



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE
CAMPUS CEDETEG
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

MATHEUS MEOQUIOR DA FONSECA

**DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS: UMA REVISÃO DAS CÉLULAS SOLARES DE
SILÍCIO E FILMES FINOS, E SEU IMPACTO SOCIOAMBIENTAL**

Guarapuava - PR

2023

MATHEUS MEOQUIOR DA FONSECA

DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS: UMA REVISÃO DAS CÉLULAS SOLARES DE SILÍCIO E FILMES FINOS, E SEU IMPACTO SOCIOAMBIENTAL

Trabalho de conclusão de curso (TCC) apresentado ao Departamento de Física, da UNICENTRO, para aprovação no curso de graduação em Licenciatura em Física.

Orientador: Prof. Dr. Valdirlei Fernandes Freitas

Guarapuava - PR

2023

*Dedico este trabalho a todos que me auxiliaram
e me apoiaram em minha jornada acadêmica.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus por toda sabedoria e força. A minha mãe, que em todos os momentos esteve ao meu lado apoiando, incentivando, confiando e dando todo o suporte necessário ao longo de minha trajetória acadêmica. Agradeço à minha esposa, Bianca, que passou por todos os momentos mais difíceis comigo e sempre me ajudando a levantar e continuar. Agradeço também aos meus amigos que fizeram parte ao longo dessa jornada, ao Felipe e Ricardo por todos os auxílios nos estudos e nos momentos fora da universidade e especial ao Luciano e Fernanda, que, na reta final, foram essenciais.

Agradeço também a todos os professores do Departamento de Física da Unicentro, por toda a dedicação máxima e ensinarem a todo momento a importância da ciência e do aprendizado contínuo. Agradeço em especial ao professor Valdirlei. F. Freitas por toda a paciência e compreensão em minhas últimas etapas de conclusão de curso; ao professor Pedro P. Gonzáles Borrero por ter me ensinado sobre comprometimento ao longo de minha passagem pelo PET; e à professora Tania Toyomi Tominaga por todos os “puxões de orelha” que vieram nos momentos certos.

RESUMO

A crescente demanda mundial por energia tem impulsionado a busca por fontes renováveis de energia. Entre as soluções propostas, destacam-se os dispositivos fotovoltaicos. No entanto, a fabricação desses dispositivos ainda apresenta desafios em relação à estabilidade e custo devido aos materiais utilizados. É essencial compreender os diferentes tipos de dispositivos fotovoltaicos disponíveis no mercado e seu impacto social, ambiental e econômico no mundo. Nesse contexto, este trabalho reúne artigos que abordam as características dos dispositivos fotovoltaicos, com destaque para as células solares de silício e perovskitas, que correspondem, respectivamente, à primeira e terceira geração desses dispositivos.

Palavras chave: perovskitas, Energia solar, impacto social

ABSTRACT

The growing global demand for energy has driven the search for renewable energy sources. Among the proposed solutions, photovoltaic devices stand out. However, the manufacture of these devices still presents challenges regarding stability and cost due to the materials used. It is essential to understand the different types of photovoltaic devices available on the market and their social, environmental and economic impact on the world. In this context, this work brings together articles that address the characteristics of photovoltaic devices, with emphasis on silicon and perovskite solar cells, which correspond, respectively, to the first and third generation of these devices.

Keywords: perovskite, Solar energy, social impact

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação entre as bandas proibidas dos materiais semicondutores (a), e representação do surgimento de vacâncias na banda de valência (b). Adaptado de: 5.....	3
Figura 2 – Representação de uma junção PN (a) e a zona de depleção (b). Adaptado de: 11.....	4
Figura 3 - Diagrama esquemático da conversão fotovoltaica realizada por uma célula semicondutora de junção P-N. Fonte: 12.....	5
Figura 4 – Domínios polarizados em um material ferroelétrico separados por paredes de domínios. Fonte: 14.....	5
Figura 5 – formação do efeito fotovoltaico na parede de domínio. Fonte: 14.....	6
Figura 6 – Representação das células solares de primeira geração (a), segunda geração (b) e terceira geração (c). Fonte: 3.....	8
Figura 7 - Esquema de um módulo fotovoltaico. Fonte: 1.....	9
Figura 8 – Representação da estrutura de uma perovskita. As esferas azuis e vermelhas representam os cátions (A e B) e a esfera cinza o ânion (C). Fonte: 4.....	10
Figura 9 - Estimativa de volumes cumulativos de resíduos de painéis fotovoltaicos no final de sua vida útil pelos 5 principais países em 2050, tanto por cenário de perda antecipada quanto por cenário de perda regular. Fonte: IRENA, 2016.....	13
Figura 10 - Comparação entre o Brasil e o Mundo em relação a Geração de Energia Elétrica em 2040. Fonte: EPE, 2019.....	14

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CIGS	Seleneto de cobre, índio, gálio
CdTe	Telureto de cádmio
CZTS	Sulfeto de cobre, zinco, estanho
ITO	Óxido de índio-estanho
FTO	Óxido de estanho e índio

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.2. Dopagem	3
2.3. Junção P-N	3
2.4. Efeito Fotovoltaico em semicondutores	4
3. OBJETIVOS.....	6
3.1. Objetivo Geral	6
3.2. Objetivo(s) específico(s)	6
4. METODOLOGIA	6
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	7
6. CONCLUSÃO	15
7. REFERÊNCIAS	16

1. INTRODUÇÃO

Em virtude da crescente preocupação com o meio ambiente, a busca por fontes de energia renováveis e limpas têm ganhado importância nos últimos anos. Atualmente, a principal fonte de energia utilizada mundialmente é proveniente da queima de combustíveis fósseis, que gera impactos negativos ao meio ambiente como a emissão de gases poluentes^[1-3]. Uma alternativa viável e sustentável é a utilização de painéis solares, os quais fazem a conversão da energia solar em energia elétrica^[1-3].

O processo de conversão de energia solar em energia elétrica ocorre devido ao efeito fotovoltaico, descoberto por Enrel Becquerel em 1839. Ao expor à luz solar duas placas metálicas condutoras, imersas em uma solução eletrolítica, ele observou a geração de uma corrente elétrica. Desde então, essa tecnologia tem sido aprimorada e atualmente é uma das formas mais eficientes e sustentáveis de se produzir energia elétrica, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a preservação do meio ambiente^[1]. Atualmente, as principais células solares são produzidas a partir do silício, as quais correspondem a maior eficiência de conversão presente no mercado, chegando a cerca de 22,7%^[1]. Apesar da tecnologia utilizar-se de uma fonte de energia abundante e de acesso a todos, possuir um sistema que permita utilizá-la ainda é muito caro. Desta forma, os estudos voltados à produção de uma célula solar de baixo custo vem sendo feitos incansavelmente por diversos grupos de pesquisas espalhados por todo o mundo. Atualmente, devido a esses estudos, pode-se classificar as células solares de três formas: 1^a, 2^a e 3^a geração^[3].

