citar como exemplo o efeito estufa que aumenta a temperatura da terra. Hoje as formas de obtenção de energia são classificadas de duas maneiras: em renováveis e não-renováveis. As renováveis são aquelas energias no qual se renovam diariamente, diferentemente das não-renováveis que chegam a se esgotar e são derivadas de combustíveis fósseis como petróleo, carvão ou gás. As fontes de energias renováveis que vamos citar serão a solar, hidráulica, biomassa, eólica e etc. Já as não renováveis petróleo, gás natural , carvão e nuclear.

### 2.1 AS ENERGIAS RENOVÁVEIS

Nos dias atuais as fontes renováveis oriundas devido a sua regeneração cotidiana, ou seja se renovam todos os dias estão sendo usados como fonte de geração de energia como no presente muitos problemas estão sendo causados pelas fontes que são esgotáveis, problemas ambientais que trazem consequências sociais para as pessoas e todo o planeta, ao modo que a sociedade agride o planeta com a produção de energia não-renovável expelindo gás carbônico o planeta responde aos seus habitantes em geral com o aquecimento global principalmente aquecendo o terra e trazendo transtornos climáticos.

As energias renováveis surgem como saída e com alternativas de viver bem na inter-relação com o sistema econômico como um todo, além da necessidade de substituir a energia suja pela energia limpa (renovável) sem proporcionar uma redução no crescimento econômico, e sim agregar alternativas para crescer, desenvolver e sustentar a economia, o social e o ambiente simultaneamente (VIEIRA, 2021). A utilização excessiva de energia obtida pela queima de combustíveis fósseis pela sociedade moderna é um dos fatores apontados como fator determinante para a alteração da temperatura do planeta que traz como consequência alterações na natureza decorrentes da poluição de gás carbônico na atmosfera terrestre.

Figura 1 – Tipos energias renováveis no mundo



Fonte: Lovins e Cohen (2013)

### 2.1.1 Energia Solar

A energia solar é uma das principais fontes renováveis, pois a radiação solar é uma fonte que se renova cotidianamente e isso faz tornar uma grande fonte de geração de energia que pode e vem trazendo benefícios para a sociedade. É uma energia totalmente limpa e renovável que é uma enorme vantagem (FERREIRA et al., 2018). Dentro da categoria da geração das fontes renováveis, encontra-se a energia solar fotovoltaica, que utiliza células fotovoltaicas para obter energia convertendo radiação solar.

Atualmente com o crescimento da população tem como consequência um consumo maior de energia, hoje é possível ver em todas as grandes cidades a construção de grandes supermercados, prédios e residências ou seja a sociedade cresce constantemente elevando o consumo energético e com isso o agravamento climático, pois o crescimento das cidades e da sociedade aumente consideravelmente o aumento da poluição e do aquecimento global, devido a utilização de fonte não-renováveis. Desta forma surge como solução a utilização das fontes renováveis como a solar que vem crescendo nos dias atuais. Cada vez mais é necessário o desenvolvimento de fontes de energia limpa e sustentável, com isso a energia solar é uma alternativa bem sucedida neste quesito.

### 2.1.2 Energia Eólica

Uma outra fonte que é utilizada para a geração de energia elétrica e a eólica, está também é uma fonte renovável do qual provém do vento em que converte a energia cinética do vento em energia elétrica, desde os tempos da antiguidade essa forma de gerar energia é utilizada

como por exemplo para a navegação ou para funcionar moinhos e nos dias atuais sua produção está ganhando espaço devido ao fato de ser uma fonte renovável que não libera gás carbônico na atmosfera. De acordo com Silva, dentre as fontes energéticas que não acarretam a emissão de gases do efeito estufa (GEE) - a energia mecânica contida no vento vem se destacando e demonstrando potencial para contribuir significativamente no entendimento dos requisitos necessários quanto aos custos de produção, segurança de fornecimento e sustentabilidade do meio ambiente (SILVA et al., 2020).

A obtenção de energia elétrica está relacionada a energia transferida que vai depender da área de varrimento do rotor, da velocidade do vento e da densidade do ar. Segundo Melo, energia cinética contida nas massas de ar, que é captada pelas hélices ligadas à uma turbina que aciona o gerador (MELO, 2017).

### 2.1.3 Biomassa

São várias as formas de obtenção de energia de formato renovável, podemos citar também a Biomassa que é uma forma de obter energia através da queima de matéria orgânica. Para a geração de energia elétrica nessa fonte é necessário a queima fazendo o aproveitamento de serragem, lixo comercial e industrial, outro material orgânico muito utilizado e o bagaço da cana de açúcar.

O bagaço da cana de açúcar tem sido utilizado não só para a geração de energia elétrica, mas também para a produção de biocombustíveis, tais como etanol e o biodiesel. Essa forma de geração de energia é considerada limpa pois é menos poluente e além disso a cana de açúcar pode ser replantada a cada ano isso a torna uma fonte renovável mesmo com sua total utilização é possível replantar ou seja pode renovar a plantação e com isto trazendo benefícios para o planeta e para a sociedade pois sua utilização gera menos impactos ambientais.

### 2.1.4 Hidráulica

A energia produzida pelas hidrelétricas é devido a força do movimento das águas. A conversão para energia elétrica ocorre quando a ação da água causa uma rotação da turbina hidráulica é desta forma produzindo eletricidade. As hidroelétricas são as principais formas de geração de energia elétrica no Brasil, pois possuem grandes quedas de água sendo privilegiadas.

Apesar das hidrelétricas serem fontes renováveis devido a utilização da água para a geração de energia esse tipo de geração não poluidora, ou seja não contribui com a disseminação de gases poluentes na atmosfera. Mas apesar de ser renovável e não liberar gás carbônico, a obtenção através dessa fonte acaba trazendo algumas consequências para a vegetação natural como o assoreamento do leito dos rios, a extinção de espécies de peixes, além dos impactos sociais que pode causar a população que vive próximo ao local.

### 3 ESTRUTURA DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Inicialmente para entender o funcionamento dos módulos solares é preciso entender como e a estrutura dos módulos, quais os seus componentes e materiais utilizados e desta forma iniciar o estudo e busca explorar o funcionamento, os módulos solares ou fotovoltaicas são essencialmente formado por materiais semicondutores que não são nem materiais condutores e isolantes são intermediários. Conhecer como são formados e estruturados é o primeiro passo para entender como é transformar a energia proveniente do sol em energia elétrica.

A conversão da energia solar em energia elétrica é realizada através do efeito fotovoltaico é observado por Edmond Becquerel em 1839. Foi observado uma diferença de potencial nas extremidades de uma estrutura semicondutora, incide uma luz sobre ela. Impulsionadas pelas novas descobertas da microeletrônica, em 1956 foram construídas as primeiras as primeiras células fotovoltaicas industriais (NASCIMENTO, 2004). A célula fotovoltaica é um dispositivo elétrico de estado sólido que tem a capacidade de converter a luz diretamente em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. Os conjuntos de células solares utilizados na captura da energia da luz são conhecidos como painéis solares (BEIGELMAN, 2013).

O material semicondutor, e o material no qual ocorre o efeito fotovoltaico, ou seja, conduz eletricidade de forma mais efetiva que os isolantes e menos efetiva que os condutores. Este material é caracterizado pela presença de faixas de energia em que permite a presença de elétrons, denominada banda de valência e outra completamente vazia denominada banda de condução. Entre estas duas bandas existe um gap, conhecido como faixa proibida ou intervalo de energia, que determina se o material é um condutor, semicondutor ou isolante (BEIGELMAN, 2013).

Um módulo fotovoltaico é constituído de um conjunto de células montadas sobre uma estrutura rígida e conectadas eletricamente. Normalmente as células são conectadas eletricamente em série para produzir tensões maiores (VILLALVA, 1983). Ele é uma combinação de duas placas de semicondutores dopados, uma dopagem tipo N (com excesso de elétron) e outra com dopagem tipo P (com excesso de barracos). Essa combinação de semicondutores dopados é chamada de junção P/N, devido a diferença de sinais, a junção gera um movimento das cargas entre as placas (CORREIA, 2019).

Dando prosseguimento ao estudo da célula fotovoltaica vamos analisar o conjunto que é formado pelo semicondutor do tipo P e o semicondutor do tipo N que essa formação é fundamental para analisarmos o processo de transformação da energia solar em elétrica ou seja a transformação da energia luminosa em energia elétrica, simplesmente o efeito fotovoltaico. Uma célula fotovoltaica é composta tipicamente pela junção de duas camadas de material semicondutor, uma do tipo P e outra do tipo N (VILLALVA, 1983).

#### 3.1 FUNCIONAMENTO DAS CÉLULAS SOLARES

Buscar analisar o processo de geração ou seja de converter a energia solar diretamente em energia elétrica é fundamental, pois no presente existe um crescimento e necessidade de obter

energia para a sociedade, buscar outras fontes como a solar e também garantir a sobrevivência das gerações futuras e com isso diversificar as formas de produzir e energia, saber como ocorre o processo de conversão é um fator importante, mas também analisar que a física está presente também nesse processo desta forma buscamos compreender e analisar a forma de obtenção. A conversão direta da luz em energia elétrica através do efeito fotovoltaico é denominada energia solar fotovoltaica. O efeito fotovoltaico foi relatado primeiramente em 1839 pelo físico francês Edmond Becquerel, que observou o surgimento de uma diferença de potencial nas extremidades de uma material semicondutor quando exposto à luz (COOPER et al., 2013).

