

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**  
**TALLES DE PAIVA PINTO**

**ESTUDO DE CASO: atuação de um engenheiro mecânico em uma empresa de energia solar**

**Varginha**  
**2022**

**TALLES DE PAIVA PINTO**

**ESTUDO DE CASO: atuação de um engenheiro mecânico em uma empresa de energia solar**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Prof. Dr. Luiz Carlos Vieira Guedes.

**Varginha  
2022**

**TALLES DE PAIVA PINTO**

**ESTUDO DE CASO: atuação de um engenheiro mecânico em uma empresa de energia solar**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em     /     /

---

Prof. \_\_\_\_\_

---

Prof. \_\_\_\_\_

---

Prof. \_\_\_\_\_

OBS.:

Dedico este trabalho a todos aqueles que  
contribuíram para a sua realização, em  
especial Prof. Dr. Luiz Carlos Vieira Guedes,  
Yan Samuel e todos da Caminho do Sol.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus colegas, professores, amigos e a minha família por terem ajudado na construção deste trabalho, por todo apoio e paciência dados neste momento.

“Se ficar difícil, dobre o esforço.  
Se estiver sem forças, dobre os joelhos.”  
Desmond Doss

## RESUMO

A busca crescente por sistemas fotovoltaicos por parte de pessoas naturais e empresas fez com que o número de empregos no setor de energia solar se intensificasse. Porém, ainda que esse mercado seja altamente atrativo tanto para prestadores de serviço quanto para clientes, deve-se estar ciente dos melhores procedimentos para uma boa instalação de um sistema fotovoltaico de modo que sua eficiência valha o investimento realizado. Dentro desse contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo de caso de um engenheiro mecânico em uma empresa de energia solar a fim de avaliar a performance de dois sistemas fotovoltaicos com diferentes ângulos de inclinação, demonstrando a importância deste parâmetro para o rendimento energético do sistema. Para isso, os levantamentos das informações dos sistemas fotovoltaicos foram coletados e sintetizados por um aplicativo. Com isso, foi possível comparar os dois sistemas e avaliar suas performances, demonstrando a importância do ângulo de inclinação para o bom desempenho do sistema.

**Palavras-chave:**Energia solar. Sistema fotovoltaico.

## **ABSTRACT**

*The growing search for photovoltaic systems by natural people and companies has made the number of jobs in the solar energy sector intensify. However, although this market is highly attractive for both service providers and customers, one must be aware of the best procedures for a good installation of a photovoltaic system so that its efficiency is worth the investment made. Within this context, this paper aims to present a case study of a mechanical engineer in a solar energy company in order to evaluate the performance of two solar panels with different angles of inclination, demonstrating the importance of this parameter for the energy efficiency of the system. For this, the surveys of information from solar systems were collected and synthesized by an application. With this, it was possible to compare the two systems and evaluate their performance, demonstrating the importance of the angle of inclination for the good performance of the system.*

**Keywords:***Solar energy. Photovoltaic system.*



## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil.....	13
Figura 02 – Espectro da radiação solar incluindo um detalhamento da faixa visível humana...16	16
Figura 03 – Absorção da radiação solar na atmosfera.....	17
Figura 04 – Esquema representando a insolação.....	17
Figura 05 – Visibilidade do fotoperíodo ao longo do ano para diferentes latitudes.....	19
Figura 06 – A geometria Sol-Terra determina as estações do ano e a duração do dia.....	19
Figura 07 – Ângulos notáveis em solarimetria.....	20
Figura 08 – Amplitude de valores do ângulo de inclinação.....	21
Figura 09 – Processos de interação da radiação solar com os principais constituintes atmosféricos.....	24
Figura 10 – Espectro eletromagnético da radiação solar.....	24
Figura 11 – Componentes da irradiância solar.....	25
Figura 12 – Os três tipos de radiação solar.....	26
Figura 13 – Balanço da energia solar na Terra.....	26
Figura 14 – Esquema do efeito fotovoltaico em uma placa fotovoltaica.....	32
Figura 15 - Estrutura moleculares dos semicondutores <i>p</i> e <i>n</i> .....	33
Figura 16 - Estrutura de uma célula fotovoltaica.....	33
Figura 17 - Materiais semicondutores em três situações diferentes: separados, unidos para formar uma junção e por último com a junção exposta à luz para produzir corrente elétrica....	34
Figura 18 – Efeito fotovoltaico e efeito fotoelétrico.....	35
Figura 19 – Elementos básicos de um sistema fotovoltaico.....	37
Figura 20 – Elementos de um sistema ligado à rede com backup de bateria.....	39
Figura 21 – Elementos de um sistema ligado à rede com backup de bateria.....	40
Figura 22 – Efeito da inclinação do módulo fotovoltaico na captação de energia.....	41
Figura 23 – Energia solar captada ao longo do ano com diferentes inclinações.....	42
Figura 24 – Energia solar captada ao longo do ano com diferentes inclinações.....	43
Figura 25 - Projeto 1036.....	45
Figura 26 – Projeto 1037.....	46
Figura 27 – Inversor Growatt e sua ficha técnica.....	46
Figura 28 – Produção diária de energia do projeto 1036.....	47
Figura 29 – Produção diária de energia do projeto 1037.....	47
Figura 30 – Produção mensal de energia do projeto 1036.....	48
Figura 31 – Produção mensal de energia do projeto 1037.....	48