Neste estudo, foi realizada uma revisão sobre dispositivos fotovoltaicos, com o objetivo de explorar suas características, enfatizando as células solares de primeira geração (feitas de silício) e as células solares de terceira geração, também conhecidas como filmes finos. Tendo como motivo de estudo as células de primeira geração que são comercialmente estáveis, enquanto as de terceira geração têm eficiência de conversão de energia semelhante às células de primeira geração, mas em um período de tempo mais curto de pesquisa. Além disso, foi avaliado o impacto socioambiental gerado por esse tipo de energia.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Propriedades elétricas

Diversos objetos e materiais são encontrados ao nosso redor, cada um com diferentes propriedades físicas e químicas. Uma das características que diferencia esses materiais é a sua capacidade de conduzir energia elétrica, sendo classificados em três tipos: condutores, isolantes e semicondutores [4 - 9]. A capacidade de um material conduzir eletricidade depende, em grande parte, da facilidade com que os elétrons presentes na sua banda de valência podem se mover livremente através do material, sem ter que superar uma "banda proibida" [4 - 9]. Essa liberdade de movimento dos elétrons é possível devido à sua fraca ligação com o núcleo atômico, o que confere maior mobilidade aos elétrons mais externos do átomo e aumenta a probabilidade de que eles sejam promovidos da banda de valência para a banda de condução [4 - 9]. A baixa resistência elétrica desses materiais permite que uma corrente elétrica flua com facilidade através deles, o que os classifica como bons condutores [4 - 9]. Já os materiais isolantes possuem uma banda de valência totalmente preenchida e uma banda de condução vazia, neste caso, separadas por uma banda chamada de banda proibida, a qual impede que os elétrons sejam promovidos para a banda de condução por possuírem alta resistência elétrica [4 - 9]. A resistência neste caso se dá devido à forte ligação dos elétrons de valência que estão ligados a seus átomos. Sendo assim, para que ocorra a condução neste tipo de material torna-se necessário fornecer uma enorme quantidade de energia para desprendê-los das moléculas e permitir a passagem da corrente elétrica [4 - 9].

Já os semicondutores são materiais que possuem uma propriedade única de condução elétrica, que os diferencia dos isolantes e dos condutores metálicos. A razão para essa característica está relacionada com a largura da "banda proibida" [4 - 9]. Em semicondutores, essa zona é relativamente pequena em comparação com a dos isolantes (Fig. 1-a), o que significa que os elétrons da banda de valência podem adquirir energia suficiente para transitar para a banda de condução com relativa facilidade [10 - 14].

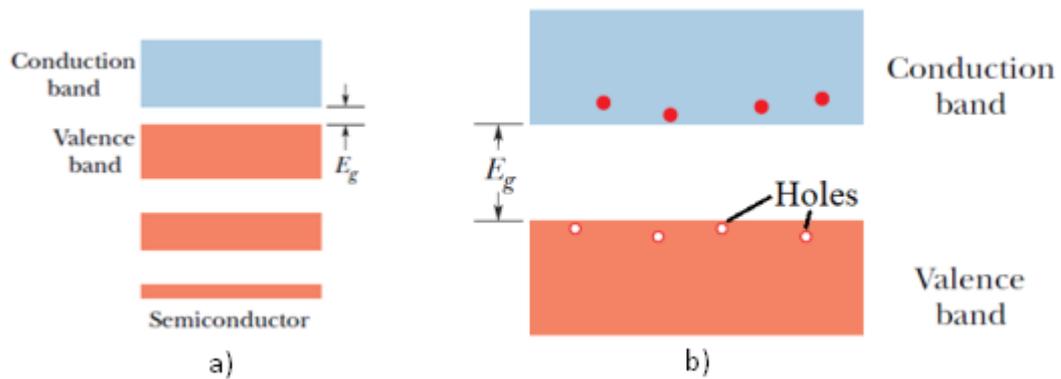


Figura 1 - Relação entre as bandas proibidas dos materiais semicondutores (a), e representação do surgimento de vacâncias na banda de valência (b). Adaptado de: 5.

Quando isso acontece, os elétrons deixam vacâncias em sua posição anterior (veja na Fig. 1-b), que são preenchidas pelos chamados buracos, que agem como portadores de carga positiva ^[4-9]. Sob a ação de um campo elétrico, os elétrons na banda de valência se movem em direção oposta ao campo, enquanto os buracos se movem na direção do campo elétrico ^[4-9].

2.2. Dopagem

A dopagem é um processo que pode ser utilizado na produção de um material semicondutor caso seja aplicado em um material isolante. Já na dopagem em cristais naturalmente semicondutores, átomos de outros elementos, chamados de impurezas, são intencionalmente adicionados de forma controlada ^[4-9]. Esse processo altera as propriedades elétricas do material com o objetivo de aumentar a quantidade de elétrons livres ou de lacunas (falta de elétrons) ^[4-9]. Os cristais dopados com impurezas doadoras são chamados de semicondutores tipo N, pois possuem um número maior de elétrons livres do que de lacunas. Por outro lado, os cristais dopados com impurezas receptoras são conhecidos como semicondutores tipo P, uma vez que apresentam mais lacunas do que elétrons livres ^[4-9].

2.3. Junção P-N

A formação de uma junção P-N ocorre quando um material semicondutor tipo N é combinado e fundido com outro material semicondutor tipo P, como representado na Figura 1 ^[4-9]. A união entre os materiais faz com que as lacunas dos semicondutores P sejam preenchidas pelos elétrons do material do tipo N, fazendo com que ocorra a formação da chamada zona de depleção, responsável por separar a parte P da N ^[4-9]. Este tipo de junção é a base de todos os

dispositivos de estado sólido, incluindo diodos semicondutores, circuitos integrados, microprocessadores e células solares [4-9].



Figura 2 – Representação de uma junção PN (a) e a zona de depleção (b). Adaptado de: 11.