As primeiras experiências com dispositivos fotovoltaicos remontam ao ano de 1839, com a descoberta por Becquerel, um físico e cientistas francês, de uma tensão elétrica resultante da ação da luz sobre um eletrodo metálico imerso em uma solução química. Em 1877, Adams e Day, cientistas ingleses observaram um efeito similar ao sólido, outro tipo de semicondutor. Posteriormente diversas experiências similares foram desenvolvidas por cientistas em todo o mundo, até que em 1905 o efeito fotoelétrico, que estreita relação com o efeito fotovoltaico, foi explicado por Albert Einstein, cientista nascido na Alemanha, em pesquisa que lhe rendeu o prêmio Nobel (VILLALVA, 1983). Em 1883 a célula fotovoltaica foi produzida com selênio, porém esta célula tinha eficiência de conversão de apenas 1% para que o efeito fotovoltaico se tornasse mais compreendido, foi necessário o estudo mais aprofundado com relação a junção do estado sólido (ALVES, 2019).

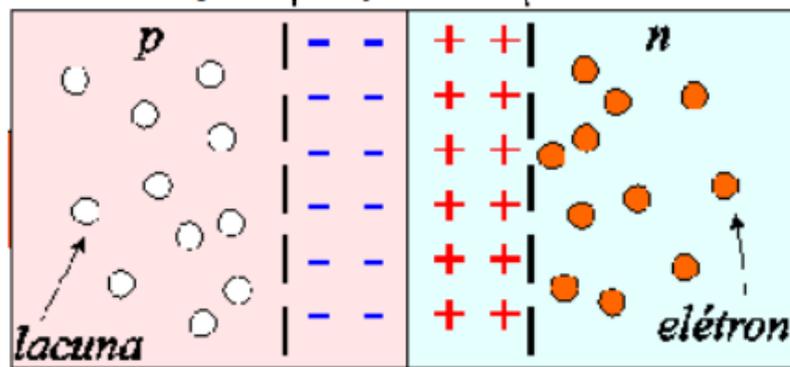
O efeito fotovoltaico é descrito como sendo a criação de uma tensão ou corrente elétrica em um material quando este se encontra exposto à luz solar todavia este fenômeno apenas pode ocorrer se a radiação eletromagnética incidente no material possui intensidade energética equivalente ou superior a energia de valência. Com resultado, os elétrons que absorvem esta energia ficaram excitados e libertaram-se da camada de valência (SILVA, 2014). O efeito fotovoltaico é a base para os sistemas de energia limpa, a radiação eletromagnética do sol é transformada em energia elétrica através de uma diferença de potencial de uma célula formada por materiais semicondutores, a estrutura da célula fotovoltaica é formada por uma camada N e outra P (LINO et al., 2021).

Cada célula fotovoltaica compõe-se de uma camada fina de material tipo N e outra tipo P. Separadamente ambos os corpos são eletricamente neutros, mas ao serem unidos, na região P-N, forma-se um campo elétrico devido aos elétrons livres do silício tipo N que ocupam os vazios da estrutura do silício tipo P. Ao incidir luz sobre as células fotovoltaicas, os fótons chocam-se com os elétrons da estrutura do silício fornecendo-lhes energia e transformando-os em condutores. Devido ao campo elétrico pela junção P-N, os elétrons são orientados e fluem da camada P para a camada N (NASCIMENTO, 2004).

Compreender o comportamento dos elétrons na junção P-N é fundamental para entender o processo de como estes se deslocam de uma camada para outra, segundo Correia, essa combinação de semicondutores dopados é chamada de junção P-N, devido a diferença de sinais, elétrons da junção tipo (N) irão se fundir com os buracos próximos da Junção P (CORREIA, 2019).

Quando um elétron aniquila um buraco, a placa tipo (N) fica carregada positivamente e a placa tipo P fica carregada negativamente, quanto mais aniquilações acontecem mais carregadas as placas ficam, resultando na criação de um campo elétrico que estabiliza o movimento das cargas (CORREIA, 2019).

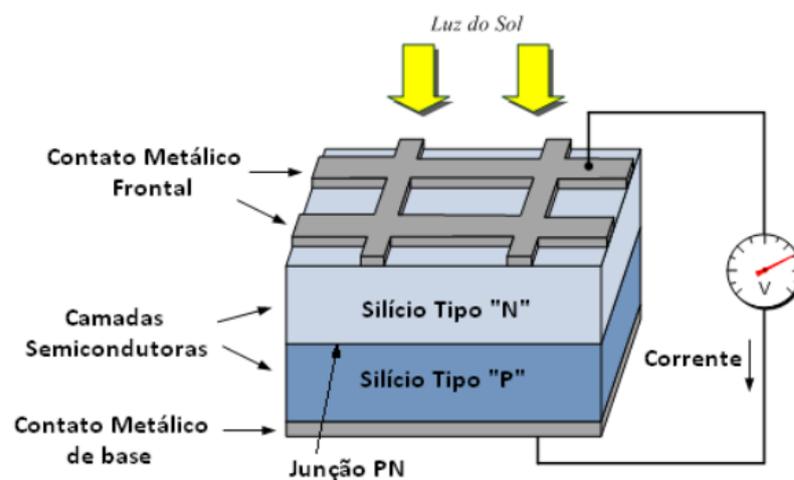
Figura 2 – Junção P-N estabilizada



Fonte: Correia (2019)

Por meio de um condutor externo, ligando a camada negativa à positiva, gera-se um fluxo de elétrons (corrente elétrica). Enquanto a luz incide na célula o fluxo de elétrons se mantém. Uma célula fotovoltaica não armazena energia elétrica, apenas mantém um fluxo de elétrons estabelecidos num circuito elétrico enquanto houver incidência de luz sobre ela. Este fenômeno é denominado "efeito fotovoltaico"(NASCIMENTO, 2004).

Figura 3 – Corte transversal de uma célula fotoelétrica mostrando a junção P-N



Fonte: Almeida (2011)

### 3.2 TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Atualmente existem vários tipos de células fotovoltaicas, essas células são que constituem as placas solares fotovoltaicas ou módulos fotovoltaicos. As diferentes formas de tecnologias

fotovoltaicas apresentam algumas particularidades que podem influenciar no desempenho energético, ou seja, as diferentes características dos materiais semicondutores que formam as células fotovoltaicas diferenciam a cristalinidade, a absorção da radiação e etc. Agora vamos distinguir as principais tecnologias de geração de células fotovoltaicas com intuito de analisar a evolução dos tipos de células. De acordo com Teixeira, em virtude da abundância de energia, a estrutura das células fotovoltaicas e a melhora da eficiência energética são alvos de estudos científicos contínuos na transformação da energia solar (TEIXEIRA et al., 2019).

### 3.2.1 As tecnologias das células de primeira geração

As tecnologias relacionadas às células de primeira geração são na maioria representadas pela constituição de silício essas células têm sua produção inicialmente nos anos 50 e ainda são tecnologias com muita participação no mercado devido a um baixo custo de produção e uma tecnologia muito eficiente na conversão de energia. As principais formas dessa tecnologia de primeira geração podem ser classificadas como:

- Monocristalino (m - si)

Começando o estudo sobre as células fotovoltaicas, iremos fazer uma análise sobre a fabricação das células de silício Monocristalino (m - si) que tem como utilização para formar essa célula o cristal de silício. De acordo com Lazzarin, essas células normalmente são mais eficientes, porém mais caras quando comparadas com outras células (LAZZARIN, 2023). No processo para a Produção das células Monocristalinos e preciso inicialmente produzir o lingote de silício Monocristalino, como é utilizado o silício monocristalino, pois quando aquecido em altas temperaturas e seguidamente passa por um processo de formação de cristal nesse processo é chamado especificamente de *czochralski*, no qual tem como a finalidade a Produção do lingote de silício Monocristalino. O lingote do tipo de silício Monocristalino é constituído de uma estrutura cristalina única e possui organização molecular homogênea, o que lhe confere aspecto brilhante e uniforme (VILLALVA, 1983).

Figura 4 – Lingote de silício monocristalino



Fonte: Lino (2021)

O lingote é utilizado para produzir wafers, estes wafers são as finas bolachas de silício puro que são obtidas após serem serradas e fatiadas. Mas com a obtenção dos wafers estes ainda não possuem impurezas, ou seja, ainda não se caracteriza uma célula fotovoltaica. A constituição para a formação e o funcionamento das células é preciso utilizar os wafers para serem submetidos a processos químicos, com relação a ambas as faces dos *wafers*, esse processo químico tem como objetivo a introdução de impurezas e com isso após a introdução das impurezas temos a configuração de uma célula fotovoltaica com as camadas tipo p e tipo N. Para complementar os *wafers* após o adicionamento das impurezas as células recebem películas metálicas na estrutura das faces, grade metálica e uma camada de material anti reflexo na face que a luz está incidindo e como resultado temos a célula fotovoltaica monocristalina.

