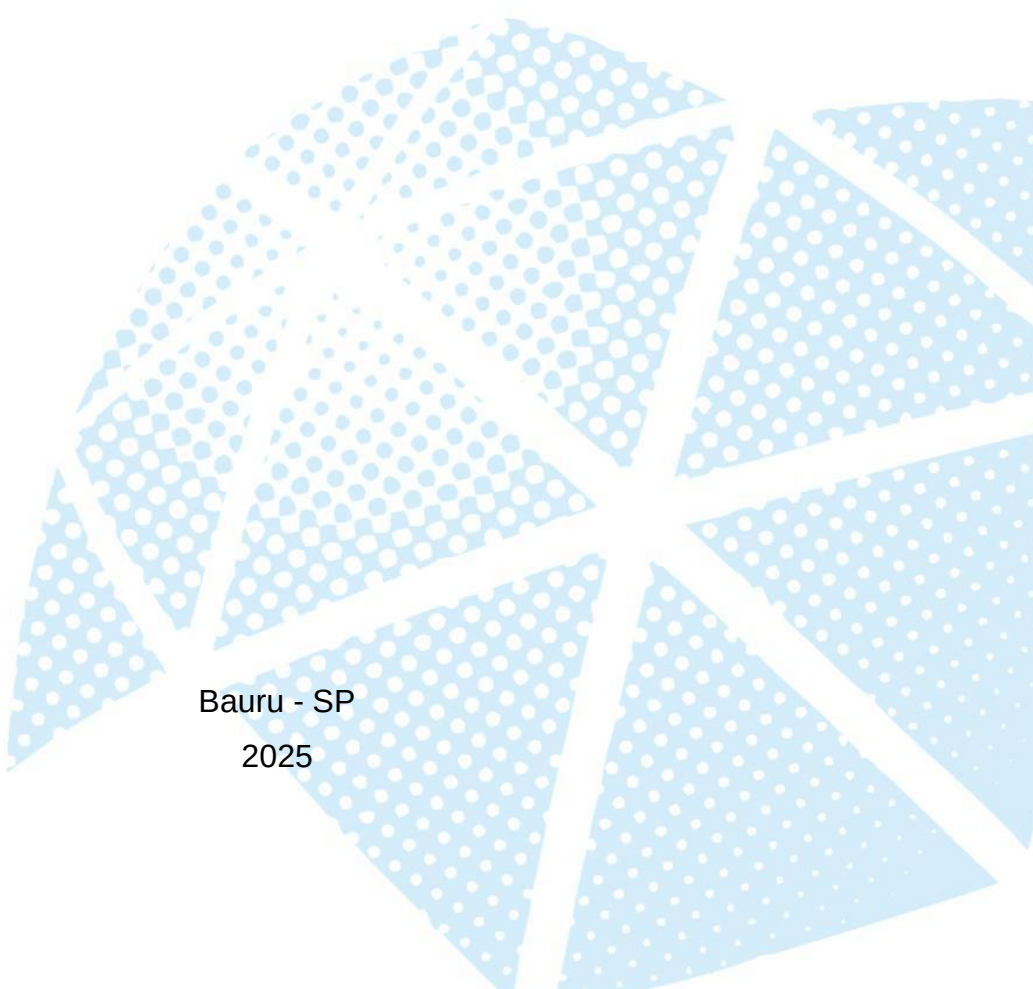


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE BAURU**

JOÃO VITOR GONÇALVES DE OLIVEIRA

**FATORES QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS: UMA REVISÃO**

Bauru - SP
2025



JOÃO VITOR GONÇALVES DE OLIVEIRA

**FATORES QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS: UMA REVISÃO**

Trabalho de Graduação apresentado à
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia, Bauru, para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Assoc. Fabricio
Guimarães Baptista

Bauru - SP

2025

O48f

Oliveira, João Vitor Gonçalves

Fatores que influenciam o desempenho de sistemas fotovoltaicos:
uma revisão / João Vitor Gonçalves Oliveira. -- Bauru, 2025
43 p. : tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia
Elétrica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de
Engenharia, Bauru

Orientador: Fabricio Guimarães Baptista

1. Geração de energia fotovoltaica. 2. Energia Fontes alternativas.
3. Aproveitamento energético. 4. Baterias solares. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: **João Vitor Gonçalves de Oliveira**

Título: **Fatores que Influenciam o Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos:
Uma Revisão**

Trabalho de Graduação defendido e aprovado em 14/11/2025, com

MÉDIA: **9,0 (nove inteiros)**, pela comissão julgadora:

Prof. Dr. Fabricio Guimarães Baptista

Prof. Dr. Fábio Isaac Ferreira

Prof. Dr. Leandro Melo Campeiro

Prof. Dr. José Eduardo Cogo Castanho

Coordenador do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica

RESUMO

A crescente demanda por fontes de energia renovável tem impulsionado o desenvolvimento e a utilização de sistemas fotovoltaicos em todo o mundo. No entanto, o desempenho desses sistemas depende de diversos fatores técnicos e ambientais, que influenciam diretamente a eficiência de conversão e a confiabilidade ao longo da vida útil. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais fatores que impactam o desempenho de sistemas fotovoltaicos, bem como as tecnologias e estratégias empregadas para mitigá-los, destacando suas vantagens e desvantagens. Trata-se de uma pesquisa realizada com base na seleção e análise de publicações científicas, relatórios técnicos e normas relevantes da área, priorizando trabalhos publicados nos últimos dez anos. A revisão permitiu identificar que fatores como temperatura e degradação têm papel determinante no desempenho à longo prazo, enquanto avanços em algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência e novas tecnologias de armazenamento oferecem perspectivas promissoras para a maximização da geração e da confiabilidade. Assim, este estudo contribui para consolidar o conhecimento sobre as variáveis determinantes no desempenho fotovoltaico, além de apontar lacunas que podem orientar futuras pesquisas e aprimoramentos tecnológicos no setor.

Palavras-chave: energia solar fotovoltaica; desempenho de sistemas fotovoltaicos; otimização de sistemas; eficiência energética; armazenamento de energia.

ABSTRACT

The growing demand for renewable energy sources has driven the development and use of photovoltaic systems worldwide. However, the performance of these systems depends on several technical and environmental factors that directly influence conversion efficiency and long-term reliability. This work presents a bibliographic review of the main factors that affect the performance of photovoltaic systems, as well as the technologies and strategies employed to mitigate them, highlighting their advantages and disadvantages. The research was conducted based on the selection and analysis of scientific publications, technical reports and relevant standards in the field, prioritizing studies published in the last ten years. The review identified that factors such as temperature and degradation play a decisive role in long-term performance, while advances in maximum power point tracking algorithms and new energy storage technologies offer promising perspectives for maximizing generation and reliability. Thus, this study contributes to consolidating knowledge about the key variables influencing photovoltaic performance and highlights research gaps that may guide future investigations and technological improvements in the sector.

Keywords: photovoltaic solar energy; photovoltaic systems performance; system optimization; energy efficiency; energy storage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de uma célula fotovoltaica	14
Figura 2 - Curva característica I-V de corrente e tensão de um módulo fotovoltaico.	15
Figura 3 - Curva característica P-V de corrente e tensão de um módulo fotovoltaico.	16
Figura 4 - Ângulo azimutal.....	18
Figura 5 - Orientação azimutal ótima.	18
Figura 6 - Ângulos que definem a posição do Sol (θ_z é o ângulo de zênite, α é o ângulo da altura solar e γ é o ângulo de azimute).	19
Figura 7 - Ângulo de incidência da luz solar - (a) módulo sem inclinação e (b) módulo com inclinação β	19
Figura 8 - Geração de energia para azimutes de -45° a $+45^\circ$	21
Figura 9 - Potência gerada para o sistema com e sem rastreador solar.	22
Figura 10 - Influência da radiação solar na operação de um módulo.....	23
Figura 11 - Influência do sombreamento em um arranjo fotovoltaico.....	24
Figura 12 - Efeito do sombreamento em um módulo único.....	25
Figura 13 - Efeito do sombreamento de um módulo em um arranjo fotovoltaico.	25
Figura 14 - Curvas I-V e P-V para arranjo com diodos de <i>bypass</i>	27
Figura 15 - Potência gerada pelos módulos limpo (1) e sujo (2).	28
Figura 16 - Curva P-V para módulos bifaciais e mono sob diferentes inclinações. ...	31
Figura 17 - Efeito causado pela variação da temperatura em um módulo de 36 células de silício.	32
Figura 18 - Potência de um módulo para diferentes temperaturas.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Recomendação de ângulo de inclinação do módulo.	20
---	----

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Equação de Shockley	15
Equação 2 - Corrente de saturação reversa.....	15
Equação 3 - Curva característica célula fotovoltaica.....	16
Equação 4 - Eficiência de um módulo fotovoltaico	29
Equação 5 - Ganho de energia pela face traseira do módulo	29
Equação 6 - Energia total de um módulo bifacial	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	12
1.2	METODOLOGIA.....	12
2	FUNDAMENTOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	13
2.1	EFEITO FOTOVOLTAICO E PLACAS FOTOVOLTAICAS	13
2.2	CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS ..	14
3	POSICIONAMENTO E ORIENTAÇÃO DOS MÓDULOS	17
3.1	RASTREAMENTO DO <i>MPPT</i>	21
4	SOMBREAMENTO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	23
4.1	<i>HOTSPOTS</i>	26
4.2	ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DO SOMBREAMENTO	26
5	EFICIÊNCIA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	28
5.1	IMPACTO DA TEMPERATURA	32
5.1.1	MÉTODOS DE RESFRIAMENTO.....	33
5.2	DEGRADAÇÃO E CONFIABILIDADE DOS MÓDULOS	35
6	ARMAZENAMENTO E INTEGRAÇÃO COM OUTRAS FONTES.....	36
7	CONCLUSÃO	38
	REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes renováveis de energia tem consolidado a energia solar fotovoltaica como uma das principais alternativas para diversificação da matriz elétrica mundial. O avanço tecnológico das últimas décadas permitiu que sistemas fotovoltaicos atingissem maior eficiência e viabilidade econômica, ampliando significativamente sua participação tanto em países desenvolvidos quanto em nações emergentes.

O Brasil, em particular, por seu alto elevado potencial de radiação e sua grande diversidade de recursos e extensão territorial, apresenta diversas oportunidades na diversificação de sua matriz energética. Tal fato é afirmado pela Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012, a qual regulamenta a geração de energia através de placas solares fotovoltaicas (ANEEL, 2012).

Apesar desse cenário promissor, o desempenho dos sistemas fotovoltaicos é condicionado a diversos fatores técnicos e ambientais, que influenciam diretamente a eficiência de conversão, a confiabilidade e a vida útil dos equipamentos. Entre esses fatores, destacam-se o posicionamento e a inclinação dos módulos, a temperatura de operação, a degradação dos componentes e a qualidade da construção interna das células e módulos fotovoltaicos, da qual decorre a sua eficiência final. Esses aspectos determinam de maneira significativa a performance global do sistema.

