

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

José Matheus Queiroz Rodrigues

**Avaliação de Tecnologias Fotovoltaicas para Integração em Automóveis  
Solares**

**São Carlos  
2025**

José Matheus Queiroz Rodrigues

**Avaliação de Tecnologias Fotovoltaicas para Integração em Automóveis  
Solares**

Trabalho de Final de Curso apresentado ao Departamento de Física da Universidade de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Física.

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Eiras

**São Carlos  
2025**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

José Matheus Queiroz Rodrigues

### **Avaliação de Tecnologias Fotovoltaicas para Integração em Automóveis Solares**

Trabalho de Final de Curso apresentado ao Departamento de Física da Universidade de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Física.

Orientador

---

Prof. Dr. José Antonio Eiras

Universidade Federal de São Carlos – Departamento de Física

Examinador

---

Prof. Dr. Vinicius Tribuzi Rodrigues Pinheiro Gomes

Universidade Federal de São Carlos – Departamento de Física

Examinador(a)

---

Prof. Dr. Alexandre José Gualdi

Universidade Federal de São Carlos – Departamento de Física

*“Dedico este trabalho aos meus pais e à minha namorada Thais Papile, pelo amor, apoio e incentivo de sempre.”*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, cuja presença e valores sempre guiaram minha trajetória. À minha namorada, Thais Papile, pela compreensão, parceria e por estar ao meu lado em cada etapa desta jornada.

Aos meus amigos Lucas Gabriel Bassan de Moraes, Davi Batista Silveira e Matheus Bolson, agradeço pela convivência, pelas conversas e pela leveza que trouxeram aos dias mais cansativos da graduação.

Expresso também minha gratidão ao meu orientador José Antonio Eiras, pelas orientações, pela disponibilidade e pelo comprometimento que contribuíram diretamente para a realização deste trabalho.

## RESUMO

O trabalho analisa de forma comparativa as principais tecnologias fotovoltaicas quanto à sua aplicabilidade em automóveis solares, enfatizando eficiência energética, durabilidade, flexibilidade, disponibilidade de matéria-prima, facilidade de produção e implicações de descarte. Para tanto, adota-se uma metodologia baseada em seis critérios técnicos e seis tecnologias representativas — silício cristalino (c-Si), silício policristalino (p-Si), silício amorfo (a-Si), cobre-índio-gálio-selênio (CIGS), telureto de cádmio (CdTe) e perovskitas — definidas pelo autor, às quais foram atribuídas notas de 1 a 5 em cada critério, cuja média permitiu uma avaliação consolidada. Os resultados indicam que o silício cristalino — especialmente o silício monocristalino — apresenta o melhor equilíbrio entre rendimento, estabilidade e maturidade industrial, obtendo a maior média entre as tecnologias estudadas; tecnologias de filmes finos, como CIGS e CdTe, oferecem vantagens de leveza e alta absorção em camadas delgadas, enquanto as perovskitas destacam-se pela elevada eficiência e extrema flexibilidade, ainda que limitadas por questões de durabilidade e gestão ambiental do descarte. O estudo conclui que soluções tandem, como a combinação de perovskita sobre silício, representam a rota mais promissora para conciliar eficiência e confiabilidade em veículos solares, recomendando-se esforços em encapsulamento, escalonamento da produção e desenvolvimento de rotas de reciclagem para viabilizar sua adoção no setor automotivo.

**Palavras-chave:** energia solar; células fotovoltaicas; carros solares; perovskita; silício cristalino.

## ABSTRACT

This work presents a comparative analysis of the main photovoltaic technologies regarding their applicability in solar-powered vehicles, emphasizing energy efficiency, durability, flexibility, raw material availability, ease of production, and end-of-life disposal implications. To this end, a methodology based on six technical criteria and six representative technologies is adopted — crystalline silicon (c-Si), polycrystalline silicon (p-Si), amorphous silicon (a-Si), copper–indium–gallium–selenide (CIGS), cadmium telluride (CdTe), and perovskites — as defined by the author. Each technology was assigned scores ranging from 1 to 5 for each criterion, and the resulting averages enabled a consolidated assessment. The results indicate that crystalline silicon — particularly monocrystalline silicon — exhibits the best balance between efficiency, stability, and industrial maturity, achieving the highest average score among the technologies analyzed. Thin-film technologies such as CIGS and CdTe offer advantages in terms of low weight and high absorption in thin layers, while perovskites stand out for their high efficiency and extreme flexibility, although they are still limited by durability issues and environmental concerns related to end-of-life management. The study concludes that tandem solutions, such as perovskite-on-silicon configurations, represent the most promising route to reconcile efficiency and reliability in solar vehicles, and recommends further efforts in encapsulation, production scale-up, and the development of recycling pathways to enable their adoption in the automotive sector.

**Keywords:** solar energy; photovoltaic cells; solar vehicles; perovskite; crystalline silicon.

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	15
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	15
3.1.    RADIAÇÃO, IRRADIÂNCIA E IRRADIAÇÃO .....	15
3.2.    TEORIA DE BANDAS.....	17
3.3.    JUNÇÃO P-N.....	22
3.4.    EFEITO FOTOVOLTAICO E CÉLULAS FOTOVOLTAICAS .....	25
<b>3.4.1.    Célula Fotovoltaica Elementar</b> .....	26
<b>3.4.2.    Célula com Emissor e Face Traseira Passivados</b> .....	28
<b>3.4.3.    Células N-I-P e P-I-N</b> .....	29
<b>3.4.4.    Células Tandem</b> .....	31
3.5.    RENDIMENTO E COMPONENTES DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA .....	32
3.6.    MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	36
3.7.    CARRO SOLAR .....	38
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	39
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	43
5.1.    SILÍCIO .....	43
5.2.    CIGS.....	46
5.3.    CDTE .....	48
5.4.    PEROVSKITA.....	50
5.5.    TABELA COMPARATIVA .....	52
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	53



## 1. INTRODUÇÃO

O aumento contínuo da temperatura global tem provocado transformações profundas no equilíbrio climático do planeta. O derretimento acelerado das geleiras e o consequente aumento do nível dos mares, aliado à intensificação de eventos extremos — como secas prolongadas, ondas de calor e inundações —, evidenciam os impactos diretos do aquecimento global sobre ecossistemas, agricultura e saúde humana. Essas alterações resultam, em grande parte, da intensificação do efeito estufa, impulsionado pela emissão de gases como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxidos de nitrogênio ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e clorofluorcarbonetos (CFCs), provenientes de atividades industriais, agrícolas e energéticas [1].

Nesse cenário, o Acordo de Paris, firmado em 2015 durante a COP21, representa um marco na política climática global ao estabelecer metas para limitar o aumento da temperatura média mundial a, no máximo, 2 °C acima dos níveis pré-industriais (1850-1900), buscando esforços adicionais para restringi-lo a 1,5 °C. Com isso, a urgência climática se torna ainda mais evidente diante do aumento recorde das temperaturas observado na última década. A Organização Meteorológica Mundial (OMM) confirmou que 2024 foi o ano mais quente já registrado, atingindo a temperatura média global da superfície de  $(1,55 \pm 0,13)$  °C acima da média dos níveis pré-industriais, indicando que os esforços para mitigar o aquecimento global ainda não são o suficiente [1,2].

Entre os setores responsáveis por esse cenário, o de energia se destaca como o principal emissor de gases de efeito estufa em escala global, responsável por 73% do total. No Brasil, o setor energético ocupa a terceira posição em emissões, ficando atrás apenas das mudanças de uso da terra e da agropecuária, como é possível observar na Figura 1 [3,4].

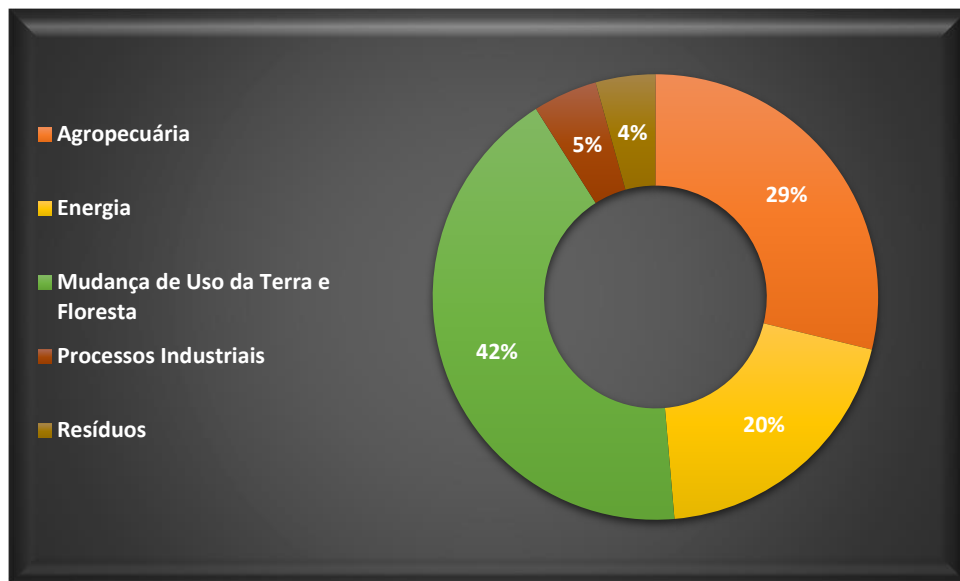


Figura 1 – Participação dos setores no perfil das emissões brasileiras em 2024. Fonte: Adaptado de [4].

Grande parte desse impacto decorre principalmente da queima de combustíveis fósseis no setor de transportes, que emitiu cerca de 222 Mt (Megatoneladas) de CO<sub>2</sub>e<sup>1</sup> (GWP-AR6)<sup>2</sup> em 2024, conforme mostrado na Figura 2 — valor superior à soma das demais categorias ou valor que representa mais da metade das emissões do setor. Dentro desse setor, os automóveis respondem por quase um terço das emissões totais (Gráfico de pizza na Figura 2), o que evidencia seu papel significativo nos desafios da transição energética, entendida como o processo de substituição gradual das fontes fósseis por matrizes renováveis e de baixo carbono [5,6].

<sup>1</sup> Dióxido de carbono equivalente — é uma unidade usada para expressar o impacto total de todos os gases de efeito estufa (como CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O) em termos do equivalente em CO<sub>2</sub> que teria o mesmo potencial de aquecimento global.

<sup>2</sup> Potencial de aquecimento global em cem anos (GWP) conforme o 6º Relatório de Avaliação (AR6) do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

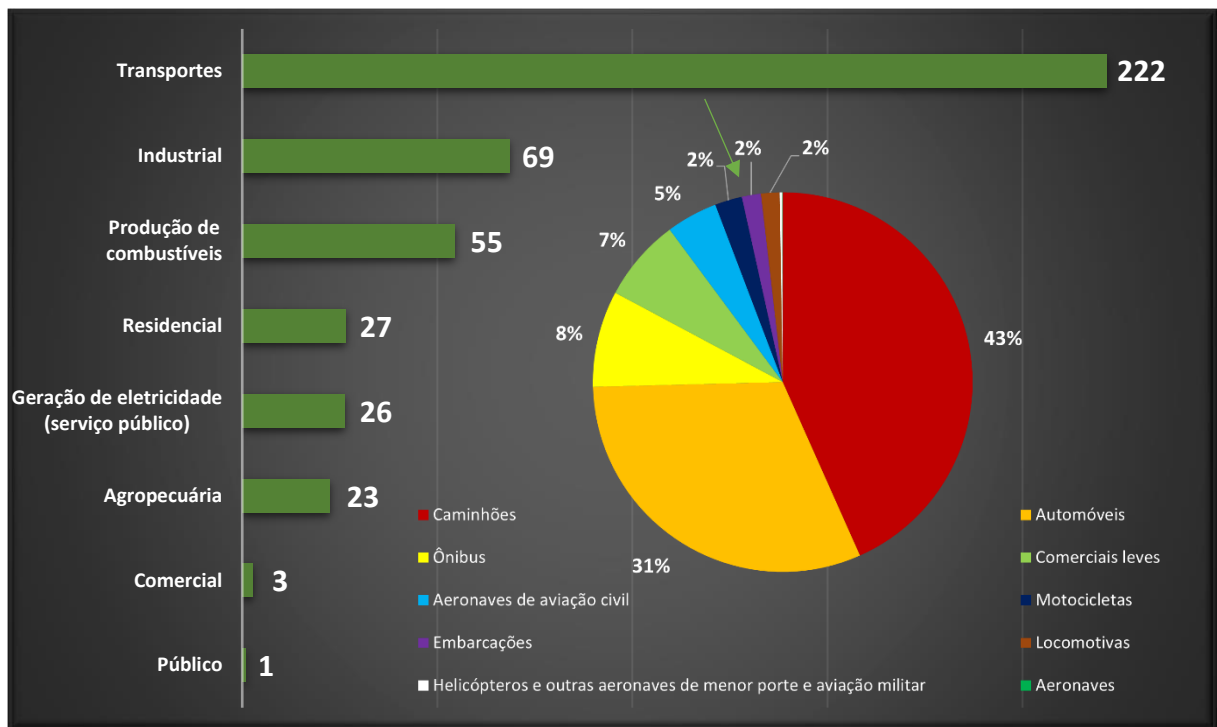


Figura 2 - Distribuição das emissões de CO<sub>2</sub>e(t) GWP-AR6 no setor de energia do Brasil em 2024, com detalhamento do segmento de transportes. Fonte: Adaptado de [5,6].

Com isso, novas tecnologias surgem para tentar resolver esse problema, como por exemplo, os carros elétricos e carros solares. Os automóveis solares possuem painéis em sua carroceria que alimentam uma bateria e possibilitam uma maior independência de carregamento [7-9].

Entretanto esses carros ainda enfrentam grandes desafios e alguns deles obviamente são em comum com os carros elétricos, como o rendimento dos painéis solares, o clima local, infraestrutura de carregamento, peso do carro, área das placas fotovoltaicas, etc [10].

Alguns carros já estão em desenvolvimento ou foram comercializados, como o Sono Sion (Figura 3.a), da Sono Motors (Alemanha), o Aptera (Figura 3.b), da Aptera Motors (Estados Unidos), e o Lightyear 0 (Figura 3.c), da empresa Lightyear (Países Baixos). Esses veículos prometem uma maior independência de carregamento, alcançando autonomies próximas de 700 km ao combinar a energia armazenada na bateria com a geração solar em um dia ensolarado. Cada um deles é projetado com o objetivo de minimizar as limitações técnicas e estruturais descritas anteriormente [7-9].



Figura 3 – Modelo de automóveis solares já comercializados ou em projeto: a) Sono Sion; b) Aptera e c) Lightyear 0. Fontes: [11-13].

Em relação às células fotovoltaicas alguns obstáculos ainda pendem, especialmente no que se refere à eficiência de conversão, ao tempo de vida útil e ao descarte dos módulos. Atualmente, as tecnologias baseadas em silício cristalino — tanto monofacial quanto bifacial — dominam o mercado, devido à sua maturidade tecnológica, estabilidade e eficiência superior a 20%. No entanto, novas gerações de materiais vêm despertando crescente interesse. Entre elas, destacam-se os filmes finos, como o telureto de cádmio (CdTe), o cobre-índio-gálio-selênio (CIGS) e o silício amorfo (a-Si), que oferecem menor consumo de material e maior flexibilidade de aplicação. As células de perovskita, por sua vez, representam um avanço notável por combinarem baixo custo de produção e elevadas eficiências laboratoriais, enquanto as estruturas multijunção buscam explorar faixas complementares do espectro solar, atingindo rendimentos teóricos superiores a 40% [14-16].

Custo e durabilidade são fatores determinantes para qualquer tipo de veículo. No entanto, em automóveis solares, essas exigências se tornam ainda mais críticas, pois dependem diretamente da seleção adequada dos materiais fotovoltaicos e da otimização dos processos de fabricação — como deposição, dopagem, encapsulamento e reaproveitamento. A escolha apropriada dos materiais pode não apenas potencializar o desempenho energético do veículo, mas também reduzir

significativamente o impacto ambiental associado à produção das células solares. Dessa forma, para esclarecer o escopo e as metas deste estudo, os objetivos gerais e específicos são apresentados na seção a seguir.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral é avaliar as tecnologias fotovoltaicas mais adequadas para aplicação em automóveis solares e o impacto potencial da substituição de veículos a combustíveis fósseis por automóveis solares na emissão de gases de efeito estufa no setor de transportes do Brasil, no contexto da transição energética. Já os objetivos específicos são:

- Avaliar comparativamente os materiais e as rotas de fabricação de diferentes tecnologias fotovoltaicas aplicáveis a automóveis solares, considerando eficiência energética, durabilidade, flexibilidade de integração, disponibilidade de matéria-prima, facilidade de produção e implicações ambientais do descarte.
- Identificar quais tecnologias fotovoltaicas apresentam maior adequação para aplicação no cenário de curto prazo.
- Apontar, de forma sucinta, a tecnologia que demonstra maior potencial de desenvolvimento futuro, como indicação de tendência tecnológica.