Figura 5 – Célula fotovoltaica monocristalino



Fonte: Lino (2021)

- Células de silício policristalino ( p-si)

Para a formação das células de silício policristalino é utilizado o lingote mas nesse caso o lingote policristalino, de acordo com Villalva o lingote de silício policristalino é formado por um aglomerado de pequenos cristais, com tamanhos e orientações diferentes (VILLALVA, 1983).

Figura 6 – Lingote de silício policristalino



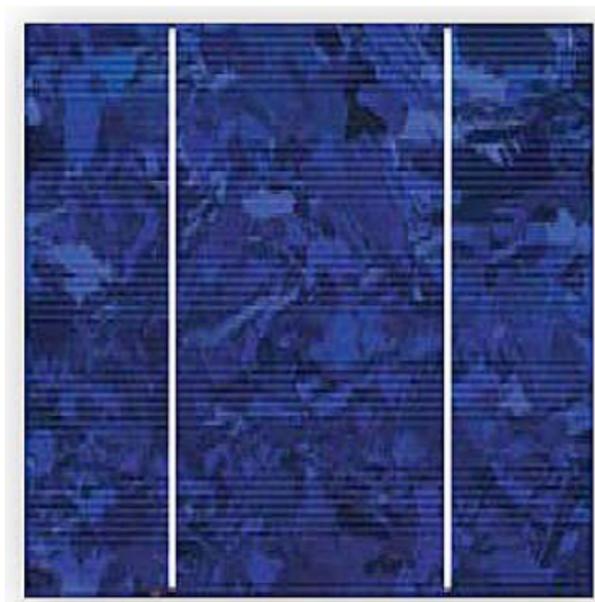
Fonte: Lino (2021)

Este lingote também passa por um processo natural no qual é serrado, com isso é possível adquirir os wafers que conseqüentemente serão utilizados para formar as células fotovoltaicas. Segundo Villalva são células rígidas e quebradiças que precisam ser montadas em módulos para adquirir resistência mecânica (VILLALVA, 1983).

As células de silício policristalino, também conhecido como silício multicristalino, são mais baratas quando comparadas com as de silício Monocristalino pelo fato de exigirem um processo menos rigoroso de preparação das células (BEIGELMAN, 2013). As células de silício policristalino possuem menos eficiência, porém são mais baratas quando comparadas a outras tecnologias, devido à perfeição cristalina ser menor que no caso do silício silício Monocristalino e o processo geralmente ser mais simples (LAZZARIN, 2023).

O lingote de silício policristalino será fatiado e após esse processo segue para se tornar uma célula fotovoltaica, visivelmente vemos que a estrutura desse lingote diferencia do Monocristalino, possui aparência heterogênea e geralmente serão de cor azulada, mas semelhante ao Monocristalino sua cor pode sofrer variações dependendo do tratamento antirreflexo que receberá a luz solar.

Figura 7 – Célula de silício policristalino



Fonte: Lino (2021)

### 3.2.2 As tecnologias das células de segunda geração

As células de segunda geração são chamadas de filmes finos que são fabricadas pela aplicação de várias camadas de película fina de material fotovoltaico devido a isto o nome *The film* (filme fino).

- Filmes finos

A tecnologia de filmes finos tem como principal diferença na sua constituição não são formados por lingotes de silício, como as células de silício, de acordo com Villalva, os dispositivos de filmes finos são fabricados através da deposição de finas camadas de materiais (silício e outros) sobre uma base que pode ser rígida ou flexível (VILLALVA, 1983). Segundo Marco, essas células de filme fino, fabricadas depositando-se uma camada fina de materiais semicondutores diretamente em um substrato, oferecem a possibilidade de produção de painéis solares leves e flexíveis (MARCO et al., 2023).

Com isso um dos fatores importantes e com relação ao custo de produção dessa tecnologia, pois na obtenção dos filmes finos é possível evitar desperdícios por causa que não ocorre o processo de serragem dos wafers cristalinos, essa tecnologia consome também menos energia para sua fabricação. Segundo Lazzarin, uma vantagem é que dispositivos de filmes finos requerem pouca quantidade de material para a fabricação das células e podem ser facilmente aplicados em grandes áreas (LAZZARIN, 2023).

As células de filmes finos podem ser classificadas da seguinte forma: as células de silício Amorfo (a-si), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS), células de telureto de cádmio (cdte) e a célula de arsenieto de gálio (gaAS).

- Silício amorfo

Os módulos de filmes finos de silício Amorfo foi o primeiro do tipo da tecnologia de filmes finos desenvolvida, segundo Lazzarin, as células de silício Amorfo (a-si) apresentam menos eficiência que as células de silício policristalino, mas podem competir para Produção em larga escala (LAZZARIN, 2023).

A célula de silício Amorfo se diferencia das demais estruturas cristalinas pelo fato de apresentar um alto grau de desordem na estrutura dos átomos. A utilização de silício Amorfo para a fabricação das células fotovoltaicas apresenta grandes vantagens tanto no processo de fabricação quanto nas propriedades elétricas (BEIGELMAN, 2013). Fazendo uma análise geral sobre as células de silício Amorfo podem ter algumas vantagens e desvantagens, entre as vantagens podem ser citadas o baixo custo dos materiais empregados na fabricação das células, são células leves e flexíveis e as suas características estéticas possibilitam diversidade de uso da tecnologia, com relação às desvantagens podem ser citadas principalmente e com relação a degradação de eficiência quando em situações severas de clima, temperatura e também baixa eficiência se comparada a outras tecnologias.

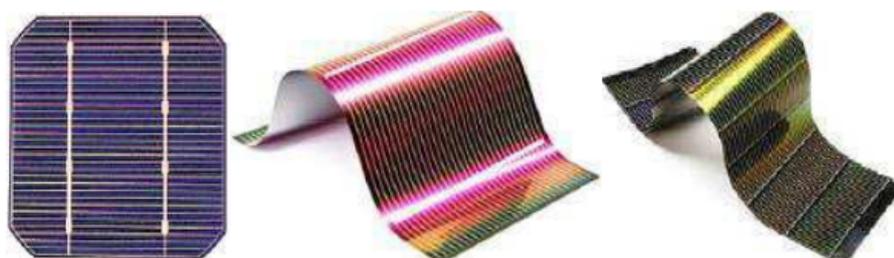
- Células de Disseleneto de cobre, índio (CIS) e gálio ( CIGS)

Para a formação das células de Disseleneto de cobre e índio também conhecidas como (CIS) são compostas pelos elementos químicos índio (In), cobre (cu) e selênio que são elementos naturais e quimicamente muito estáveis e com a utilização desse conjunto e possível obter uma composição com propriedades semicondutoras que adquire uma capacidade de absorção de radiação solar. Já as células CIGS são formadas pela adição de gálio nas células de disseleneto de cobre de índio.

- Células de telureto de cádmio (Cdte)

As células de telureto de cádmio ou também conhecidas como (cdte) também compõem as células de filmes finos. Segundo Villalva as células de cdte enfrentam problemas para sua Produção em larga escala, pois o cádmio (cd) e material tóxico e o Telúrio (te) e um material raro, que não é encontrado em abundância (VILLALVA, 1983). De acordo com Marco, o telureto de cádmio é um material semicondutor composto por cádmio e Telúrio (MARCO et al., 2023).

Figura 8 – Da esquerda para a direita: célula fotovoltaica filme fino silício amorfo, CIGS e CdTe



Fonte: Ortega (2013)

As células de (cdte) apresentam um alto índice de toxicidade, com isso é um fator importante que se leva em consideração quanto a sua utilização é ainda mais com relação a sua expansão produção. As células de tecnologia (cdte) possuem algumas características importantes, como características bem próximas do ideal na utilização para a Produção de energia solar e uma tecnologia promissora devido às suas características, além disso os módulos de (cdte) são flexíveis e com boas características estéticas.

- Célula de arsenieto de gálio (GaAs)

As células da tecnologia fotovoltaica de filme formada por arseneto de gálio também são conhecidas de filmes finos de arseneto de gálio. O arseneto de gálio é composto com propriedades semicondutoras e sua composição é constituída pelos elementos gálio (Ga) e arsênio (As). Essa combinação dos dois elementos gera um elemento tóxico mais importante para a Produção de energia elétrica que é convertida pela incidência de luz solar. Essa constituição dos elementos de Gálio (Ga) e arsênio (As), tem algumas propriedades importantes como não possuir grande sensibilidade a incidência de calor, com isso não perde suas características condutividade em altas temperaturas. Com o (GaAs) pode incorporar outros elementos como por exemplo o (índio, fósforo e etc) e desta forma busca conseguir elementos compostos com características que possa melhorar quantidade de cargas próximas às junções e também os (GaAs) possuem uma elevação no grau de absorção de radiação solar.

As células de GaAS podem assumir algumas vantagens e desvantagens, com relação às vantagens podemos citar a flexibilidade da confecção destas células, as propriedades para a conversão de energia são próximas do ideal e além disso possui baixas perdas de energia devido a temperatura. Com relação às desvantagens e que essas células possuem alto custo de produção, raridade dos materiais utilizados para a obtenção da célula e a principal desvantagem é com a toxicidade da GaAS.