Com o rápido avanço do mercado fotovoltaico e a crescente penetração dessa fonte no Brasil, surgem novos desafios relacionados à operação em redes elétricas, incluindo a inversão de fluxo em diversas concessionárias, a qual vem limitando novos projetos na área, reforçando a importância de estratégias que maximizem a geração e assegurem maior confiabilidade ao sistema (ANEEL, 2024).

Nesse contexto, observa-se também que a introdução de novas tecnologias não apenas melhora a eficiência, mas desempenha papel fundamental na segurança elétrica e operacional dos sistemas. A utilização de materiais mais resistentes, técnicas avançadas e soluções construtivas que previnem falhas contribuem para reduzir riscos de incêndio, curtos-circuitos e degradações prematuras. Além disso, sistemas de monitoramento e proteção cada vez mais sofisticados elevam o nível de confiabilidade, tornando a energia solar não apenas mais competitiva, mas também mais segura para consumidores e concessionárias.

Assim, torna-se relevante investigar, de maneira sistemática, os fatores que influenciam o desempenho de sistemas fotovoltaicos, bem como as abordagens tecnológicas existentes para mitigar tais efeitos, destacando suas vantagens e limitações.

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica dos principais fatores que afetam a geração fotovoltaica, relacionando soluções propostas na literatura e analisando sua relevância no contexto atual de expansão do setor solar no Brasil e no mundo.

1.1 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho de graduação foi o desenvolvimento de um estudo sobre os fatores que influenciam a geração de energia em sistemas fotovoltaicos, destacando sua relevância no contexto global e, de forma breve, considerando também o cenário atual do mercado brasileiro, no qual já se observam situações de inversão de fluxo em algumas concessionárias.

1.2 METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido por meio de uma revisão bibliográfica, baseada na seleção e análise de artigos científicos, relatórios técnicos e normas relacionadas à energia fotovoltaica. A busca foi conduzida principalmente no *IEEE Xplore*, priorizando publicações dos últimos dez anos, de modo a garantir a atualidade e a relevância das informações, mas também incluindo alguns estudos mais antigos cuja relevância permanece significativa.

A abordagem adotada buscou não apenas descrever os principais avanços da área, mas também comparar soluções propostas na literatura, ressaltando suas vantagens e limitações. Dessa forma, foi possível estabelecer uma visão abrangente e fundamentada sobre os fatores determinantes do desempenho em sistemas fotovoltaicos.

2 FUNDAMENTOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

2.1 EFEITO FOTOVOLTAICO E PLACAS FOTOVOLTAICAS

A energia solar fotovoltaica é definida como a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade, fenômeno conhecido como efeito fotovoltaico (CRESESB, 2014). Tal efeito foi descoberto pelo francês Alexandre-Edmond Becquerel em 1839, quando observou uma diferença de potencial nas extremidades de uma estrutura semicondutora, enquanto incidia uma luz sobre ela, descoberta que motivou a construção das primeiras placas fotovoltaicas (Nascimento, 2011).

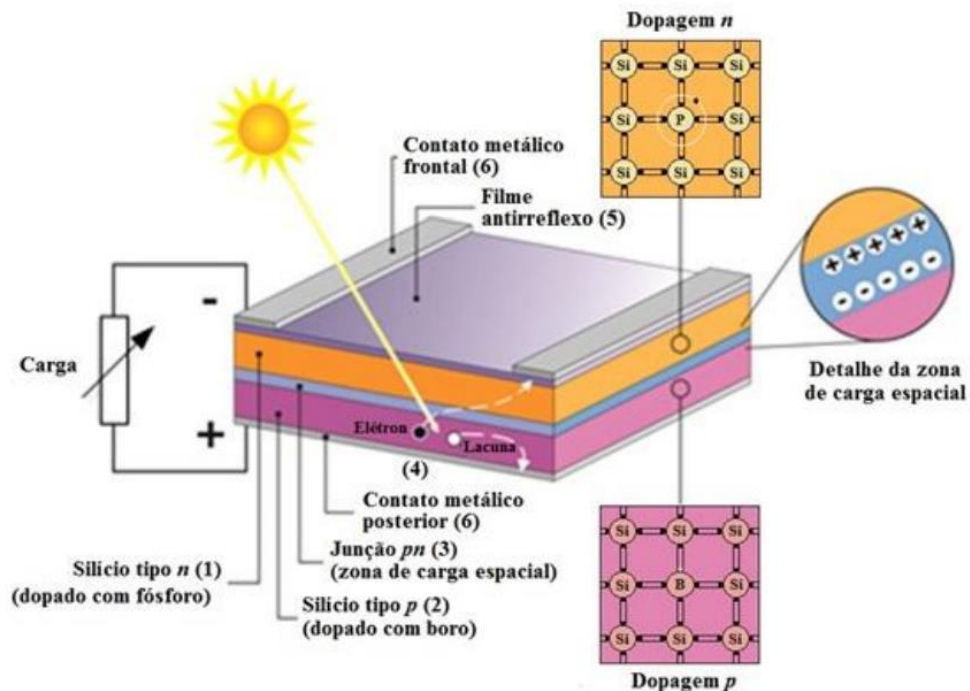
Células solares são compostas por materiais semicondutores, sendo que o silício (Si) é o principal elemento utilizado em sua fabricação e tem dominado o mercado mundial atualmente, principalmente por sua abundância e seu valor baixo comparado com outros materiais semicondutores (Almeida *et al.*, 2016).

Porém o cristal de silício puro não é bom condutor elétrico, para alterar isso e possibilitar a construção das placas fotovoltaicas, acrescentam-se a ele porcentagens de outros elementos, processo denominado dopagem. O silício é denominado do tipo P, com cargas positivas livres (lacunas), quando dopado com materiais trivalentes, e do tipo N, com cargas negativas livres (elétrons livres), quando dopado com materiais pentavalentes (Nascimento, 2011).

Dessa forma, como podemos observar através da Figura 1, células fotovoltaicas são compostas por duas camadas de material semicondutor, sendo uma do tipo P e a outra do tipo N, uma grade de coletores metálicos superior e uma base metálica inferior, que são terminais elétricos que fazem a coleta da corrente elétrica produzida pela ação da luz. Sendo que células comerciais ainda possuem uma camada de material antirreflexivo, normalmente feita de nitreto de silício ou de dióxido de titânio, necessária para evitar a reflexão e aumentar a absorção de luz (Villalva e Gazoli, 2012).

Assim, por meio de um condutor externo, conectando as camadas positiva e negativa, gera-se um fluxo de elétrons (corrente elétrica), que se manterá enquanto a luz incidir na célula (Nascimento, 2011).

Figura 1 - Estrutura de uma célula fotovoltaica



Fonte: CRESESB, 2014

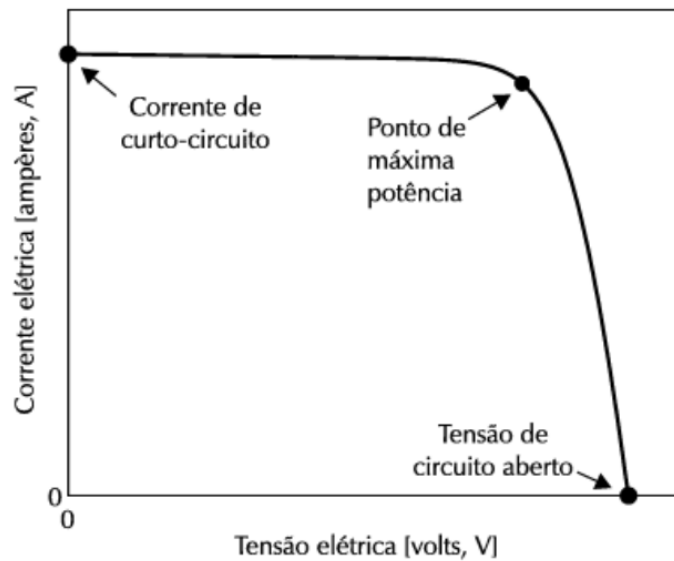
Uma única célula fotovoltaica é capaz de gerar apenas uma quantidade reduzida de energia elétrica, apresentando valores de tensão insuficientes para atender aplicações práticas de maior escala. Contudo, ao serem conectadas em série, as células podem elevar a tensão do circuito e aumentar a potência disponibilizada, originando os chamados módulos fotovoltaicos (CEMIG, 2012).

Os módulos fotovoltaicos, por sua vez, não possuem a função de armazenar energia. Sua finalidade é apenas captar a radiação solar e convertê-la diretamente em corrente elétrica, a qual é posteriormente coletada e processada por dispositivos controladores e conversores, que permitem sua adequada utilização (Villalva e Gazoli, 2012).

2.2 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

A relação entre a tensão e a corrente de saída de um módulo fotovoltaico não é linear, como apresentado pela curva I-V na Figura 2:

Figura 2 - Curva característica I-V de corrente e tensão de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Villalva e Gazoli, 2012

Através da equação 1, CRESESB (2014) descreve essa relação entre a tensão e a corrente das células, a qual deriva da Equação de Shockley, do diodo ideal:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

Onde:

I_L - corrente fotogerada (A);

I_0 - corrente de saturação reversa do diodo (A);

n - fator de idealidade do diodo, obtido por ajuste de dados medidos;

q - carga do elétron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C);

k - a constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K);

T - temperatura absoluta (K).

Também segundo CRESESB (2014), a corrente de saturação reversa, por sua vez, pode ser calculada pela equação 2:

$$I_0 = q \cdot A \cdot n_i^2 \cdot \left(\frac{D_p}{L_p \cdot N_d} + \frac{D_n}{L_n \cdot N_a} \right) \quad (2)$$

Onde:

A – área da seção reta da junção (área da célula);

n_i – concentração de portadores intrínsecos no material;
 N_d, N_a – concentração dos dopantes tipo n e p, respectivamente;
 D_p, D_n – Coeficientes de difusão de lacunas e elétrons, respectivamente, no material;
 L_p, L_n – Comprimentos de difusão de lacunas e elétrons;
 q - carga do elétron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

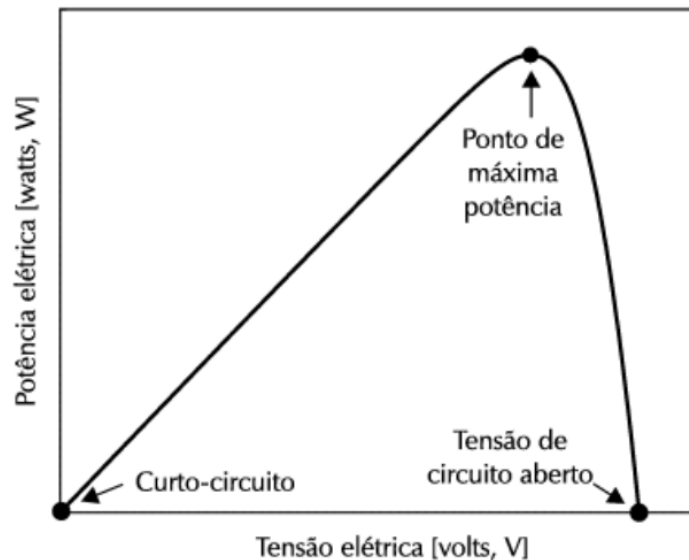
Considerando que em uma célula fotovoltaica há uma resistência em série devido à junção metal-semicondutor, assim como resistências em paralelo devido a pontos de curto circuito na junção pn, a equação da sua curva característica torna-se (CRESESB, 2014):

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_S)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_p} \quad (3)$$

Onde R_S é a resistência em série e R_p a resistência em paralelo.