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2 ENERGIA SOLAR</b> .....	15
<b>2.1 Definição e origem</b> .....	15
<b>2.2 Parâmetros do Sol</b> .....	15
2.2.1 Irradiância.....	16
2.2.2 Insolação.....	17
<b>2.3 Fatores astronômicos</b> .....	18
2.3.1 Posição relativa entre a Terra e o Sol e a irradiância solar .....	18
2.3.2 Ciclo anual e ciclo diário.....	18
2.3.3 Ângulos .....	20
<b>2.4 Fatores atmosféricas e ambientais</b> .....	22
2.4.1 Espalhamento e Absorção .....	23
<b>2.5 Tipos de irradiância solar</b> .....	25
<b>2.6 Tipos de energia solar</b> .....	27
2.6.1 Energia solar fotovoltaica.....	27
2.6.2 Energia solar térmica.....	28
2.6.3 Energia solar passiva.....	28
<b>2.7 Formas de captação</b> .....	29
<b>2.8 Vantagens dos sistemas fotovoltaicos</b> .....	29
<b>3 SISTEMA FOTOVOLTAICO</b> .....	31
<b>3.1 Efeito fotovoltaico e efeito fotoelétrico</b> .....	31
3.1.2 Efeito fotovoltaico.....	31
3.1.3 Efeito fotoelétrico.....	34
<b>3.2 Tipos de células fotovoltaicas</b> .....	35
<b>3.3 Célula, módulo, placa ou painel fotovoltaicos</b> .....	36
<b>3.4 Componentes de um sistema fotovoltaico</b> .....	36
<b>3.5 Tipos de sistemas fotovoltaicos</b> .....	38
3.4.1 Sistema vinculado à rede.....	38
3.4.2 Sistema ligado à rede com backup de bateria .....	39
3.4.2 Sistema off-grid.....	40
<b>4 PARÂMETROS PARA INSTALAÇÃO</b> .....	42
<b>4.1 Regras fundamentais para a instalação</b> .....	43

<b>5 METODOLOGIA.....</b>	<b>45</b>
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>47</b>
<b>7 CONCLUSÃO.....</b>	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>50</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Marsh (2021), a energia solar é um recurso energético renovável e limpo proveniente das partículas – denominadas fótons – que surgem da reação nuclear massiva que ocorre no Sol, sendo, portanto, a fonte de energia mais abundante na Terra.

Atualmente, a forma mais utilizada para a sua captação é através de painéis fotovoltaicos, dispositivos formados por um arranjo de células fotovoltaicas que configuram uma matriz que pode se estender a uma ordem de centímetros ou metros quadrados (WENDT, 2020).

Apesar dos progressos realizados na eficiência energética dos painéis fotovoltaicos, segundo o Center for Sustainable Systems da Universidade de Michigan (2021), a maioria dos painéis utilizados para fins comerciais possui uma eficiência que varia de 15% a 20%. E, além desse percentual relativamente baixo, ela pode ser ainda menor se o painel fotovoltaico não estiver inclinado na posição mais propensa à captação de energia, a qual é influenciada pela latitude e época do ano do local em que se encontra (MARSH, 2022).

Por isso, é de grande importância investigar a relação entre a inclinação de um painel fotovoltaico e sua eficiência energética a fim de demonstrar a necessidade de se instalar sistemas fotovoltaicos com uma boa atuação profissional para que o investimento realizado não seja convertido em desperdício.

Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (2022), de 2012 até 2022, no Brasil, as fontes de energia solar fotovoltaica foram responsáveis pela geração de mais de 15,3 GW operacionais, representando mais de R\$ 82,1 bilhões em novos investimentos, além de estabelecer a geração de mais de 459 mil novos empregados. Constata-se ainda o valor de R\$ 22,1 bilhões em arrecadação de tributos concomitante a uma redução de 22,0 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>.

Dentro da matriz elétrica brasileira, a energia solar fotovoltaica representa o valor de 7,6% de MW gerados, sendo Minas Gerais e São Paulo os estados no topo do ranking de geração de energia solar, representando, respectivamente, os valores de 16,8% e 12,8%.

A figura 01 apresenta a evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil até o mês de abril de 2022, no qual é nitidamente perceptível o crescimento da potência instalada anualmente.

Figura 01 – Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil.



Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA, 2022).

Ainda de acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (2022), no ano de 2022 foram adicionados mais de 12,1 GW de potência instalada, o que significa a geração de 357 mil novos empregos no Brasil, representando investimentos que poderão superar a cifra de R\$ 50,8 bilhões.