### 3.3 As tecnologias das células de terceira geração

A terceira geração das células são formadas pelas células PERC, células híbridas, células de *perovskita*, células orgânicas e células sensibilizadas por corantes.

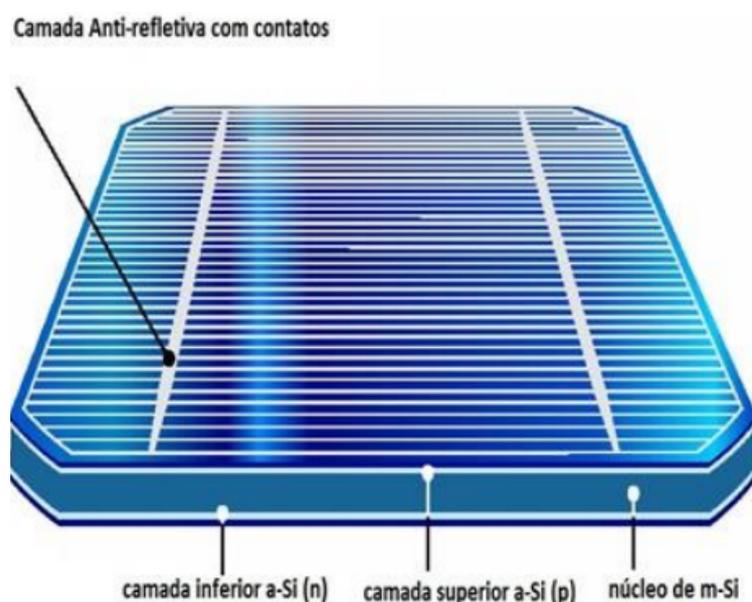
- Células PERC

As células PERC são compostas por células de silício Monocristalino ou policristalino no qual são adicionadas camadas de passivação na parte posterior, com isso essas células são capazes de aumentar a sua eficiência. Segundo Góes e Tanimoto, esse ganho de eficiência promove , ainda, outras vantagens secundárias: Necessidade de menos módulos e conseqüentemente, menor área, menor número de estruturas de fixação (GÓES; TANIMOTO, 2021). Outras características das células de PERC são que estas demonstram um melhor desempenho em elevadas temperaturas e também nas condições em que ocorre baixa incidência.

- Células híbridas

As células híbridas são células de junção heterogênea com camada fina intrínseca chamada também de HIT podem ser conhecidas como sendo células de heterojunção com camada intrínseca ou seja as (HCI). Essas células HIT/HCI são compostas de c-si, com uma determinada película fina. A estruturação dessas células está associada com o silício m-si e a-si em conjunto com uma camada intrínseca. Esta combinação tem como resultado uma pastilha de m-si, no qual possui um revestimento em seus lados de uma fina camada de silício a-si a camada do meio ou seja a intermediária coloca-se uma película ultra fina de silício. Segundo Lazzarin, na camada intermediária é inserida uma película ultrafina (intrínseca) de silício de alta pureza que liga a pastilha cristalina (núcleo) a cada uma das camadas de silício (LAZZARIN, 2023).

Figura 9 – Célula Híbrida



Fonte: Lazzarin (2023)

- Células de *Perovskita*

A produção das células solares de perovskita tem como base os haletos orgânico-inorgânicos, essas células utilizam materiais de baixo custo no qual contribui de forma direta para uma maior desenvolvimento e crescimento desse tipo de célula para a formação de módulos fotovoltaicos para a geração de energia. Segundo Cardozo, as células solares de perovskita são fortes candidatas para a próxima geração de células fotovoltaicas que serão amplamente utilizadas no mercado de energia solar (CARDOZO, 2023).

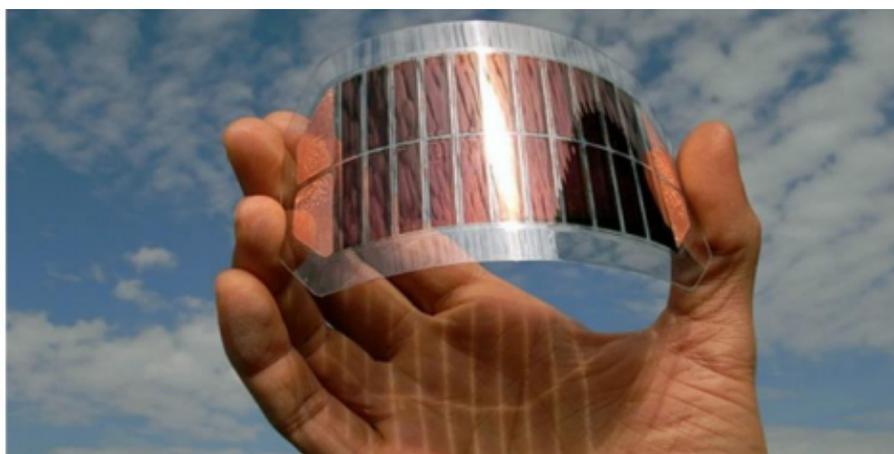
A célula solar de perovskita pode ser do tipo de haleto metilamônio de chumbo, são formados este tipo de material no qual tem propriedades de absorção com relação às regiões do visível do espectro solar. De acordo com Cardozo, dentre as perovskitas mais utilizadas estão perovskita de chumbo ou estanho e as híbridas orgânicas - inorgânicas (CARDOZO, 2023).

- Células fotovoltaicas orgânicas (OPV)

As células fotovoltaicas orgânicas também conhecidas como (OPV) tem em sua composição um conjunto de materiais fotoativos que estão distribuídos entre dois eletrodos. O material fotoativo tem como função absorver fótons. De maneira geral, a estrutura de uma OPV consiste em um eletrodo transparente, em que geralmente são utilizados lâminas de vidro, como substrato recobertos com um filme fino de óxido de estanho dopado com flúor (FTO) ou óxido de índio dopado com estanho (CREMASCO et al., 2022).

As células orgânicas são formadas pela junção de duas camadas principais, onde ocorre o efeito fotovoltaico. Uma tem a função de doar elétrons e normalmente se utiliza polímeros conjugados, como o poli (3-hexiltiofeno) também conhecido como P3HT (MACHADO; MIRANDA, 2015). A composição dessas células é formada por materiais orgânicos e polímeros, com isso, essas células apresentam algumas vantagens. Segundo Góes, são células compostas, que apresentam muitas vantagens como: baixo custo de fabricação, flexibilidade, baixo peso, utiliza materiais abundantes, atóxicos e se baseia em um processo de produção bastante reproduzível e com alta reprodutividade de impressão de células fotovoltaicas orgânicas em substrato leve, flexível e transparente (GÓES; TANIMOTO, 2021).

Figura 10 – Painel solar orgânico



Fonte: Itsolar (2019)

Estas células fotovoltaicas orgânicas devido a sua estrutura pode ampliar suas aplicações, de acordo com Goés, essas qualidades permitem que a tecnologia tenha ampla aplicação, como em dispositivos móveis (carregadores de bateria de celulares, relógios, rádios, lanterna, laptops), por serem extremamente flexíveis, é possível dobrá-los, enrolá-los e até guardá-los após o uso. Com essa tecnologia é possível ver muitas avanços com pontos positivos, pois são mais flexíveis e leves proporcionando ampliar seu uso, mas também possui desvantagens que, segundo Góes, entretanto, as principais desvantagens estão na baixa eficiência e baixo tempo de vida (cerca de 7 anos) devido a instabilidade (GÓES; TANIMOTO, 2021).

- Célula solar sensibilizada por corante (DYE - *SENSITIZED SOLAR CELL*- DSSC)

As células sensibilizadas por corantes são estruturadas e baseadas com nanocristais que possuem propriedades semicondutoras, no qual estes são formados pela composição entre um ânodo fotossensibilizador e um eletrólito. Os nanocristais são importantes para a captação de luz solar, segundo Goés, os nanocristais de corante atuam na separação das cargas para a geração fotocorrente. Essas células de (DSSC) são uma tecnologia promissora com relação a obtenção de materiais, mas possuem algumas desvantagens, de acordo com Goés as células DSSC podem degradar facilmente com a luz solar é a possibilidade de congelamento de eletrólito líquido usado dificulta a aplicação em locais com temperatura mais baixas (GÓES; TANIMOTO, 2021).

- Células de pontos quânticos

Na classificação das células de terceira geração existe mais uma no qual é conhecida como células de pontos quânticos, está podem ser diferenciadas das outras células de terceira geração, pois estas utilizam quantum dots que são nanocristais semicondutores, de acordo com Machado, são nanocristais semicondutores com tamanho reduzido o suficiente para apresentar propriedades quânticas (MACHADO; MIRANDA, 2015).

As células de pontos quânticos podem possuir subdivisões, ou seja existem ramificações com relação a sua constituição, segundo Machado, se subdividem em três tipos a) Metal semicondutor (ou junção *schottky*); B) células orgânicas; C) *quantum dots sensitized solar cells*.

## 4 ANÁLISE DA FÍSICA ENVOLVIDA NAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Como foi realizada uma análise da estrutura das células fotovoltaicas voltadas, nesta seção será direcionado para uma revisão dos conceitos físicos envolvidos ou seja uma discussão abrangente para entender a importância da física na conversão da energia solar em elétrica.