2.4. Efeito Fotovoltaico em semicondutores

Ao incidir luz em materiais semicondutores de junção P-N, ocorre uma interação entre os fótons e os elétrons presentes na camada N do semicondutor. Essa interação faz com que os elétrons recebam energia suficiente para serem promovidos da banda de valência e transitem para a banda de condução, gerando assim buracos na banda de valência. Os buracos formados possuem probabilidade de se recombinar com elétrons liberados pelo mesmo efeito, formando pares elétron-buraco de acordo com a teoria de formação de pares [4, 5, 10, 11].

De maneira aleatória, os elétrons livres ocupam os buracos existentes na parte positiva do semicondutor, que por sua vez são atraídos pelos buracos deixados na parte negativa. Com isso, a zona de depleção - região da junção em que não há portadores de carga - entre as duas partes (tipo P e tipo N) diminui, permitindo que os elétrons possam passar novamente para a parte negativa, como representado na figura 3 [4, 5, 10, 11].

Essa movimentação de elétrons entre as partes P e N permite que o ciclo continue, com os elétrons sendo atingidos por novos fótons e passando novamente para a banda de condução, gerando corrente elétrica. Esse é o princípio básico das células fotovoltaicas, que convertem a energia solar em energia elétrica de forma limpa e renovável.

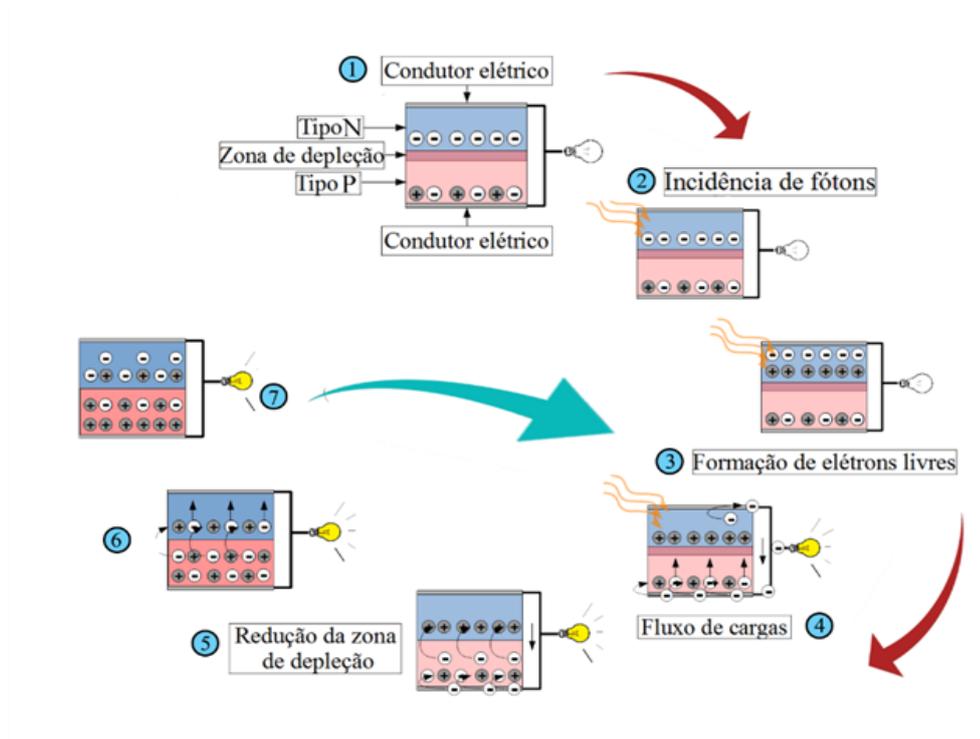


Figura 3 - Diagrama esquemático da conversão fotovoltaica realizada por uma célula semicondutora de junção P-

N. Fonte: 12.

2.5. Efeito Fotovoltaico em perovskitas

Nos últimos anos, houve um amplo estudo dos mecanismos responsáveis pelo efeito fotovoltaico em materiais com estrutura perovskita. Embora ainda não haja um modelo completo para explicar esse efeito, estudos indicam que as paredes de domínio são cruciais na geração de fotovoltagem nesses materiais [13-16]. Nas perovskitas ferroelétricas, como o BiFeO_3 , a ausência de centrossimetria leva à geração de polarização espontânea, resultando em domínios polarizados separados por paredes de domínio, figura 4 [13-16].

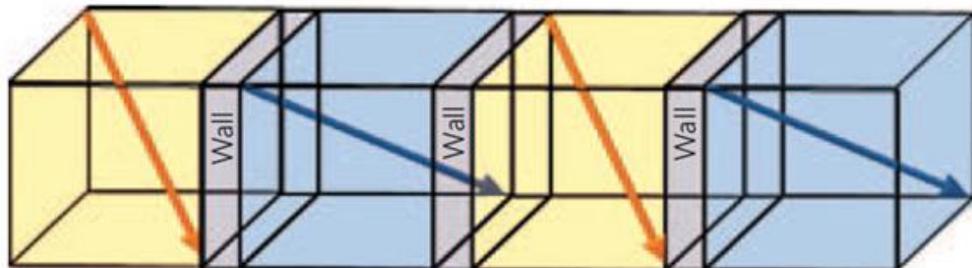


Figura 4 – Domínios polarizados em um material ferroelétrico separados por paredes de domínios.

Fonte: 14.

Quando fótons incidem em materiais perovskita, a probabilidade de recombinação elétron-buraco é menor dentro das paredes de domínio em comparação com os domínios polarizados ^[14]. Segundo Yang et al., isso ocorre porque o elétron promovido no domínio não possui uma direção clara para conduzir, tornando a recombinação mais favorável nessas condições. Por outro lado, quando os elétrons são promovidos dentro da parede de domínio, eles são atraídos para o domínio vizinho, e o mesmo ocorre com o buraco deixado. Isso reduz a recombinação e permite um melhor aproveitamento do elétron, conforme indicado na figura 5 ^[14].