Para cada curva I-V existe uma curva P-V correspondente que mostra como a potência do módulo varia em função de sua tensão, como podemos observar na Figura 3.

Figura 3 - Curva característica P-V de corrente e tensão de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Villalva e Gazoli, 2012

Nas curvas apresentadas nas Figuras 2 e 3, é possível notar três pontos de destaque: o ponto de corrente de curto circuito (I_{SC}), que é a máxima corrente que se pode obter e é medida quando a tensão em seus terminais é zero; a tensão de curto-circuito (V_{SC}), que a tensão máxima que uma placa pode produzir, obtida quando não há corrente elétrica circulando; e o ponto de máxima potência (P_{MP}), onde o módulo opera com potência máxima. Sendo que esse último é o ponto ideal em que o equipamento deve operar (CRESESB, 2014).

Os painéis solares também podem ser associados em série e/ou paralelo para se obter as tensões e correntes determinadas em um projeto. (Almeida *et al.*, 2016)

Há diversos fatores que afetam o desempenho de um arranjo fotovoltaico, impedindo-o de operar em seu ponto de máxima potência, onde os principais serão destacados a seguir.

3 POSICIONAMENTO E ORIENTAÇÃO DOS MÓDULOS

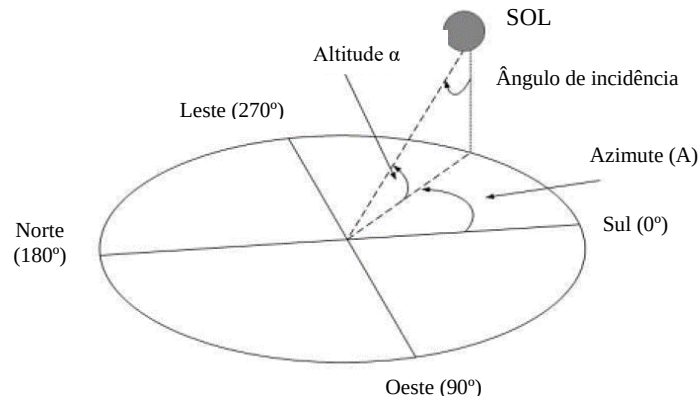
Uns dos principais fatores são a orientação e a inclinação dos módulos solares, pois exercem papel fundamental na captação da radiação solar. Sistemas posicionados de acordo com o movimento aparente do sol apresentam maior rendimento energético, enquanto desvios podem resultar em perdas significativas.

A potência gerada por um sistema fotovoltaico está diretamente associada ao ângulo de incidência da radiação solar sobre os módulos. O desempenho máximo ocorre quando os raios solares atingem a superfície de forma perpendicular, condição em que há maior aproveitamento da energia disponível. (Pratama *et al.*, 2019)

Em cada ponto do planeta a radiação incide no solo com uma inclinação diferente, que varia ao longo dos meses do ano, sendo um fator que não pode ser controlado. Entretanto é possível posicionar os módulos de modo a maximizar a captação da radiação direta (Villalva e Gazoli, 2012).

Um dos conceitos de maior impacto na potência de um sistema fotovoltaico é o ângulo azimutal, apresentado na Figura 4, que é o ângulo de orientação dos raios solares com relação ao norte geográfico (Desai *et al.*, 2021).

Figura 4 - Ângulo azimutal.

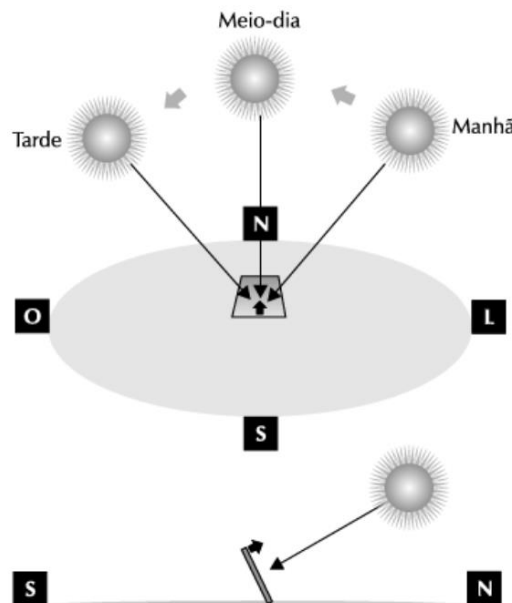


Fonte: Adaptada de Desai *et al.*, 2021

No hemisfério sul, a situação na qual o ângulo do azimute solar coincide com o norte polar da Terra, é chamada de meio-dia solar, que representa o ângulo azimutal nulo e também indica que o Sol está na metade do seu trajeto entre o nascimento e o instante que se põe (Villalva e Gazoli, 2012).

A instalação correta das células deve levar em conta esse movimento, sendo que a melhor maneira de instalar um sistema solar fixo é orientá-lo com sua face voltada ao norte geográfico, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Orientação azimutal ótima.

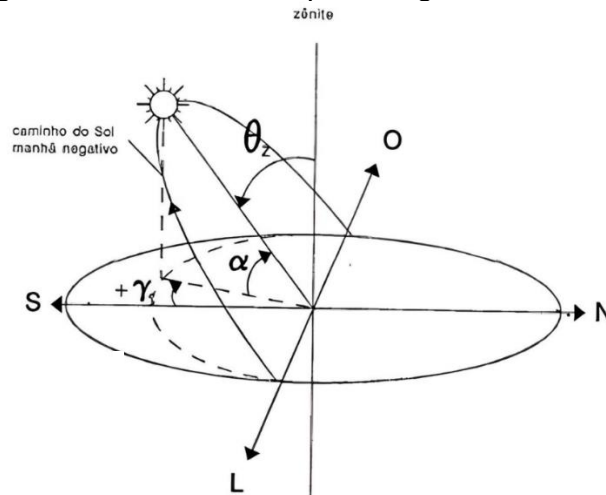


Fonte: Villalva e Gazoli, 2012

Outros dois ângulos de importância no estudo do posicionamento das placas são o ângulo zenital (θ_z), representando a posição do sol em relação ao eixo vertical,

onde quanto menor o ângulo maior a radiação incidente, e da altura solar (α), ângulo complementar ao zenital. Ambos podem ser observados na Figura 6, sendo que o primeiro é o ângulo do Sol em relação ao eixo vertical e o segundo é em relação ao plano horizontal (Barcelos e Oliveira, 2022).

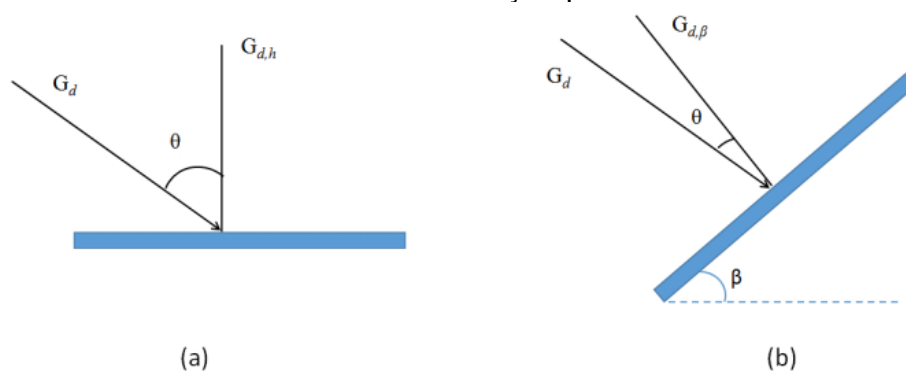
Figura 6 - Ângulos que definem a posição do Sol (θ_z é o ângulo de zênite, α é o ângulo da altura solar e γ é o ângulo de azimuth).



Fonte: Barcellos e Oliveira, 2016

Por conta da posição do Sol no céu, para que ele incida sobre as células de maneira perpendicular, as mesmas são instaladas com um ângulo de inclinação. Através da Figura 7, é possível observar a influência da inclinação no ângulo de incidência da luz solar, onde G é o vetor de irradiância solar direta e θ representa o ângulo de zênite.

Figura 7 - Ângulo de incidência da luz solar - (a) módulo sem inclinação e (b) módulo com inclinação β .



Fonte: CRESESB, 2014

É possível determinar um ângulo de inclinação que possibilita uma boa geração média de energia ao longo do ano de acordo com a latitude geográfica do local, regra adotada por muitos fabricantes, como apresentado na Tabela 1, não sendo recomendados ângulos inferiores a 10°, por conta do acúmulo de sedimentos (Villalva e Gazolli, 2012).

Tabela 1: Recomendação de ângulo de inclinação do módulo.

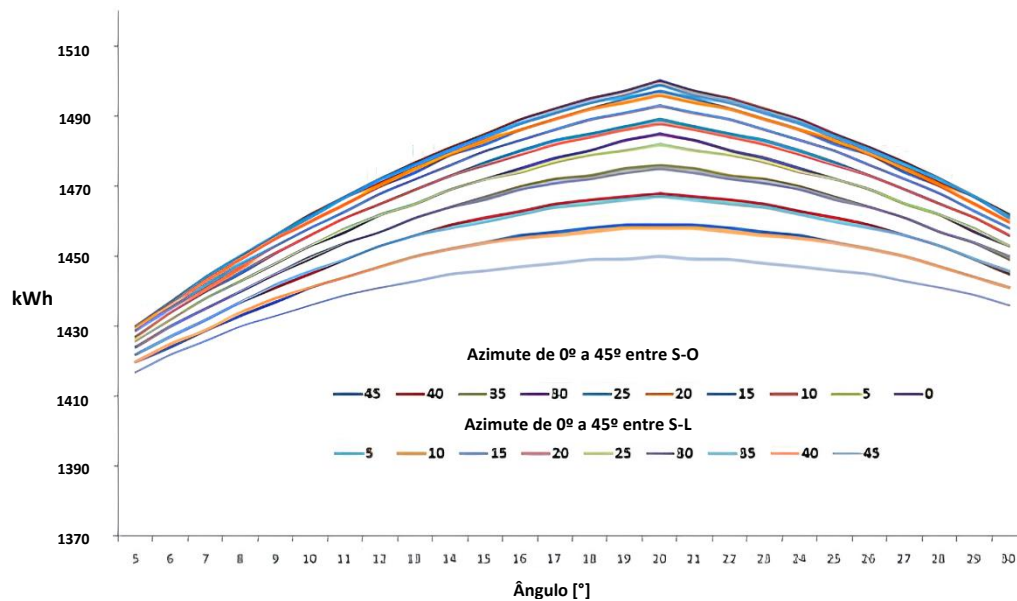
Latitude Geográfica do Local	Ângulo de inclinação recomendado
0° a 10°	$\beta = 10^\circ$
11° a 20°	$\beta = \text{latitude}$
21° a 30°	$\beta = \text{latitude} + 5^\circ$
31° a 40°	$\beta = \text{latitude} + 10^\circ$
41° ou mais	$\beta = \text{latitude} + 15^\circ$

Fonte: Adaptado de BOSCH Solar Energy Corp, 2012

De acordo com Rojas-Hernandez (2016), em um estudo realizado na Libéria para avaliar o impacto do posicionamento na geração de sistemas fotovoltaicos, foram analisadas variações no ângulo de azimute e na inclinação dos módulos em uma mesma fileira. Os resultados indicaram diferenças de até 2,5% na geração do sistema entre a configuração considerada ótima e a configuração sem inclinações, evidenciando a relevância do posicionamento dos módulos na eficiência global do sistema.