### 4.1 CONDUTORES, ISOLANTES E SEMICONDUTORES

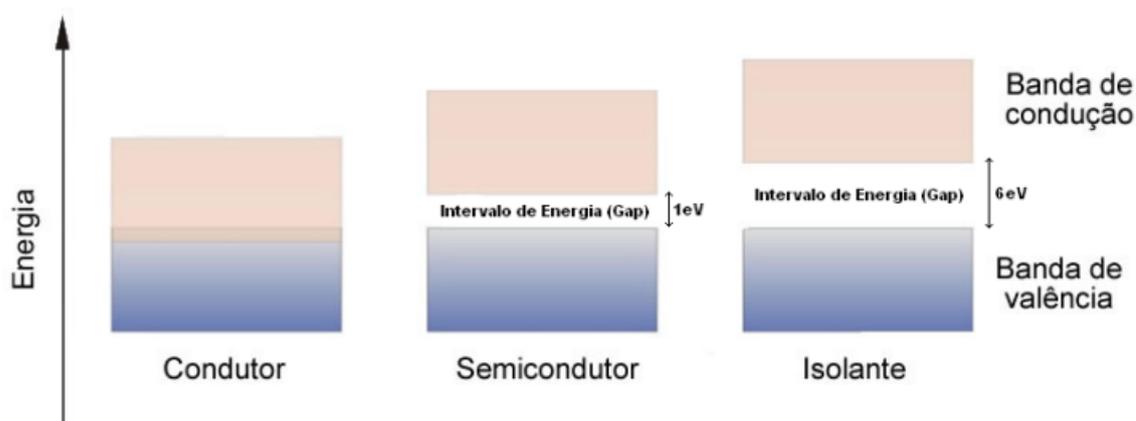
Inicialmente vamos fazer uma dos tipos de substâncias nas quais estas diferenciam-se, devido a aplicação de uma diferença de potencial podem produzir uma corrente elétrica mais facilmente, estando relacionado com as bandas de energia que determinam se um material é semicondutor, isolante ou condutor. Nos isolantes possuem bandas de energia na parte mais elevada estão preenchidas essa região é chamada de banda de valência e a banda de energia mais elevada onde existem elétrons. Diferentemente da banda que é a mais elevada seguinte no qual é chamada de banda de condução está está e completamente vazia desta forma não existem elétrons em seus Estados. Dizemos que uma substância é isolante se a aplicação de uma diferença de potencial a substância não produz uma corrente elétrica (HALLIDAY, 2009).

Agora como os metais são diferentes dos isolantes, pois quando aplicado uma diferença de potencial produz uma corrente elétrica. Desta forma é possível compreender por que alguns materiais são isolantes e outros condutores. O que define um metal é que o nível de energia mais alto ocupado pelos elétrons está no meio de uma banda de energias permitidas (HALLIDAY, 2009).

Quando a banda de valência está apenas parcialmente preenchida existem muitos de vazios de energia na banda de condução, e os elétrons dessa banda podem facilmente se mover para um estado de energia mais alto através de um campo elétrico, assim esse material é um condutor. Se a banda de valência está preenchida e existe uma grande distância entre ela e a próxima banda disponível, um campo elétrico típico aplicado não será suficientemente forte para excitar um elétron dos níveis de energia mais altos de uma banda preenchida para uma banda vazia, atravessando a grande distância existente entre os níveis, logo o material é um isolante (TIPLER, 2006).

Estudando os semicondutores vamos fazer uma análise sobre a estrutura e entender que os semicondutores têm uma resistividade elétrica que o faz está entre um Intermédio de um material condutor e o material isolante. Buscar entender a estrutura dos semicondutores é importante para o estudo dos módulos fotovoltaicos, estes são somente umas das aplicações, os semicondutores têm uma vasta ramificações principalmente na eletrônica moderna. A figura abaixo mostra as estruturas dos semicondutores.

Figura 11 – Bandas de condução e valência em materiais condutores, semicondutores e isolantes



Fonte: Beigelman (2013)

Vimos que a estrutura de bandas de um semicondutor é parecida com a de um isolante; A diferença é que os semicondutores a distância  $E_g$  entre o nível mais alto da última camada (a banda de valência) e o nível mais baixo da primeira banda de desocupada (a banda de condução) é muito menor que nos isolantes (HALLIDAY, 2009).

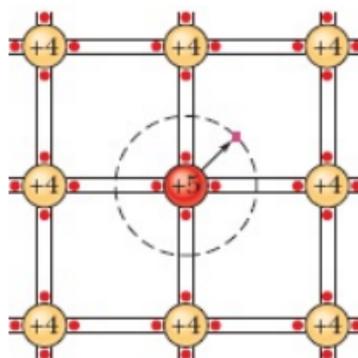
## 4.2 SEMICONDUTORES DOPADOS

Os semicondutores são os materiais nos quais têm propriedades parecidas com isolantes e condutores, estão entre um intermédio. Os semicondutores dopados são aqueles no qual são introduzidos impurezas em sua estrutura, devido a este processo de dopagem podem existir ou classificar esses semicondutores dopados em dois tipos, os do tipo N e o tipo P.

- Semicondutores do tipo N

Considerando um material semicondutor formado por silício, lembrando que o silício possui somente 4 elétrons na camada de valência. Quando é introduzido um átomo de fósforo no qual possuem cinco elétrons na camada de valência é colocado na estrutura do silício. Quatro dos elétrons de valência do fósforo formam ligações covalentes com quatro átomos vizinhos de silício. O quinto elétron não forma nenhuma ligação e fica francamente ligado ao núcleo de fósforo (HALLIDAY, 2009). A imagem abaixo representa a estrutura do silício puro e seguidamente a estrutura após a introdução de impurezas. A figura abaixo indica a estrutura de silício com a introdução de impurezas.

Figura 12 – Substituição de um átomo de silício por um átomo de fósforo (cuja valência é 5)



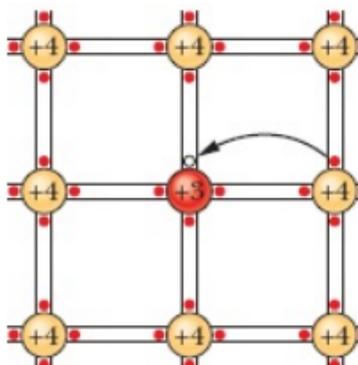
Fonte: Halliday *et al* (2009)

O fósforo é tratado como um átomo que tem a função de doar elétrons, por isso o fósforo é chamado de átomo doador. Os semicondutores dopados com átomos doadores são chamados semicondutores do tipo N; o N vem do negativo, para indicar que os portadores de carga negativos (elétrons) da banda de condução (elétrons já existentes mais elétrons provenientes dos átomos doadores) são mais numerosos que os buracos da banda de valência (HALLIDAY, 2009).

- Semicondutores do tipo P

Agora, analisando o silício quando na sua estrutura, agora é introduzido um átomo de alumínio que possui três elétrons em sua estrutura, diferentemente do silício que é composto por quatro elétrons na estrutura. Assim após a introdução do átomo de alumínio estes podem fazer ligações covalentes com três átomos de silício, desta forma existe um buraco na estrutura das ligações covalentes alumínio-silício.

Figura 13 – Substituição de um átomo de silício por um átomo de alumínio (cuja valência é 3)



Fonte: Halliday *et al* (2009)

Esses semicondutores como o silício que recebe a dopagem de um elemento como o alumínio é chamado de semicondutor do tipo P. Os semicondutores dopados com átomos aceitadores são chamados semicondutores do tipo P; o P vem de positivo, para indicar que

os portadores de cargas positivas (buracos) da banda de valência (buracos já existentes mais barracos criados pelos átomos aceitadores) são mais numerosos que os elétrons da banda de condução (HALLIDAY, 2009).

- Junção P-N

Após um estudo sobre os semicondutores e o processo de dopagem foi possível determinar dois tipos de semicondutores dopados: os do tipo N com excesso de elétrons livres e os do tipo P com falta de elétrons contendo barracos na sua estrutura. A partir desse estudo será possível começar a entender a formação da junção P-N, junção que é de grande importância no processo de transformação no processo de transformação de energia da radiação solar em elétrica de forma direta.

A junção P-N é formada pelo conjunto de dois semicondutores dopados, os do tipo P e os do tipo N. A junção P-N em um cristal semiconductor que foi dopado em uma região com impurezas doadoras e em uma região vizinha com uma impureza aceitadora. Essa junção p-n é fundamental para a utilização não somente para obtenção de energia, mas também para a utilização de dispositivos da eletrônica contemporânea, atualmente a utilização de muitos outros dispositivos que são formados pela junção P-N, ou seja dispositivos semicondutores como o Diodo, transistores e circuitos integrados e etc (HALLIDAY, 2009).

Figura 14 – Junção P-N



Fonte: Halliday *et al* (2009)

#### 4.3 UM ESTUDO SOBRE A LUZ

Na física um tema importante é o estudo da luz e das ondas eletromagnéticas as ondas tem como característica o transporte de energia é momento. Hoje já sabemos que o estudo da luz é fundamental para compreender alguns fenômenos da física e para isso é preciso entender o seu comportamento como uma onda e como fóton, ou seja entender esse comportamento dual da luz é necessário, pois entender o processo de obtenção de energia elétrica através da radiação.