## 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1. RADIAÇÃO, IRRADIÂNCIA E IRRADIAÇÃO

A **radiação** é uma forma de transferência de **energia** entre corpos que ocorre por meio da emissão de ondas eletromagnéticas — ou, sob a ótica quântica, pela emissão de partículas. A Figura 4 ilustra todo o espectro da radiação eletromagnética, no qual é possível observar que o que chamamos de luz visível representa apenas uma pequena fração da radiação térmica emitida pelo Sol, resultante dos processos de fusão nuclear que ocorrem em seu núcleo [17, 18].

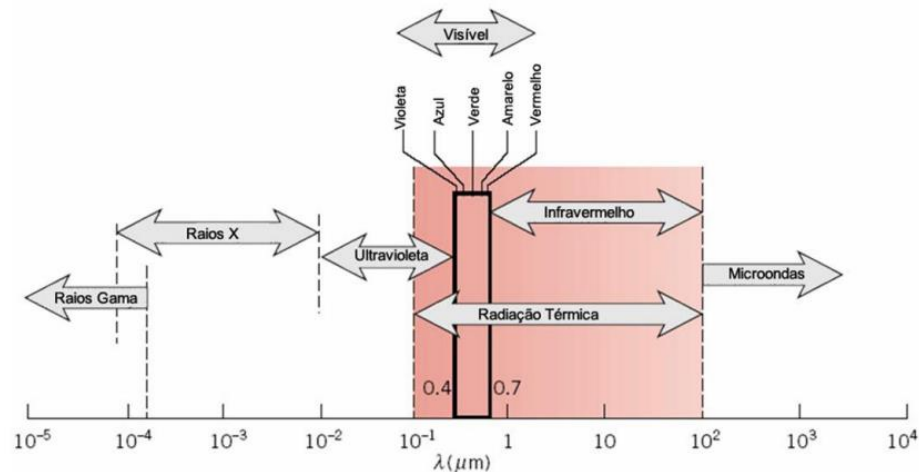


Figura 4 – Espectro eletromagnético com destaque para o intervalo da radiação térmica e detalhamento da luz visível. Fonte: [17].

Dessa forma, a **irradiância** solar representa a **potência** (taxa instantânea de energia) solar que incide sobre uma **superfície**, expressa em  $W/m^2$ . A irradiância global é composta por duas parcelas: a irradiância direta, que corresponde à radiação proveniente diretamente do Sol, sem sofrer processos de espalhamento; e a irradiância difusa, resultante da dispersão dos raios solares por partículas, moléculas e nuvens na atmosfera. Ambas as componentes podem incidir sobre superfícies horizontais ou inclinadas, variando em intensidade conforme o ângulo zenital solar, que define a posição do Sol em relação à vertical do local [19].

Já a **irradiação** (ou insolação) corresponde à **energia** solar total recebida por uma **superfície** ao longo de um determinado intervalo de **tempo**, sendo definida como a integral temporal da irradiância. Essa grandeza expressa, portanto, a densidade de energia acumulada por unidade de área, sendo comumente apresentada em  $kWh/m^2$ . A Figura 5 ilustra os valores de irradiação global no plano horizontal (IGH), no plano inclinado (IPI) e da irradiação direta normal (IDN), considerando valores médios diários e anuais para as cinco regiões do Brasil. [19].



Figura 5 – IGH, IPI e IDN por região no Brasil. Fonte [19].

A IPI é maior que a IGH, uma vez que o plano é inclinado de forma que receba a radiação perpendicularmente, ou o mais próximo possível, durante o maior tempo, já a IGH e IPI são maiores que IDN pois possuem a componente difusa inclusa. Sabendo que a China, atualmente maior produtora mundial de energia solar, recebe uma irradiação global horizontal média anual de aproximadamente 1.511,8 kWh/m<sup>2</sup>, a Figura 4 evidencia o grande potencial do Brasil para a geração fotovoltaica. Observa-se que, em todas as regiões do território brasileiro, os valores médios de irradiação superam os valores registrados na China, indicando condições naturais amplamente favoráveis para o aproveitamento e expansão da energia solar no país [19–21].

### 3.2. TEORIA DE BANDAS

Para compreender como a luz interage com os materiais, é necessário, antes, entender a estrutura eletrônica que os compõe. A matéria é formada por átomos constituídos de um núcleo central, cercado por uma nuvem eletrônica cuja densidade

de probabilidade indica onde é mais provável encontrar os elétrons. Essas partículas, de natureza quântica, são descritas por uma função de onda que obedece à Equação de Schrödinger, a qual determina seus estados de energia permitidos [22].

Dessa forma, ao interpretar os elétrons como ondas que se propagam pelo sólido, elas interagem com a periodicidade do retículo cristalino, produzindo interferências construtivas e destrutivas determinadas pela lei de Bragg. Essa interação periódica faz com que, para certos intervalos de energia, não existam soluções permitidas para a Equação de Schrödinger sob as condições impostas pela rede cristalina, originando as lacunas de energia que discretizam os níveis/bandas de energia. Simultaneamente, essa propagação quântica das ondas eletrônicas é relacionada à superposição das funções de onda associadas aos elétrons dos átomos constituintes, respeitando o princípio de exclusão de Pauli, que impede que dois elétrons ocupem o mesmo estado quântico. Essa visão integrada une o comportamento ondulatório quântico dos elétrons, as regras da mecânica quântica e as condições de interferência da rede cristalina para explicar a estrutura eletrônica dos sólidos [23,24].

Os elétrons que ocupam a banda mais elevada são responsáveis pelas ligações químicas que mantêm o sólido, esta banda é chamada de banda de valência (BV). Acima desta banda existe a banda de condução (BC), que fica desocupada ou parcialmente ocupada, elétrons nessa banda têm mobilidade, podendo se mover através do sólido, gerando uma corrente. O que se costuma chamar de bandgap ( $E_g$ ) é a diferença de energia entre o topo da banda de valência e o fundo da banda de condução. Um elétron pode ser excitado de BV para BC, para tal, o mesmo deve absorver a energia de um fóton que possua energia maior ou igual a  $E_g$  [18].

A energia  $E_f$  de um fóton depende apenas da frequência ( $\nu$ ) da radiação e pode ser escrita pela Equação 1 [18]:

$$E_f = h\nu \quad (2.2.1)$$

onde  $h$  é a constante de Planck e equivale a aproximadamente  $6,6 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} / \text{s}$ . Com base na disposição das bandas de energia, os materiais sólidos podem ser classificados em três categorias principais, representadas na Figura 6 [18]:

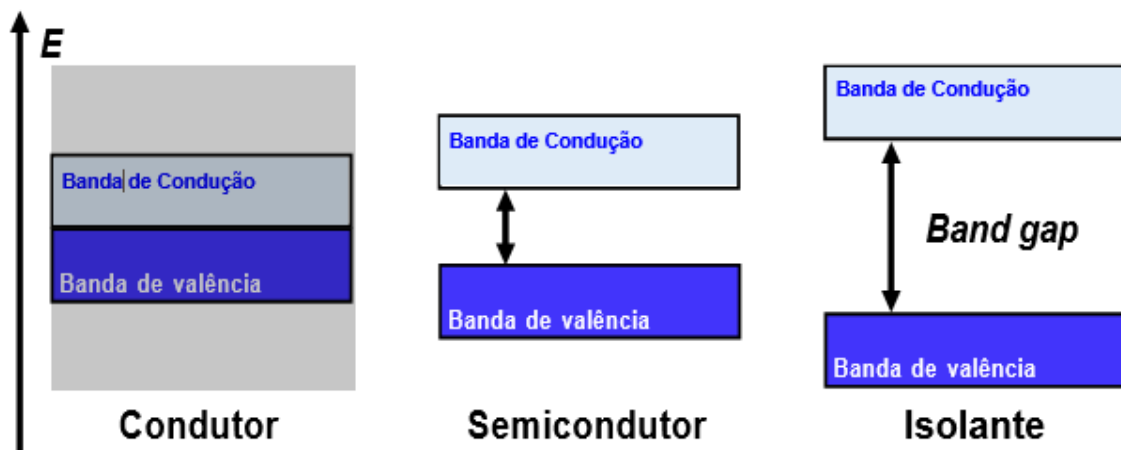


Figura 6 – Configuração de bandas para condutor, semicondutor e isolante. Fonte: [25].

- Condutores: Possuem banda de valência parcialmente preenchida ou sobreposição entre as bandas de valência e condução, resultando em alta condutividade elétrica [18];
- Isolantes: Apresentam bandgap superior a 2 eV, impedindo a excitação térmica de elétrons para a banda de condução à temperatura ambiente, tendo sua banda de valência totalmente preenchida [18];
- Semicondutores intrínsecos: Em um semicondutor intrínseco,  $E_g$  é relativamente pequena, geralmente no intervalo de 0,5-2,0 eV, facilitando a promoção dos elétrons da banda de valência para a banda de condução e possibilitando que os elétrons da banda de condução sejam acelerados por um campo elétrico. Quando um elétron é promovido, ele deixa um buraco, permitindo que elétrons vizinhos ocupem esses buracos e consequentemente deixando outro buraco. Esse processo contínuo pode ser interpretado como o movimento de buracos no mesmo sentido do campo elétrico, isto é, no sentido oposto ao movimento dos elétrons. Dessa forma, os buracos comportam-se efetivamente como portadores de carga positiva. Uma característica marcante dos semicondutores é que, ao contrário do que ocorre nos metais, sua condutividade elétrica aumenta com a elevação da temperatura (ou, equivalentemente, sua resistividade diminui). Isso ocorre porque o aumento da temperatura promove a excitação de mais elétrons da banda de valência para a banda de condução, elevando simultaneamente o número de buracos disponíveis. Em semicondutores, o efeito combinado do aumento do número

de portadores de carga — elétrons e buracos — supera o efeito do maior espalhamento eletrônico devido às vibrações térmicas do retículo cristalino [18].

Grande parte dos dispositivos eletrônicos, como diodos e transistores, é baseada em semicondutores dopados — materiais cuja condutividade elétrica é ajustada pela introdução controlada de impurezas específicas em um semicondutor intrínseco. Esse processo, denominado dopagem, permite modificar a concentração e o tipo de portadores de carga do material [18].

No silício dopado com arsênio, parte dos átomos de silício na rede cristalina é substituída por átomos de arsênio, que possuem cinco elétrons de valência — um a mais que o silício. Quatro desses elétrons formam ligações covalentes com os átomos vizinhos, enquanto o quinto permanece fracamente ligado ao átomo dopante, como ilustrado na Figura 6.a. Esse elétron adicional ocupa um nível de energia ligeiramente abaixo da banda de condução, conhecido como nível doador (Figura 6.b), podendo ser facilmente excitado termicamente para essa banda, onde passa a contribuir para a condução elétrica [18].

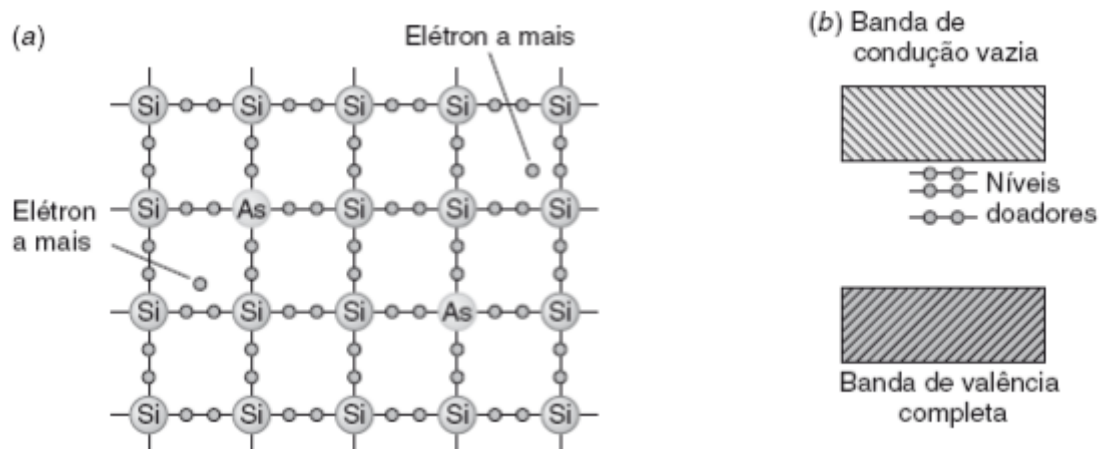


Figura 6 - (a) Cristal de silício dopado com arsênio, destacando o elétron extra fracamente ligado ao átomo dopante. (b) Diagrama de bandas de um semicondutor tipo  $n$ , mostrando os níveis doadores logo abaixo da banda de condução. Fonte: [18].

O sistema formado pelo elétron fracamente ligado e o núcleo ionizado do dopante é análogo ao átomo de hidrogênio, e, portanto, a teoria de Bohr pode ser utilizada para estimar seus níveis de energia, desde que sejam consideradas duas modificações fundamentais [18]:

1. O cristal atua como um meio com alta constante dielétrica ( $\kappa$ ), o que reduz a atração coulombiana entre o elétron e o íon positivo [18];

2. A massa do elétron deve ser substituída pela massa efetiva ( $m^*$ ), que leva em conta a influência do potencial periódico do cristal sobre o movimento do elétron [18].

Com essas adaptações, as energias e os raios orbitais médios do elétron ligado ao dopante são descritos pelas Equações 2.2.2 e 2.2.3 [18]:

$$E_n = -\frac{1}{2} \left( \frac{ke^2}{\hbar} \right)^2 \frac{m^*}{\kappa^2 n^2} \quad (2.2.2)$$

$$\langle r_n \rangle = a_0 n^2 \times \frac{m_e}{m^*} \times \kappa \quad (2.2.3)$$

onde  $a_0 = 0,0529 \text{ nm}$  é o raio de Bohr,  $n$  o número quântico principal,  $m_e$  é a massa do elétron  $9,109382 \times 10^{-31} \text{ kg}$  e  $k \approx 9,0 * 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$  é a constante eletrostática [18].

Usando os valores experimentais da massa efetiva do elétron no silício ( $m^* = 0,2m_e$ ) e da constante dielétrica ( $\kappa = 11,8$ ), obtém-se para o estado fundamental ( $n = 1$ ) uma energia  $E_1 = -0,020 \text{ eV}$ , valor significativamente menor que o do átomo de hidrogênio ( $-13,6 \text{ eV}$ ). O raio médio correspondente é  $\langle r_1 \rangle = 3,1 \text{ nm}$ , aproximadamente 60 vezes maior que o raio do hidrogênio. Isso mostra que o elétron doador está muito fracamente ligado e pode ser facilmente excitado à banda de condução, especialmente à temperatura ambiente [18].

Esses níveis de energia próximos à banda de condução são chamados de níveis doadores, e os átomos que os originam (como o arsênio) são denominados dopantes doadores. Um semiconductor com esse tipo de dopagem é classificado como semiconductor tipo *n*, pois seus portadores majoritários são elétrons (de carga negativa). A condutividade pode ser ajustada com alta precisão, uma vez que depende diretamente da concentração de impurezas — mesmo pequenas quantidades (na ordem de partes por milhão) podem aumentar a condutividade em várias ordens de magnitude [18].

De forma análoga, o semiconductor tipo *p* pode ser obtido substituindo parte dos átomos de silício por átomos de gálio, que possuem apenas três elétrons de valência. Nessa configuração, o gálio “aceita” um elétron da banda de valência do silício para completar suas quatro ligações covalentes, criando um buraco (lacuna eletrônica) na banda de valência, como ilustrado na Figura 7(a). Os níveis de energia associados a esses buracos localizam-se logo acima do topo da banda de valência e são

conhecidos como níveis aceitadores, uma vez que os átomos dopantes aceitam elétrons — conforme mostrado na Figura 7(b) [18].

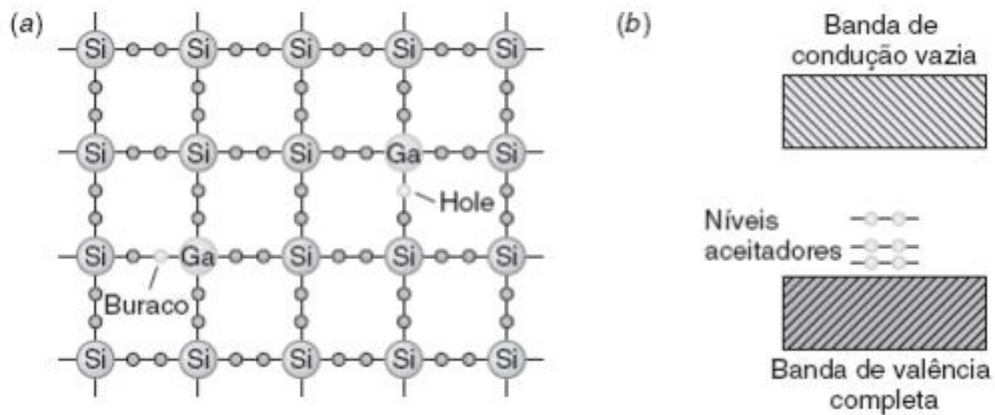


Figura 7 - a) Estrutura bidimensional de um cristal de silício dopado com gálio, onde a ausência de um elétron gera um buraco responsável pela condução elétrica. (b) Estrutura de bandas de um semiconductor tipo  $p$ , com níveis aceitadores localizados logo acima da banda de valência [18].