No mesmo sentido, Desai *et al.* (2012), realizaram um estudo parecido na região de Gujarat, na Índia, também variando os ângulos de azimute e de inclinação, onde notou perdas de até 50 kWh/kWp na geração da instalação teste, dados apresentados na Figura 8. Em sistemas de maior porte, tal perda é ainda mais expressiva, representando uma redução considerável na produção total de energia.

Figura 8 - Geração de energia para azimutes de -45° a $+45^\circ$.



Fonte: Adaptado de Desai *et al.*, 2021

Na maioria das instalações, os módulos fotovoltaicos são posicionados de forma fixa, com a orientação e a inclinação definidas durante o projeto. Embora essa configuração simplifique a instalação e reduza custos, ela apresenta a limitação de não acompanhar as todas as variações diárias e sazonais da trajetória solar, o que resulta em um aproveitamento parcial do recurso energético disponível. Diante dessa restrição, torna-se relevante estudar estratégias que permitam extrair a máxima potência do sistema em diferentes condições de operação, sendo o rastreamento do ponto de máxima potência (*MPPT*, do inglês *Maximum Power Point Tracking*), apresentado a seguir, uma das técnicas mais utilizadas para esse fim.

3.1 RASTREAMENTO DO *MPPT*

Além de um dimensionamento e projeto adequados do sistema, existem algumas outras maneiras que podem ser utilizadas para melhorar o posicionamento dos módulos e maximizar a captação solar.

Segundo Aslam *et al.* (2019), por conta de perdas no processo de geração e também por conta da capacidade de absorção dos equipamentos, apenas cerca de 30% a 40% da energia solar incidente nas células solares são convertidas em energia elétrica. Dessa forma foram criados métodos de rastreamento solar, onde as

estruturas são feitas de forma que os painéis sejam móveis e rotacionem de acordo com a posição do sol, de forma a potencializar a sua absorção de energia.

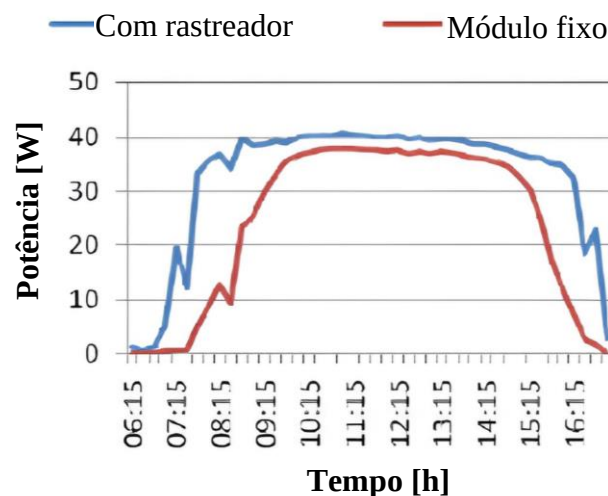
De todas as formas de rastreamento do sol, duas são as mais importantes: o rastreamento astronômico e o rastreamento fotoelétrico. O primeiro baseia-se no controle do posicionamento das placas com base na longitude, latitude e horário local, enquanto o segundo tem como base sensores fotossensíveis, utilizados para detectar a posição solar (Li *et al.*, 2014).

O rastreamento astronômico possui um algoritmo de controle mais simples e baixo consumo de energia, porém por não utilizarem sinais de realimentação de sensores, pode acumular erros, além de ser mais exigente em termos de estrutura mecânica, elevando consideravelmente o custo do projeto (Li *et al.*, 2014).

O controle fotoelétrico é um sistema de malha fechada, evitando acúmulos de erros, entretanto em condições de baixa irradiância, como dias nublados, tende a ter problemas para rastrear o sol (Aslam *et al.*, 2019).

Em estudo realizado por Mustafa *et al.* (2017), apresentado na Figura 9, foi feita a comparação entre um sistema de posicionamento fixo (em vermelho), orientado conforme a condição ótima do local de teste, e outro equipado com rastreamento solar integrado (em azul). Os resultados indicaram um acréscimo de aproximadamente 8% na geração do sistema com rastreadores durante o meio-dia solar. Em determinados períodos do dia, essa diferença ultrapassou 100%, resultando em um ganho acumulado de cerca de 35% ao final do dia de testes.

Figura 9 - Potência gerada para o sistema com e sem rastreador solar.



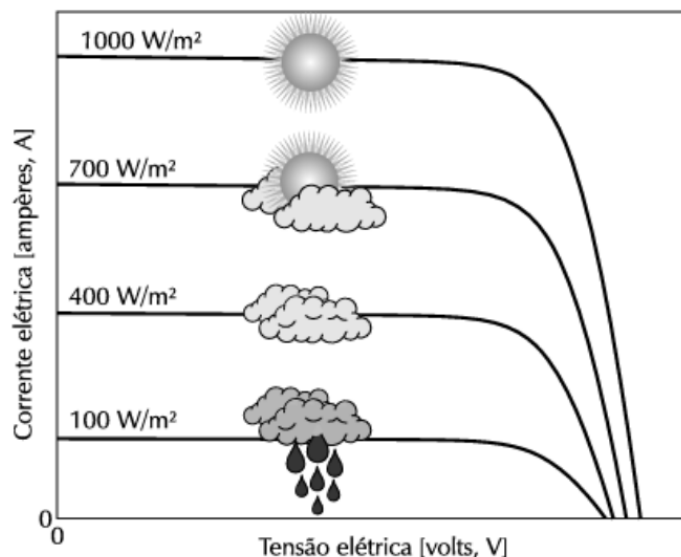
Fonte: Adaptado de Mustafa *et al.*, 2017

De modo geral, o emprego de rastreadores de máxima potência é indicado para o aumento da captação dos sistemas fotovoltaicos, sobretudo em condições de alta variabilidade de irradiância ou em grandes usinas, onde a maximização da produção compensa os custos adicionais de implementação. No entanto, em sistemas residenciais e comerciais de menor escala, o elevado custo associado à aquisição, instalação e manutenção desses equipamentos costuma tornar sua utilização economicamente inviável, razão pela qual a maior parte das instalações ainda adota estruturas fixas.

4 SOMBREAMENTO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Outro fator de impacto na geração dos sistemas fotovoltaicos é o sombreamento, visto que a intensidade da corrente elétrica de uma placa solar, e consequentemente de sua geração, é diretamente proporcional à intensidade da radiação incidente sobre ela. E quando há pouca ou nenhuma luz, sombreamento, sua corrente é muito baixa (Villalva e Gazoli, 2012).

Figura 10 - Influência da radiação solar na operação de um módulo.



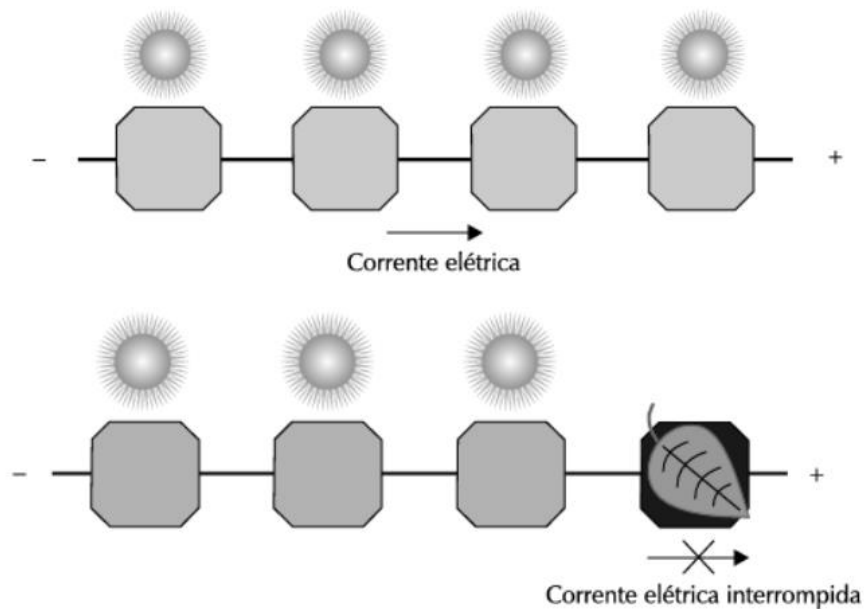
Fonte: Villalva e Gazoli, 2012

Um módulo fotovoltaico submetido a sombreamento pode apresentar redução na geração de energia, mesmo que apenas uma de suas células receba menor incidência de luz. Isso ocorre porque a intensidade da corrente elétrica gerada por uma célula fotovoltaica é diretamente proporcional à radiação solar incidente; assim,

quando a iluminação é insuficiente, a corrente pode tornar-se muito baixa ou até nula (Abdulmawjood *et al.*, 2022).

E como as células de um módulo fotovoltaico são conectadas em série, o desempenho do conjunto depende do funcionamento de cada célula individual. Dessa forma, a célula menos iluminada limita a passagem de corrente de todas as demais, conforme representado na Figura 11. Situação semelhante se verifica em módulos conectados em série, onde o sombreamento de apenas um deles compromete a geração de energia de todo o arranjo (Villalva e Gazoli, 2012).

Figura 11 - Influência do sombreamento em um arranjo fotovoltaico.



Fonte: Villalva e Gazoli, 2012

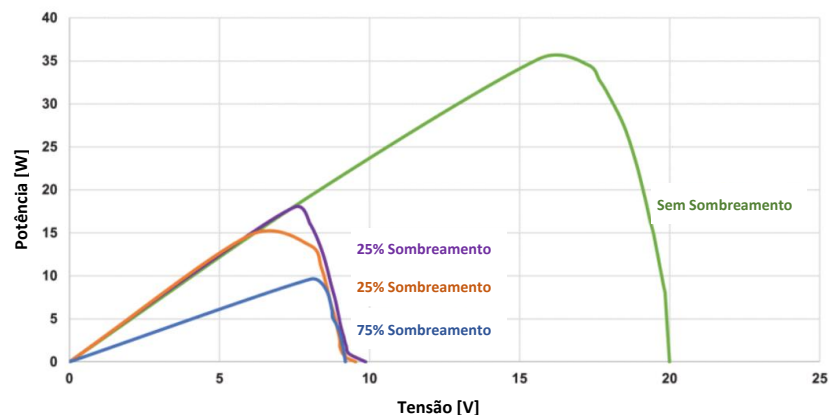
Portanto, a escolha adequada da localização para a instalação dos módulos fotovoltaicos é fundamental para minimizar perdas de geração decorrentes de sombreamentos.