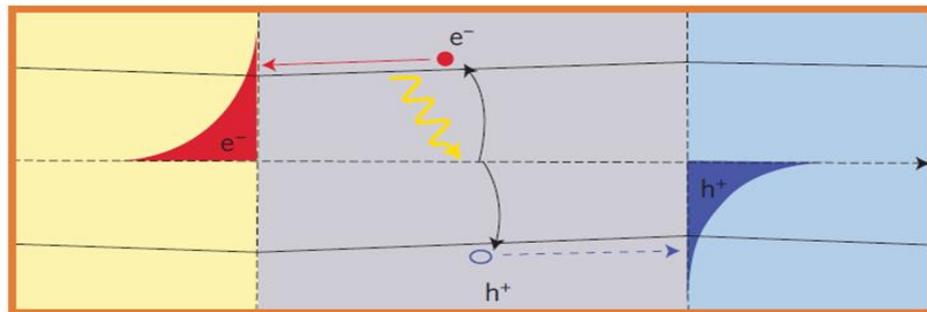


Figura 5 – formação do efeito fotovoltaico na parede de domínio. Fonte: 14.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

- 3.1.1.** Realizar uma revisão bibliográfica sobre o desenvolvimento dos dispositivos fotovoltaicos.

3.2. Objetivo(s) específico(s)

- 3.2.1.** Estudar os avanços e a história dos dispositivos fotovoltaicos, em especial com os compostos de silício e as perovskitas de chumbo.
- 3.2.2.** Estudar o impacto social, ambiental e econômico que o desenvolvimento destes dispositivos gera.

4. METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho foi rigorosa e criteriosa. Inicialmente, foram selecionados apenas os artigos mais relevantes e atualizados sobre os dispositivos fotovoltaicos e os impactos sociais e econômicos. Os critérios utilizados foram: credibilidade e acesso. A credibilidade dos artigos selecionados foi garantida pela escolha de publicações científicas reconhecidas, garantindo a qualidade e confiabilidade das informações. O acesso aos artigos foi verificado para garantir que todos pudessem ser acessados e lidos.

Após a seleção dos artigos, foi realizada uma leitura crítica de todos os materiais, buscando identificar os pontos-chave, os argumentos utilizados pelos autores e as evidências apresentadas para sustentar suas afirmações. Em seguida, foram realizadas as análises, sínteses e discussões dos resultados, permitindo uma comparação e contraste das diferentes abordagens encontradas na literatura.

5. DESENVOLVIMENTO E DISCUSSÃO

Atualmente classificamos os dispositivos fotovoltaicos de três formas: Dispositivos fotovoltaicos de primeira, segunda e terceira geração (figura 6). As células solares de primeira geração são as mais comuns, como exemplo em células solares de silício cristalino, que apresentam eficiências entre 15-20%, porém têm alto custo de produção e instalação. As células solares de segunda geração, como CIGS, CdTe e CZTS, têm custo mais baixo, mas uma eficiência mais baixa. As células solares de terceira geração, à base de materiais orgânicos, corantes, pontos quânticos ou perovskitas, oferecem a possibilidade de ultrapassar os limites teóricos de eficiência de Shockley e Queisser (S-Q), associando elevada eficiência e baixo custo ^[3, 17].

O limite teórico de Shockley-Queisser é uma teoria na área da fotovoltaica que estabelece um limite máximo teórico de eficiência para células solares de uma única junção. Esta eficiência máxima teórica depende do material semicondutor utilizado, bem como da radiação solar incidente e das perdas térmicas. De acordo com o limite teórico de Shockley-Queisser, a eficiência máxima teórica de uma célula solar é de aproximadamente 33,7%. Isso ocorre porque a energia dos fótons incidentes com uma energia superior ao gap do material semicondutor é perdida como calor. Além disso, os portadores de carga que são gerados no material semicondutor podem perder energia através de processos como a recombinação não radiativa, resultando em uma eficiência global reduzida ^[29, 30].

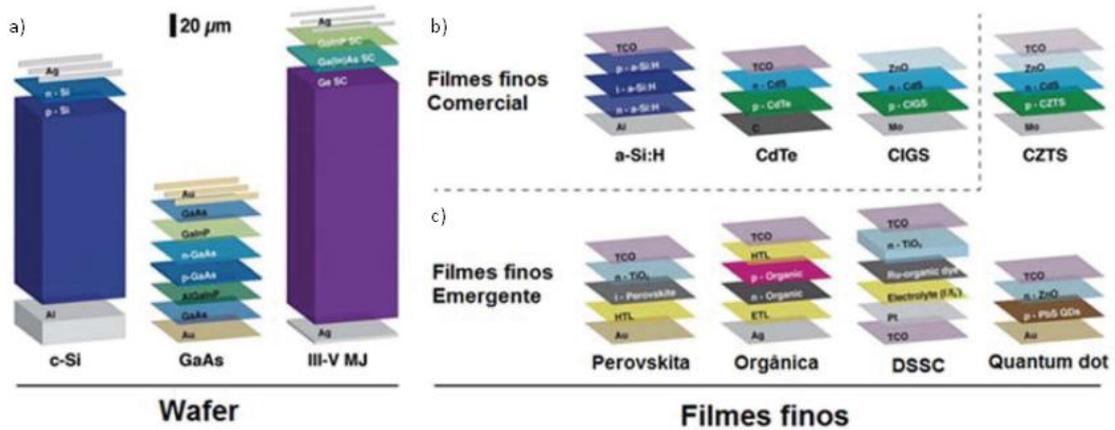


Figura 6 – Representação das células solares de primeira geração (a), segunda geração (b) e terceira geração (c).

Fonte: 3.

5.1. Dispositivos fotovoltaicos de 1ª Geração

Os dispositivos fotovoltaicos de Silício, também conhecidos como células fotovoltaicas de primeira geração, foram desenvolvidos a partir dos anos 50. Eles consistem em células feitas a partir de um Wafer de silício com espessura de 100 a 200 μm [18].

O material mais comumente utilizado na fabricação de células fotovoltaicas é o silício, que pode ser encontrado em três formas principais: monocristalino (m-Si), policristalino (p-Si) e amorfo (a-Si) [1, 20]. A primeira apresenta uma estrutura molecular altamente definida e um alto grau de pureza, resultando em maior eficiência, porém com um custo mais elevado. Em contrapartida, o silício policristalino tem uma estrutura menos homogênea e, conseqüentemente, eficiência e custos menores. Por fim, o silício amorfo não possui uma estrutura cristalina e, portanto, apresenta baixa eficiência quando utilizado na produção de células e painéis fotovoltaicos [19].

“[...] Até o momento, as células solares de silício cristalino (Si) dominam os mercados comerciais por causa de sua estabilidade superior e alta eficiência de conversão de energia (PCE) (LI, HUILIN, 2021 - traduzido).”