O conjunto formado pelo íon de gálio e o buraco também pode ser descrito de forma análoga ao átomo de hidrogênio, permitindo o uso da teoria de Bohr para calcular seus níveis de energia. Quando um buraco é transferido para a banda de valência (ou, de forma equivalente, quando um elétron é promovido dos níveis aceitadores para essa banda), ele se torna livre para participar do transporte elétrico. Assim, os semicondutores tipo  $p$  têm como portadores majoritários os buracos, que se comportam como partículas de carga positiva [18].

### 3.3. JUNÇÃO P-N

Ao unir-se dois semicondutores dopados (um do tipo  $p$  e outro do tipo  $n$ ), tem-se a junção  $p$ - $n$ , onde ocorre um processo espontâneo de difusão de portadores. Elétrons do lado  $n$  tendem a se mover para o lado  $p$ , onde há lacunas disponíveis, enquanto lacunas da região  $p$  difundem-se em direção ao lado  $n$ . Essa recombinação inicial de cargas gera uma zona próxima à interface onde praticamente não há portadores livres, chamada região ou camada de depleção, como se pode observar na Figura 8. Nessa região, permanecem íons fixos — positivos no lado  $n$  e negativos no lado  $p$  — que estabelecem um campo elétrico interno e uma barreira de potencial que se opõe à difusão contínua de cargas [18,26].

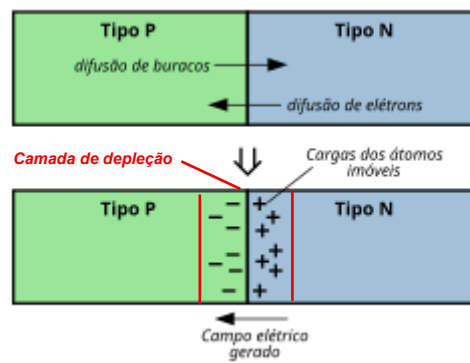


Figura 8- Difusão de portadores em uma junção p-n, formando a camada de depleção. Fonte: Adaptado de [27].

Sem radiação incidente e sem qualquer tensão aplicada externamente, a junção permanece em equilíbrio dinâmico. Nesse estado, surge uma corrente resultante da geração térmica de portadores, a qual se anula pela soma de dois mecanismos distintos: a corrente de deriva ( $i^D$ ) e a corrente de difusão ( $i^d$ ) [28].

A corrente de deriva é causada pelo campo elétrico interno da depleção e desloca portadores minoritários em direção às regiões onde são majoritários. Possui duas contribuições: lacunas que se movem do lado n para o lado p ( $i^D_p$ ) e elétrons que se deslocam do lado p para o lado n ( $i^D_n$ ) [28].

Já a corrente de difusão ( $i^d$ ) decorre dos gradientes de concentração entre as regiões p e n. Também é composta por duas partes: lacunas difundindo do lado p para o lado n ( $i^d_p$ ) e elétrons movendo-se do lado n para o lado p ( $i^d_n$ ). Como cada componente de deriva é cancelada pela respectiva componente de difusão, o resultado final no equilíbrio é nulo [28].

$$i^D = i^D_p + i^D_n \quad i^d = i^d_n + i^d_p \quad i = i^D = i^d = 0 \quad (2.3.1)$$

A barreira de potencial formada na junção corresponde a uma energia  $q\psi_{bi}$ , sendo  $\psi_{bi}$  o potencial embutido e  $q$  a carga elementar (carga do elétron). Esse potencial pode ser calculado, em equilíbrio térmico e sem polarização externa, pela expressão [26, 28]:

$$\psi_{bi} = V_T \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right), \quad (2.3.2)$$

onde  $V_T = \frac{k_B T}{q}$  é a tensão térmica,  $k_B = 1,380649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  é a constante de Boltzmann  $N_A$  e  $N_D$  são as concentrações de dopantes aceitadores e doadores,

respectivamente, e  $n_i$  é a concentração intrínseca (sem dopagem) de portadores. Quando se aplica uma tensão externa  $V$ , o potencial efetivo sobre a região de depleção passa a ser  $\Psi = \Psi_{bi} - V$ . Assim, sob polarização direta ( $V > 0$ ), a diferença de potencial diminui e a região de depleção se estreita; sob polarização reversa ( $V < 0$ ), o campo interno aumenta e a depleção se alarga, dificultando a condução corrente, entretanto, se for fornecida tensão suficiente (tensão de ruptura) o material também passa a conduzir eletricidade. O comportamento elétrico da junção depende da polarização externa aplicada e pode ser avaliada graficamente na Figura 9 [18,26]:

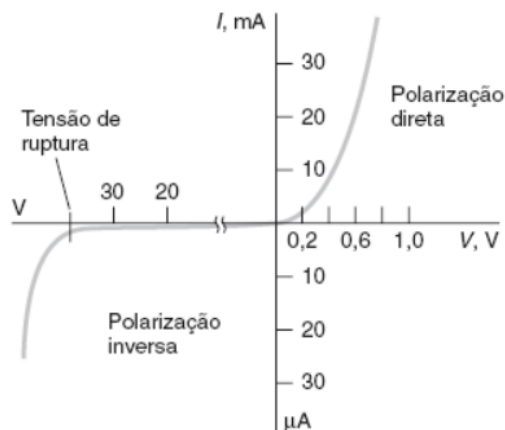


Figura 9 - Curva característica corrente-tensão de uma junção p-n de silício, evidenciando as diferentes escalas de corrente para as polarizações direta e reversa. Fonte: [18].

A largura total dessa região é expressa por [26].:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} (\Psi_{bi} - V)}, \quad (2.3.3)$$

onde  $\varepsilon_s$  é a permissividade do semicondutor e  $q$  é a carga elementar. Essa equação mostra que a largura da camada de depleção depende diretamente da dopagem e do potencial aplicado. Além disso, a depleção distribui-se de forma desigual entre as regiões p e n, sendo maior no lado menos dopado, segundo as expressões [26]:

$$W_p = \frac{N_D}{N_A + N_D} W \quad \text{e} \quad W_n = \frac{N_A}{N_A + N_D} W \quad (2.3.4)$$

Dessa forma, quando  $N_A \gg N_D$ , a maior parte da depleção se estende para o lado n — fato explorado em células fotovoltaicas para maximizar o volume de separação de portadores e a eficiência de coleta dos portadores de carga [26].

### 3.4. EFEITO FOTOVOLTAICO E CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Em 1839, Alexandre-Edmond Becquerel observou a geração de uma tensão elétrica em uma junção entre um eletrodo e um eletrólito sob iluminação. Décadas depois, Russell Ohl, em 1940, observou o fenômeno em uma junção p–n de silício, e pesquisas subsequentes em germânio foram conduzidas por Benzer (1946) e Pantchechnikoff (1952). Esse feito é denominado Efeito Fotovoltaico e teve seu marco histórico em 1954, quando Chapin et al. desenvolveram a primeira célula solar de silício monocristalino (c-Si) com eficiência de 6%, fato que impulsionou o desenvolvimento das tecnologias fotovoltaicas contemporâneas [26,29].

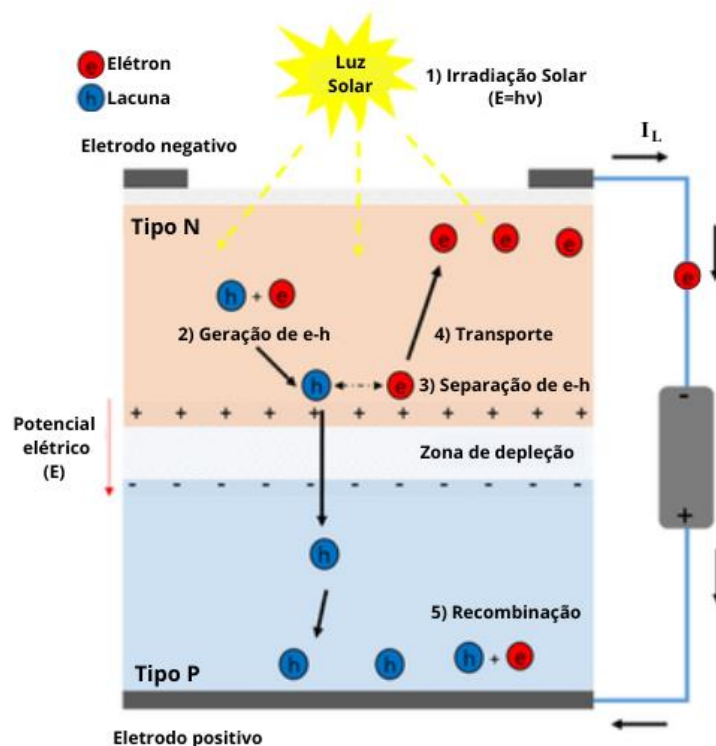


Figura 10 – Esquema de funcionamento de uma célula p–n sob iluminação: geração de pares elétron–lacuna, separação por campo na zona de depleção e coleta por contatos, resultando na corrente fotogerada  $I_L$ . (Setas mostram movimento dos portadores; corrente convencional externa segue a polaridade dos terminais.) Fonte: Adaptado de [30].

Fisicamente, o fenômeno pode ser compreendido da seguinte forma: quando um fóton com energia igual ou superior à  $E_g$  do material é absorvido, ele transfere energia suficiente para promover um elétron da banda de valência para a banda de condução, originando um par elétron–lacuna. A energia em excesso dos fótons que possuem energia maior que  $E_g$  é dissipada por calor num processo denominado termalização [26,28].

Quando esse efeito ocorre sobre a região de depleção de uma junção p-n, o campo elétrico interno existente faz com que os elétrons sejam acelerados em direção à região tipo n, enquanto as lacunas se deslocam para o lado tipo p —, o que impede sua recombinação imediata [26,28].

Esse movimento ordenado das cargas gera uma corrente elétrica, também de deriva, denominada corrente fotogerada ( $I_L$ ), representada na Figura 10, e que possui duas componentes: a gerada pelo movimento dos elétrons e a gerada pelo movimento das lacunas. Essa corrente tem sentido inverso à corrente de um diodo polarizado diretamente [28].

Quando os pares elétron-lacuna são gerados pela luz fora da região de carga espacial, eles não estão sob ação do campo elétrico da junção. Nessa situação, os portadores minoritários — isto é, lacunas no lado n e elétrons no lado p — só conseguem alcançar a junção por difusão, movendo-se devido ao gradiente natural de concentração de portadores existente no material. Para que consigam chegar até a junção pn antes de se recombinarem, eles precisam ter tempo de vida suficientemente longo e comprimento de difusão adequado. Caso consigam alcançar a região de depleção, o campo elétrico interno da junção então separa as cargas e elas são coletadas, contribuindo assim para  $I_L$ . Caso contrário, recombina antes e deixam de contribuir para a corrente [28].

A recombinação pode ocorrer de duas formas principais. Na recombinação direta (banda-a-banda), o elétron na banda de condução volta para a banda de valência, liberando energia na forma de um fóton — esse é o mecanismo usado em LEDs. Na recombinação indireta, o elétron passa por níveis de energia intermediários (defeitos) dentro da banda proibida antes de recombinar, o que também libera energia, mas via processos diferentes e geralmente menos eficientes em emissão de fótons [28].

#### **3.4.1. Célula Fotovoltaica Elementar**

A configuração mais elementar de uma célula fotovoltaica — ilustrada na Figura 11 — é formada por um conjunto de camadas especialmente projetadas para maximizar a absorção de luz e o aproveitamento dos portadores de carga gerados. Na parte frontal encontra-se o contato metálico superior, normalmente estruturado em forma de malha fina, cuja função é coletar os elétrons produzidos pelo efeito fotovoltaico ao mesmo tempo em que permite a maior entrada possível de radiação.

Logo abaixo, é aplicada uma camada antirreflexiva (AR), comumente de nitreto de silício ( $\text{SiNx}$ ), responsável por minimizar a reflexão e aumentar o tempo de permanência da luz no semicondutor, favorecendo a absorção fotônica [28].

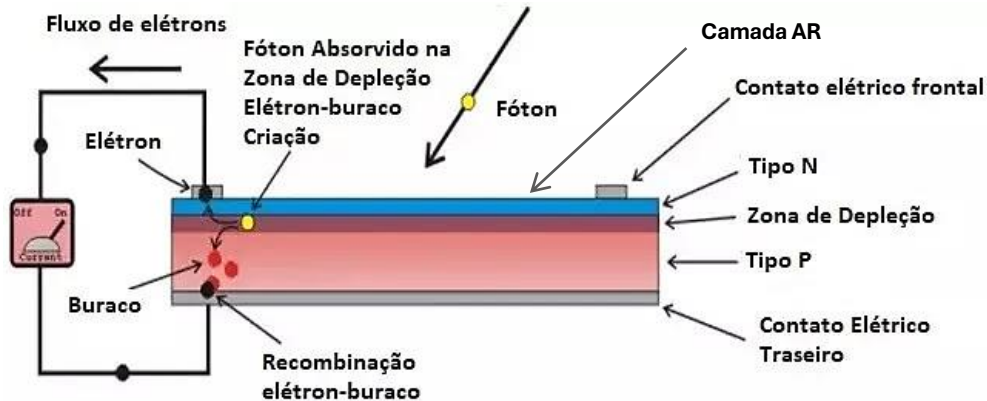


Figura 11 – Componentes de uma célula fotovoltaica elementar, evidenciando a geração e recombinação do par elétron-lacuna. Fonte: Adaptado de [31].

Abaixo desse revestimento situa-se a junção p-n, elemento central da célula, encarregada de separar e direcionar os portadores gerados pela luz. O campo elétrico interno criado nessa região impulsiona os elétrons em direção ao contato frontal, enquanto as lacunas são conduzidas para o contato posterior. Na parte traseira da célula encontra-se o contato metálico depositado sobre o material tipo p, cuja função é coletar as lacunas — portadores majoritários — e completar o circuito elétrico. É importante ressaltar que o vidro utilizado no encapsulamento fotovoltaico não integra a célula propriamente dita; ele compõe o módulo e tem como papel garantir proteção mecânica e transparência óptica [32].

Apesar dessa estrutura consolidada, a eficiência das células convencionais é fortemente limitada pela recombinação de portadores, especialmente nas superfícies frontal e posterior. Defeitos estruturais ou impurezas, seja no volume do semicondutor ou em sua superfície, atuam como centros de recombinação. Como a superfície representa uma ruptura significativa da rede cristalina, ela tende a apresentar uma densidade elevada de estados de recombinação. Nessas regiões, a concentração de portadores minoritários se reduz drasticamente, criando um gradiente que atrai portadores das regiões adjacentes. Assim, a recombinação superficial passa a ser limitada pelo fluxo de portadores minoritários que migram em direção à superfície. Com o intuito de minimizar essas perdas e elevar a eficiência

final, diversas arquiteturas avançadas de células fotovoltaicas foram desenvolvidas nas últimas décadas [32].

### 3.4.2. Célula com Emissor e Face Traseira Passivados

Na célula com Emissor e Face Traseira Passivados (Passivated Emitter and Rear Cell – PERC), representada na Figura 12, introduz-se uma camada dielétrica de passivação na parte traseira da célula, normalmente composta por  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  ou empilhamentos finos de  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ . Essa camada contém cargas fixas que geram um campo elétrico repulsivo para os portadores minoritários (elétrons, no caso de células p-tipo), reduzindo significativamente a recombinação na superfície posterior do silício. Para permitir a extração de corrente, pequenos pontos de contato metálico são mantidos na região traseira. Como resultado, diminui-se a área efetiva de contato metal-silício, reduzindo ainda mais a taxa de recombinação de superfície [33,34].

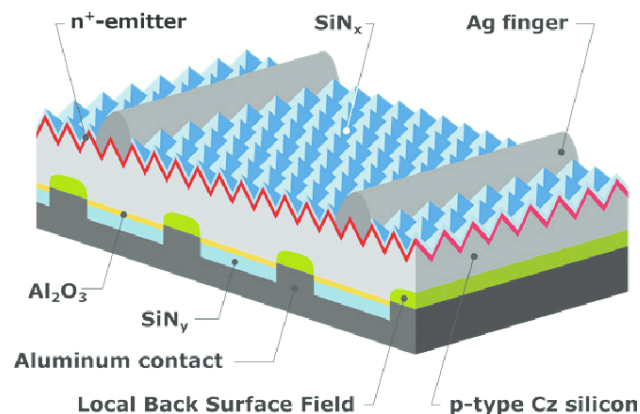


Figura 12 – Estrutura de uma célula PERC. Fonte: [33].

Além da passivação elétrica, a camada dielétrica traseira também atua como um espelho interno, refletindo fótons que não foram absorvidos na primeira passagem pela camada ativa. Isso aumenta o caminho óptico da luz dentro da célula e, portanto, a taxa de geração de pares elétron-lacuna, resultando em maior corrente de curto-circuito e eficiência global [35].

Graças ao baixo custo de implementação (só é preciso incluir 1–2 etapas extras na linha de produção), a tecnologia PERC foi rapidamente adotada: em 2017 já se fabricavam >15 GW/ano de módulos PERC no mundo. Hoje a maior parte dos módulos importados no Brasil utiliza células PERC, sejam monocristalinas ou policristalinas [36,37].