- A luz como onda

O estudo da luz tem grandes físicos envolvidos, eles estão Isaac Newton, que trouxe contribuições, Newton acreditava no comportamento corpuscular da luz, ou seja compreendia que a luz tinha natureza material. Até a época de Isaac Newton (1642-1727), a maioria dos cientistas imaginava que a luz fosse constituída por um feixe de minúsculas partículas (chamados de corpúsculos) emitidos por fontes de luz (YOUNG, 2008).

Um outro cientista chamado James Clerk Maxwell desenvolveu o estudo relacionado aos fenômenos elétricos e magnéticos. Maxwell usou essa teoria sobre os fenômenos elétricos e magnéticos no qual descreve a sua teoria com base em quatro equações, o conjunto dessas equações ficou conhecida como as equações de Maxwell. Maxwell unificou o eletromagnetismo através das seguintes leis : A Lei de Gauss para a eletrostática, lei de Gauss para o magnetismo, lei de Ampere-Maxwell e a lei de Faraday para a indução eletromagnética. As equações a seguir sintetizam todos os conceitos do eletromagnetismo.

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (3)$$

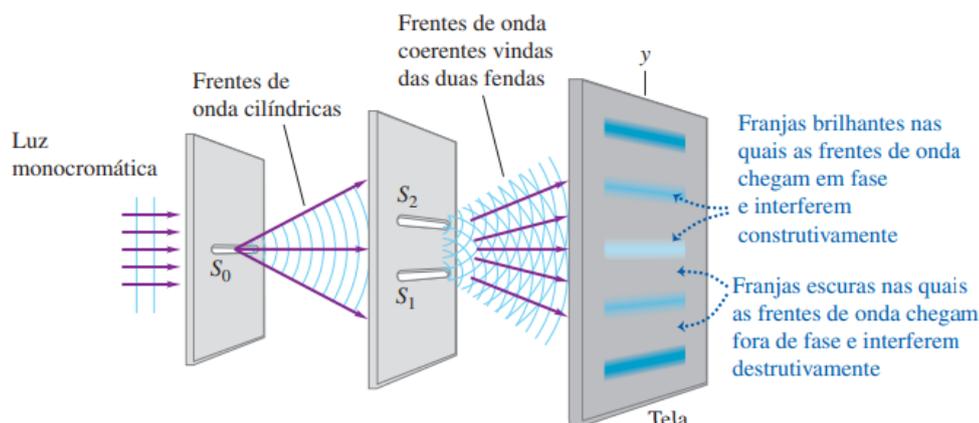
$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \quad (4)$$

Com o seu estudo baseado nas quatro equações fundamentais do eletromagnetismo, Maxwell provou que os campos elétricos e os campos magnéticos oscilam perpendicularmente entre eles, assim Maxwell estabeleceu o comportamento das campos elétricos e magnéticos sendo uma onda eletromagnética mais especificamente era luz tinha o comportamento ondulatório. A equação mostrada a seguir é a equação da onda eletromagnética em uma dimensão em termos de campo elétrico.

$$\frac{\partial^2 E(x, t)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 E(x, t)}{\partial x^2}. \quad (5)$$

Outros cientistas como Christian Huygens, Thomas Young também estudaram a luz e comprovaram o seu comportamento ondulatório. Young conseguiu comprovar o comportamento ondulatório da luz através do experimento de dupla fenda. No seu experimento young usou uma fonte de luz monocromática no qual iluminou uma uma fenda em um anteparo, conseqüentemente após a luz passar pelo anteparo sofre difração ou seja ocorre um alargamento de um feixe de luz ao passar pela fenda, após a passagem a luz se espalha incidindo sobre um segundo anteparo que contém duas fendas e desta forma ocorre outro processo de difração, após essa nova difração duas ondas esféricas se propagam simultaneamente e utilizando um anteparo e observado listras com regiões que são chamadas de franjas claras e outras regiões escuras onde as ondas se cancelam (sofrem interferência) que são denominados franjas escuras. Em 1801, Thomas Young provou experimentalmente que a luz é uma onda, ao contrário do que pensavam muitos cientistas da época. O que o cientista fez foi demonstrar que a luz sofre interferência como as ondas do mar, as ondas sonoras e os outros tipos de ondas (HALLIDAY, 2009).

Figura 15 – Experimento de dupla fenda



Fonte: Young *et al* (2016)

- A luz como partícula

A teoria corpuscular da luz foi confirmada por Albert Einstein através do efeito fotoelétrico, mas o efeito foi observado inicialmente por Heinrich Hertz que trabalhando com Experimentos de ondas eletromagnéticas no qual tinha luz incidente sobre uma superfície metálica, Hertz observou que alguns elétrons escapavam do metal, Hertz não conseguiu explicar esse fenômeno. Outro indício sobre a teoria corpuscular da luz foi realizado por Planck, mas não confirmada pois não tinha certeza sobre a sua teoria de quantização. Planck considerou que a luz deveria ser quantizada em valores discretos de energia  $K = hf$ . Ele imaginava que ela fosse apenas um artifício de cálculo, não uma hipótese fundamental. Em uma carta a um amigo, Plank disse que era apenas um ato de desespero no qual ele foi forçado porque uma explicação teórica deveria ser encontrada a qualquer preço. A descrição do fenômeno observado por Hertz foi explicada por Albert Einstein que postulou a luz sendo quantidades discretas de energia. A análise correta do efeito fotoelétrico foi feita por Albert Einstein em 1905 desenvolvendo uma hipótese apresentada apresentada cinco anos antes por Max Planck, Einstein postulou que um feixe de luz era constituído por pequenos pacotes de energia chamados de fótons ou quantas (YOUNG, 2008). A equação a seguir mostra justamente o que Planck postulou:

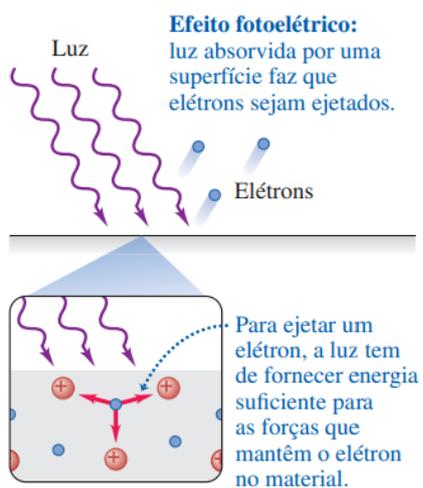
$$K = hf = \frac{hc}{\lambda}. \quad (6)$$

O efeito fotoelétrico é visualizado quando ao incidir radiação sobre uma superfície e observa-se elétrons sendo emitidos desta superfície e a única explicação para esse fenômeno era através da ideia de quantização de e energia de planck. Um fóton que atinge uma superfície é absorvido por um elétron. Essa transferência de energia é um processo do tipo tudo ou nada, ou seja, o elétron ganha a energia total do fóton ou não absorve nenhuma; isso contraria o princípio de transferência de energia física clássica. Quando essa energia é maior do que a função trabalho, o elétron pode escapar da superfície.

$$K = hf - \Phi. \quad (7)$$

Em que  $h$  é a constante de Planck,  $f$  é a frequência e  $\Phi$  é chamada de função trabalho.

Figura 16 – Efeito fotoelétrico



Fonte: Young *et al* (2016)

## 5 GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR NO BRASIL NOS ÚLTIMOS ANOS

A energia solar também também é considerada uma energia primária, atualmente a obtenção da energia elétrica através da radiação solar cresce no Brasil mesmo tendo como principal fonte de geração as hidrelétricas. Mesmo assim, a produção solar está ganhando cada vez mais espaço, segundo Vieira, o crescimento rápido das energias renováveis vem difundido cada vez mais em empresas públicas e particulares, famílias e comunidades como o mundo todo (VIEIRA, 2021).

Neste momento o Brasil é um país privilegiado no qual se vê o crescimento de fontes primárias e renováveis crescendo e se desenvolvendo cada vez mais. O Brasil apresenta no momento um cenário ideal para implementação de novas fontes energéticas; isso devido principalmente ao tradicional modelo de geração de energia que se utiliza basicamente as hidrelétricas e termelétricas (ROCHA; RODRIGUES, 2019).

A utilização da energia solar no Brasil ganha com alguns benefícios tanto socioeconômicos, ambientais e estratégicos. Socioeconômico devido a produção de solar elétrica aumentar pode reduzir gastos com energia para as empresas, governos e principalmente para a população e com isso trazendo economia para a sociedade. Os benefícios ambientais provocados pela energia fotovoltaica e com relação de ser uma energia limpa, sustentável e renovável desta forma e menos emissão de gases que contribuem para o efeito estufa ocasionando menos impacto ao meio ambiente. Com isso vamos focar no estudo da geração de energia através da radiação solar esta fonte primária e uma alternativa para a população brasileira como sabemos temos uma fonte ilimitada de energia e sabendo do desenvolvimento da sociedade é importante analisar o crescimento ou seja a obtenção do estudo sobre a Produção de energia fotovoltaicas com isso teremos uma visão de como está ocorrendo o crescimento desse tipo de geração de energia. Para complementar a geração de eletricidade no Brasil, a energia solar representa uma ótima alternativa, porque o país que recebe uma alta taxa de irradiação solar, entretanto segundo o banco de informações de geração, até fevereiro de 2019, apenas cerca de 1,2% do total da matriz energética do Brasil e produzida por sistemas fotovoltaicos, o que equivale a pouco mais de 2 GW de potência instalada (ROCHA; RODRIGUES, 2019).