Atualmente, nota-se um aumento substancial na busca por instalações de sistemas que captam a energia solar, o que vem impactando no consequente aumento do número de empresas especializadas na prestação de serviços relacionados aos sistemas de captação de energia solar, em especial o fotovoltaico, com o intuito de oferecer energia em residência, comércios e indústrias. No Brasil, em 2021, o crescimento na busca por energia solar foi de 117% (MALISZEWSKI, 2021).

Dentro desse contexto, este trabalho apresenta um estudo de caso dentro de uma empresa de energia solar em busca de analisar a relação entre a inclinação de um painel fotovoltaico e o seu desempenho energético a fim de demonstrar a importância de uma correta instalação para otimização energética do sistema.

Cumpra para este propósito, seguir as tarefas expostas abaixo:

a) Apresentar um referencial teórico que sobre energia solar;

- b) Apresentar um referencial teórico sobre sistema fotovoltaico;
- c) Apresentar a relação entre a inclinação de um painel fotovoltaico e a sua eficiência energética, demonstrando o problema envolvido nesse aspecto;
- d) Apresentar, através de um estudo de caso, uma análise sobre como a definição da inclinação de um painel fotovoltaico impacta em seu desempenho.

Para cumprir os propósitos estabelecidos neste trabalho, será realizada uma pesquisa bibliográfica em livros, sites oficiais, artigos técnicos e manuais sobre os assuntos a serem abordados e, por fim, um estudo de caso realizado no âmbito de uma empresa de instalação de sistemas fotovoltaicos, utilizando uma ferramenta de coleta de dados de sistemas fotovoltaicos.

Este trabalho começa trazendo uma abordagem sobre a energia solar, explicando como ela é afetada pelos fatores existentes na Terra. Após isso, será realizada uma explanação sobre os sistemas fotovoltaicos. Logo após, será tratado o problema envolvendo os parâmetros de instalação, dando-se especial atenção ao ângulo de inclinação. Por fim, parte-se para a parte prática, a qual será constatado o efeito causado por este parâmetro.

## **2 ENERGIA SOLAR**

Neste tópico, será abordado o resultado de diversas pesquisas sobre energia solar, no qual será apresentada sua definição e origem, suas formas de captação, os fatores responsáveis por alterar seus parâmetros, os tipos de irradiância solar, os tipos de energia solar e suas formas de captação.

### **2.1 Definição e origem**

Segundo Collins (2022), a energia solar é uma energia renovável e inesgotável, obtida através da radiação eletromagnética do Sol, sendo capaz de produzir eletricidade e calor de uma forma totalmente sustentável e gratuita.

Porém, segundo Pereira et al (2017), em sentido estrito, a energia solar não é renovável e nem inesgotável, porém ela pode ser considerada assim tendo-se em vista o tempo de atividade do Sol em relação à escala de tempo da vida no planeta Terra.

A energia solar provém das reações de fusão nuclear dos átomos de hidrogênio, que compõem mais de 75% do Sol, para formar hélio, que compõe cerca de 25% do Sol (PEREIRA et al, 2017).

Segundo Turgeon e Morse (2022), a energia solar é qualquer tipo de energia gerada pelo Sol, sendo criada pela fusão nuclear que ocorre no astro. A fusão ocorre quando prótons de átomos de hidrogênio colidem violentamente no núcleo do Sol e se fundem para criar um átomo de hélio.

Esse processo, conhecido como reação em cadeia PP (próton-próton), emite uma enorme quantidade de energia. Em seu núcleo, o Sol funde cerca de 620 milhões de toneladas métricas de hidrogênio a cada segundo (TURGEON; MORSE, 2022).

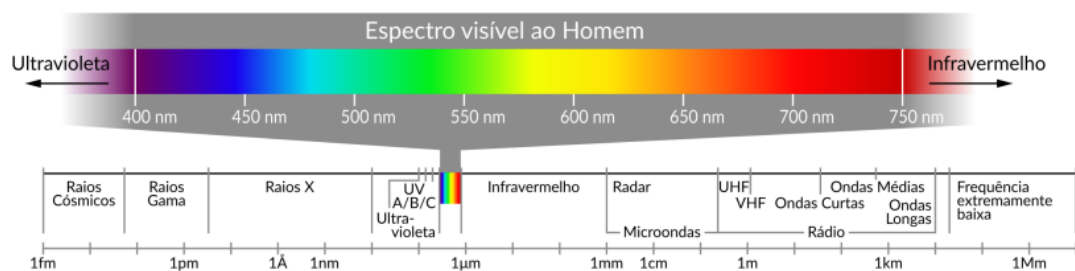
A fusão nuclear pela reação em cadeia PP libera enormes quantidades de energia na forma de ondas e partículas. Assim, a energia solar está constantemente fluindo para longe do Sol e por todo o Sistema Solar (TURGEON; MORSE, 2022).

A energia, o calor e a luz do Sol fluem na forma de radiação eletromagnética (EMR). O espectro eletromagnético existe como ondas de diferentes frequências e diferentes comprimentos de onda (TURGEON; MORSE, 2022).