### 3.4.3. Células N-I-P e P-I-N

As arquiteturas n-i-p e p-i-n representam duas configurações amplamente utilizadas em células fotovoltaicas de filmes finos, especialmente aquelas baseadas em perovskitas, que hoje se destacam como uma das tecnologias mais promissoras devido à alta eficiência, flexibilidade e baixo custo potencial de fabricação. Em ambas as arquiteturas, a célula é composta pelo eletrodo condutor transparente — geralmente ITO (óxido de índio e estanho) ou FTO (óxido de flúor e estanho) — pelas camadas transportadoras de carga, pela camada ativa absorvedora de luz (comumente perovskita) e pelo eletrodo metálico traseiro, normalmente de Ag, Au ou Al [38].

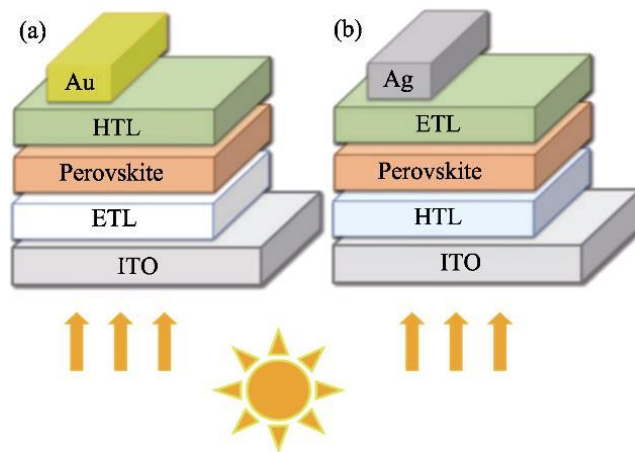


Figura 13 – Arquiteturas de perovskita utilizadas em células fotovoltaicas de filmes finos: a) n-i-p e b) p-i-n. Fonte: [39].

Na estrutura n-i-p (Figura 13.a), a luz incide através do eletrodo transparente e atravessa primeiramente a Camada de Transporte de Elétrons (ETL), geralmente composta por materiais como  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SnO}_2$  ou fulerenos modificados, que têm a função de extrair elétrons e bloquear buracos. A seguir, encontra a camada intrínseca — frequentemente compostos como  $\text{MAPbI}_3$ ,  $\text{FAPbI}_3$  ou haletos mistos — responsável pela absorção eficiente dos fótons e geração dos pares elétron-lacuna. Após a geração dos pares, a carga positiva migra para a Camada de Transporte de Buracos (HTL), formada tipicamente por Spiro-OMeTAD, PTAA ou óxidos como NiOx, que conduzem buracos e bloqueiam elétrons, enquanto os elétrons são empurrados novamente para ETL devido ao campo interno. Por fim, a corrente é coletada no eletrodo metálico posterior [38].

A estrutura p–i–n (Figura 13.b) segue o mesmo princípio de funcionamento, porém com as camadas invertidas: a luz entra pelo eletrodo transparente, passa primeiro pela camada tipo p (HTL), depois pela perovskita e, por fim, pela camada tipo n (ETL). Essa inversão altera significativamente as rotas de fabricação, a temperatura de processamento e a compatibilidade com diferentes substratos [38].

Do ponto de vista produtivo, a arquitetura n–i–p é tradicionalmente associada a processos que incluem etapas de alta temperatura ( $>450^{\circ}\text{C}$ ), especialmente quando se utiliza  $\text{TiO}_2$  como ETL, o que exige fornos e rampas térmicas controladas. Embora esses tratamentos garantam camadas eletronicamente eficientes, também aumentam complexidade e custos, além de dificultarem a produção em substratos flexíveis. Materiais como Spiro-OMeTAD dopado, frequentemente usados nessa configuração, apresentam custo elevado e maior sensibilidade à umidade, o que pode comprometer sua durabilidade em aplicações expostas, como veículos solares. A presença de contatos metálicos mais nobres, como ouro, também eleva o custo total de materiais. Embora soluções como substituir  $\text{TiO}_2$  por  $\text{SnO}_2$  ou utilizar eletrodos de Ag/Al auxiliem na redução de custos, ainda há desafios em manter estabilidade e eficiência em larga escala [38,40].

Por outro lado, a arquitetura p–i–n destaca-se por permitir um processamento totalmente em baixa temperatura ( $\sim 100^{\circ}\text{C}$ ), utilizando materiais como PCBM,  $\text{SnO}_2$  e NiOx em soluções compatíveis com métodos de deposição amplamente escaláveis — incluindo slot-die, rotogravura, lâmina e mesmo impressão por jato de tinta. Esse conjunto de técnicas favorece linhas de produção contínuas do tipo roll-to-roll (R2R), semelhantes às já empregadas em eletrônica impressa e OPV, com menor capex<sup>3</sup>, maior velocidade e melhor controle de uniformidade. A simplificação das interfaces também reduz defeitos e aumenta o rendimento do módulo. Além disso, o uso de camadas ultra-finas, como as HTLs baseadas em monocamadas auto-organizadas (SAMs), reduz drasticamente o custo de materiais, e a menor dependência de etapas a vácuo contribui para uma cadeia produtiva mais enxuta [38,41].

Ao considerar a aplicação em carros solares, essas diferenças tornam-se particularmente relevantes. Veículos solares demandam módulos leves, flexíveis, de baixo custo e alta estabilidade em campo, capazes de suportar vibração, variações

---

<sup>3</sup> CAPEX (Capital Expenditure) refere-se aos investimentos iniciais necessários para construir a fábrica ou instalar a linha de produção — por exemplo máquinas, fornos, equipamentos de revestimento, infraestrutura.

térmicas e exposição contínua à radiação solar. Nesse cenário, a arquitetura p–i–n apresenta vantagens claras: sua compatibilidade natural com substratos flexíveis e com processos R2R facilita a produção de módulos ultraleves, adequados para integração ao corpo do veículo. A operação em baixa temperatura também evita deformações e degradações prematuras que poderiam ocorrer em materiais poliméricos usados como suporte. Além disso, a maior facilidade de encapsulamento em linha — essencial para proteger as perovskitas da umidade — fortalece a durabilidade, um requisito crucial para sistemas embarcados [38].

Já as células n–i–p, embora capazes de fornecer altas eficiências laboratoriais, tendem a ser menos adequadas para integração em superfícies automotivas devido às restrições de temperatura, ao uso de materiais mais caros e à maior dificuldade de escalabilidade em formatos flexíveis. Em aplicações rígidas, como módulos convencionais, a n–i–p ainda pode apresentar excelente desempenho; porém, para o contexto de mobilidade solar, onde peso, conformabilidade e custo são determinantes, a estrutura p–i–n se destaca como a opção mais alinhada às demandas tecnológicas e econômicas [38].

#### **3.4.4. Células Tandem**

As células tandem (ou multijunção) empilham duas ou mais subcélulas com bandgaps diferentes para captar uma faixa mais ampla do espectro solar: a subcélula de bandgap maior (“wide-bandgap”) fica no topo e absorve fótons de alta energia (comprimentos de onda curtos), enquanto a de bandgap menor (“narrow-bandgap”) fica abaixo e aproveita os fótons de menor energia que atravessam a camada superior; essa ordem reduz perdas por thermalização (excesso de energia transformado em calor) e evita que fótons de baixa energia passem despercebidos, como ocorreria em uma junção única. No arranjo mais estudado atualmente — a tandem perovskita/silício (Figura 14) — a perovskita funciona como a camada superior, absorvendo eficientemente luz visível e UV, e o silício cristalino atua como base, captando o infravermelho próximo; essa combinação tem demonstrado ganhos de eficiência substanciais em relação a células de silício isoladas, e projeções teóricas indicam potencial para rendimentos muito superiores ao limite das junções únicas [42].

Contudo, implementar essa arquitetura exige resolver desafios técnicos importantes. Um deles é garantir que a subcélula superior e a inferior estejam eletricamente bem “casadas” — ou seja, que a corrente que cada camada gera seja

compatível (“current matching”), para não haver perdas. Além disso, é fundamental desenvolver uma interface eficiente para recombinação de portadores, com baixa resistência série, e tratar os defeitos nas junções para evitar recombinação não desejada. Também é necessário um bom manejo óptico da luz, para que os fótons sejam bem distribuídos entre as subcélulas e não haja reflexões excessivas [42].

Abaixo da perovskita, há uma camada especial (às vezes chamada de “tunnel junction” ou camada de recombinação), que conecta a subcélula de perovskita à de silício. Essa camada altamente dopada permite que os portadores (elétrons e buracos) “tunelizam” entre as duas subcélulas, garantindo que a corrente possa fluir de forma eficiente e que as duas camadas funcionem como um dispositivo monolítico [43].



Figura 14 – Estrutura esquemática de uma célula tandem perovskita/silício. Fonte: [44].

Outro ponto crítico é a estabilidade dos materiais envolvidos. Por exemplo, a perovskita (como subcélula de topo) precisa resistir à degradação por umidade, calor e radiação, enquanto os processos de fabricação devem ser escaláveis sem comprometer a qualidade ou a compatibilidade com os wafers de silício. A estabilidade já vem sendo melhorada: estudos relatam que células tandem perovskita-silício mantêm boa eficiência após testes prolongados [45].

### 3.5. RENDIMENTO E COMPONENTES DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA

O rendimento ( $\eta$ ) de uma célula solar representa a razão entre a potência elétrica útil que ela fornece e a potência da radiação solar incidente sobre sua superfície. A potência incidente,  $P_{in}$ , depende apenas das propriedades do Sol e da geometria Terra–Sol. Shockley e Queisser, em 1961, modelaram o Sol como um corpo negro de temperatura de 6000 K, que emite radiação em todas as direções. A intensidade dessa

radiação é descrita pela distribuição de Planck, e o fluxo de fótons por unidade de área, tempo e energia é dado por [46]:

$$\Phi_{BB}(E, T_s) = \frac{2E_f^2}{h^3 c^2} \frac{1}{e^{E_f/(k_B T_s)} - 1} \quad (2.5.1)$$

onde  $T_s$  é a temperatura do sol e  $c$  é a velocidade da luz. Considerando que o Sol ocupa apenas uma pequena região do céu vista da Terra, seu ângulo sólido é  $\Omega_{\odot} = \pi(R_{\odot}/D)^2 \approx 6,85 \times 10^{-5}$  sr, onde  $R_{\odot}$  é o raio do sol e  $D$  é a distância média terra-sol. Assim, a potência total que chega à célula é [46]:

$$P_{in} = \Omega_{\odot} \int_0^{\infty} E_f \Phi_{BB}(E_f, T_s) dE_f \quad (2.5.2)$$

Avaliando essa integral para  $T_s = 6000K$ , obtém-se  $P_{in} \approx 1600 W/m^2$ , valor ligeiramente superior à constante solar medida ( $\sim 1360 W/m^2$ ) devido à temperatura idealizada mais alta usada no modelo teórico. A potência de saída, por sua vez, é determinada pelo produto entre a tensão  $V$  e a densidade de corrente  $I(V)$ . No modelo ideal proposto por Shockley e Queisser, a corrente segue a expressão [46]:

$$I(V) = I_{sc} - I_0(e^{qV/(k_B T_c)} - 1) \quad (2.5.3)$$

Onde  $q$  é a carga do elétron,  $T_c$  é a temperatura da célula,  $I_{sc}$  é a corrente de curto-circuito e  $I_0$  é a corrente de saturação (ou *dark current*). A corrente de curto-circuito representa o fluxo máximo de elétrons gerado pela absorção de fótons cuja energia é igual ou superior ao bandgap do material ( $E_f \geq E_g$ ), e é obtida pela integração de todo o espectro solar acima dessa energia limite [46]:

$$I_{sc} = q \int_{E_g}^{\infty} \Phi_{BB}(E_f, T_s) \Omega_{\odot} dE_f \quad (2.5.4)$$

Assim, o bandgap atua como um “filtro energético”: apenas os fótons com energia suficiente para promover elétrons da banda de valência à banda de condução contribuem para a corrente elétrica [46].

Já a corrente de saturação  $I_0$  está associada ao processo oposto — a recombinação de elétrons e buracos dentro da célula. No limite ideal, considera-se apenas a recombinação radiativa, em que um elétron da banda de condução se recombina com um buraco da banda de valência, emitindo um fóton de energia igual ao bandgap. Esse processo é o inverso direto da absorção, e representa a única perda inevitável de energia. Assim [46]:

$$I_0 = q \int_{E_g}^{\infty} \Phi_{BB}(E_f, T_c) dE_f \quad (2.5.5)$$

com  $T_c$  sendo a temperatura da célula (geralmente 300 K). Quanto maior o bandgap, menor é essa recombinação térmica, o que tende a aumentar a tensão de circuito aberto,  $V_{oc}$ . A tensão de circuito aberto é dada por [46]:

$$V_{oc} = \frac{k_B T_c}{q} \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.5.6)$$

e expressa o equilíbrio entre geração e recombinação: valores altos de  $I_{sc}$  e baixos de  $I_0$  resultam em tensões mais elevadas. Entretanto, essa tensão nunca pode exceder  $E_g/q$ , pois cada elétron no semiconductor só pode adquirir, no máximo, a energia equivalente ao bandgap.

O ponto de máxima potência ( $P_{MP}$ ) ocorre em um valor intermediário de tensão, onde a célula entrega simultaneamente uma corrente e uma tensão significativas. A relação entre essa potência máxima ( $V_{MP}I_{MP}$ ) e o retângulo ideal formado por  $V_{oc}I_{sc}$  define o fator de preenchimento ( $m$ ), que indica o quão “quadrada” é a curva I–V. No modelo ideal, esse fator pode atingir valores próximos de 0,86, diminuindo quando há recombinação elevada ou perdas resistivas [46]. A eficiência da célula pode então ser expressa como [46]:

$$\eta = \frac{m V_{oc} I_{sc}}{P_{in}} \quad (2.5.7)$$

A Figura 15 ilustra esse comportamento: a corrente permanece próxima de  $I_{sc}$  até tensões intermediárias, reduzindo-se rapidamente ao se aproximar de  $V_{oc}$ . A potência elétrica cresce proporcionalmente à tensão até atingir  $P_{MP}$ , ponto em que o produto  $V_{MP}I_{MP}$  é máximo, e depois cai a zero em  $V_{oc}$ . Assim, a forma conjunta das curvas I–V e P–V determina diretamente o  $m$  e, conseqüentemente, a eficiência global da célula fotovoltaica [46].

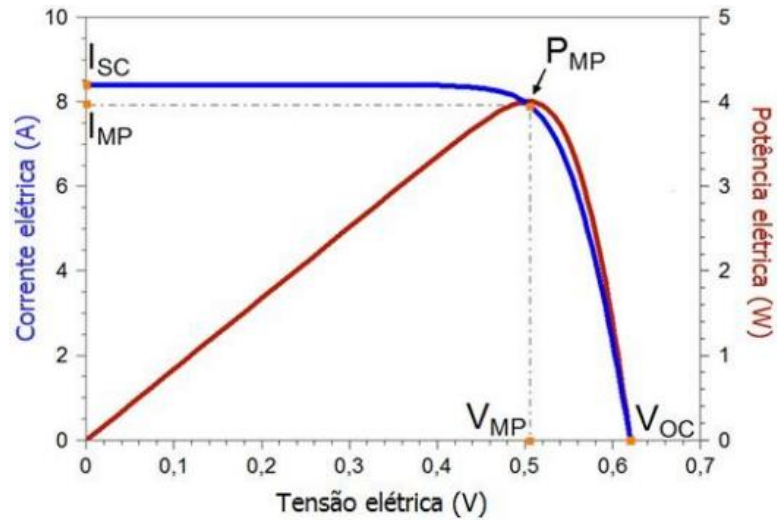


Figura 15 – Exemplo de curvas características I-V e P-V de uma célula fotovoltaica.

Fonte: [47].

Shockley e Queisser determinaram esse ponto ajustando numericamente as integrais acima para diferentes bandgaps e encontraram o rendimento máximo de cerca de 30% (Figura 16) para um bandgap de 1,1 eV — valor típico do silício monocristalino, que na época era o material predominante [46].

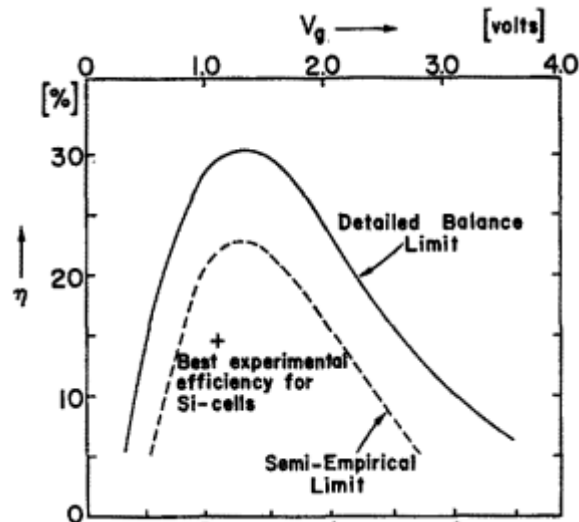


Figura 16 – Limite teórico de eficiência de células solares de junção única em função do bandgap (Shockley-Queisser). Fonte: Adaptado de [46].