O processo de fabricação de módulos solares comerciais envolve a conexão em série das células solares por meio de filamentos condutores. Essas células são encapsuladas em folhas de acetato de vinil etileno (EVA) e revestidas na parte frontal com vidro temperado e, na parte

posterior, com um filme de fluoreto de polivinila (PVF), conhecido como Tedlar®. Esse conjunto laminado é então montado em um perfil de alumínio. O esquema de montagem do módulo é ilustrado na Figura 8 ^[1].

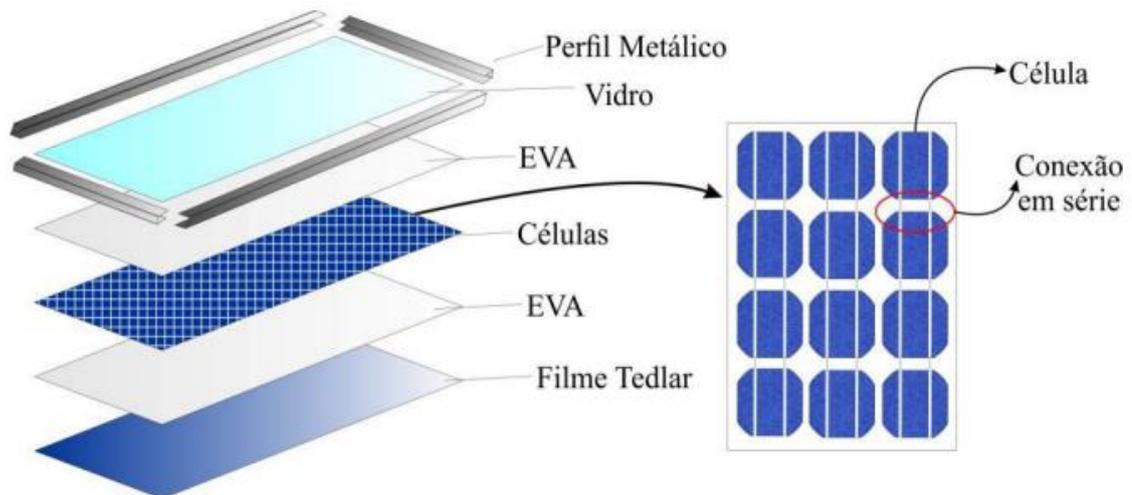


Figura 7 - Esquema de um módulo fotovoltaico. Fonte: 1.

Os métodos de fabricação da célula solar mantêm a cristalização do silício em uma estrutura mais coerente e homogênea possível, formando um único cristal (no caso do silício monocristalino) ou um conglomerado de cristais, entre 1mm e vários cm em tamanho (silício multicristalino) ^[19].

A maioria dos processos de síntese de silício monocristalino são baseados no mesmo princípio. Este processo começa derretendo o silício policristalino em torno de 1400-1500°C, com uma haste ou folha de silício monocristalino adequadamente resfriada (conhecida como semente) é colocada em contato. Se o processo for lento o suficiente para que os átomos de Si fundido se ordenem de acordo com as posições da rede cristalina da semente, o silício fundido solidifica na interface líquido-sólido, formando um único cristal que é uma extensão da semente ^[19]. Na prática, os fabricantes de wafer geralmente adicionam uma certa quantidade bem controlada de boro ou fósforo junto com polisilício em potes de fundição para obter lingotes de silício cristalino tipo p ou tipo n, respectivamente, após a cristalização ^[19, 20]. Entretanto, os dispositivos fotovoltaicos de Si possuem processos de fabricação complexos, caros e tóxicos ^[18, 19].

5.2. Dispositivos fotovoltaicos de 3ª geração (Perovskitas).

Em 1839, uma classe de compostos semelhantes ao mineral titanato de cálcio (CaTiO_3) foi descoberta e chamada de perovskitas. Essa classe de compostos é notável por sua estrutura cristalina altamente adaptável, que lhes confere características únicas, como a capacidade de modificar facilmente suas propriedades eletrônicas, magnéticas por se tratar de um material multiferróico [3, 17]. Apresentar estas propriedades na forma de filme fino faz com que as perovskitas tornem-se atraentes em comparação com outros tipos de semicondutores, que não possuem a mesma flexibilidade. Os dispositivos fotovoltaicos desenvolvidos a partir destes materiais chamam muito atenção da comunidade científica pelo fato de terem atingido uma eficiência de 25,7% em apenas meia década de estudos [21].

A estrutura da perovskita é geralmente representada por ABC_3 , onde A e B são cátions e C é um ânion. Algumas de suas características são: ferroeletricidade, ferromagnetismo, magnetoeletricidade, luminescência e supercondutividade [3, 17, 22, 23].

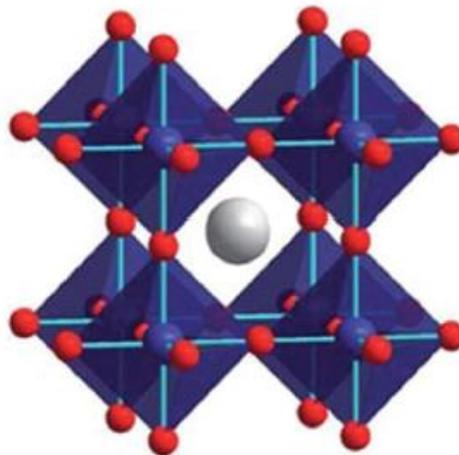


Figura 8 – Representação da estrutura de uma perovskita. As esferas azuis e vermelhas representam os cátions (A e B) e a esfera cinza o ânion (C). Fonte: 4.

Em células solares baseadas em perovskitas de halogenetos, geralmente utilizam-se de halogenetos de chumbo, como iodeto de chumbo, brometo de chumbo ou clorato de chumbo, com a adição de outros compostos orgânicos, como o metilamônio ou o formamidínio [3, 17, 24]. Essa combinação de materiais permite a criação de uma camada ativa altamente eficiente para a geração de energia solar. Dentre os materiais usados para sintetizar esses dispositivos de perovskita, destaca-se o iodeto de chumbo e metilamônio (MAPbI_3). Em 2009, ele mostrou ser

útil como um semicondutor em células solares, com uma eficiência de conversão de energia de 3,8%, que aumentou para 10% em 2012. Atualmente, essas células solares têm uma eficiência de conversão de energia certificada de 23,3%. Estes dispositivos surgiram como materiais fotovoltaicos promissores devido a serem processados em solução sem a necessidade de tratamento em altas temperaturas [3, 17, 24].