Muitos fatores podem estar associados ao crescimento da geração de energia solar, como a disseminação de buscar por um consumo de energia consciente que busque associar à conservação do meio ambiente com a obtenção de energia, também pode-se levado em conta que o crescimento das formas de obter energia renovável como a energia solar seja reflexo dos níveis educacionais da população e o nível de consciência em busca da preservação do meio ambiente com o desenvolvimento sustentável.

Como visto, o Brasil é um país diversificado com relação às formas de obtenção de energia, como a geração de eletricidade é primordial para o crescimento da nação é fundamental para o crescimento e desenvolvimento econômico do país, por isso a necessidade de aproveitamento de todas as fontes de energia e umas dessas fontes podemos citar a solar. Segundo Almeida, o aproveitamento da energia solar em larga escala através do sistema fotovoltaico ou fototérmico é

e será de grande importância para a matriz energética brasileira, por ser uma fonte limpa e em abundância no Brasil (ALMEIDA, 2018). O potencial de geração fotovoltaica é enorme no Brasil por conta da incidência de radiação solar no território nacional. De acordo com atlas brasileiro de energia solar, no local menos ensolarado do Brasil é possível gerar mais eletricidade solar do que no local mais ensolarado da Alemanha (TATAGIBA, 2023).

O aumento da população influencia no aumento do consumo de energia devido às suas necessidades para a sobrevivência no cotidiano, conforto, mercado de trabalho e também como o Brasil tem na sua maioria energia proveniente das hidrelétricas e estas dependem de bons períodos de chuvas, caso tenha períodos de secas como ocorridos a produção de energia é prejudicado, por isso uma fonte de geração importante é a geração solar, pois é renovável, inesgotável devido a isso e uma das fontes de geração que mais cresce. O crescimento da energia solar também pode estar relacionado ao desenvolvimento de novas gerações de células fotovoltaicas, ou seja a evolução das células ocorre em uma maior diversidade de placas fotovoltaicas desta forma acaba barateando e também colaborando com mais leque de opções no mercado. Mas de certo um dos fatores principais que motiva a instalação de sistemas fotovoltaicos está relacionado na busca de diminuir menos gás carbônico no planeta terra.

O aumento da população influencia no aumento do consumo de energia devido às suas necessidades para a sobrevivência no cotidiano, conforto, mercado de trabalho e também como o Brasil tem na sua maioria energia proveniente das hidrelétricas e estas dependem de bons períodos de chuvas, caso tenha períodos de secas como ocorridos a produção de energia é prejudicado, por isso uma fonte de geração importante é a geração solar, pois é renovável, inesgotável devido a isso e uma das fontes de geração que mais cresce. O crescimento da energia solar também pode estar relacionado ao desenvolvimento de novas gerações de células fotovoltaicas, ou seja a evolução das células ocorre em uma maior diversidade de placas fotovoltaicas desta forma acaba barateando e também colaborando com mais leque de opções no mercado. Mas de certo um dos fatores principais que motiva a instalação de sistemas fotovoltaicos está relacionado na busca de diminuir menos gás carbônico no planeta terra.

Fazendo uma análise com relação a energia solar teve um crescimento considerável, a figura a seguir mostra a geração elétrica por fonte no Brasil em GWh.

Figura 17 – Geração elétrica por fonte no Brasil (GWh)

	2016	2017	2018	2019	2020	Δ% (2020/2019)	Part. % (2020)	
<b>Total</b>	<b>578.898</b>	<b>587.962</b>	<b>601.396</b>	<b>626.324</b>	<b>621.219</b>	<b>-0,8</b>	<b>100,0</b>	<b>Total</b>
Hidráulica (i)	380.911	370.906	388.971	397.877	396.381	-0,4	63,8	Hydraulics (i)
Gás Natural	56.550	65.591	54.295	60.188	53.515	-11,1	8,6	Natural Gas
Derivados de Petróleo (ii)	12.207	12.911	10.293	7.846	8.556	9,1	1,4	Petroleum Products (ii)
Carvão	17.001	16.257	14.204	15.327	11.946	-22,1	1,9	Coal
Nuclear	15.864	15.739	15.674	16.129	14.053	-12,9	2,3	Nuclear
Biomassa (iii)	49.236	49.385	51.876	52.111	55.613	6,7	9,0	Biomass (iii)
Eólica	33.489	42.373	48.475	55.986	57.051	1,9	9,2	Wind
Solar	85	831	3.461	6.651	10.717	61,1	1,7	Solar Power Plants
Outras (iv)	13.554	13.968	14.147	14.210	13.387	-5,8	2,2	Others (iv)

Fonte: Balanço Energético Nacional 2021; Elaboração: EPE

Notas:

(1) Inclui PCH, CGH e autoprodução;

(2) Derivados de petróleo: óleo diesel e óleo combustível;

(3) Biomassa: lenha, bagaço de cana e lixívia;

(4) Outras: gás de coqueria, outras secundárias, outras não renováveis, outras renováveis e biodiesel.

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2021)

Olhando para a geração solar entre os anos de 2016 e 2020, a obtenção através da fonte solar cresceu a cada ano. Analisando o crescimento da capacidade instalada no Brasil com os seguintes dados da tabela abaixo:

Tabela 1 – Anuários de 2019 até 2022

Fontes	2019 (GWh)	2020 (GWh)	2021 (GWh)	2022 (GWh)
Hidráulica	397.877 (63,5 %)	396.381 (63,8 %)	362.818 (55,3 %)	42.114 (63,0 %)
Gás Natural	60.188 (9,6 %)	53.515 (8,6 %)	86.816 (13,2 %)	42.035 (6,2 %)
Eólica	55.985 (8,9 %)	57.613 (9,2 %)	72.286 (11,0 %)	81.632 (12,1 %)
Biomassa	52.111 (8,3 %)	55.613 (9,0 %)	51.711 (7,9 %)	52.047 (7,7 %)
Nuclear	16.128 (2,6 %)	14.053 (2,3 %)	14.705 (2,2 %)	14,559 (2,1 %)
Carvão	15.327 (2,4 %)	11.946 (1,9 %)	17.585 (2,7 %)	7.988 (1,2 %)
Outras	14.209 (2,3 %)	13.387 (2,2 %)	15.146 (2,3 %)	14.121 (2,1 %)
Derivados do Petróleo	7.846 (1,3 %)	8.556 (1,4 %)	18.244 (2,8 %)	7.816 (1,2 %)
Solar	6.650 (1,1 %)	10.717 (1,7 %)	16.752 (2,6 %)	30.126 (4,4 %)

Fonte: (ELÉTRICA, 2020); (ELÉTRICA, 2021); (ELÉTRICA, 2022); (ELÉTRICA, 2023)

Analisando a tabela podemos ver que a capacidade instalada da fonte solar teve um crescimento neste período entre 2019 e 2022.

Analisando com base no anuário estatístico de 2020 que tem como base o ano de 2019 a geração fotovoltaica teve um aumento de mais de 92,1% em números a geração saiu de 3.416 GWh em 2018 para 6.650 GWh em 2019. Com base no anuário do ano de 2020 a participação na geração elétrica a obtenção através da geração fotovoltaica também obteve um crescimento no qual saltou de 6.651 GWh no ano de 2019 para 10.717 GWh em 2020, ou seja um intervalo de crescimento de um ano para outro de mais de 62,1%. Em 2021 a produção solar continuou

subindo nesse período de 2021 a produção de geração elétrica através da fonte solar subiu de 10,717 GWh em 2020 para 16,752 GWh em 2021. No anuário estatístico de 2023 mostra o crescimento de mais de 79,8% da geração solar fotovoltaica em números, isso significa que em 2021 tinha 16,752 GWh e passou para 30,126 GWh em 2022.

## 5.1 REGIÃO NORDESTE E O SEU POTENCIAL PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar é uma fonte inesgotável a qual está tem participação indiretamente em outras fontes como a Biomassa, eólica, hidrelétricas ou seja essas são formas indiretas da energia solar. Mas sabemos que é possível obter energia elétrica através da radiação solar de forma direta utilizando placas fotovoltaicas para a conversão de energia luminosa em energia elétrica. Segundo Dias, o aproveitamento da iluminação natural, para posterior geração de energia, decorre da penetração e absorção dos raios solares nas edificações no geral, tendo como retorno a redução da utilização de fontes não renováveis de geração de energia elétrica (DIAS et al., 2017).