Com o refinamento dos modelos e o uso de dados solares mais precisos, sabe-se hoje que o rendimento máximo teórico para o silício de junção única é de ~33%. Essa diferença surge por dois fatores principais: a adoção da temperatura solar efetiva real de 5777 K (em vez de 6000 K, que superestimava a irradiância) e o uso do

espectro solar medido (AM1.5<sup>4</sup>), que inclui absorções atmosféricas. Esses ajustes tornaram o modelo mais fiel às condições reais, mas sem alterar sua essência física: a eficiência máxima de uma célula de junção única é determinada pelo equilíbrio entre geração de portadores acima do bandgap e recombinação radiativa inevitável, que limita o quanto da energia da luz solar pode ser convertida em eletricidade útil [48].

As células multijunção (tandem) superam o limite de Shockley–Queisser justamente por empilharem subcélulas com *bandgaps* diferentes, de modo que cada camada absorve uma faixa distinta do espectro solar. Modelos teóricos recentes para células tandem de perovskita sobre silício indicam que esse tipo de arquitetura pode atingir até 43,2% de eficiência, considerando recombinação Auger no silício e acoplamento lumínico realista entre as camadas [49].

Em laboratório, os recordes já são impressionantes. Por exemplo, a LONGi publicou recentemente uma célula tandem perovskita-silício com eficiência certificada de 34,85% [50]. Esse valor ultrapassa claramente o limite das células monojunção determinadas pelo modelo clássico de Shockley–Queisser para o silício monocristalino.

Comumente os materiais fotovoltaicos são divididos em gerações, com base no método de fabricação e material. A 1ª geração é dominada pelo silício cristalino (mono e multicristalino) e por células wafer-based que aproveitaram a infraestrutura da indústria microeletrônica; a 2ª geração agrupa as tecnologias de filme fino (p.ex. CIGS e CdTe), desenvolvidas para reduzir o consumo de material e custo; a 3ª geração reúne abordagens não-convencionais (multijunção, perovskitas, orgânicos, pontos quânticos, etc.) com ênfase em arquiteturas tandem e materiais com bandgap ajustável [16].

### 3.6. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Em aplicações práticas, as células são encapsuladas em módulos fotovoltaicos compostos por vidro, filmes poliméricos e backsheets, os quais proporcionam proteção mecânica e ambiental, além de garantir estabilidade estrutural e durabilidade ao dispositivo [16,51].

---

<sup>4</sup> AM1.5 (Air Mass 1.5) é o espectro solar padrão usado em testes fotovoltaicos, correspondente à radiação que atravessa 1,5 vezes a espessura da atmosfera terrestre. Representa condições típicas de irradiação ao nível do solo e integra as Condições de Teste Padrão (STC).

A eficiência de um módulo fotovoltaico é, em geral, inferior à de uma célula isolada (curvas azuis na Figura 17), devido às perdas resistivas nas interconexões elétricas entre as células e às variações de desempenho individual entre elas [52]. A configuração elétrica dos módulos também influencia sua resposta elétrica: células conectadas em série somam suas tensões (curva verde na Figura 17.a), mas mantêm a corrente igual à da menor célula do conjunto; por outro lado, células conectadas em paralelo mantêm a mesma tensão, mas a corrente total passa a ser a soma das correntes individuais (curva verde na Figura 17.b) [16,28].

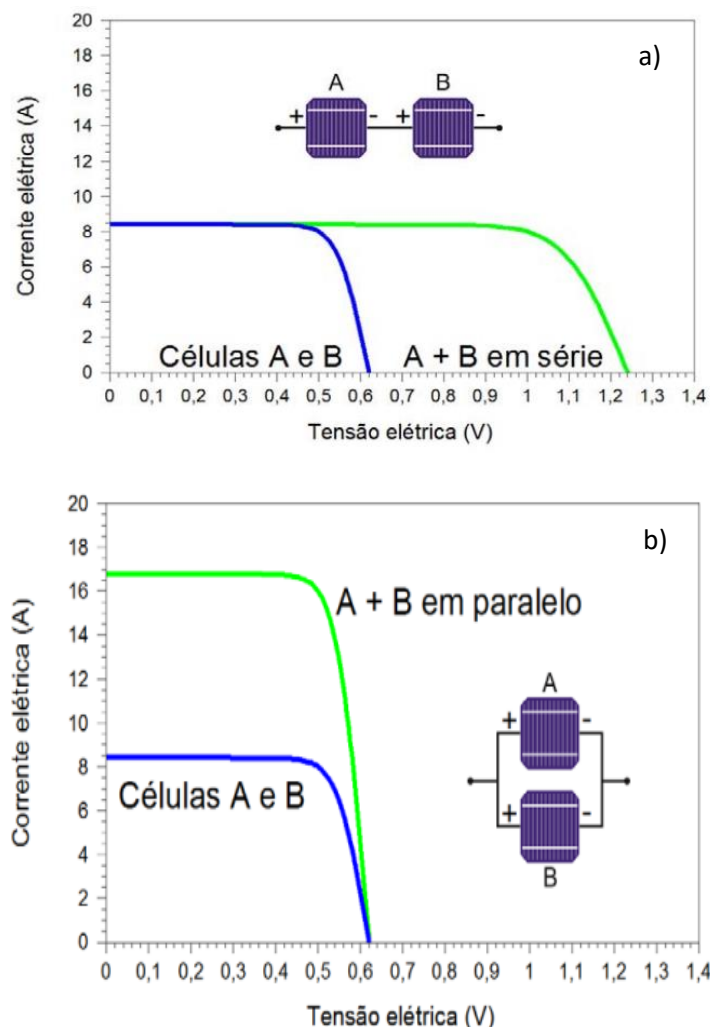


Figura 17 – Exemplo de curvas I-V de duas células fotovoltaicas conectadas a) em série e b) em paralelo. Fonte: [28].

Dessa forma, os painéis solares são formados pela associação de múltiplas células fotovoltaicas em série e paralelo, de modo a alcançar a potência e a tensão desejadas. Uma célula isolada gera aproximadamente 0,5 V, valor insuficiente para

aplicações práticas; portanto, a conexão de seis células em série, por exemplo, fornece cerca de 3 V ( $6 \times 0,5$  V). Para aumentar a corrente, essas séries de células podem ser ligadas em paralelo. Assim, se cada célula gerar 2 A, uma configuração com doze células em arranjo série-paralelo pode produzir 4 A e 3 V, resultando em maior potência de saída e viabilidade prática do sistema [53].

### 3.7. CARRO SOLAR

O Carro Solar é um veículo elétrico que incorpora células fotovoltaicas a bordo com o objetivo de carregar um conjunto de baterias, estendendo assim a autonomia de condução. O sistema de um é composto por vários blocos essenciais (Figura 18) que gerenciam o fluxo de energia, desde a geração até a tração do veículo [54].

O sistema começa com o Painel Fotovoltaico (*PV Panel*), que consiste nos módulos de células solares instaladas no veículo. A energia produzida pelo painel é, em princípio, suficiente para acionar o carro, mas é usada em conjunto com as baterias para uma escolha mais eficiente. A saída do painel é enviada para o MPPT (*Maximum Power Point Tracker*), um componente do sistema de controle. O MPPT é fundamental para assegurar que a tensão elétrica de saída seja compatível tanto para carregar a Bateria (*Battery*) quanto para fornecer energia ao sistema de acionamento do motor elétrico [54].

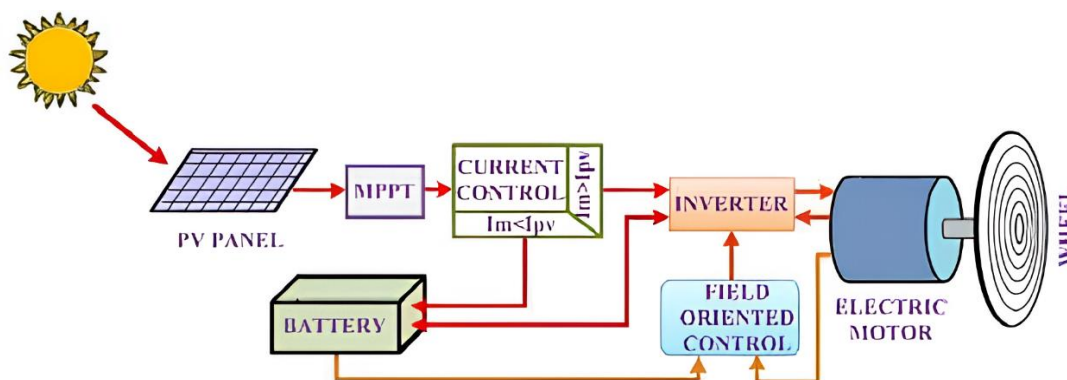


Figura 18 – Diagrama de blocos para um carro solar. Fonte: [54].

O Controle de Corrente (*Current Control*) gerencia o fluxo de energia elétrica. O excesso de energia gerado pelos módulos solares é desviado e utilizado para carregar as baterias. A Bateria é o sistema de armazenamento de energia recarregável, como as baterias de Íon-Lítio. Além de armazenar o excedente de energia, proveniente do painel, para estender a autonomia de condução, as baterias

também armazenam a energia fornecida pelo motor elétrico quando ele está funcionando no modo regenerativo, o que ocorre durante a frenagem e em movimentos em declive do veículo [54].

O sistema de controle geral atua no gerenciamento da energia elétrica entre a bateria e o sistema de acionamento e comanda o inversor. O Inversor (*Inverter*) possui a função de converter a corrente contínua (CC) proveniente do MPPT ou das baterias em corrente alternada (CA) ou CC, dependendo do funcionamento do motor, e garantir maior eficiência no controle da propulsão [55].

A velocidade do motor de tração é regulada pelo método de Controle Orientado a Campo (FOC). O Motor Elétrico (*Electric Motor*) consome a energia do sistema para gerar a força de tração. Ele é capaz de operar em modo regenerativo, devolvendo energia para a bateria. Por fim, a Roda (*Wheel*) recebe o torque de tração total do motor elétrico para movimentar o veículo [54].

#### **4. METODOLOGIA**

Este trabalho adota uma metodologia de caráter comparativo e semi-quantitativo, com base em revisão bibliográfica e análise técnica das principais tecnologias fotovoltaicas aplicáveis a automóveis solares. O objetivo da metodologia é permitir a comparação sistemática entre diferentes tecnologias, de forma coerente com os critérios técnicos e ambientais discutidos ao longo do texto.

Inicialmente, foram selecionadas tecnologias fotovoltaicas representativas, amplamente discutidas na literatura científica e técnica, considerando tanto soluções consolidadas quanto alternativas emergentes. Para cada tecnologia, realizou-se um levantamento das principais características físicas, tecnológicas e ambientais, com base em artigos científicos, relatórios técnicos e publicações institucionais.

A avaliação comparativa foi estruturada a partir de critérios técnicos previamente definidos pelo autor, os quais refletem os principais fatores que influenciam a viabilidade do uso de células fotovoltaicas em automóveis solares. Os critérios considerados foram:

##### **Critério 1 - Disponibilidade de matéria-prima**

Avalia a abundância dos materiais utilizados e a dependência de processos adicionais para sua obtenção.

- **Nota 5:** Material muito abundante e disponível diretamente na natureza, sem dependência de subprocessos complexos.
- **Nota 4:** Material abundante, porém dependente de processos adicionais de obtenção ou purificação.
- **Nota 3:** Material com abundância adequada e sem dependência significativa de subprocessos críticos.
- **Nota 2:** Material com baixa abundância, embora não dependa de subprocessos complexos.
- **Nota 1:** Material escasso e dependente de subprocessos críticos ou cadeias produtivas restritas.

## **Critério 2 - Produção**

Relaciona-se à complexidade do processo produtivo, ao grau de maturidade industrial, à viabilidade de produção em larga escala e ao consumo energético associado às etapas de fabricação.

- **Nota 5:** Processo produtivo simples, maduro e amplamente industrializado, com alta escalabilidade, elevada reprodutibilidade e baixo a moderado consumo energético relativo.
- **Nota 4:** Processo produtivo consolidado e industrializado, porém com etapas adicionais de maior complexidade ou elevado consumo energético, ainda mantendo viabilidade e escala industrial.
- **Nota 3:** Processo produtivo viável e já demonstrado industrialmente, mas com desafios técnicos, econômicos ou energéticos, como controle rigoroso de parâmetros, custos elevados ou menor robustez produtiva.
- **Nota 2:** Processo produtivo de baixa maturidade industrial, com dificuldades de escalonamento, reprodutibilidade limitada ou dependência de soluções técnicas ainda não plenamente consolidadas, mesmo quando energeticamente favorável.

- **Nota 1:** Processo produtivo predominantemente experimental ou de difícil viabilização industrial, com alta incerteza técnica ou econômica e elevado consumo energético relativo.

## **Durabilidade**

Refere-se à vida útil, estabilidade térmica, resistência à degradação e confiabilidade da tecnologia ao longo do tempo. A avaliação foi realizada de forma comparativa entre as tecnologias analisadas, considerando tendências relativas de degradação e estabilidade observadas na literatura, e não valores absolutos de vida útil, os quais podem variar significativamente conforme condições ambientais, encapsulamento e aplicação.

- **Nota 5:** Alta durabilidade, estabilidade comprovada e longa vida útil.
- **Nota 4:** Boa durabilidade, com degradação controlada.
- **Nota 3:** Durabilidade moderada, com limitações conhecidas.
- **Nota 2:** Baixa durabilidade ou degradação acelerada.
- **Nota 1:** Durabilidade muito limitada ou instabilidade significativa.

## **Rendimento**

Este critério avalia a eficiência de conversão da energia solar em eletricidade, considerando de forma conjunta o desempenho em nível de célula e em nível de módulo, de modo a refletir a viabilidade prática da tecnologia em aplicações veiculares. As notas foram atribuídas conforme os seguintes níveis:

- **Nota 5:** Tecnologia que apresenta **alta eficiência tanto em nível de célula quanto em nível de módulo**, com desempenho elevado e consolidado em aplicações comerciais.
- **Nota 4:** Tecnologia que apresenta **alta eficiência em nível de célula**, porém **eficiência inferior em nível de módulo**, em função de perdas associadas à integração, encapsulamento ou estágio de maturidade industrial.

- **Nota 3:** Tecnologia que apresenta **eficiência intermediária** tanto em nível de célula quanto em nível de módulo, com desempenho adequado, porém sem destaque.
- **Nota 2:** Tecnologia que apresenta **eficiência intermediária em nível de célula**, mas **baixa eficiência em nível de módulo**, resultando em limitações para aplicações veiculares.
- **Nota 1:** Tecnologia que apresenta **baixa eficiência tanto em nível de célula quanto em nível de módulo**, sendo pouco adequada para aplicação em automóveis solares.

### **Flexibilidade**

Avalia a facilidade de adaptação da tecnologia às superfícies curvas e restrições geométricas típicas de automóveis solares.

- **Nota 5:** Alta flexibilidade ou excelente adaptabilidade geométrica.
- **Nota 4:** Boa integração veicular, com pequenas restrições de forma.
- **Nota 3:** Integração possível, porém limitada a superfícies planas ou pouco curvas.
- **Nota 2:** Integração difícil, exigindo adaptações estruturais.
- **Nota 1:** Integração inviável ou altamente restritiva para uso veicular.

### **Descarte**

Este critério avalia os impactos ambientais associados ao fim de vida das tecnologias fotovoltaicas, considerando a existência de infraestrutura de reciclagem, a complexidade técnica e econômica dos processos de descarte ou reciclagem e os riscos ambientais associados aos materiais empregados. A avaliação prioriza a viabilidade prática do descarte seguro no contexto atual.

- **Nota 5:** Tecnologia que não contém materiais tóxicos, possui infraestrutura de reciclagem amplamente consolidada e apresenta processos de descarte ou reciclagem simples, seguros e bem estabelecidos.
- **Nota 4:** Tecnologia que não contém materiais tóxicos e dispõe de infraestrutura de reciclagem existente, porém com processos de reciclagem tecnicamente mais complexos ou economicamente mais custosos.
- **Nota 3:** Tecnologia que não contém materiais tóxicos, mas não possui infraestrutura de reciclagem consolidada, apresentando processos de descarte ou reciclagem difíceis ou pouco difundidos.
- **Nota 2:** Tecnologia cuja reciclagem é limitada ou pouco difundida, com processos de descarte tecnicamente complexos e baixo incentivo econômico para a recuperação dos materiais, podendo envolver materiais críticos ou com potenciais restrições ambientais.
- **Nota 1:** Tecnologia que contém materiais tóxicos e não possui infraestrutura de reciclagem consolidada, apresentando alto risco ambiental associado ao descarte e exigindo controle rigoroso ao fim de vida.