Em uma célula solar de terceira geração, existem inúmeras arquiteturas de montagem que podem ser utilizadas, a mais comum adota a camada ativa a perovskita a qual é colocada entre uma camada transportadora de elétrons e uma camada transportadora de buracos. Uma das camadas é depositada sob um eletrodo condutor transparente, como FTO ou ITO, enquanto a outra é depositada em um metal, formando um “ensanduichamento” das camadas transportadoras de cargas. Além disso, há estudos que realizam a preparação de células solares de perovskita modificando a ordem destas arquiteturas a fim de melhorar a eficiência da mesma [3, 17, 24].

5.3. Impactos sociais e econômicos

Atualmente, o meio ambiente enfrenta diversas mudanças, incluindo eventos naturais como terremotos, inundações, furacões e incêndios florestais, além das influências humanas causadas pela má gestão dos recursos naturais, especialmente energéticos, que são mais evidentes nos países industrializados. O aumento populacional também contribui para essa situação. As crises do petróleo servem como exemplos da importância de diversificar a matriz energética.

No Brasil, em 2016, o setor de energia emitiu 423,5 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO_2e), representando 19% do total anual de emissões. O planejamento energético atualmente leva em consideração a preocupação com o meio ambiente e a minimização dos impactos socioambientais. Com uma matriz energética que tem grande participação de fontes renováveis, as emissões de gases de efeito estufa por unidade de energia consumida no Brasil são relativamente baixas em comparação com outros países. No entanto, ainda há muito a ser feito para o Brasil alcançar padrões socioeconômicos semelhantes aos de países desenvolvidos. A participação de fontes renováveis na matriz energética do Brasil é um destaque em relação a poucos países no mundo [25].

De acordo com a nota técnica da EPE (2017a) que analisa a dimensão socioambiental das fontes energéticas do Planejamento e Desenvolvimento Energético (PDE) 2026, a energia solar fotovoltaica é uma fonte de energia limpa e renovável, que não emite poluentes como NO_x , SO_2 , CO e gases de efeito estufa, como CO_2 , CH_4 , N_2O e outros [26]. Além disso, a criação

de empregos no processo de fabricação dos sistemas fotovoltaicos tem um impacto social positivo. Por outro lado, há impactos negativos associados à indústria de transformação e extração mineral, que podem ser agravados com o aumento da demanda por células fotovoltaicas [25].

No entanto, a geração de energia fotovoltaica pode ter alguns impactos relacionados ao uso e ocupação do solo, tais como a construção de usinas, movimentação de terra e implantação de vias de acesso. Além disso, pode ocorrer interferência na fauna e flora se houver supressão significativa de vegetação e impactos negativos na paisagem. Outro aspecto importante é a localização das usinas, pois regiões com excesso de poeira e vento exigem limpeza diferenciada dos painéis, o que pode implicar em maior consumo de água ou adoção de novas tecnologias e processos. É essencial destacar também a questão do descarte de painéis solares, pois os componentes desses painéis podem causar impacto ambiental. A geração de energia elétrica por meio de placas fotovoltaicas é uma tendência mundial em crescimento, mas é preciso considerar que o aumento do lançamento de resíduos no ambiente pode acarretar sérios problemas ambientais [25 - 28].

A energia solar oferece uma oportunidade de gerar eletricidade limpa e contribuir para um estilo de vida sustentável. No entanto, a indústria eletrônica tem criado grandes quantidades de resíduos perigosos no fim do ciclo de vida de seus produtos. No que diz respeito à produção de células fotovoltaicas, é importante destacar que a fabricação exige a utilização de diversos gases e químicos. Atualmente, a produção de células é altamente controlada em ambientes regulamentados, onde todos os resíduos são tratados adequadamente, o que resulta em um impacto ambiental muito baixo [25 - 28].

No entanto, de acordo com IRENA (2016), no cenário de perda regular, o desperdício de painéis fotovoltaicos correspondeu a 43.500 toneladas no final de 2016, com uma projeção de aumento para 1,7 milhão de toneladas em 2030 e um aumento drástico esperado para cerca de 60 milhões de toneladas em 2050, como mostra a Figura 10. Em contraste, no cenário de perda antecipada, é estimado um aumento maior no fluxo total de resíduos fotovoltaicos, com 250.000 toneladas no final de 2016, aumentando para 8 milhões de toneladas em 2030 e 78 milhões de toneladas em 2050. Isso se deve ao fato de que o cenário de perda antecipada pressupõe uma porcentagem maior de falhas nos painéis fotovoltaicos em comparação com o cenário de perda regular [27].

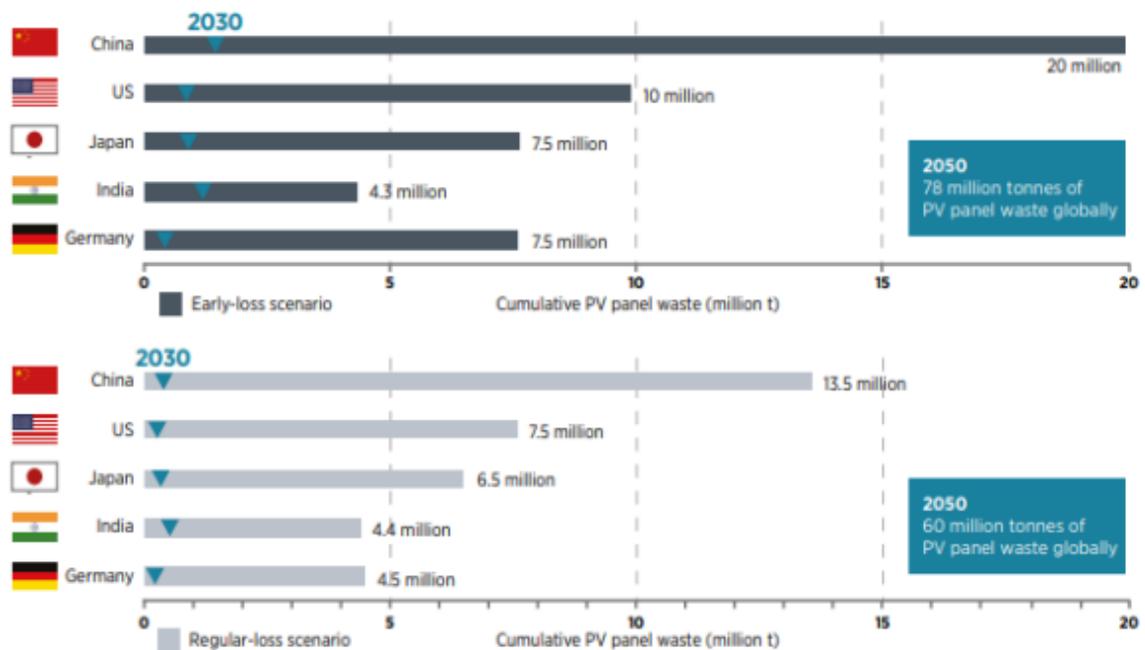


Figura 9 - Estimativa de volumes cumulativos de resíduos de painéis fotovoltaicos no final de sua vida útil pelos 5 principais países em 2050, tanto por cenário de perda antecipada quanto por cenário de perda regular. Fonte: IRENA, 2016.