### **2.2 Parâmetros do Sol**

Pereira et al (2017) explica que o Sol emite uma potência de aproximadamente  $3,86 \cdot 10^{26}$  W, sendo sua taxa de energia um valor aproximadamente constante há bilhões de anos. A temperatura efetiva de sua superfície equivale a um valor na ordem de 5778 K (5505° C) de forma que a energia irradiada por ele se estende a uma ampla faixa do espectro eletromagnético, da qual cerca de 81% da energia que alcança a Terra e sua atmosfera está em uma faixa de comprimentos de onda que abarca o visível e se estende até o infravermelho próximo.

Figura 02 – Espectro da radiação solar incluindo um detalhamento da faixa visível humana.



Fonte: (PEREIRA ET AL, 2017).

A figura 02 exibe o espectro da radiação solar visível ao ser humano. A seguir serão apresentados alguns parâmetros relacionados ao Sol.

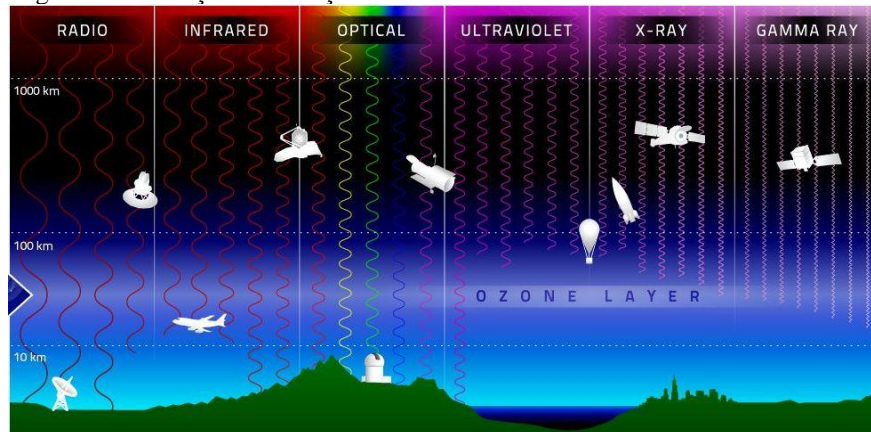
### 2.2.1 Irradiância

Segundo Villalva (2012), a irradiância é a grandeza que mede a potência gerada pela radiação solar por unidade de área (densidade de potência), sendo expressa em  $W/m^2$ .

Considera-se que, na superfície terrestre, a irradiância da radiação solar possui um valor típico de  $1000 W/m^2$ . Já no espaço extraterrestre, detecta-se, na distância média entre o Sol e a Terra, um valor de  $1353 W/m^2$ .



Figura 03–Absorção da radiação solar na atmosfera.



Fonte: (GEOENGINEERING.GLOBAL, 2014).

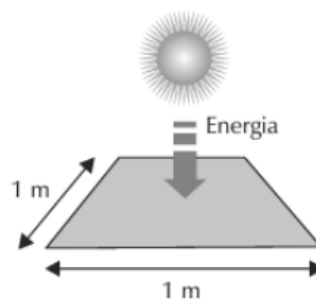
Segundo o site Geoengineering.global (2014), a maior parte da radiação solar que atinge a atmosfera e alcança o solo possui um comprimento de onda entre 250 e 2400 nanômetros (nm). Dentro desse espectro, encontra-se a radiação infravermelha (52-55%/700-2400 nm), a luz visível (42-43%/400-700 nm) e os raios ultravioletas (3-5%/250-400 nm).

Como mostra a figura 03, a radiação solar que alcança o solo representa cerca de 70% da radiação que atinge o topo da atmosfera. Isso ocorre porque o ozônio atmosférico ( $O_3$ ), moléculas de oxigênio ( $O_2$ ), vapor de água ( $H_2O$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ) refletem 30% da radiação solar penetrante de volta para o espaço e impedem-na de alcançar o solo.

### 2.2.2 Insolação

A insolação é a grandeza que mede a energia gerada pela radiação solar por unidade de área ao longo de um determinado intervalo de tempo. Geralmente utiliza-se a medida da insolação por dia, sendo expressa em  $W/m^2/dia$  (VILLALVA, 2012).

Figura 04 - Esquema representando a insolação.



Fonte: (VILLALVA, 2012).

A figura 04 apresenta um esquema dessa grandeza.

## 2.3 Fatores astronômicos

Segundo Wallace e Hobbs (2006), a disponibilidade do recurso energético solar e sua variabilidade espacial e temporal estão intrinsecamente relacionadas a conceitos astronômicos.

Os fatores astronômicos estabelecem a variabilidade da radiação solar que incide no topo da atmosfera.

### 2.3.1 Posição relativa entre a Terra e o Sol e a irradiância solar

De acordo com Yamasoe e Corrêa (2016), a posição relativa entre o Sol e a Terra é um dos parâmetros que impacta no fluxo de radiação solar (irradiância solar), causando uma oscilação que varia de  $1325 \text{ W/m}^2$  a  $1412 \text{ W/m}^2$ , uma vez que a distância entre os dois corpos celestes varia de  $1,47 \cdot 10^8 \text{ km}$  a  $1,52 \cdot 10^8 \text{ km}$  ao longo do período em que a Terra orbita o Sol, completando um ciclo a cada 365,25 dias solares.