A partir dessas notas, foi calculada uma média para cada tecnologia, permitindo uma avaliação geral do seu potencial. Por fim, os resultados foram discutidos individualmente e de forma comparativa, destacando o desempenho relativo dos materiais e sua adequação ao uso em automóveis solares.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. SILÍCIO

A matéria-prima para o silício fotovoltaico — a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) — é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, presente em minerais como quartzo e areia, o que garante excelente disponibilidade (nota **5** para **disponibilidade**). Outro fato importante é que o Brasil possui as maiores reservas mundiais de quartzo leitoso. Apesar dessa abundância, obter silício de grau solar exige processos complexos, porque é preciso purificá-lo a níveis muito altos para uso em células solares [56,57].

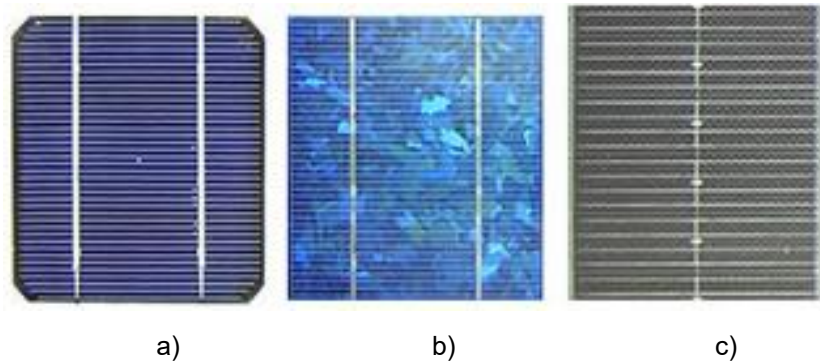


Figura 19- Módulos fotovoltaicos de: a) c-Si; b) p-Si e c) a-Si. Fonte: [58].

Quanto à **produção**, o silício cristalino (c-Si (Figura 19.a.) e p-Si (Figura 19.b)) são bem consolidados: já existe grande *know-how* industrial para purificar, crescer lingotes (por exemplo, pelo método Czochralski) e cortar wafers, o que mostra que a tecnologia de fabricação em larga escala está madura. Entretanto, o Brasil produz apenas silício de grau metalúrgico (Si-GM), com pureza em torno de 98 %, valor insuficiente para placas fotovoltaicas que exigem pureza da ordem de 99,9999 %, e grande parte do Si-GM produzido é destinado à exportação. Além disso, o esforço energético necessário é elevado, o que reduz a facilidade de produção. Assim, atribuo nota **4** para o c-Si e **5** para o p-Si, pois, embora ambos utilizem processos consolidados, sua fabricação ainda é custosa e altamente dependente de energia, sendo que o silício policristalino é relativamente mais simples por não exigir etapas de crescimento cristalino como o método Czochralski. Já o silício amorfo (a-Si (Figura 19.c)), depositado por gases em reatores de plasma, exige muito menos material e energia, entretanto sua produção ainda não se compara aos outros materiais de silício (nota **3**) [57,59,60].

Quanto a **durabilidade**, os valores de degradação anual variam conforme o clima local onde os módulos estão instalados, poeira, umidade, entre outros. Mas de forma geral, dentre as tecnologias de Silício, o c-Si tende a apresenta a menor taxa de degradação, seguido do p-Si e a-Si, respectivamente nessa ordem [61-63]. Além disso, o a-Si apresenta maior sensibilidade a poeira, enquanto o p-Si é o menos sensível. Dessa forma, atribuo nota **4**, **5** e **2** para o c-Si, p-Si e a-Si, respectivamente [64].

Em termos de **rendimento**, o valor recorde para células: de c-Si temos 26,1% (nota **5**), para p-Si 23,3 % (nota **5**) e para o a-Si, temos 14% (nota **3**) [65]. Para os

módulos comerciais, os valores típicos são: 17%-18% para o c-Si; 12%-14% para o p-Si e 4%-8% para o a-Si [60]. Dessa forma, atribuo nota **5** para o c-Si, **4** para o p-Si e **2** para o a-Si.

Falando sobre **flexibilidade** e integração em carros solares: embora o silício monocristalino tradicionalmente seja rígido, avanços recentes permitiram a fabricação de células ultrafinas e semi-flexíveis, capazes de suportar curvaturas moderadas, o que viabiliza sua aplicação em superfícies levemente curvas — como as utilizadas em veículos solares — justificando uma flexibilidade intermediária (nota **3**). Isso também vale, em menor grau, para o silício policristalino quando produzido em espessuras reduzidas (nota **3**). Já o silício amorfo (a-Si), por ser naturalmente um filme fino depositado em substratos flexíveis, apresenta flexibilidade significativamente maior, recebendo nota **4** [60,66,67].

O **descarte** e reciclagem dos módulos de silício variam sobretudo pela infraestrutura disponível e pela complexidade de separação dos materiais. Os módulos monocristalinos e policristalinos, que representam a maior parte do mercado, contam com cadeias de reciclagem já consolidadas, principalmente na Europa, envolvendo etapas bem estabelecidas como a remoção da moldura, separação do vidro, laminação térmica e recuperação parcial do silício e dos metais de contato. A separação, porém, exige temperaturas elevadas ou processos químicos mais intensos, tornando o procedimento tecnicamente viável, mas ainda relativamente custoso [67-69]. Portanto, atribuo nota **4** para ambos materiais.

Os módulos de a-Si, por outro lado, são tecnicamente mais simples de desmontar, pois utilizam camadas semicondutoras muito mais finas e possuem estrutura menos complexa; contudo, a reciclagem efetiva dessa tecnologia é menos comum, já que a infraestrutura global é fortemente voltada aos módulos cristalinos e o baixo valor recuperado do material desestimula linhas específicas para a-Si. Assim, embora o a-Si seja mais fácil de processar, a disponibilidade real de instalações adequadas é menor (nota **3**), enquanto c-Si e p-Si, mesmo exigindo processos mais robustos, possuem maior suporte industrial para descarte e reciclagem. [60,67,70,71].

Em resumo, o silício monocristalino destaca-se por eficiência e durabilidade, o policristalino oferece um bom equilíbrio entre custo, produção e desempenho, e o silício amorfo traz vantagens em flexibilidade e economia de material, mas paga esse preço em eficiência e estabilidade.

## 5.2. CIGS

O CIGS — cobre-índio-gálio-selênio — é um semicondutor muito eficiente para células solares de filme fino justamente porque tem banda proibida direta, o que favorece a absorção de luz mesmo em camadas finas e reduz a quantidade de material necessário para gerar energia. Além disso, a composição (proporção de índio e gálio, por exemplo) pode ser ajustada para otimizar o “bandgap” e melhorar o desempenho, sendo essa versatilidade uma das chaves de seu potencial [60].

Quanto à **disponibilidade** da matéria-prima, o elemento mais crítico no CIGS é o índio, que é relativamente raro e obtido principalmente como subproduto da refinação de zinco. A cadeia de suprimento pode sustentar volumes consideráveis — pesquisas apontam que há suprimento suficiente para até cerca de 100 GW/ano de produção em certas regiões. Ainda assim, existe risco de escassez caso a demanda aumente, porque o índice de recuperação de índio depende diretamente da produção de zinco. Por isso, atribuo uma nota **1** para disponibilidade [72,73].

Na **produção** de células (como a representada na Figura 20), são usadas duas estratégias principais: a co-evaporação, onde cobre, índio, gálio e selênio são evaporados em vácuo sobre um substrato aquecido; e um processo “two-stage”, em que primeiro se deposita precursores por sputtering e depois se faz recozimento com selênio para cristalização. Depois da camada absorvedora, normalmente se deposita CdS (via banho químico) e uma camada de ZnO para formar a junção da célula. Apesar de existirem indústrias que já fazem módulos em vidro e até em substratos flexíveis (como aço inox, usado pela MiaSolé), o processo exige capital alto (reatores a vácuo, sistemas complexos), o que torna a facilidade de produção mais limitada — atribuo nota **3** [60,74,75].

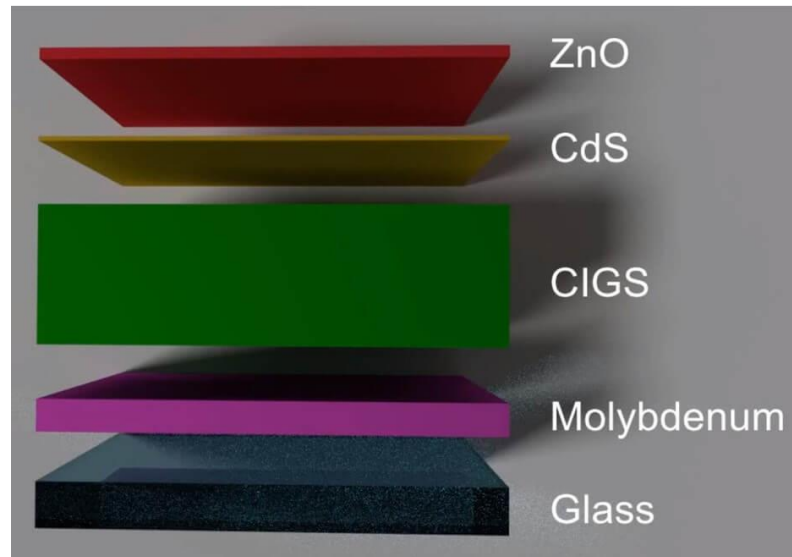


Figura 20 – Estrutura genérica de uma célula CIGS em configuração de substrato, composta por vidro, contato traseiro de molibdênio, camada absorvedora de CIGS, camada buffer de CdS e eletrodo condutor transparente de ZnO. Fonte: [76].

Quanto à **durabilidade**, o CIGS apresenta desempenho intermediário entre o p-Si e o a-Si, desde que o encapsulamento proteja bem contra umidade. Essa estabilidade química (Cu, In, Ga, Se) reforça a confiabilidade técnica, então dou nota **3** para **durabilidade** [61,62].

Em termos de **rendimento**, o potencial é elevado: células de laboratório já alcançaram cerca de 23,6% de eficiência, segundo alguns relatórios. Em módulos comerciais, a faixa típica é de 10–15%, o que é competitivo para filme fino, resultando numa nota **4** para rendimento [60,65].

Para a aplicação em carros solares, o CIGS tem vantagens claras: sua alta absorção permite camadas muito finas, o que reduz o peso — essencial em veículos; e sua possibilidade de deposição em substratos flexíveis (como aço inox) viabiliza painéis curvos ou integrados à carroceria (nota **4** para **flexibilidade**) [69,74].

No **descarte** de módulos CIGS, existem tanto potenciais positivos quanto riscos ambientais. Por um lado, elementos valiosos como cobre, índio, gálio e selênio podem ser reciclados com eficiência: por exemplo, estudos demonstram que membranas de nanofiltração resistentes a ácidos são capazes de reter mais de 98% de índio em lixiviados derivados de CIGS, mesmo em pH muito baixo, separando-o de selênio, zinco e outros metais; em seguida, a extração líquido-líquido recupera cerca de 97% do índio retido. Por outro lado, o selênio presente nos módulos CIGS pode representar risco ambiental: em teses acadêmicas já se usou a oxidação para converter selênio

de CIGS em dióxido de selênio ( $\text{SeO}_2$ ) e recuperá-lo com pureza muito elevada ( $\geq 99\%$ ). Esses processos de reciclagem exigem controle químico rigoroso, pois a manipulação de selênio e compostos relacionados pode ser tóxica se feita de maneira inadequada. Além disso, a própria análise econômica de reciclagem de CIGS aponta que se usam reagentes agressivos (como ácidos) nas rotas hidrometalúrgicas, o que aumenta os impactos ambientais potenciais. Portanto, embora a reciclagem efetiva seja possível e até bem avançada em pesquisa, os riscos associados ao selênio e a complexidade química justificam cautela — por isso atribuo uma nota **2** para o descarte [69,68,77].

Em resumo, o CIGS se apresenta como uma opção muito promissora para painéis solares automotivos: ele equilibra bem eficiência, leveza e versatilidade de forma potencialmente flexível, mas seus principais desafios são os altos custos de produção, a complexidade da cadeia de suprimento do índio e a necessidade de reciclagem bem planejada para mitigar riscos ambientais associados a seus elementos constituintes [69,74].

### 5.3. CDTE

O telureto de cádmio ( $\text{CdTe}$ ) é um semicondutor usado em células solares de filme fino, muito eficiente também por ter um band-gap direto favorável ( $\sim 1,44$  eV). Além disso, é uma tecnologia bastante madura, com produção industrial consolidada, o que torna o  $\text{CdTe}$  uma das poucas alternativas de filme fino com forte presença comercial [60,68].

Quanto à **disponibilidade** de matéria-prima, o elemento mais crítico no  $\text{CdTe}$  é o telúrio, que é raro e frequentemente obtido como subproduto da refinação de cobre. Relatórios indicam que a oferta de telúrio é limitada, o que pode restringir escalabilidade futura — embora exista potencial de reciclagem para recuperar grande parte do telúrio nos módulos. Por isso, atribuo uma nota **2** para a disponibilidade [68,72].

Na estrutura das células, normalmente se usa uma junção n- $\text{CdS}$  / p- $\text{CdTe}$ , onde uma fina camada de sulfeto de cádmio ( $\text{CdS}$ ) funciona como janela para a entrada de luz, e o  $\text{CdTe}$  absorve a maior parte da radiação (Figura 21). Para deposição, um método bastante utilizado é a sublimação em espaço fechado (CSS), em que o  $\text{CdTe}$  sublima em vácuo e se deposita sobre um substrato (geralmente vidro), um processo relativamente rápido e eficiente para produção em larga escala [59,68].

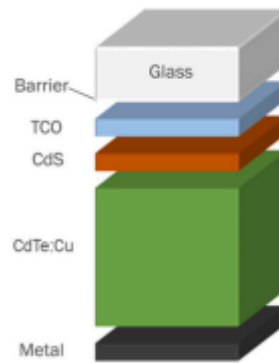


Figura 21 - Estrutura básica de uma célula de CdTe. Fonte: [78].

Em relação à **produção** industrial, o CdTe já conta com uma cadeia bem desenvolvida: a First Solar (Estados Unidos) é a grande líder mundial nessa tecnologia, produzindo módulos em escala gigawatt. Esse nível de maturidade indica que o método de fabricação é bem conhecido e dominado pela indústria — por isso dou nota **4** para a facilidade de produção na prática [58,66]. Sobre **durabilidade**, de modo geral, os módulos de CdTe possuem maior degradação anual do que as outras tecnologias já mencionadas. [62,79]. Com isso, atribuo nota **2**.

Relativamente ao **rendimento**, os valores são bastante sólidos para filme fino: células de CdTe já atingiram 23,1% em laboratório, segundo a First Solar, e os módulos comerciais chegam a 9%-11%, o que me leva a dar nota **3** [60,65].

Em uma aplicação para carros solares, o CdTe apresenta vantagens interessantes: por ter um alto coeficiente de absorção, pode-se utilizar camadas finas (reduzindo peso), e sua produção em alta vazão ajuda a tornar os painéis mais econômicos para aplicações automotivas. No entanto, a toxicidade do cádmio é uma grande preocupação — qualquer dano ao módulo que exponha Cd pode ser perigoso, exigindo encapsulamento rigoroso. Além disso, muitos módulos CdTe são depositados sobre vidro rígido, o que limita a flexibilidade: por isso atribuo nota **3** para **flexibilidade** [60,66,68,78].

Quando se trata de **descarte**, há riscos e também oportunidades: o cádmio é tóxico, e testes mostram que, em condições desfavoráveis — como em aterros ácidos, onde o chorume de baixo pH aumenta a solubilidade dos metais —, pode haver lixiviação de Cd e Te, o que representa um problema ambiental. Por outro lado, a indústria já desenvolveu programas de reciclagem robustos — mais de 90% do módulo pode ser recuperado, segundo relatórios, incluindo vidro, semicondutor e

metais. Portanto, dou nota **1** para descarte, devido ao potencial de toxicidade, apesar dos avanços na reciclagem [60,68,69,78].

Em resumo, o CdTe é uma tecnologia bem equilibrada: entrega bom desempenho, é relativamente leve e tem produção industrial madura. Para carros solares, ele pode ser muito vantajoso no sentido de usar menos material e oferecer peso menor, mas seu principal desafio está na gestão ambiental — será fundamental garantir encapsulamento seguro e reciclagem eficiente para mitigar os riscos associados ao cádmio.

#### 5.4. PEROVSKITA

A perovskita não é um material específico, mas uma família de compostos que compartilham a mesma estrutura cristalina característica, representada na Figura 22. Essa estrutura pode ser descrita genericamente pela fórmula  $ABX_3$ , na qual diferentes cátions e ânions ocupam posições definidas na rede cristalina. No caso das perovskitas haleto-metálicas usadas em fotovoltaica, A é um cátion ( $MA^+$ ,  $FA^+$  ou  $Cs^+$ ), B é um metal bivalente como  $Pb^{2+}$  ou  $Sn^{2+}$ , e X é um ânion haleto. A versatilidade dessa estrutura permite ajustar o bandgap e outras propriedades eletrônicas, tornando tais materiais altamente promissores para células solares finas e leves [66,69,80].