Segundo Abdulmawjood *et al.* (2022), existem dois tipos de sombreamento, que podem reduzir a radiação solar incidente nas placas, o estático e o dinâmico. O primeiro se refere a sombras provenientes de um elemento que permanece por um longo período de tempo, como poeira, sujeira ou excrementos de aves que podem aderir a superfície dos módulos, enquanto o segundo são efeitos que cobrem parte do arranjo momentaneamente, como folhas de árvores, fumaça, nuvens passageiras ou construções vizinhas.

Abdulmawjood *et al.* (2022) realizaram uma série de experimentos para observar a influência do sombreamento em dois casos, para um módulo isolado e para um arranjo de seis módulos em série.

No primeiro caso, apresentado na Figura 12, analisado, um módulo foi submetido a diferentes níveis de sombreamento parcial. Observou-se que, quando apenas 25% da superfície do painel foi sombreada (em roxo), ocorreu uma redução de aproximadamente 50% na potência gerada em relação ao sistema sem sombreamento (verde), chegando a valores de até 72,6% para níveis de sombreamento maiores.

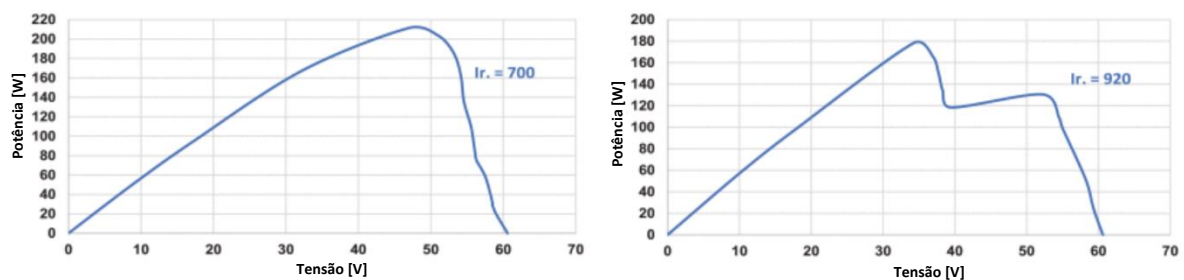
Figura 12 - Efeito do sombreamento em um módulo único.



Fonte: Adaptado de Abdulmawjood *et al.*, 2022

No segundo caso, apresentado na Figura 13, para um arranjo de seis placas em série, Abdulmawjood *et al.* (2022) sombrearam completamente um dos módulos e observou uma queda de aproximadamente 40% (à direita) na potência gerada pelo sistema em relação ao comportamento do sistema sem sombreamento, à esquerda.

Figura 13 - Efeito do sombreamento de um módulo em um arranjo fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de Abdulmawjood *et al.*, 2022

4.1 HOTSPOTS

Além da queda da geração, o sombreamento pode causar danos físicos aos equipamentos. Visto que, em condições de baixa irradiação, a corrente de curto-circuito da célula fotovoltaica apresenta valores reduzidos e caso a corrente de saída do circuito seja superior à corrente de curto-circuito da célula que se encontra sombreada, a única forma de a célula sustentar esse mesmo nível de corrente é operando na região de polarização reversa (Ishak *et al.*, 2023).

Porém nesse ponto, sua tensão é negativa, fazendo com que a célula se comporte como uma carga, consumindo corrente ao invés de produzi-la. Essa potência consumida faz com que a temperatura da célula aumente, efeito conhecido como *hotspot* ou efeito de ponto quente (Ishak *et al.*, 2023).

Se a corrente de saída do painel for significativamente maior que a corrente de curto-circuito da célula sombreada, a queda de tensão sobre essa célula se aproximará da tensão de ruptura. Nessa condição, uma quantidade considerável de potência será absorvida pela célula e convertida em calor, o que pode ocasionar danos permanentes ao painel e riscos à instalação (Verapeen e Wen, 2016).

4.2 ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DO SOMBREAMENTO

Diante destes impactos ocasionados pelo sombreamento, torna-se essencial a adoção de estratégias capazes de mitigar esses efeitos. Diversas soluções têm sido desenvolvidas com o objetivo de reduzir as perdas de desempenho e preservar a integridade dos módulos fotovoltaicos. Entre as principais medidas destacam-se o uso de diodos de *bypass* e a realização periódica da limpeza dos módulos.

Os diodos de *bypass* são componentes que podem ser conectados em paralelo com células e/ou módulos fotovoltaicos durante a sua fabricação ou instalação. Sua função é fornecer um caminho para a corrente elétrica no caso da célula ou módulo apresentarem falhas, permitindo que, mesmo nesses casos, a energia continue sendo fornecida, mesmo que em menor potência (Prajapati e Fernandez, 2020).

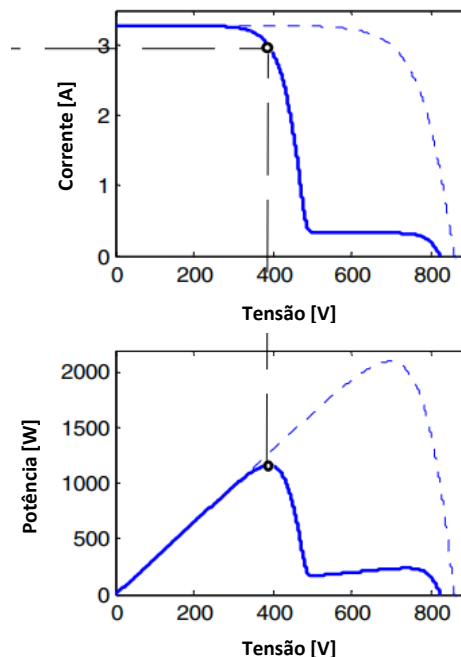
Idealmente, cada célula fotovoltaica deveria ser protegida individualmente por um diodo de *bypass*, de modo a evitar perdas significativas em condições de sombreamento. No entanto, essa solução elevaria consideravelmente o custo de

fabricação do módulo, além de tornar seu processo produtivo mais complexo (Villalva e Gazoli, 2012).

Por essa razão, os fabricantes adotam uma configuração intermediária, na qual cada diodo é responsável pela proteção de um conjunto de células. Embora a quantidade exata possa variar entre diferentes projetos e fabricantes, é comum encontrar a proporção de aproximadamente um diodo para cada vinte células.

Díaz-Dorado *et al.* (2010) conduziram um estudo com o objetivo de analisar a influência dos diodos de *bypass* na mitigação dos efeitos do sombreamento. Para isso, utilizou um arranjo composto por vinte módulos conectados em série, dos quais onze foram submetidos a sombreamento. Os resultados, apresentados na Figura 14, mostraram que, mesmo com a maioria dos módulos comprometidos, o sistema ainda foi capaz de produzir energia sem que os equipamentos sombreados afetassem todo o sistema. Em cima a curva de Corrente-Tensão para o sistema sombreado e abaixo sua curva de Potência-Tensão, em ambos os casos a linha pontilhada representa o comportamento esperado do sistema sem sombreamento e em azul contínuo seu comportamento observado no experimento.

Figura 14 - Curvas I-V e P-V para arranjo com diodos de *bypass*.



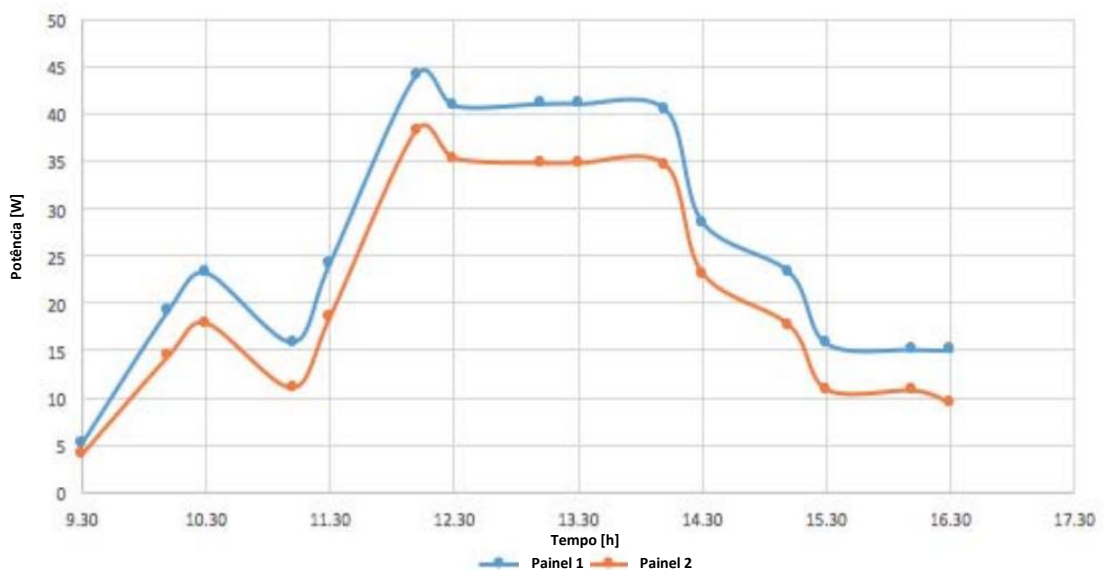
Fonte: Adaptado de Díaz-Dorado *et al.*, 2010

Outra medida eficaz de mitigação, inserida no âmbito da manutenção preventiva, consiste na limpeza periódica dos módulos fotovoltaicos. Essa prática

reduz o sombreamento provocado pelo acúmulo de poeira, resíduos e outros sedimentos sobre a superfície dos painéis, contribuindo para a preservação do desempenho do sistema.

Em estudo conduzido por Patil e Asokan (2016), dois módulos fotovoltaicos foram expostos simultaneamente às condições naturais de intempéries, sujeitando-se ao acúmulo de poeira, sujeira e outros agentes externos. Durante um período de 15 dias, apenas um dos módulos recebeu limpeza periódica, enquanto o outro permaneceu sem manutenção. Ao final do experimento, as medições de potência indicaram que o módulo limpo apresentou uma produção de energia 19,56% superior em comparação ao módulo não limpo, resultados apresentados na Figura 15, evidenciando a relevância da manutenção preventiva para mitigar perdas de desempenho em sistemas fotovoltaicos.

Figura 15 - Potência gerada pelos módulos limpo (1) e sujo (2).



Fonte: Adaptado de Patil e Asokan, 2016

5 EFICIÊNCIA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A eficiência dos módulos fotovoltaicos também é um parâmetro importante para o desempenho de um sistema de geração solar, pois está diretamente relacionada à quantidade de energia elétrica efetivamente convertida a partir da radiação elétrica incidente. Esse índice, definido como a razão entre a potência elétrica gerada e a potência da radiação recebida pela superfície do módulo, depende de fatores

intrínsecos às propriedades dos materiais semicondutores, bem como do processo de fabricação das células e pode ser calculada pela seguinte fórmula (Tomcheva *et al.*, 2025):

$$\eta_P = \frac{P_{MAX}}{A_P \cdot 1000} \quad (4)$$

Onde P_{MAX} é a potência de pico do módulo, A_P é a área do módulo e o número 1000 é referente a taxa de radiação solar padronizada.