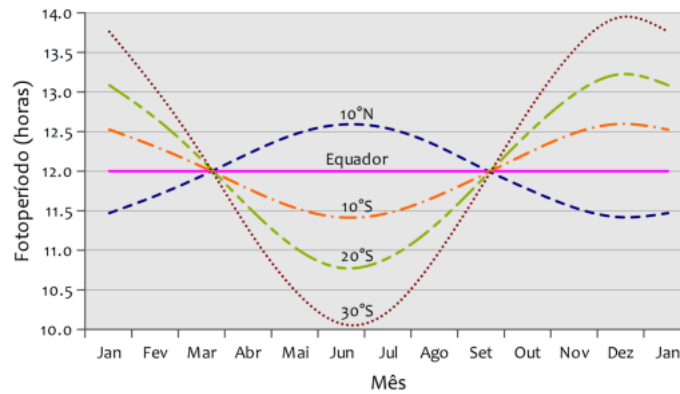
Em média, o Sol é orbitado pela Terra a uma distância de cerca de 150 milhões de quilômetros. Com isso, tem-se um valor médio de irradiância solar igual a  $1366 \text{ W/m}^2$ , valor que define a constante solar.

### 2.3.2 Ciclo anual e ciclo diário

A duração do dia e a quantidade de energia solar incidente em um ponto qualquer da superfície terrestre apresenta variabilidade temporal característica de dois ciclos: o ciclo anual e o ciclo diário (WALLACE E HOBBS, 2006).

O ciclo anual é a variação da inclinação do eixo axial da Terra com relação ao plano orbital do planeta em torno do Sol em 23,45 graus, definindo as estações do ano (WALLACE E HOBBS, 2006).

Figura 05–Visibilidade do fotoperíodo ao longo do ano para diferentes latitudes.



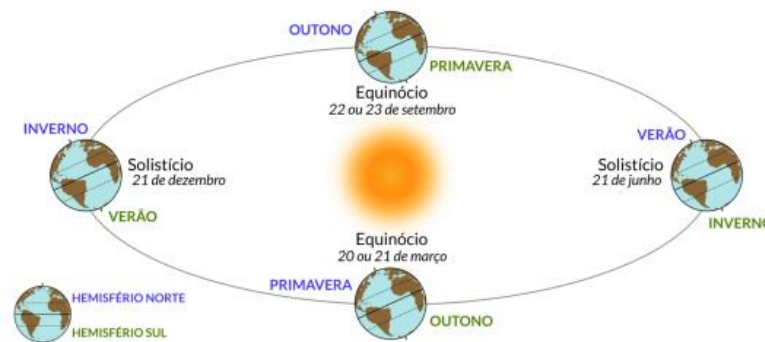
Fonte: (PEREIRA ET AL, 2017).

A figura 05 apresenta a visibilidade do fotoperíodo ao longo do ano para diferentes latitudes. Deve-se notar que o fotoperíodo demonstra maior variabilidade à medida que a localidade está mais próxima dos polos.

De acordo com Wallace e Hobbs (2006), as estações do ano são classificadas em:

- a) Solstícios: instantes em que o Sol obtém a maior declinação em latitude medida a partir do Equador terrestre durante seu movimento aparente na esfera celeste; e
- b) Equinócios: instantes em que o Sol atravessa o Equador terrestre em sua órbita aparente.

Figura 06 – A geometria Sol-Terra determina as estações do ano e a duração do dia.



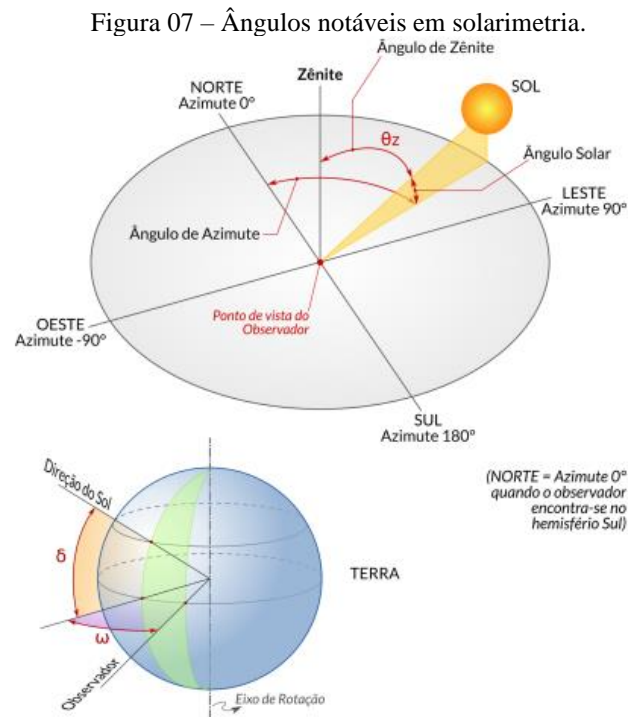
Fonte:(PEREIRA ET AL, 2017).