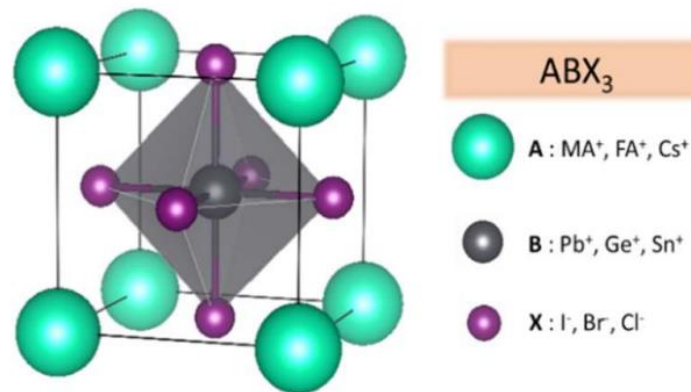


Figura 22 – Estrutura cristalina genérica  $ABX_3$  de perovskitas. Fonte: [81].

Quanto à **disponibilidade** das matérias-primas, os haletos de chumbo (Pb) e cério (Cs) usados nas perovskitas têm um fornecimento mais restrito: embora o chumbo exista em abundância, ele é tóxico e depende em parte de reciclagem. Já o cério, presente em perovskitas totalmente inorgânicas (como  $CsPbX_3$ ), tem cadeias de suprimento mais vulneráveis, com dependência geopolítica e risco de escassez, especialmente para haletos muito puros [69,72,78,82]. Assim, atribuo nota **3**.

Na **produção**, a perovskita apresenta uma vantagem importante: ela pode ser processada por solução (spin-coating, impressão ou spray) a temperaturas relativamente baixas ( $\sim 85^\circ\text{C}$ ), o que torna a fabricação menos intensiva em energia comparada ao silício cristalino. Além disso, células — especialmente as flexíveis — geralmente utilizam as arquiteturas n-i-p ou p-i-n, que são compatíveis com técnicas de deposição por solução e com substratos sensíveis ao calor, como filmes plásticos (PET ou PEN). No entanto, ainda existem desafios para escalar: recristalização, defeitos nos contornos de grão e qualidade do filme são cruciais para alcançar alto desempenho. Por isso, embora já haja muitos laboratórios trabalhando com essas técnicas e algumas indústrias emergindo, atribuo nota **2**, considerando que o método é promissor, mas ainda exige controle sofisticado. [67,70,78,80].

Em relação à **durabilidade**, as perovskitas tradicionais ainda têm problemas sérios: íons podem migrar, e o calor, a umidade e a radiação provocam degradação, porque as ligações iônicas na estrutura são relativamente fracas. Estratégias modernas, como a engenharia de cátions mistos ( $\text{FA}^+$ ,  $\text{MA}^+$ ,  $\text{Cs}^+$ ) e encapsulamento avançado, têm ajudado a estender a vida útil — por exemplo, alguns estudos relatam que manter  $\sim 80\%$  da eficiência após semanas ou meses em condições controladas é possível. Mesmo assim, a estabilidade ainda está bem abaixo da de módulos de silício típicos, então atribuo nota **1** para durabilidade [74,78,80,83].

No quesito **rendimento**, os avanços da perovskita são impressionantes. A tecnologia já alcançou eficiências de célula de  $27\%$ , comparáveis às células de silício de ponta. O verdadeiro potencial reside nas arquiteturas tandem, que são consideradas a estratégia mais proeminente para superar o limite teórico de eficiência de células de junção única. Em células tandem de perovskita/silício já foi reportada uma eficiência recorde de conversão de aproximadamente  $34,9\%$ . Por isso minha nota para rendimento é **4** [48,65].

Para aplicação em carros solares, a perovskita traz várias vantagens: por ser depositada em filmes finos, pode ser integrada sobre superfícies curvas, é leve e pode ser aplicada por técnicas variadas (impressão, spray), facilitando a integração à carroceria (nota **5** para **flexibilidade**). Também há a possibilidade de ajustar o band-gap para adaptar ao espectro da luz incidente, especialmente em condições variáveis. Por outro lado, sua instabilidade (degradação por umidade, calor e vibração) é uma desvantagem significativa para veículos, assim como a sensibilidade à pureza da solução no processamento em escala automotiva [66,69,74,80].

Quanto ao **descarte**, existe uma preocupação ambiental relevante: muitos perovskitas usam chumbo, que é tóxico e pode vazar se o encapsulamento falhar. No entanto, métodos de reciclagem têm sido desenvolvidos com sucesso: por exemplo, resinas de troca iônica permitem separar Pb de módulos mesmo em diferentes estágios (perovskita,  $PbI_2$ , óxidos, etc.) com rendimento muito elevado o que torna o reaproveitamento viável [67,69,77]. Por conta disso, atribuo nota **3**.

Em resumo, a perovskita brilha por seu enorme potencial de eficiência, leveza e versatilidade para integração em veículos solares. Porém, para realmente se tornar viável em carros solares, ainda será necessário resolver os desafios de durabilidade sob condições reais e garantir processos de reciclagem ambientalmente seguros.

### 5.5. TABELA COMPARATIVA

A Tabela 1 faz uma síntese das notas atribuídas para cada critério para cada material.

Tabela 1- Resumo das notas de cada critério em ordem crescente para os materiais utilizados em placas fotovoltaicas. Fonte: Autoria própria.

Material \ Critério	Disp.	Prod.	Dura.	Rend.	Flex.	Des.	Média
<b>CdTe</b>	2	3	2	3	3	1	2,3
<b>CIGS</b>	1	3	3	4	4	2	2,8
<b>Pero</b>	3	2	1	4	5	3	3,0
<b>a-Si</b>	5	3	2	2	4	3	3,2
<b>p-Si</b>	5	5	4	4	3	4	4,2
<b>c-Si</b>	5	4	5	5	3	4	4,3

A análise dos materiais fotovoltaicos considerando seus critérios de desempenho revela que as notas atribuídas estão coerentes com as características reportadas na literatura. Para a aplicação específica em **carros solares**, certos critérios tornam-se ainda mais determinantes — especialmente **rendimento**, **durabilidade** e **flexibilidade**, além da **confiabilidade** em longos percursos sob vibração, variação térmica e exposição prolongada ao sol.

Dentro desse contexto, o **silício monocristalino (c-Si)** apresentou a maior média (4,3), sendo o material mais equilibrado entre todos os critérios avaliados. Seu

excelente rendimento, combinando eficiência elevada e durabilidade superior, o torna uma escolha altamente favorável para carros solares cujo espaço disponível é limitado e exige máxima extração de energia por área. O **silício policristalino (p-Si)** permaneceu próximo (4,2), refletindo também boa eficiência, boa estabilidade e produção amplamente estabelecida, embora com desempenho levemente inferior em rendimento.

O grupo dos filmes finos apresentou desempenho intermediário. O **CIGS** (média 3,0) destaca-se por apresentar boa flexibilidade e rendimento relativamente elevado para thin-films, o que pode representar vantagem em veículos solares com carrocerias curvas, porém sua limitação em disponibilidade de matéria-prima reduz sua atratividade para escalabilidade industrial. A **perovskita** (média 3,0) também mostra pontos fortes importantes — rendimento elevado e excelente flexibilidade — características desejáveis em veículos ultraleves e estruturados com superfícies irregulares. Ainda assim, suas notas baixas para durabilidade e descarte refletem os desafios de estabilidade térmica e fotoquímica ainda não resolvidos, o que restringe sua adoção imediata em aplicações automotivas que exigem confiabilidade prolongada. O **silício amorfo (a-Si)**, apesar de muito abundante e flexível, obteve média de 2,8 devido ao rendimento inferior e menor durabilidade, limitando seu uso em projetos de alto desempenho.

Por fim, o **CdTe**, com a menor média (2,5), reflete limitações relevantes para carros solares, especialmente relacionadas ao descarte e à disponibilidade do telúrio, além do rendimento inferior comparado a alternativas mais modernas.

## 6. CONCLUSÃO

Diante da avaliação global, conclui-se que o melhor material para aplicação em carros solares continua sendo o silício cristalino, especialmente o monocristalino, devido à combinação ideal de eficiência, durabilidade, estabilidade térmica e maturidade industrial. Entretanto, a análise também destaca o potencial das estruturas tandem, principalmente c-Si + perovskita, como caminho mais promissor para projetos futuros. Essas combinações permitem aliar a confiabilidade do silício à alta eficiência das perovskitas, resultando em módulos mais leves, mais eficientes e adaptados às demandas energéticas de veículos solares. Assim, os resultados da tabela reforçam

tanto a liderança atual do silício quanto a perspectiva de avanço tecnológico baseado em híbridos tandem.

Por fim, os resultados reforçam o potencial dos veículos solares como alternativa sustentável para a mobilidade. Diante das condições favoráveis de irradiação no Brasil, a adoção ampla dessa tecnologia poderia reduzir em cerca de 30% as emissões de gases de efeito estufa do setor de transportes, contribuindo diretamente para metas de descarbonização. Assim, o avanço e aprimoramento das células tandem apresentam-se como caminho promissor para integrar de forma eficiente a energia solar ao contexto veicular.

## REFERÊNCIAS

- [1] IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Genebra: IPCC, 2023. E-book. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_FullVolume.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf). Acesso em: 27 nov. 2025.
- [2] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION – WMO. **WMO confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55 °C above pre-industrial level.** [S. I.], 10 jan. 2025. Disponível em: <https://public.wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level>. Acesso em: 27 nov. 2025.
- [3] GE, M.; FRIEDRICH, J.; VIGNA, L. **4 gráficos para entender as emissões de gases de efeito estufa por país e por setor.** WRI Brasil, 28 fev. 2020. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/4-graficos-para-entender-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-por-pais-e-por-setor>. Acesso em: 27 nov. 2025.
- [4] **SEEG. Plataforma SEEG – dados de emissões de gases de efeito estufa no Brasil.** [S. I.], [s.d.]. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/?yearRange%5B0%5D=2024&yearRange%5B1%5D=2024&emissionType%5B0%5D=1&gas=9&groupBy=Sector&rankBy=Detail&filtersTab=filters&statisticsTab=historical>. Acesso em: 27 nov. 2025.
- [5] **SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa.** Plataforma SEEG – Emissões por setor e categoria (2024). [S. I.], 2024. Disponível em: <https://encurtador.com.br/cRiF>. Acesso em: 27 nov. 2025.
- [6] **SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Plataforma SEEG – dados de 2024.** [S. I.], 2024. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/?yearRange%5B0%5D=2024&yearRange%5B1%5D=2024&sector%5B0%5D=477&category%5B0%5D=755&emissionType%5B0%5D=1&gas=9&groupBy=Detail&rankBy=Detail&filtersTab=filters&statisticsTab=historical>. Acesso em: 27 nov. 2025.

[7] NEOCHARGE. **As vantagens do carro elétrico Sono Sion, coberto por um painel solar.** NeoCharge, 2024. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/blog/as-vantagens-do-carro-eletrico-sono-sion-coberto-por-um-painel-solar>. Acesso em: 27 nov. 2025.

[8] **Aptera Motors. Aptera – Solar Electric Vehicle.** [S. l.], s.d. Disponível em: <https://aptera.us/>. Acesso em: 27 nov. 2025.

[9] **Lightyear. Lightyear Layer – solar charging systems for mobility.** [S. l.], s.d. Disponível em: <https://lightyear.one/lightyear-layer>. Acesso em: 27 nov. 2025.

[10] WINDMILL, Mr. **The Feasibility of Solar-Powered Cars.** Digital Windmill, 14 jun. 2024. Disponível em: <https://digitalwindmill.com/the-feasibility-of-solar-powered-cars/>. Acesso em: 27 nov. 2025.

[11] CARELLOS, L. **Carro elétrico movido a energia solar é revelado na Alemanha.** VRUM, 02 ago. 2022, 18:45. Disponível em: <https://www.vrum.com.br/noticias/carro-eletrico-movido-a-energia-solar-e-revelado-na-alemanha/>. Acesso em: 27 nov. 2025.

[12] **APTERA MOTORS. Aptera unveils production-ready solar electric vehicle at CES 2025.** [S. l.], 7 jan. 2025. Disponível em: <https://aptera.us/aptera-unveils-production-ready-solar-electric-vehicle-at-ces-2025/>. Acesso em: 27 nov. 2025.

[13] OHARE, B. **Want A Lightyear 0 But Don't Have \$277K? Now Is Your Chance To Buy A Prototype.** InsideEVs, 22 abr. 2023. Disponível em: <https://insideevs.com/news/663680/lightyear-0-prototype-for-sale/>. Acesso em: 27 nov. 2025.

[14] TINKER, L. **Beyond Recycling: Reducing Waste from Solar Modules Before They're Even Made.** U.S. Department of Energy – Solar Energy Technologies Office, 5 mar. 2024. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/solar/articles/beyond-recycling-reducing-waste-solar-modules-theyre-even-made>. Acesso em: 27 nov. 2025.

[15] DOE – U.S. Department of Energy. **Photovoltaic Cell and Module Design.** Solar Energy Technologies Office. Estados Unidos, s.d. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/solar/photovoltaic-cell-and-module-design>. Acesso em: 27 nov. 2025.

[16] LAMEIRINHAS, R. A. M.; TORRES, J. P. N.; CUNHA, J. P. M. **A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications.** Energies, v. 15, n. 5, p. 1823, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15051823>. Acesso em: 27 nov. 2025.

[17] INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa.** 6. ed. Rio de Janeiro: GEN/LTC, 2008.

[18] TIPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph A. **Física Moderna**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

[19] PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2017. 88 p. ISBN 978-85-17-00090-4. Disponível em: <http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34P/3PERDJE>. Acesso em: 27 nov. 2025.

[20] CONTE, N.; KOSTANDI, C. **Ranked: The Countries With the Most Solar Power Installed**. Visual Capitalist, 25 jul. 2025. Disponível em: <https://www.visualcapitalist.com/ranked-the-countries-with-the-most-solar-power-installed/>. Acesso em: 27 nov. 2025.

[21] GOODHAO GROUP. **Latest Data! Solar Resources and Power Generation Hours by Province**. China: China Meteorological Administration, 24 jan. 2024. Boletim de imprensa. Disponível em: <https://goodhao.com.cn/en/%E5%A4%AA%E9%98%B3%E8%83%BD1-25/>. Acesso em: 27 nov. 2025.

[22] GRIFFITHS, D. J. **Mecânica quântica**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2011.

[23] KITTEL, Charles. Bandas de energia. In: KITTEL, Charles. **Introdução à física do estado sólido**. 5. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A., 1978. p. 179–199.

[24] CORREIA, E. S.; DANTAS, J. de M.; ANDRADE, J. E. de. **Considerações acerca dos conceitos de condutores, isolantes e semicondutores nos livros de Ensino Médio sob um olhar da teoria de bandas de energia**. *Scientia Plena*, [s.l.], v. 13, n. 1, 2017. DOI: 10.14808/sci.plena.2017.012716. Disponível em: <https://www.scienciaplena.org.br/sp/article/view/3485/1630>. Acesso em: 27 nov. 2025.

[25] CLEMENTE, G.; ROCHA, L.; GONÇALVES, G.; SANTOS, G.; MAROTTA, L.; LIMA, G. **Preparação de vernizes contendo luminóforos para aplicação em sinalização**. *Revista de Gestão e Secretariado*, [s.l.], v. 15, n. 1, p. 880-903, 2024. DOI: 10.7769/gesec.v15i1.3317.

[26] SZE, S. M.; NG, K. K. **Physics of semiconductor devices**. Hoboken: Wiley, 2006.

[27] WIKIPÉDIA. **Região de depleção**. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Regi%C3%A3o\\_de\\_deple%C3%A7%C3%A3o](https://pt.wikipedia.org/wiki/Regi%C3%A3o_de_deple%C3%A7%C3%A3o). Acesso em: 27 nov. 2025.

[28] PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB, 2014. Disponível em: [https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf). Acesso em: 27 nov. 2025.

[29] MILES, R. W.; HYNES, K. M.; FORBES, I. **Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues**.

*Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, v. 51, n. 1, p. 1-42, 2005. DOI: 10.1016/j.pcrysgrow.2005.10.002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960897405000410>.

[30] KIM, S.; HOANG, V.-Q.; BARK, C. W. **Silicon-based technologies for flexible photovoltaic (PV) devices: from basic mechanism to manufacturing technologies**. *Nanomaterials*, v. 11, p. 2944, 2021. DOI: 10.3390/nano11112944.

[31] COELHO, P. **Células Fotovoltaicas: Funcionamento, Produção e Tipos de Módulos Solares**. *EngQuimicaSantosSP*, 19 dez. 2012. Disponível em: <https://www.engquimicasantosp.com.br/2012/12/celulas-fotovoltaicas.html>. Acesso em: 27 nov. 2025.

[32] FERREIRA, R. B. **Análise da variação da eficiência de conversão energética de células fotovoltaicas de perovskita baseada na velocidade de recombinação e potencial de contato**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/227175/PEEL2024-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Acesso em: 27 nov. 2025.

[33] HANNEBAUER, H.; FALCON, T.; CUNNUSAMY, J.; DULLWEBER, T. **Single print metal stencils for high-efficiency PERC solar cells**. *Energy Procedia*, v. 98, p. 40-45, 2016. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.10.079.