As atividades relacionadas à gestão de resíduos no final da vida são de responsabilidade das três principais partes interessadas: a sociedade, os consumidores e os produtores. É crucial que os painéis solares sejam eliminados de maneira segura, garantindo que nenhum material nocivo seja liberado para o meio ambiente. Nesse sentido, as empresas devem comprometer-se a descartar esses resíduos de maneira apropriada, uma vez que esses equipamentos são danosos para o meio ambiente. Portanto, é importante investir em pesquisas e tecnologias que utilizem recursos naturais renováveis e realizar estudos ambientais durante o processo de licenciamento ambiental do projeto, a fim de diversificar a matriz energética e reduzir a poluição. É fundamental valorizar os baixos impactos ambientais, incluindo a baixa emissão de gases de efeito estufa, causados pelos sistemas fotovoltaicos [25 - 28].

A adoção de energia solar limpa e renovável é crucial para que o país cumpra as metas estabelecidas na COP21. No acordo firmado no final de 2015, o Brasil se comprometeu a ampliar para, no mínimo, 23% o uso doméstico de energia gerada por fontes renováveis - além da energia hídrica - na matriz elétrica até 2030. Conforme apresentado na Figura 11, as energias de baixo carbono, como as renováveis e a nuclear, irão ganhar maior participação na matriz de geração elétrica brasileira até 2040. O Brasil terá 96% de sua matriz elétrica proveniente de energias de baixo carbono, sendo que a maior fatia deste gráfico se refere às fontes renováveis.

Em comparação, o mundo terá 80% de sua matriz elétrica oriunda de energias de baixo carbono [25 - 28].

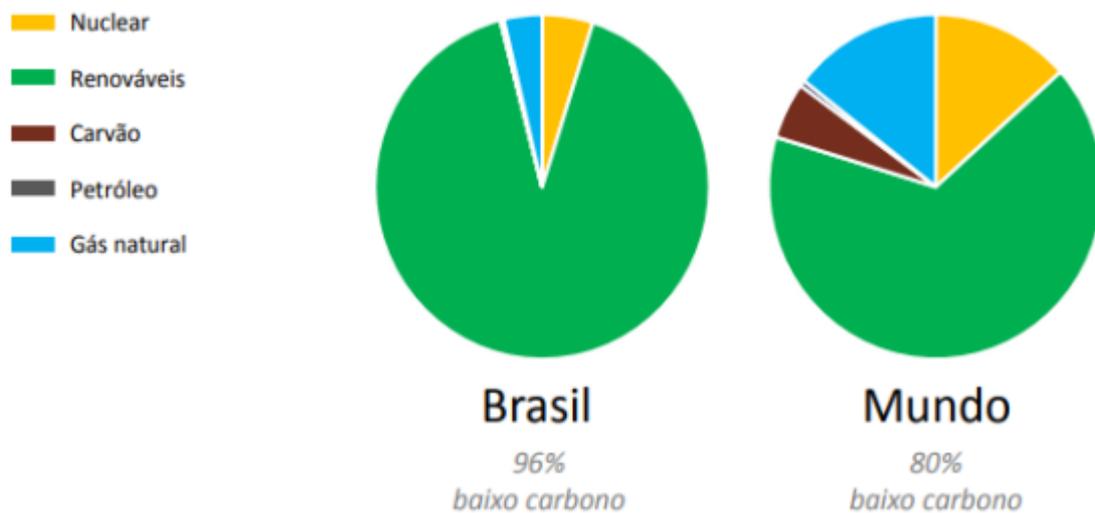


Figura 10 - Comparação entre o Brasil e o Mundo em relação a Geração de Energia Elétrica em 2040. Fonte: EPE, 2019.

Para garantir um futuro sustentável, é crucial que o setor energético adote práticas sustentáveis e reduza os impactos socioambientais causados pela exploração de recursos primários da natureza. As mudanças climáticas apresentam ameaças significativas para a humanidade e o planeta, e, portanto, é fundamental que todos os países trabalhem juntos para reduzir as emissões globais de gases de efeito estufa [25 - 28].

Pode-se destacar como alguns dos benefícios da energia solar fotovoltaica para o Brasil como [25]:

- a geração de energia limpa, renovável e sustentável.
- a contribuição para as metas de redução de emissão de gases de efeito estufa do país.
- a não emissão de gases, líquidos ou sólidos durante o processo de geração de energia.

Portanto, a energia elétrica gerada por meio de painéis solares fotovoltaicos é muito importante para o Brasil, pois além de ser limpa e renovável, é também mais competitiva e diversifica a matriz elétrica do país, que atualmente depende muito das hidrelétricas e termelétricas fósseis. Com a utilização dos sistemas fotovoltaicos, é possível aliviar a pressão sobre os reservatórios hídricos, reduzir a pressão sobre outros usos estratégicos como o abastecimento humano, agricultura, irrigação e processos industriais. Adicionalmente, o uso da energia solar fotovoltaica ajuda a reduzir a utilização de termelétricas fósseis, que são mais caras e poluentes,

além de contribuir para a diminuição dos custos de energia elétrica para os consumidores e para a mitigação dos impactos do aquecimento global.

6. CONCLUSÃO

Neste estudo, foi realizada uma análise abrangente dos artigos que tratam dos dispositivos fotovoltaicos de primeira, segunda e terceira geração. Foram apresentadas as principais características físicas desses dispositivos, com ênfase nas células de silício de primeira geração e nas células de perovskita de terceira geração.