A figura 06 ilustra que o Sol está posicionado sobre a linha dos Trópicos de Câncer e de Capricórnio nos dias de solstício e posicionado sobre o Equador nos equinócios.

O ciclo diário, por sua vez, é a variação do movimento de rotação da Terra em torno do seu próprio eixo, o que impacta na variabilidade da incidência da energia solar ao longo do dia (WALLACE E HOBBS, 2006).

### 2.3.3 Ângulos

Segundo Wilks (2006), tanto o ciclo anual quanto o diário influenciam na variabilidade da radiação solar que incide na superfície terrestre. Assim, para descrever essa variabilidade, utiliza-se os ângulos exibidos na figura 07.



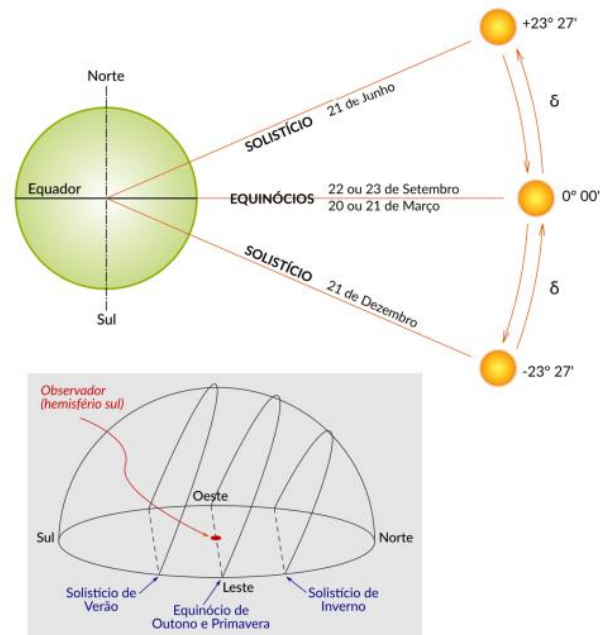
Fonte:(PEREIRA et al, 2017).

Deve-se perceber que o estudo geométrico e espacial destas variáveis possibilita a descrição da posição do Sol relativamente a um ponto na superfície terrestre, além de descrever numericamente a variabilidade diária e sazonal do Sol(WILKS, 2006).

#### 2.3.3.1 Declinação solar

A declinação solar ( $\delta$ ) é o ângulo formado pela inclinação do plano equatorial da Terra e a linha de direção Sol-Terra. Apresenta variação entre  $-23^\circ 27'$  e  $+23^\circ 27'$  ao longo do período de um ano. Por convenção, as declinações são consideradas negativas quando a linha de direção Sol-Terra cruza a superfície no hemisfério Sul (WILKS, 2006).

Figura 08 – Amplitude de valores do ângulo de inclinação.



Fonte:(PEREIRA ET AL, 2017).

A figura 08 indica a amplitude de valores da declinação ao longo do ano.

### 2.3.3.2 Ângulo horário solar

O ângulo horário solar ( $\omega$ ) corresponde ao deslocamento angular do movimento aparente do Sol devido à rotação da Terra e varia entre  $-180^\circ$  e  $+180^\circ$ . Cada hora corresponde a  $15^\circ$  de variação do ângulo horário solar. Por convenção, durante a manhã é positivo, à tarde é negativo e, ao meio-dia assume o valor zero (WILKS, 2006).

### 2.3.3.3 Ângulo zenital solar

O ângulo zenital solar ( $\theta_z$ ) representa o ângulo formado entre a vertical no ponto de observação e a direção da linha que liga o mesmo ponto da superfície da Terra ao Sol (WILKS, 2006).

Pode ser calculado conhecendo-se os valores da latitude do local ( $\varphi$ ), a declinação solar ( $\delta$ ) e o ângulo horário solar ( $\omega$ ). O ângulo zenital é igual a  $90^\circ$  quando o Sol está no horizonte ao nascer ou pôr do Sol (WILKS, 2006).

### 2.3.3.4 Ângulo azimutal

Por fim, o ângulo azimutal do Sol é o ângulo formado entre a linha de projeção da direção do Sol no plano horizontal com o meridiano do observador. Seu valor pode variar entre  $-180^\circ$  e  $+180^\circ$ , sendo positivo no sentido horário a partir da direção Norte Geográfico no meridiano local (WILKS, 2006).

#### 2.3.3.5 Ângulo da altura solar

A altura solar é o ângulo de inclinação da trajetória do Sol com o plano horizontal. Essa medida é definida pela declinação solar juntamente com a localização geográfica do observador (WILKS, 2006).

#### 2.3.3.6 Ângulo de incidência dos raios solares

O ângulo de incidência dos raios solares é o ângulo formado entre a trajetória dos raios solares e a linha perpendicular à superfície do painel fotovoltaico (WILKS, 2006).

## 2.4 Fatores atmosféricas e ambientais

Segundo Vianello e Alves (2013), além dos fatores astronômicos, há fatores atmosféricos e ambientais que também influenciam na intensidade da radiação recebida na superfície terrestre ao longo do percurso dos raios do Sol.