As propriedades físicas, em especial as de natureza eletrônica (como a energia de banda, a mobilidade dos portadores de carga, o tempo de vida dos portadores, a taxa de recombinação, a concentração de dopagem e a condutividade elétrica) e as características ópticas (como o coeficiente de absorção, o índice de refração, a lacuna de banda óptica, a refletividade e a fotoluminescência), constituem fatores fundamentais para a avaliação da eficiência e do desempenho global das células solares (Sharma e Mishra, 2025).

Por serem equipamentos de eficiência relativamente baixa, um painel fotovoltaico comercial pode converter apenas cerca de 18-24% da radiação solar incidente em energia elétrica, impactos na sua eficiência, mesmo pequenos, podem resultar em grandes perdas no desempenho global do sistema (Kurz *et al.*, 2025).

Nesse sentido, a cada ano estão sendo aprimoradas as tecnologias de fabricação de módulos fotovoltaicos, resultando em dispositivos com eficiências cada vez maiores. Porém, outra alternativa que os fabricantes encontraram para obter uma melhor conversão de energia solar foi a construção de módulos bifaciais, os quais além de sua face frontal convencional, utilizam também a face traseira para a captação da radiação solar, permitindo um melhor aproveitamento da luz refletida pelo ambiente (Sun *et al.*, 2018).

Para as placas bifaciais, o ganho de energia gerado pela parte traseira (*BGE*, do inglês *back gain energy*) pode ser expressado pela seguinte formula:

$$BGE = \frac{E_{TRAS}}{E_{FRONT}} \cdot 100[\%] \quad (5)$$

Onde E_{FRONT} é a potência gerada pela face frontal do painel e E_{TRAS} é a potência gerada pela face traseira (Sun *et al.*, 2018).

Logo, a energia total convertida para energia elétrica pelo módulo é descrita por:

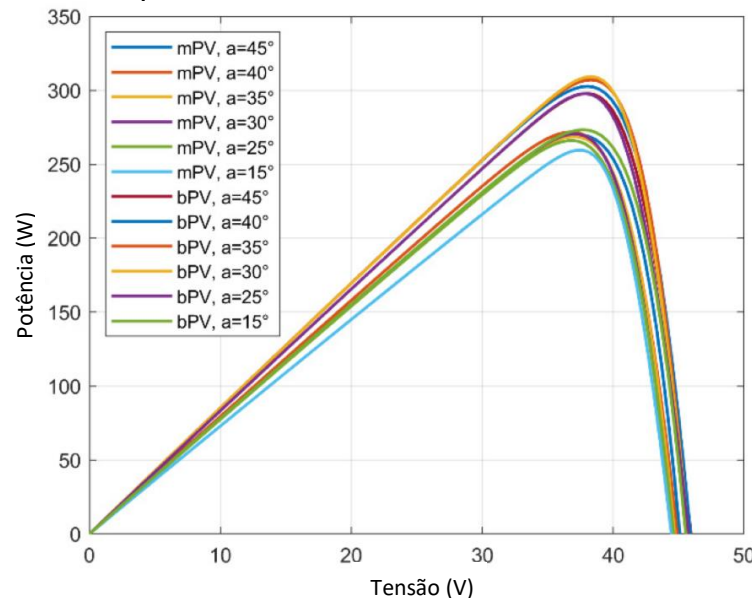
$$E_E = E_{FRONT} + \frac{I_{SC,TRAS}}{I_{SC,FRONT}} \cdot E_{TRAS} [W/m^2] \quad (6)$$

Onde $I_{SC,TRAS}$ é a corrente de curto-circuito da face traseira do módulo e $I_{SC,FRONT}$ é referente a corrente de curto-circuito da face frontal (Sun *et al*, 2018).

Kurz *et al.* (2025) realizou um estudo com o objetivo de avaliar o ganho prático dos módulos bifaciais em relação aos monofaciais. Para isso, utilizou duas unidades bifaciais, sendo que a face traseira de uma delas foi coberta com alumínio a fim de simular o comportamento de um módulo convencional. Os experimentos foram conduzidos com os equipamentos instalados a 0,5 m do solo, sob diferentes condições de inclinação (variando de 15° a 45°), e a geração de ambos os arranjos foi comparada.

Os resultados do estudo, apresentados na Figura 16, indicaram que o módulo bifacial apresentou um ganho de geração de energia entre 6% e 15% em relação ao módulo convencional, a depender do ângulo de inclinação. O menor incremento foi observado para 15° (azul ciano), enquanto o maior ocorreu em 35° (amarelo). Esses achados evidenciam as vantagens do aproveitamento da face traseira do módulo para captar a radiação refletida, contribuindo para a otimização da geração de energia. Contudo, também demonstram que os ganhos mais expressivos estão associados a ângulos próximos de 35°, os quais raramente são empregados em instalações convencionais realizadas em telhados residenciais.

Figura 16 - Curva P-V para módulos bifaciais e mono sob diferentes inclinações.



Fonte: Adaptado de Kurz *et al.*, 2025

Complementando o aumento do rendimento, a estrutura em vidro-vidro dos módulos bifaciais proporciona maior durabilidade em comparação às placas monofaciais convencionais. Além disso, em função de sua eficiência elevada e configuração otimizada, esses módulos não apenas permitem uma geração adicional de energia, mas também uma redução do impacto da temperatura e maior vida útil (Sun *et al*, 2018).

Atualmente, os módulos bifaciais têm um custo cerca de 15% a 20% mais elevado que os convencionais monofaciais, porém, a diferença de preços tem diminuído progressivamente. Considerando que os ganhos adicionais de geração podem superar essa diferença, o uso dessa tecnologia mostra-se economicamente viável em diversas situações. Além disso, com o avanço contínuo do mercado, espera-se que os módulos bifaciais se tornem cada vez mais acessíveis, consolidando-se como uma alternativa competitiva e promissora para a expansão da geração fotovoltaica.

Existem dois fatores principais que têm maior impacto sobre a eficiência das placas solares, sendo eles a temperatura e a degradação ao longo do tempo, que serão apresentados a seguir.

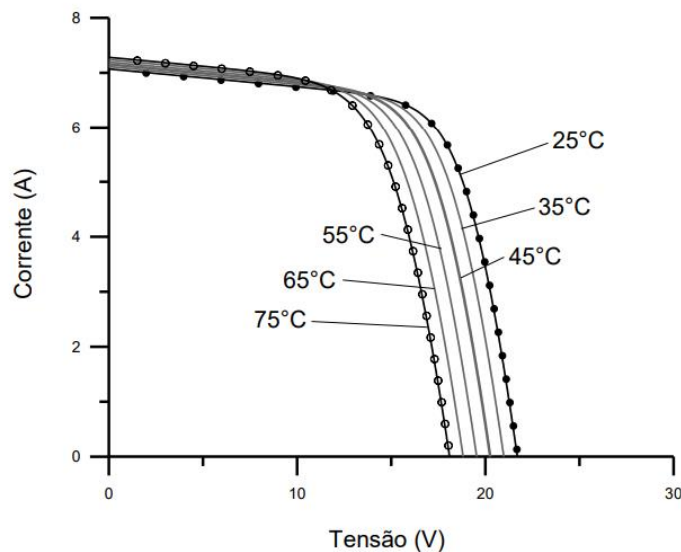
5.1 IMPACTO DA TEMPERATURA

A temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos desempenha papel crucial na energia gerada por eles (Sharma e Mishra, 2025).

Sendo equipamentos projetados a operar na temperatura padrão de 25 °C, cada grau Celsius adicional provoca uma redução de aproximadamente 0,5% a 0,6% na sua eficiência de conversão de energia (Abou Akrouch *et al.*, 2025).

Quando submetidos a temperaturas acima do valor de projeto padrão, ocorre a redução da lacuna de banda do material semiconductor, afetando as suas propriedades elétricas. Esse fenômeno ocasiona o aumento da sua corrente de saturação reversa e uma redução na tensão de curto-circuito, como pode ser observado na Figura 17, resultando, conseqüentemente, em uma menor eficiência (Alam e Rahman, 2016).

Figura 17 - Efeito causado pela variação da temperatura em um módulo de 36 células de silício.

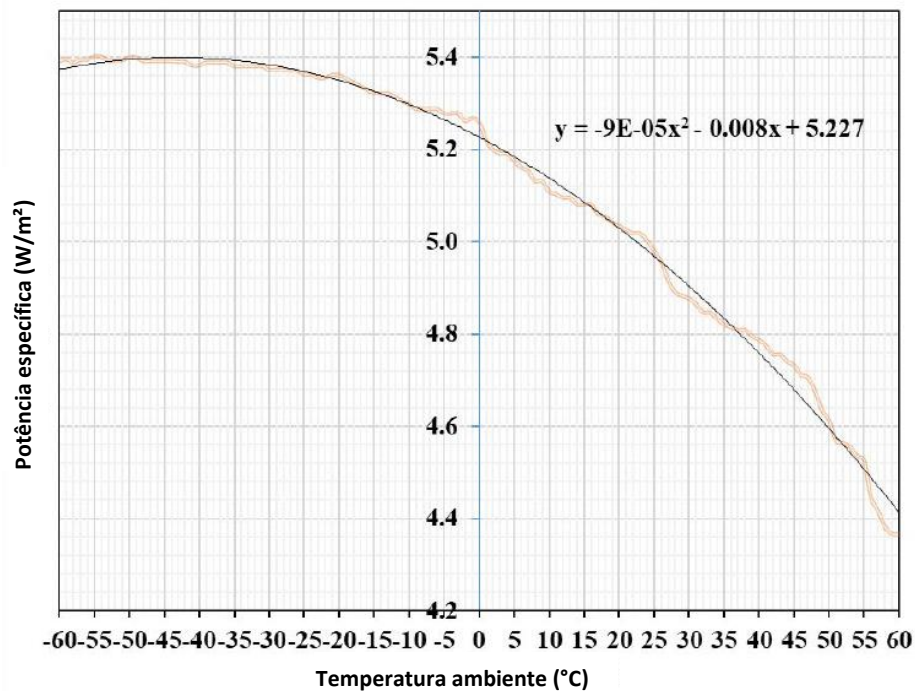


Fonte: CRESESB, 2014

Além dos seus impactos na eficiência, a temperatura também é um dos principais fatores de aceleração do processo de degradação dos módulos, por estar associada a reações químicas e processos de difusão. Tais mecanismos podem ocasionar deformação e/ou quebra das células internas das placas e delaminação – perda de adesão entre as camadas que a compõe –, o que compromete a confiabilidade e pode levar a falhas prematuras do sistema (Sharma e Mishra, 2025).

A diminuição da temperatura, por outro lado, pode causar impactos positivos na geração de energia de um sistema fotovoltaico. Em um estudo conduzido por Mestnikov *et al.* (2024), apresentado através da Figura 18, notou-se que temperaturas menores favorecem o aumento da potência dos módulos devido à redução da temperatura de operação interna do equipamento, cerca de 5% a cada 10 °C diminuídos, tendo seu limite observado em cerca de -45 °C.

Figura 18 - Potência de um módulo para diferentes temperaturas.