Além disso, foi observado que, embora as células de silício sejam as mais comercializadas atualmente, há estudos em andamento para substituí-las devido ao seu alto custo de produção e instalação. Por outro lado, as células de perovskita têm despertado grande interesse entre os cientistas, mas ainda enfrentam desafios significativos em termos de estabilidade e viabilidade comercial.

Finalmente, ficou claramente todo o impacto social, ambiental e econômico que o desenvolvimento destas tecnologias tem no mundo e, também, a evidência de que devido ao avanço tão rápido do desenvolvimento das células de perovskitas, estas tem grandes possibilidades de substituírem as células de primeira geração.

7. REFERÊNCIAS

1. MACHADO, Carolina T.; MIRANDA, Fabio S.. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: Uma Breve Revisão. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v. 7, n. 1, p.126-143, fev. 2015.
2. ELY, Fernando; SWART, Jacobus W. Energia solar fotovoltaica de terceira geração. **Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos ou Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), O Setor Elétrico**, ed, v. 105, p. 138-139, 2014.
3. RAPHAEL, Ellen et al. CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITAS: uma nova tecnologia emergente. **Química Nova**, São Paulo, v. 41, n. 1, p. 61-74, out. 2017. Sociedade Brasileira de Química (SBQ).
4. TIPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph A.. Efeito Fotoelétrico. In: TIPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph A.. **Física Moderna**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2017. Cap. 3. p. 81-87.
5. HALLIDAY, D. R. R. . W. J. Fundamentos de Física. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 4 **Ótica e Física Moderna**, 2016.
6. KITTEL, C. **Introdução à Física do Estado Sólido**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
7. SWART, Jacobus W.. **Conceitos Básicos para Semicondutores**. Disponível em: <https://www.ccs.unicamp.br/cursos/ee941/download/cap02.pdf>. Acesso em: 02 jan.2022.
8. BRAATZ, Luciano. **Eletrônica Geral I**. Rio Grande do Do Sul.
9. SZE, S.M.; NG, Kwok K.. Physics of Semiconductor Devices. **John Wiley & Sons, Inc**, [S.L.], p. 5-133, 10 abr. 2006. John Wiley & Sons, Inc.. <http://dx.doi.org/10.1002/0470068329>.
10. EISBERG, R. R. R. **Quantum Physics**. United States: John Wiley & Sons, Inc., 1976
11. RUY, F. BlueSol. **Efeito Fotoelétrico e Efeito Fotovoltaico: Entenda (De Uma Vez) Qual É Geração de Energia Elétrica Para Seu Imóvel.**, 18 agosto 2018. Disponível em: <<https://blog.bluesol.com.br/efeito-fotoeletrico-fotovoltaico/>>. Acesso em: 01 de março 2023.
12. DIAS, Luciano Cardoso. **CARACTERIZAÇÃO FOTOVOLTAICA, NANO E MICROESTRUTURAÇÃO DE FILMES FINOS DO COMPOSTO MULTIFERRÓICO Bi-FeO3**. 2021. 29 f. TCC (Graduação) - Curso de Licenciatura em Física, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2021.
13. SUM, C. T.; , M. N. Advancements in perovskite solar cells: photophysics behind the photovoltaics. **Energy Environmental Science**, p. 2518–2534, maio de 2014.
14. YANG, S. Y. et al. Above-bandgap voltages from ferroelectric. **Nature nanotechnology**, v. 5, p. 143-147, janeiro 2010.
15. FRIDKIN, V. M. **The Anomalous Photovoltaic Effect in Ferroelectrics. Photoferroelectrics** , v. 9, p. 85-113, 1979.

16. FREITAS, F. V.; ET AL. On the characteristics of perovskite structured BiFeO₃-PbTiO₃ thin films: Their potential to multifunctional photovoltaic applications. **Brazilian Journal of Physics**, 2021.
17. XIAO, Junyan *et al.* Perovskite thin-film solar cell: excitation in photovoltaic science. **Science China Chemistry**, [S.L.], v. 58, n. 2, p. 221-238, 4 jan. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11426-014-5289-2>.
18. TEIXEIRA, Marco Antonio Casadei; RAMOS, Heidy Rodriguez; AGUIAR, Alexandre de Oliveira e. **Perspectivas de Novos Materiais Alternativos ao Silício para a produção de Células Solares Fotovoltaicas: Uma Revisão Sistemática da Literatura**. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, [s. l], v. 09, n. 71, p. 48-62, 2021.
19. MANZANARES, José Lo. Balenzategui. **Tecnología de Células Solares de Silicio Cristalino**. 2008. 50 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Master En Energías Renovables y Mercado Energético, Eoi Escuela de Negocios, 2008.
20. Mori, V.; Santos, R. L. C.; Sobral, L. G. S. **Metalurgia do silício: processos de obtenção e impactos ambientais**, 1a. ed., CETEM/MCT: Rio de Janeiro, 2007.
21. ENERGY, Nrel Transforming. **BEST RESEARCH-CELL EFFICIENCIES**. Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/cell-pv-eff-emergingpv.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2023.
22. FREITAS, F. V. **O Composto BiFeO₃-PbTiO₃ Dopado com La: Relações propriedade/estrutura**. Universidade Estadual de Maringá. Maringá - PR, p. 9 - 17. 201(CBB 21. ed. 530.412).
23. SUM, C. T.; , M. N. Advancements in perovskite solar cells: photophysics behind the photovoltaics. **Energy Environmental Science**, p. 2518–2534, maio de 2014
24. YIN, Yongqi *et al.* Efficient and Stable Ideal Bandgap Perovskite Solar Cell Achieved by a Small Amount of Tin Substituted Methylammonium Lead Iodide. **Electronic Materials Letters**, [S.L.], v. 16, n. 3, p. 224-230, 25 fev. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13391-020-00206-3>.
25. ALVES, Marliana de Oliveira Lage. **ENERGIA SOLAR: ESTUDO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ON-GRID E OFF-GRID**. 2019. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2019.
26. EPE. Leilões. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/leiloes-de-energia/leiloes>

27. IRENA and IEA-PVPS (2016), “End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels” International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems.
28. GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento. 3. ed. : Coleção Acadêmica, 2012. 400 p.
29. RÜHLE, Sven. Tabulated values of the Shockley–Queisser limit for single junction solar cells. **Solar Energy**, [S.L.], v. 130, p. 139-147, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.02.015>.
30. SHOCKLEY, William; QUEISSER, Hans J.. Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. **Journal Of Applied Physics**, [S.L.], v. 32, n. 3, p. 510-519, mar. 1961. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1736034>.