Assim, a energia solar, que é emitida na forma de radiação eletromagnética, é parcialmente interceptada pela Terra e sua atmosfera, provocando uma interação de distintas configurações entre os diferentes comprimentos de onda da radiação e os constituintes atmosféricos, o que causa os conhecidos processos de absorção e espalhamento (VIANELLO E ALVES, 2013).

A atmosfera terrestre é constituída por gases atmosféricos e aerossóis (particulados). Os gases atmosféricos, por sua vez, são formados pela fração seca da atmosfera (sem vapor d'água), a qual é composta por 99% de nitrogênio ( $N_2$ ) e oxigênio ( $O_2$ ) e 1% de argônio (Ar) e outros gases, e pelos demais constituintes gasosos, denominados de gases-traço ( $CO_2$ ,  $O_3$ , entre outros), que, apesar de possuírem baixa concentração, exercem um papel essencial nos processos radiativos (TIBA, 2000).

Já os aerossóis são suspensões de partículas líquidas ou sólidas no ar (excluindo-se as gotículas de nuvem e precipitação) emitidas por fontes naturais e antrópicas (TIBA, 2000).

Na atmosfera, os aerossóis podem estar presentes em vários processos de acordo com suas características físicas e morfológicas, como, por exemplo, “na formação de gotas de nuvens e no espalhamento da radiação solar” (TIBA, 2000).

De acordo com o Intergovernmental Panel on Climate Change (2014), o efeito direto global dos aerossóis no balanço radiativo está estimado entre  $-0,2$  a  $-1,5 \text{ W/m}^2$ , o que contribui para o resfriamento da atmosfera terrestre, provocando um efeito inverso àquele gerado pelos gases do efeito estufa, os quais são  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , CFC.

Contudo, esse efeito de resfriamento sofre uma enorme influência oriunda da localidade, uma vez que a distribuição espacial não homogênea dos aerossóis no globo terrestre pode trazer efeitos marcantes em locais de elevadas concentrações de aerossóis em detrimento de locais com baixa concentração (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2014).

Em consonância, Villalva (2012) afirma que a massa de ar é um dos fatores responsáveis pelas diversas alterações na radiação solar, cujas características variam em função da espessura da camada de ar e da composição atmosférica, que inclui, além do ar, elementos suspensos como vapor de água e poeira.

A espessura da massa de ar percorrida pelos raios solares depende do comprimento da trajetória até o solo, que, por sua vez, está em função do ângulo de inclinação do Sol com relação à linha do zênite, isto é, o ângulo zenital do Sol (VILLALVA, 2012).

#### 2.4.1 Espalhamento e Absorção

De acordo com Yamasoe e Corrêa (2016), geralmente, os processos físicos amenizam a irradiância solar ao impor um valor limite máximo, em condições de céu claro, de aproximadamente  $1.000 \text{ W/m}^2$  no meio-dia solar – instante do dia em que o Sol está na posição mais elevada de modo que a radiação solar percorre a menor espessura de atmosfera.

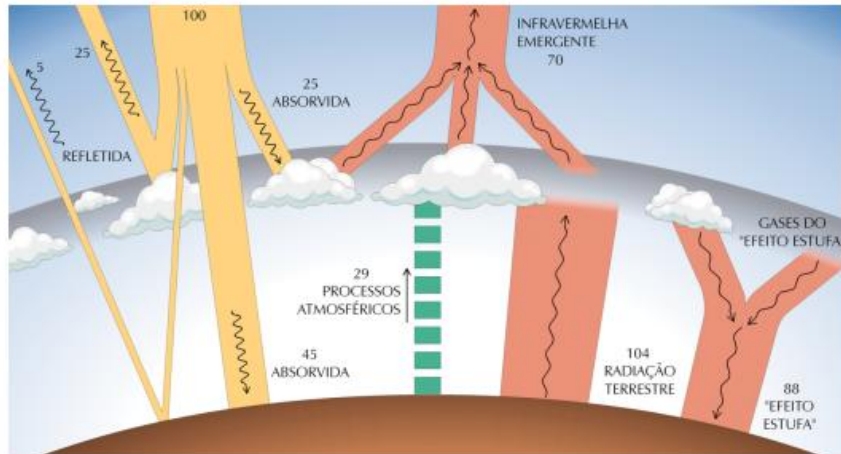
Os processos físicos de espalhamento da radiação solar são produzidos por moléculas de gases atmosféricos e particulados em suspensão (YAMASOE E CORRÊA, 2016).

As nuvens são agentes fundamentais na modulação da radiação solar incidente na superfície por possuírem propriedades óticas que geram um espalhamento eficiente da radiação solar (YAMASOE E CORRÊA, 2016).

Porém, esse espalhamento é proporcional à sua espessura ótica, à distribuição de tamanhos das gotículas, ao conteúdo e ao estado físico da água, grandezas que variam de acordo com o tipo de nuvem(YAMASOE ECORRÊA, 2016).