Fonte: Adaptado de Mestnikov *et al.*, 2024

Diante desse contexto, fica clara a importância de métodos que ajudem os módulos a operarem em temperaturas menores ou pelo menos mais próximas a referência para a qual foram projetados. Para isso, foram desenvolvidos diversos métodos de resfriamento, dos quais os principais serão discutidos a seguir.

5.1.1 MÉTODOS DE RESFRIAMENTO

Segundo Kalaiselvan *et al.* (2018), os métodos de resfriamento podem ser divididos em passivos, que consistem em tecnologias utilizadas para extrair e minimizar a absorção de calor dos módulos fotovoltaicos sem que haja consumo

adicional de energia, e ativos, os quais, por sua vez, necessitam um fornecimento contínuo de potência para reduzir a temperatura dos painéis.

Dentre os métodos passivos de resfriamento de módulos fotovoltaicos destacam-se a ventilação natural, que promove a circulação espontânea do ar ao redor do painel, favorecendo a dissipação do calor; o resfriamento por evaporação, no qual a presença de umidade ou de filmes finos de água auxilia na remoção do excesso térmico durante o processo de evaporação; e o método do telhado verde, que utiliza uma camada vegetal instalada na cobertura das edificações para reduzir a temperatura ambiente ao redor do sistema, diminuindo assim a absorção térmica dos módulos.

Enquanto os principais métodos de resfriamento ativos consistem na ventilação forçada por ventoinhas, que intensifica a circulação de ar e acelera o processo de convecção, e o bombeamento de água, em que um fluxo contínuo é aplicado sobre a superfície ou na parte traseira dos módulos, retirando o calor acumulado de forma mais eficiente.

Comparando os métodos apresentados ficam evidentes algumas diferenças. O resfriamento ativo caracteriza-se pela presença de componentes móveis, como tubos e ventoinhas, que permitem a aplicação de fluxos forçados de ar ou água, intensificando a dissipação de calor. Já o resfriamento passivo não utiliza partes móveis, baseando-se em processos naturais para remover o excesso térmico dos módulos fotovoltaicos. Em termos econômicos, o resfriamento ativo é um pouco mais caro que as técnicas passivas, mas resulta em uma eficiência superior do primeiro em comparação ao segundo.

Para provar a eficiência de dos sistemas de resfriamento, Akther (2024), realizou um estudo comparando o desempenho de um painel operando sem refrigeração com outro equipado com um sistema híbrido de resfriamento a ar e água. Esse sistema é composto por uma bomba d'água associada a uma ventoinha, que é acionado automaticamente quando a temperatura de operação do módulo ultrapassa o limite especificado e desligado quando retorna à faixa normal de funcionamento. Os resultados indicaram um aumento de até 63% na potência máxima do painel resfriado, evidenciando a efetividade da técnica. Embora a implementação desse recurso represente um acréscimo nos custos do projeto, sua aplicação mostra-se viável em instalações de maior porte, nas quais a maximização da geração é essencial, uma vez

que, além de melhorar a eficiência, contribui para prolongar a vida útil dos módulos e reduzir o tempo de retorno do investimento.

5.2 DEGRADAÇÃO E CONFIABILIDADE DOS MÓDULOS

Outro fator que contribui para a redução da eficiência dos módulos fotovoltaicos é o processo de degradação ao longo do tempo. Entre os principais mecanismos observados estão a degradação induzida pela luz (*LID*, do inglês *light-induced degradation*), responsável pela queda inicial de eficiência após a exposição à radiação solar; a degradação potencial induzida (*PID*, do inglês, *potential-induced degradation*), que ocorre em condições de elevada tensão elétrica e está associada à migração de íons no interior do módulo, resultando em perdas significativas de desempenho; as microtrincas, que consistem em fissuras microscópicas nas células fotovoltaicas capazes de interromper o fluxo de corrente elétrica, ocasionar falhas localizadas e favorecer a formação de *hotspots*; e a delaminação, que como vimos anteriormente, é caracterizada pela separação das camadas do módulo, a qual favorece a infiltração de umidade e provoca danos irreversíveis à estrutura e à confiabilidade do sistema. Uma das principais causas desses danos é a infiltração de umidade nos componentes do painel, que pode causar a corrosão dos componentes presentes nos módulos e acelerar a perda de desempenho (Sharma e Mishra, 2025).

Ambientes quentes e úmidos tendem a intensificar esses processos, promovendo maior deterioração das placas solares. A umidade pode se manifestar no ambiente externo sob diferentes formas — vapor d'água, chuva, neve ou gelo — e, devido à sua natureza gasosa, o vapor possui a capacidade de infiltrar o encapsulamento dos módulos, acumulando-se em sua estrutura e provocando a degradação dos componentes internos (Bora *et al.*, 2020).

Por outro lado, em regiões de clima frio, o processo cíclico de congelamento e descongelamento também pode comprometer a integridade estrutural, uma vez que tem o potencial de causar alterações de volume na estrutura dos módulos, causando pressões mecânicas sobre sua superfície que podem afetar a integridade da moldura e levar a separação das camadas (Sharma e Mishra, 2025).

Cientes desses riscos, os fabricantes realizam testes rigorosos para estimar a taxa de degradação ao longo da vida útil dos módulos, estabelecendo garantias

baseadas em resultados laboratoriais e em normas internacionais, nesse contexto, se fazem relevantes órgãos confiáveis que sejam capazes de realizar tais testes.

Internacionalmente destacam-se órgãos e instituições que avaliam a confiabilidade tecnológica, como a *PVTech Research*, especializada em análises técnicas e estudos de desempenho de tecnologias fotovoltaicas, e a *BloombergNEF* (*New Energy Finance*), que publica relatórios independentes de classificação de fabricantes (*Tier 1*, *Tier 2* e *Tier 3*) baseados em critérios de qualidade, bancabilidade e confiabilidade de longo prazo. Tais instituições desempenham papel fundamental na credibilidade do setor, oferecendo parâmetros de avaliação que orientam tanto investidores quanto fabricantes na busca por tecnologias mais eficientes e duráveis.

Ainda assim, existem algumas formas de corrosão que podem acelerar o processo de deterioração além do previsto pelos fabricantes, como a corrosão causada por químicos. Estas ocorrem devido à presença de elementos específicos no ambiente, geralmente causados por fenômenos naturais ou então por atividades industriais. No âmbito rural, destaca-se a amônia, em áreas industriais, os ácidos sulfúrico e nítrico, e nas áreas litorâneas, a névoa salgada resultante da evaporação da água do mar (Sharma e Mishra, 2025).

6 ARMAZENAMENTO E INTEGRAÇÃO COM OUTRAS FONTES

Além dos fatores de impacto na sua geração, a fonte solar apresenta um desafio em sua relacionado à sua elevada variabilidade, uma vez que a geração de energia depende diretamente da radiação solar e, portanto, está sujeita às condições climáticas e ambientais. O que, somado ao fato de não haver geração durante o período noturno, compromete a continuidade do fornecimento.

Para mitigar essa limitação, umas das soluções mais apresentadas é a adoção de sistemas de armazenamento de energia, como baterias, e a integração da energia solar com outras fontes renováveis, promovendo maior estabilidade do atendimento das cargas elétricas (Villalva e Gazoli, 2012).

Nesse contexto, os sistemas de armazenamento híbridos, que combinam diferentes tecnologias – como baterias e supercapacitores –, desempenham papel essencial na redução dos efeitos do sombreamento, responsável por quedas temporárias na geração e desequilíbrios entre a oferta e demanda de energia. Esses sistemas possibilitam maior flexibilidade no gerenciamento da carga, permitindo que

a energia armazenada atue durante períodos de sombreamento, suavizando flutuações de potência e aumentando a confiabilidade do arranjo (Challouf *et al.*, 2024).

Conforme apontam Islam *et al.* (2015), fontes renováveis isoladas, como a solar, não são suficientes para suprir continuamente a demanda energética de uma instalação devido à sua variabilidade. Assim, torna-se necessária a integração com outras formas de geração, como a eólica, oceânica, geotérmica, biogás, entre outras. Nesse sentido, destacou que o biogás se destaca como uma alternativa complementar promissora, não apenas pela possibilidade de associação à energia fotovoltaica, mas também pelos benefícios adicionais que proporciona, como geração de empregos, autossuficiência energética, redução das emissões de gases de efeito estufa e contribuição para a mitigação do aquecimento global.

Apesar de representarem uma solução eficaz para a estabilidade dos sistemas fotovoltaicos, tanto as baterias quanto a integração com outras fontes de energia ainda apresentam custos relativamente elevados, o que, em muitos casos, limita sua aplicação em larga escala ou em projetos de menor porte. No entanto, observa-se um avanço significativo na tecnologia de armazenamento, especialmente em baterias de lítio-íon, que vêm se tornando cada vez mais eficientes, duráveis e financeiramente acessíveis. Esse progresso tende a favorecer, no futuro próximo, uma maior viabilidade econômica e uma adoção mais ampla dessas soluções no setor energético.

7 CONCLUSÃO

Portanto, a análise desenvolvida com base nos trabalhos revisados demonstra que diversos fatores influenciam diretamente o desempenho da geração em sistemas fotovoltaicos. Entre os relevantes destaca-se o posicionamento dos módulos, visto que a maioria das instalações adota estruturas fixas. Este aspecto deve ser cuidadosamente avaliado no momento do projeto, uma vez que pode ocasionar um sombreamento parcial das placas, responsável por perdas significativas de geração e até mesmo por problemas nos equipamentos.

A utilização de rastreadores de ponto de máxima potência podem mitigar tais efeitos e aumentar a incidência solar sobre os painéis. Contudo, devido ao elevado custo desses recursos, sua aplicação ainda se mostra restrita a projetos de maior porte ou a situações específicas em que o ganho energético compensa o investimento.

Outro fator determinante é a temperatura, que apresenta relação direta com a eficiência dos módulos. Nesse sentido, a adoção de sistemas de resfriamento tem sido investigada como forma de melhorar o desempenho. Embora implique em custos adicionais, esse recurso pode ser justificável também em usinas de grande escala, onde o retorno energético tende a ser mais expressivo.

Dessa forma, outras alternativas mais acessíveis para aumentar a eficiência do sistema e reduzir perdas de desempenho são a implementação de módulos bifaciais, cuja tecnologia avançou o suficiente para que seja viável financeiramente, e a realização de limpezas periódicas no arranjo fotovoltaico, medida simples que contribui para a manutenção da produtividade do sistema.

Adicionalmente, é importante considerar que, assim como outros equipamentos eletrônicos, os módulos fotovoltaicos estão sujeitos a degradação natural ao longo do tempo. Apesar de reduzir levemente a eficiência, essa perda apresenta impacto relativamente pequeno sobre a energia total gerada, especialmente em módulos com elevada classificação de bancabilidade. Já em relação à variabilidade da geração solar, observa-se o crescente emprego de sistemas híbridos e de armazenamento como alternativas para contornar oscilações e assegurar maior estabilidade ao fornecimento de energia.

Nesse contexto, a evolução tecnológica desempenha papel fundamental na superação das limitações identificadas. Os avanços em novos materiais, técnicas de

mitigação de perdas e soluções de armazenamento vêm tornando a energia solar fotovoltaica cada vez mais competitiva e acessível.