[34] CRESTANI, T.; ZANESCO, I.; MOEHLECKE, A. **Influência da passivação em células solares de silício com campo retrodifusor seletivo de alumínio e boro**. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 14, n. 3, p. 236-242, 2017. DOI: 10.4322/2176-1523.1229. Disponível em: <https://tecnologiagmm.com.br/article/10.4322/2176-1523.1229/pdf/tmm-14-3-236.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2025.

[35] BATTAGLIA, C.; CUEVAS, A.; DE WOLF, S. **High-efficiency crystalline silicon solar cells: status and perspectives**. *Energy & Environmental Science*, v. 9, p. 1552–1576, 2016. DOI: 10.1039/C5EE03380B. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2016/ee/c5ee03380b>. Acesso em: 27 nov. 2025.

[36] VILLALVA, M. **Tecnologia PERC: a nova geração de células fotovoltaicas**. *Canal Solar*, 1 jul. 2019. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/tecnologia-perc-a-nova-geracao-de-celulas-fotovoltaicas/>. Acesso em: 27 nov. 2025.

[37] SALHAB, R. M. **Financiamento de energia solar fotovoltaica para clientes de varejo: desafios e oportunidades**. *Revista BNDES*, 2021. Disponível em: [https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/22049/1/PR\\_Financiamento%20de%20energia%20solar%20fotovoltaica\\_Revista%20BNDES\\_n.%2056.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/22049/1/PR_Financiamento%20de%20energia%20solar%20fotovoltaica_Revista%20BNDES_n.%2056.pdf). Acesso em: 29 nov. 2025.

- [38] **Understanding Perovskite Solar Cells: n-i-p vs. p-i-n structures.** *Solar Insight Hub*, 18 abr. 2024. Disponível em: <https://solarinsighthub.com/n-ip-vs-p-in-perovskite-solar-cells/>. Acesso em: 27 nov. 2025.
- [39] CHEN, Y.; LIN, P.; CAI, B.; ZHANG, W. **Research progress of inorganic hole transport materials in perovskite solar cells.** *Journal of Inorganic Materials*, v. 38, n. 9, 2023. DOI: 10.15541/jim20230105.
- [40] SCHULZE, P. S. C.; BETT, A. J.; WINKLER, K.; HINSCH, A.; LEE, S.; MASTROIANNI, S.; MUNDT, L. E.; MUNDUS, M.; WÜRFEL, U.; GLUNZ, S. W.; HERMLE, M.; GOLDSCHMIDT, J. C. **Novel Low-Temperature Process for Perovskite Solar Cells with a Mesoporous TiO<sub>2</sub> Scaffold.** *ACS Applied Materials & Interfaces*, v. 9, n. 36, p. 30567–30574, 2017. DOI: 10.1021/acsami.7b05718.
- [41] JAGADAMMA, L. K.; BLASZCZYK, O.; SAJJAD, M. T.; RUSECKAS, A.; SAMUEL, I. D. **Efficient indoor p-i-n hybrid perovskite solar cells using low temperature solution processed NiO as hole extraction layers.** *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1909.03838>. Acesso em: 27 nov. 2025.
- [42] LI, J.; WEN, F.; WANG, S. **Perovskite tandem solar cell technologies.** *Energies*, v. 16, n. 4, art. 1586, 2023. DOI: 10.3390/en16041586.
- [43] KIM, C. U.; JUNG, E.; NOH, Y.; SEO, S.; CHOI, Y.; PARK, H.; SONG, M.; CHOI, K.-J. **Strategy for large-scale monolithic Perovskite/Silicon tandem solar cell: A review of recent progress.** *EcoMat*, v. 3, 2021. DOI: 10.1002/eom2.12084.
- [44] DE ROOIJ, D. **Tandem Cells.** *Sinovoltaics*, s.d. Disponível em: <https://sinovoltaics.com/learning-center/solar-cells/tandem-cells/>. Acesso em: 27 nov. 2025.
- [45] BELLINI, E. **Células solares tandem de perovskita-silício mantiveram 80% de eficiência após 1 ano.** *pv magazine Brasil*, 10 fev. 2023. Disponível em: <https://www.pv-magazine-brasil.com/2023/02/10/celulas-solares-tandem-de-perovskita-silicio-mantiveram-80-de-eficiencia-apos-1-ano/>. Acesso em: 27 nov. 2025.
- [46] SHOCKLEY, W.; QUEISSER, H. J. **Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells.** *Journal of Applied Physics*, v. 32, n. 3, p. 510-519, 1961. DOI: 10.1063/1.1736034. Disponível em: [https://banavathvalyaiitmadras.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/12/limit-of-efficiency\\_shockley\\_queisser.pdf](https://banavathvalyaiitmadras.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/12/limit-of-efficiency_shockley_queisser.pdf). Acesso em: 27 nov. 2025.
- [47] COLPES RIBEIRO, G.; DUARTE, C.; DE LEON, F. **Técnica do rastreamento do ponto de máxima potência de um painel solar fotovoltaico aplicado a um conversor Boost.** Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/331624266\\_TECNICA\\_DO\\_RASTREAMENTO\\_DO\\_PONTO\\_DE\\_MAXIMA\\_POTENCIA\\_DE\\_UM\\_PAINEL\\_SOLAR\\_FOTOVOLT\\_AICO\\_APLICADO\\_A\\_UM\\_CONVERTOR\\_BOOST](https://www.researchgate.net/publication/331624266_TECNICA_DO_RASTREAMENTO_DO_PONTO_DE_MAXIMA_POTENCIA_DE_UM_PAINEL_SOLAR_FOTOVOLT_AICO_APLICADO_A_UM_CONVERTOR_BOOST). Acesso em: 27 nov. 2025.

[48] JOHNSON, C. M.; CONIBEER, G. J. **Limiting efficiency of generalized realistic c-Si solar cells coupled to ideal up-converters.** *Journal of Applied Physics*, v. 112, n. 10, 2012.

[49] FELL, A.; FISCHER, O.; BIVOUR, M.; MESSMER, C.; SCHÖN, J.; SCHUBERT, M. C.; GLUNZ, S. W. **Elucidating the efficiency limit of silicon-based monolithic tandem cells through the combination of Auger and Shockley–Queisser limits.** *EES Solar*, 2025. DOI: 10.1039/D5EL00085H.

[50] **34,85% ! LONGi bate novo recorde mundial de eficiência em célula solar tandem de silício cristalino e perovskita.** LONGi, 18 abr. 2025. Disponível em: <https://www.longi.com/br/news/silicon-perovskite-tandem-solar-cells-new-world-efficiency/>. Acesso em: 29 nov. 2025.

[51] SAGA, T. **Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production.** *NPG Asia Materials*, v. 2, p. 96–102, 2010. DOI: 10.1038/asiamat.2010.82. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/am201082#citeas>. Acesso em: 30 nov. 2025.

[52] A. J. Ali et al., **Recent Developments in Photovoltaic Technologies.** *Energies*, 16(1), 319, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/1/319>. Acesso em: 29 nov. 2025.

[53] J. Martínez et al., **Photovoltaic Solar Cells: A Review.** *Journal of Applied Sciences*, MDPI Energies, 5(4), 67, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-5577/5/4/67>. Acesso em: 29 nov. 2025.

[54] GÜNEŞER, M. T.; ERDİL, E.; CERNAT, M.; ÖZTÜRK, T. **Improving the energy management of a solar electric vehicle.** *Advances in Electrical and Computer Engineering*, v. 15, n. 4, p. 53–62, 2015.

[55] HOWELECTRICAL. **What is Solar Car? Definition, Components, Diagram, Advantages, Disadvantages & Applications,** [s.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://howelectrical.com/solar-car/>. Acesso em: 29 nov. 2025.

[56] **IMPORTANTE para a construção de placas solares, silício também é muito utilizado na construção civil e no setor automobilístico.** Ministério de Minas e Energia, 17 nov. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/importante-para-a-construcao-de-placas-solares-silicio-tambem-e-muito-utilizado-na-construcao-civil-e-no-setor-automobilistico>. Acesso em: 29 nov. 2025.

[57] **BNDES Setorial.** Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Rio de Janeiro, v. 31, n. 59, p. 5-55, mar. 2025. Disponível em: [https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/28127/4/PRPer\\_86593\\_BNDES\\_Setorial%2c%20n.%2059%2c%20mar.%202025.pdf.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/28127/4/PRPer_86593_BNDES_Setorial%2c%20n.%2059%2c%20mar.%202025.pdf.pdf). Acesso em: 29 nov. 2025.

[58] MELLO, G. O. L. de. **Estudo da influência da temperatura na produção de energia gerada por placas fotovoltaicas.** 2021. 53 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) — Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo

Grande, 2021. Disponível em: <https://posgraduacao.ufms.br/portal/trabalho-arquivos/download/9568>. Acesso em: 29 nov. 2025.

[59] DI SABATINO, M.; HENDAWI, R.; GARCIA, A. S. **Silicon Solar Cells: Trends, Manufacturing Challenges, and AI Perspectives**. Crystals, v. 14, n. 2, p. 167, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/cryst14020167>. Acesso em: 29 nov. 2025.

[60] ELKHAMISY, K.; ABDELHAMID, H.; EL-RABAIE, E. S. M.; et al. **A Comprehensive Survey of Silicon Thin-film Solar Cell: Challenges and Novel Trends**. Plasmonics, v. 19, p. 1–20, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11468-023-01905-x>. Acesso em: 29 nov. 2025.

[61] **How do different solar panel technologies compare in terms of degradation rates**. NenPower, 14 dez. 2024. Disponível em: <https://nenpower.com/blog/how-do-different-solar-panel-technologies-compare-in-terms-of-degradation-rates/>. Acesso em: 29 nov. 2025.

[62] GULKOWSKI, S.; MUÑOZ DÍEZ, J. V.; AGUILERA TEJERO, J.; DRAGAN, P.; NOFUENTES, G. **A study on long-term operation and performance loss rates of various PV technologies in eastern Poland**. Renewable Energy, v. 256, p. 124548, 30 set. 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148125022128>. Acesso em: 29 nov. 2025.

[63] YMER, E. T.; LEMU, H. G.; TOLCHA, M. A. **Identification of the key material degradation mechanisms affecting silicon solar cells: Systematic literature review**. Results in Engineering, v. 27, p. 106113, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123025021851>. Acesso em: 29 nov. 2025.

[64] NASCIMENTO, L. R. do. **Performance assessment of solar photovoltaic technologies under different climatic conditions in Brazil**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 20 mar. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/204420>. Acesso em: 29 nov. 2025.

[65] NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). **Best Research-Cell Efficiency Chart**. Golden, CO, EUA: NREL, 2025. Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency>. Acesso em: 29 nov. 2025.

[66] LIU, W.; LIU, Y.; YANG, Z.; et al. **Flexible solar cells based on foldable silicon wafers with blunted edges**. Nature, v. 617, p. 717–723, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05921-z>. Acesso em: 29 nov. 2025.

[67] DI SABATINO, M.; HENDAWI, R.; GARCIA, A. S. **Silicon Solar Cells: Trends, Manufacturing Challenges, and AI Perspectives**. Crystals, v. 14, n. 2, p. 167, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/cryst14020167>. Acesso em: 29 nov. 2025.

- [68] GUSTAFSSON, A. M. K.; FOREMAN, M. R. StJ.; EKBERG, C. **Recycling of high purity selenium from CIGS solar cell waste materials**. Waste Management, v. 34, n. 10, p. 1775–1782, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X14000063>. Acesso em: 29 nov. 2025.
- [69] RAVILLA, A.; GULLICKSON, E.; TOMES, A.; CELIK, I. **Economic and environmental sustainability of copper indium gallium selenide (CIGS) solar panels recycling**. Science of The Total Environment, v. 951, p. 175670, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724058261>. Acesso em: 29 nov. 2025.
- [70] MALLAH, A. R.; SAEVARSDOTTIR, G.; HEUER, M.; et al. **Advancing Sustainability in Solar-Grade Silicon Production: Enhanced Boron and Phosphorus Removal via Silicon Refining from Al–Si Melt**. JOM, v. 77, p. 2512–2526, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11837-024-07114-z>. Acesso em: 29 nov. 2025.
- [71] PILIOUGINE, M.; SÁNCHEZ-FRIERA, P.; PETRONE, G.; SÁNCHEZ PACHECO, F.; SPAGNUOLO, G.; SIDRACH-DE-CARDONA, M. **Analysis of the degradation of amorphous silicon-based modules after 11 years of exposure by means of IEC60891:2021 procedure 3**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 30, p. 1176–1187, abr. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pip.3567>. Acesso em: 29 nov. 2025.
- [72] SVERDRUP, H. U.; VAN ALLEN, O.; HARALDSSON, H. V. **Modeling Indium Extraction, Supply, Price, Use and Recycling 1930–2200 Using the WORLD7 Model: Implication for the Imaginaries of Sustainable Europe 2050**. Natural Resources Research, v. 33, p. 539–570, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11053-023-10296-z>. Acesso em: 29 nov. 2025.
- [73] BRUSDEYLIN, C. **Indium availability for CIGS thin-film solar cells in Europe**. CIGS Thin Films, 5 jul. 2021. Disponível em: <https://cigs-pv.net/indium-availability-for-cigs-thin-film-solar-cells-in-europe/>. Acesso em: 29 nov. 2025.
- [74] PARK, H. K.; JO, W. **Flexible Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> photovoltaics for bending applications: advances from materials to panels**. J. Mater. Chem. C, v. 13, n. 6, p. 2554–2577, 2025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1039/D4TC04422C>. Acesso em: 29 nov. 2025.
- [75] DA COSTA, P. V. N.; DE MEDEIRO, R. A.; FERREIRA, C. L.; CRUZ, L. R. **Effect of the Heat Treatment on the Microstructure and Morphology of Cigs Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering at Room Temperature**. In: 23rd Brazilian Conference on Materials Science and Engineering, 2020, v. 1012. Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, p. 119–124, nov. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1012.119>. Acesso em: 29 nov. 2025.

- [76] VILLALVA, M. **Filmes finos CIGS: uma alternativa ao silício cristalino.** Canal Solar, 30 maio 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/filmes-finos-cigs-uma-alternativa-ao-silicio-cristalino/>. Acesso em: 29 nov. 2025.
- [77] ZIMMERMANN, Y.-S.; NIEWERSCH, C.; LENZ, M.; KÜL, Z. Z.; CORVINI, P. F.-X.; SCHÄFFER, A.; WINTGENS, T. **Recycling of Indium From CIGS Photovoltaic Cells: Potential of Combining Acid-Resistant Nanofiltration with Liquid–Liquid Extraction.** Environmental Science & Technology, v. 48, n. 22, p. 13412–13418, 18 nov. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es502695k>. Acesso em: 29 nov. 2025.
- [78] SCARPULLA, M. A.; MCCANDLESS, B.; PHILLIPS, A. B.; YAN, Y.; HEBEN, M. J.; WOLDEN, C.; XIONG, G.; METZGER, W. K.; MAO, D.; KRASIKOV, D.; SANKIN, I.; GROVER, S.; MUNSHI, A.; SAMPATH, W.; SITES, J. R.; BOTHWELL, A.; ALBIN, D.; REESE, M. O.; ROMEO, A.; NARDONE, M.; KLIE, R.; WALLS, J. M.; FIDUCIA, T.; ABBAS, A.; HAYES, S. M. **CdTe-based thin film photovoltaics: Recent advances, current challenges and future prospects.** Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 255, p. 112289, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024823001101>. Acesso em: 29 nov. 2025.
- [79] STRAUB-MÜCK, M.; GEYER-KLINGEBERG, J.; RATHGEBER, A. W. **Determinants of the long-term degradation rate of photovoltaic modules: A meta-analysis.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 216, p. 115697, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032125003703>. Acesso em: 29 nov. 2025.
- [80] KÖNTGES, M.; LIN, J.; VIRTUANI, A.; EDER, G. C.; ORESKI, G.; HACKE, P.; STEIN, J. S.; BRUCKMAN, L.; GEBHARDT, P.; BARRIT, D.; et al. **Degradation and Failure Modes in New Photovoltaic Cell and Module Technologies.** Report IEA-PVPS, 2025.
- [81] NASCIMENTO PEREIRA, G.; BISOLOTTI DO CARMO, M.; PEREIRA UGUCIONI ROCHA, G.; UTZIG PICCO, I. U. P.; FLECHA SOSA, C. D.; DO RÊGO BRANDÃO, C. V.; BONETTO, M. **Célula fotovoltaica de perovskita: uma revisão do estado da arte.** Revista Brasileira de Energia Solar, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 151–161, 2024. DOI: 10.59627/rbens.2024v15i2.472. Disponível em: <https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/article/view/472>. Acesso em: 29 nov. 2025.
- [82] VIDAL, R.; ALBEROLA-BORRÀS, J.-A.; MORA-SERÓ, I. **Abiotic depletion and the potential risk to the supply of cesium.** Resources Policy, v. 68, p. 101792, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030142071930995X>. Acesso em: 29 nov. 2025.
- [83] National Renewable Energy Laboratory (NREL). **Thin-Film Reliability Trends Toward Improved Stability.** Golden, CO: NREL, 2011. Disponível em: <https://docs.nrel.gov/docs/fy11osti/50726.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2025.