Apesar do grande potencial de irradiação solar na região nordeste, ainda há muitos obstáculos a serem superados para que a energia solar se torne uma fonte de energia amplamente utilizada (SILVA, 2023). Buscando fazer uma análise sobre a potencialidade para a Produção de energia solar na região nordeste, composta pelos estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí e Rio Grande do Norte. A região nordestina tem como divisão em quatro sub-regiões no qual são classificadas como Meio-norte, Zona da Mata, Agreste e Sertão.

Figura 18 – Localização da área de estudo



Fonte: Azevedo (2021)

O nordeste brasileiro possui períodos de estiagem, períodos longos e alta incidência de irradiação solar é uma região rica e propícia para a utilização e obtenção de energia elétrica pela conversão de radiação solar. O desenvolvimento solar fotovoltaico nessa região no nordeste pode trazer benefícios e oportunidades para esses setor brasileiro ou seja uma diversificação

econômica e de negócios, podemos citar como exemplo e a criação de empregos e negócios como a geração de empregos, baixa o custo de energia e promover o turismo sustentável. De acordo com Silva, a implementação de painéis solares e a produção de componentes relacionados à energia solar podem gerar empregos e incentivar a economia regional, enquanto a energia solar pode fornecer uma fonte renovável e limpa para a região (SILVA, 2023).

Atualmente podemos citar como exemplo no desenvolvimento da produção de energia solar fotovoltaica e construção da mini usina solar fotovoltaica no campus A.C. Simões em Maceió, já é possível ver investimentos para produção de energia solar em Alagoas, um dos estados nordestinos. A mini usina solar é localizada na entrada do campus A.C. Simões, em Maceió, é constituída de uma área de três Mil metros quadrados, a composição da mini usina é formada por 360 módulos fotovoltaicos e quatro inversores de um sistema de 125 kWp de potência além de possuir um estacionamento solar que possui 27 módulos fotovoltaicos e dois inversores de 9 kWp de potência.

Figura 19 – Imagens da Miniusina Solar da UFAL



Fonte: UFAL (2023) <<https://ufal.br/ufal/noticias/2023/6/mini-usina-solar-da-ufal-inicia-geracao-de-energia-conectada-a-rede-eletrica-da-equatorial-alagoas/view>>

A contribuição da mini usina solar são vastos, além de contribuir para a diversibilidade da matriz energética, contribui também para a redução de dependência da utilização das fontes não renováveis como os combustíveis fósseis. Além desta vantagem a mini usina vem beneficiar também com vantagens ambientais e energéticas trazidas pela produção da energia solar, vai contribuir também no âmbito educacional servindo e atuando na parte de ensino, pois será utilizado como espaço de ensino que é diretamente destinado como laboratório pesquisas com isso e um ganho para os cursos de graduação e pós-graduação. Além disso, a energia solar é uma fonte limpa, ou seja, não emite gases do efeito estufa e nem poluentes durante a produção de energia, desta forma contribuindo de forma direta e positiva na redução dos gases causadores do aquecimento global e também na preservação ambiental.

Assim vemos um exemplo da utilização do potencial do potencial de um estado do nordeste tanto no nível ambiental e também na área de ensino com o uso de laboratórios e salas de apresentações, ou seja a construção da mini usina fotovoltaicas atrai vantagens em todas as áreas isso mostra a importância de produção solar pode ser fundamental para o presente e futuro.

## 6 CONCLUSÃO

Buscamos analisar conceitualmente a composição básica das células fotovoltaicas, como é o funcionamento e também variações dos tipos de células fotovoltaicas com. Relação aos materiais utilizados, estudamos também o crescimento da produção de energia solar e suas contribuições e analisamos o potencial da produção solar no nordeste brasileiro e vimos um exemplo de investimento na produção de energia solar em Alagoas que busca contribuir em conhecimento na área de pesquisa e ensino e na produção energética. Introduzimos também uma discussão com relação aos aspectos ambientais são imprescindíveis, aspectos esses como a redução de gases que provocam a diminuição do aquecimento do planeta de forma simples e consciente com a Produção de energia fotovoltaica não está relacionada somente a gerar e obter energia mas contribuir para a conservação do planeta.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. A. d. Energia solar: o aproveitamento da radiação solar para produção de eletricidade no Brasil. 2018.
- ALVES, M. d. O. L. Energia solar: estudo da geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid. 2019.
- BEIGELMAN, B. B. **A energia solar fotovoltaica e a aplicação na usina solar de Tauá.** 74 f. Monografia (Graduação) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- CARDOZO, O. D. d. F. Avaliação do uso de nanodifusores de óxido de zinco em células fotovoltaicas de terceira geração. Universidade Federal de Pernambuco, 2023.
- COOPER, E.; JUNIOR, M.; MORALLES, W. Aplicação de painéis solares fotovoltaicos como fonte geradora complementar de energia elétrica em residências. **Trabalho de Conclusão de Curso, Setor de Tecnologia—Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba,** 2013.
- CORREIA, F. M. **Convertendo a radiação solar em energia elétrica.** Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.
- CREMASCO, N. P.; CORDEIRO, A. C.; LAUTERT, R. R.; LELUDAK, J. A.; JUNIOR, J. U. Estudo de diferentes tecnologias de células fotovoltaicas. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, v. 12, n. 31, p. 44–55, 2022.
- DIAS, C. T. de C.; SILVA, W. K. de M.; FREITAS, G. P. de; NASCIMENTO, J. F. do. Energia solar no Brasil. **Revista InterScientia**, v. 5, n. 1, p. 153–165, 2017.
- ELÉTRICA, A. E. de E. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/publicacoesarquivos/publicacao-160/topico-168/anuario2017vf.pdf>. **Acessado em 10 de agosto de 2023**, v. 3, 2020.
- ELÉTRICA, A. E. de E. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/publicacoesarquivos/publicacao-160/topico-168/anu>**Acessado em 10 de agosto de 2023**, v. 3, 2021.
- ELÉTRICA, A. E. de E. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/fact-sheet-anuario-estatistico-de-energia-eletrica-2022>: :text=**Acessado em 10 de agosto de 2023**, v. 3, 2022.
- ELÉTRICA, A. E. de E. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. **Acessado em 10 de agosto de 2023**, v. 3, 2023.
- FERREIRA, L. C.; AMARANTE, M. dos S.; CINTRA, A. B. de G.; LOURENÇO, R. A.; CRISTIANO, C. Energia solar fotovoltaica. **Revista Pesquisa e Ação**, v. 4, n. 1, p. 153–161, 2018.
- GÓES, P. F.; TANIMOTO, A. H. Tecnologias e parâmetros ambientais para a escolha de uma placa geradora de energia solar fotovoltaica. **Scientia: Revista Científica Multidisciplinar**, v. 6, n. 1, p. 34–61, 2021.
- HALLIDAY, R. **Fundamentos de Física, Vol 4.** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

- LAZZARIN, R. Evolução tecnológica de sistemas fotovoltaicos ao longo dos tempos: Estudo de caso de uma propriedade rural no município de Cascavel/PR. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2023.
- LINO, E. C. et al. Energia solar fotovoltaica: viabilidade na geração de energia limpa no semiárido alagoano. Universidade Federal de Alagoas, 2021.
- MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia solar fotovoltaica: uma breve revisão. **Revista virtual de química**, v. 7, n. 1, p. 126–143, 2015.
- MARCO, B. de et al. Análise de geração de energia elétrica entre usinas fotovoltaicas com estrutura fixa e rastreamento de um eixo nas regiões sul e nordeste do Brasil. Florianópolis, SC., 2023.
- MELO, C. C. Estudos preliminares sobre energias renováveis. **Universidade Federal de Alagoas**, v. 1, n. 1, p. 42, 2017.
- NASCIMENTO, C. A. D. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. 21 f. Dissertação (Doutorado) — Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.
- ROCHA, G. S.; RODRIGUES, O. S. Estudo de viabilidade de um sistema de geração de energia elétrica pelo efeito fotovoltaico. 2019.
- SILVA, B. A. O. da. Aproveitamento e potencial da energia solar fotovoltaica no nordeste do Brasil. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 5, n. 1, 2023.
- SILVA, J. E. S. R. da. **Células Fotovoltaicas Estado da Arte e Perspectivas Futuras**. Tese (Doutorado) — Universidade da Beira Interior (Portugal), 2014.
- SILVA, S. S. F. da; ALVES, A. C.; RAMALHO, Â. M. C. Energia eólica e complementaridade energética: estratégia e desafio para o desenvolvimento sustentável na região nordeste do Brasil. **Qualitas Revista Eletrônica**, v. 19, n. 3, p. 53–72, 2020.
- TATAGIBA, L. M. Energia fotovoltaica e o desafio da redução de impactos ambientais para o desenvolvimento sustentável no Brasil. 2023.
- TEIXEIRA, M. A. C. et al. Perspectivas do potencial estratégico de novos materiais alternativos ao silício para a produção de células solares fotovoltaicas. Universidade Nove de Julho, 2019.
- TIPLER, M. **Física para Cientistas e Engenheiros, Vol 3**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- VIEIRA, A. C. F. Energias renováveis e sua eficiência na nova economia energética no Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 8, n. 18, p. 211–223, 2021.
- VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica? Conceitos e aplicações**. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 1983.
- YOUNG, F. **Física 4: Ótica e Física Moderna**. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2008.