Dessa forma, conclui-se que os sistemas fotovoltaicos constituem uma boa alternativa estratégica para a diversificação da matriz energética e para a mitigação dos impactos ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis. Sendo que, o conhecimento aprofundado dos fatores que influenciam seu desempenho é essencial para o aprimoramento de futuros projetos e para assegurar a confiabilidade e a competitividade dessa fonte renovável no cenário energético global.

REFERÊNCIAS

- ABDULMAWJOOD, K.; ALSADI, S.; REFAAT, S. S.; MORSI, W. G. **Characteristic Study of Solar Photovoltaic Array Under Different Partial Shading Conditions**. IEEE Access, vol. 10, p. 6856-6866, 2022.
- ABOU AKROUCH, M.; CHAHINE, K.; FARAJ, J.; HACHEM, F.; CASTELAIN, C.; KHALED, M. **Advancements in cooling techniques for enhanced efficiency of solar photovoltaic panels: A detailed comprehensive review and innovative classification**. Energy and Built Environment, v. 6, n. 2, p. 248-276, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266612332300106X>. Acesso em: 20 set. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa Nº 482**. Brasília, 2012. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 1.098, de 23 de julho de 2024**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20241098.html>. Acesso em: 21 set. 2025.
- AKTHER, M. et al. **Design and Implementation of a PV Hybrid Air-Water Cooling System**. 2024 7th International Conference on Development in Renewable Energy Technology (ICDRET), Dhaka, Bangladesh, p. 1-6, 2024.
- ALAM, S. M. S.; RAHMAN, A. N. M. M. **Performance comparison of mirror reflected solar panel with tracking and cooling**. 2016 4th International Conference on the Development in the in Renewable Energy Technology (ICDRET), Dhaka, Bangladesh, p. 1-4, 2016.
- ALMEIDA, E.; ROSA, A.; DIAS, F.; BRAZ, K.; LANA, L.; SANTO, O.; SACRAMENTO, T. **Energia Solar Fotovoltaica: Revisão Bibliográfica**. 2016. Disponível em: <https://revista.fumec.br/index.php/eol/article/view/3574>. Acesso em: 27 set. 2025.
- ASLAM, W.; XU, Y.; SIDDIQUE, A.; BATOOL, A.; ASLAM, M. N. **A Method of Hybrid Solar Tracking Prototype for MPPT**. 2019 IEEE Asia Power and Energy Engineering Conference (APEEC), Chengdu, China, p. 253-257, 2019.
- BARCELLOS, A. S.; OLIVEIRA, A. L. **Fundamentos de Energia Solar Fotovoltaica**. Rio de Janeiro: IFRJ, 2022. 75 f. Disponível em: https://www.ifrj.edu.br/sites/default/files/IFRJ/PROPPI/produto_livro_aluno_versao_final_-_alexandre_da_silva_barcellos.pdf. Acesso em: 23 set. 2025.
- BORA, M.; POP, S.; SCHULZE, R.; ROWELL, M.; HARWOOD, D. **Moisture content imaging in glass-glass and glass-backsheet photovoltaic mini-modules**. 2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Calgary, AB, Canada, p. 1485-1488, 2020.

BOSCH Solar Energy Corp. **c-Si M60 NA30119: Installation and Safety Manual**. Versão 1.0, 2012. Disponível em: https://ressupply.com/documents/bosch/c-Si_M_60_NA30119_Manual.pdf. Acesso em: 27 set. 2025.

CANO, J.; JOHN, J. J.; TATAPUDI, S.; TAMIZHMANI, G. **Effect of tilt angle on soiling of photovoltaic modules**. 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), Denver, CO, USA, p. 3174-3176, 2014.

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. **Alternativas Energéticas: uma visão Cemig**. Belo Horizonte: CEMIG, 2012.

CHALLOUF, I.; KHEMISSI, L.; BOUAICHA, M.; HMIDA, F. B.; SELLAMI, A. **Optimization of Photovoltaic System Performance Under Shading Conditions Through Hybrid Storage**. 2024 IEEE International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (IC_ASET), Hammamet, Tunisia, p. 1-6, 2024.

CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014.

DESAI, A.; MUKHOPADHYAY, I.; RAY, A. **Effect of Azimuth and Tilt Angle on Ideally Designed Rooftop Solar PV Plant for Energy Generation**. 2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Fort Lauderdale, FL, USA, p. 0522-0527, 2021.

DÍAZ-DORADO, E.; SUÁREZ-GARCÍA, A.; CARRILLO, C.; CIDRÁS, J. **Influence of the shadows in photovoltaic systems with different configurations of bypass diodes**. SPEEDAM. 2010. Pisa, Italy, p. 134-139, 2010.

ETUKUDOR, C. et al. **Optimum Tilt and Azimuth Angles for Solar Photovoltaic Systems in South-West Nigeria**. 2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica, Cape Town, South Africa, p. 348-353, 2018.

HUMADA, A. M.; SAMSURI, F. B.; HOJABRIA, M.; MOHAMED, M. B.; BIN SULAIMAN, M. H.; DAKHEEL, T. H. **Modeling of photovoltaic solar array under different levels of partial shadow conditions**. 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, Antalya, Turkey, p. 461-465, 2014.

ISHAK, N. H. B.; ISA, I. S. B.; OSMAN, M. K. B.; DAUD, K.; JADIN, M. S. B. **Hotspot Detection of Solar Photovoltaic System: A Perspective from Image Processing**. 2023 IEEE 3rd International Conference in Power Engineering Applications (ICPEA), Putrajaya, Malaysia, p. 263-267, 2023.

ISLAM, K. M. A.; KHAN, T. M.; RAHMAN, M. M.; MUNNA, M. S. **Design and performance analysis of a hybrid Solar PV and biogas power plant using PLC**. 2015 3rd International Conference on Green Energy and Technology (ICGET), Dhaka, Bangladesh, p. 1-6, 2015.

KALAÍSELVAN, S.; KARTHIKEYAN, V.; RAJESH, G.; SETHU KUMARAN, A.; RAMKIRAN, B.; NEELAMEGAM, P. **Solar PV Active and Passive Cooling**

Technologies - A Review. 2018 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), Chennai, India, p. 166-169, 2018.

KURZ, D.; DOBRZYCKI, A.; KRAWCZAK, E.; JAJCZYK, J.; MIELCZAREK, J.; WOŹNIAK, W.; SĄSIADK, M.; ORYNYCZ, O.; TUCKI, K.; BADZIŃSKA, E. **An Analysis of the Increase in Energy Efficiency of Photovoltaic Installations by Using Bifacial Modules.** *Energies*, 18, 1296, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/5/1296>. Acesso em: 27 set. 2025.

LI, H.; ZHAO, C.; WANG, H.; XIE, S.; LUO, J. **An improved PV system based on dual axis solar tracking and MPPT.** 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Tianjin, China, p. 204-209, 2014.

MESTNIKOV, N.; ALZAKKAR, A.; SAMOFALOV, Y. **The Influence of Ambient Temperature on the Functioning of a Photovoltaic Installation in the Northern Part of the Russian Far East.** 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, p. 261-265, 2024.

MUSTAFA, F. I.; AL-AMMARI, A. S.; AHMAD, F. F. **Direct and indirect sensing two-axis solar tracking system.** 2017 8th International Renewable Energy Congress (IREC), Amman, Jordan, p. 1-4, 2017.

MUSTAFA, F. I.; SHAKIR, S.; MUSTAFA, F. F.; NAIYF, A. T. **Simple design and implementation of solar tracking system two axis with four sensors for Baghdad city.** 2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC), Hammamet, Tunisia, p. 1-5, 2018.

NASCIMENTO, C. A. **Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica.** 2011. 21 f. Monografia (Especialização em Fontes Alternativas de Energia). Universidade Federal de Lavras, Lavras. Disponível em: <https://www.yumpu.com/pt/document/read/12545076/principio-de-funcionamento-da-celula-fotovoltaica-solenerg>. Acesso em: 18 set. 2025.

PATIL, T. G.; ASOKAN, A. **A proficient solar panel efficiency measurement system: Using current measurements.** 2016 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), Coimbatore, India, p. 1-6, 2016.

PRAJAPATI, S.; FERNANDEZ, E. **Effect of the Positioning of Single and Double Bypass Diodes in a PV String on its Reliability.** 2020 International Conference on Computer, Electrical & Communication Engineering (ICCECE), Kolkata, India, p. 1-5, 2020.

PRATAMA, A. Y.; FAUZY, A.; EFFENDI, H. **Performance Enhancement of Solar Panel Using Dual Axis Solar Tracker.** 2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), Bandung, Indonesia, p. 444-447, 2019.

ROJAS-HERNÁNDEZ, I. **Fixed photovoltaic system optimization: Azimuth, inclination and pitch case study at Liberia.** 2016 IEEE 36th Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXVI), San Jose, Costa Rica, p. 1-6, 2016.

SALAMA, H. A. E.-m.; MOHAMED TAHA, A. T. **Practical Implementation of Dual Axis Solar Power Tracking System**. 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt, p. 446-451, 2018.

SANANGO, J.; VIÑAÑ, J.; CARPIO, M. A.; CARPIO, D. **Use of radiators for cooling photovoltaic cells to enhance the performance of a photovoltaic panel**. 2023 IEEE Colombian Caribbean Conference (C3), Barranquilla, Colombia, p. 1-5, 2023.

SHARMA, P.; MISHRA, R. K. **Comprehensive study on photovoltaic cell's generation and factors affecting its performance: A Review**. Mater Renew Sustain Energy, v. 14, 21, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40243-024-00292-5>. Acesso em: 20 set. 2025.

SUN, X.; KHAN, M. R.; DELINE, C.; ALAM, M. A. **Optimization and Performance of Bifacial Solar Modules: A Global Perspective**. arXiv, 28 set. 2017. Revisado 21 fev. 2018. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1709.10026>. Acesso em: 4 out. 2025.

TOMCHEVA, M.; SEKULOV, L.; CHERNEVA, G. **Study and Analysis of Energy Efficiency of a Photovoltaic System in Winter Season**. 2025 Tenth Conference on Lighting (Lighting), Sozopol, Bulgaria, p. 1-5, 2025.

VAZZOLER, A. **Fundamentos de sistemas solares térmicos**. 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/348481599_Vazzoler_2021_-_Fundamentos_de_sistemas_solares_termicos. Acesso em: 20 set. 2025.

VEERAPEN, S.; WEN, H. **Shadowing effect on the power output of a photovoltaic panel**. 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), Hefei, China, p. 3508-3513, 2016.

VIAN, Â. **Energia Solar Fundamentos Tecnologia e Aplicações**. São Paulo: Editora Blucher, 2021. E-book. p.1. ISBN 9786555500592. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786555500592/>. Acesso em: 16 set. 2025.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 2. ed. rev. e atual. São Paulo: Érica, 2012.

ZIAR, H.; MANSOURPOUR, S.; AFJEI, E.; KAZEMI, M. **Bypass diode characteristic effect on the behavior of solar PV array at shadow condition**. 2012 3rd Power Electronics and Drive Systems Technology (PEDSTC), Tehran, Iran, p. 229-233, 2012.