Os processos físicos de absorção são decorrentes das moléculas de ozônio ( $O_3$ ), vapor de água, oxigênio ( $O_2$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ )(YAMASOE ECORRÊA, 2016).

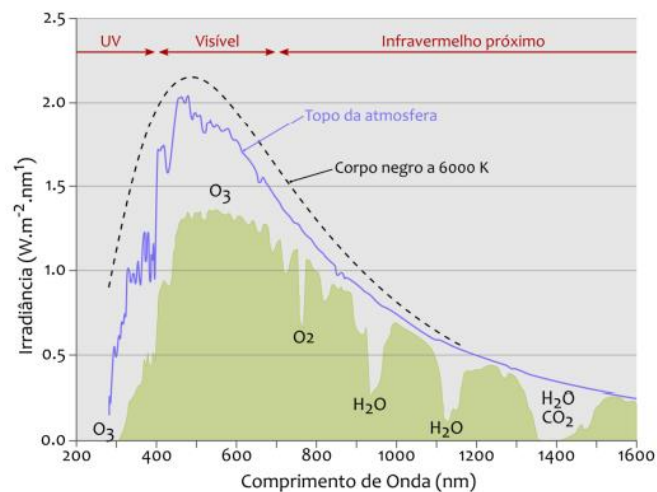
Figura09 – Processos de interação da radiação solar com os principais constituintes atmosféricos.



Fonte:(PEREIRA ET AL, 2017).

A figura 09 representa de forma simplificada os principais processos radiativos que acontecem na atmosfera terrestre.

Figura10 – Espectro eletromagnético da radiação solar.



Fonte:(PEREIRA ET AL, 2017).



A figura 10 ilustra o espectro contínuo de radiação eletromagnética emitido pelo Sol que atinge o topo da atmosfera e a superfície terrestre após a atenuação pelos processos radiativos na atmosfera (área verde do gráfico).

Deve-se perceber que alguns comprimentos de onda da radiação solar são completamente absorvidos pela atmosfera e não incidem na superfície terrestre.

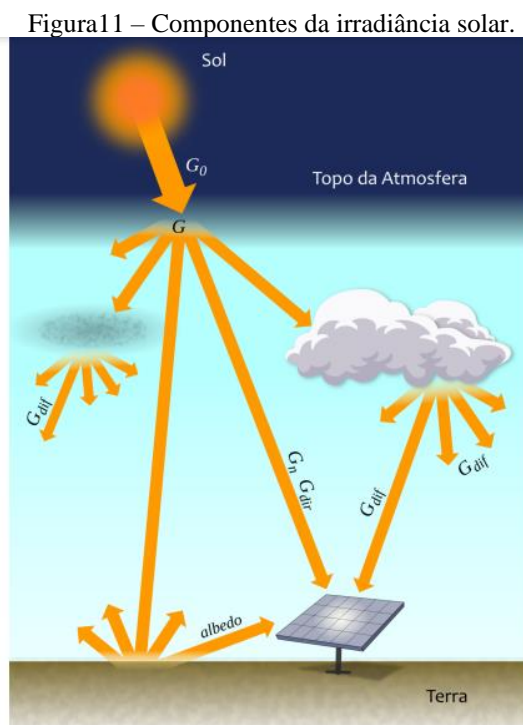
## 2.5 Tipos de irradiância solar

Conforme Yamasoe e Corrêa (2016), a irradiância solar ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) que incide em uma superfície é composta por suas componentes direta e difusa.

A irradiância solar direta é aquela que apresenta direção de incidência na linha imaginária entre a superfície e o Sol, representando a parcela que não foi atingida pelos processos físicos atmosféricos.

A irradiância solar difusa é aquela que apresenta todas as demais direções, representando a parcela atingida pelos processos de espalhamento pelos gases e aerossóis presentes na atmosfera.

A figura 11 ilustra a irradiância assim que atinge a atmosfera e seu espalhamento.



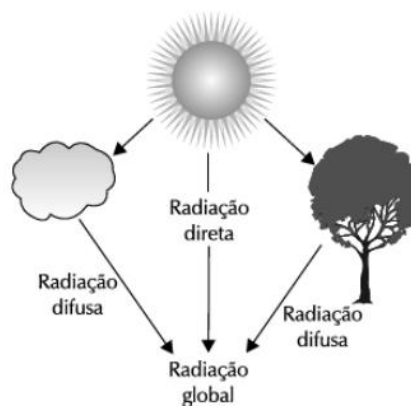
Fonte:(PEREIRA ET AL, 2017).

Em consonância, Villalva (2012) afirma que a radiação direta é aquela cujos raios solares percorrem sua trajetória em linha reta, incidindo diretamente sobre um plano horizontal do solo com uma inclinação em função do ângulo zenital do Sol.

Já a radiação difusa é aquela cujos raios solares atingem um plano horizontal do solo após sofrer difração na atmosfera e reflexão pela da poeira, nuvens e outros objetos.

Há também a radiação global, que, segundo ele, é a soma da radiação direta com a radiação difusa, como ilustra o a figura 12.

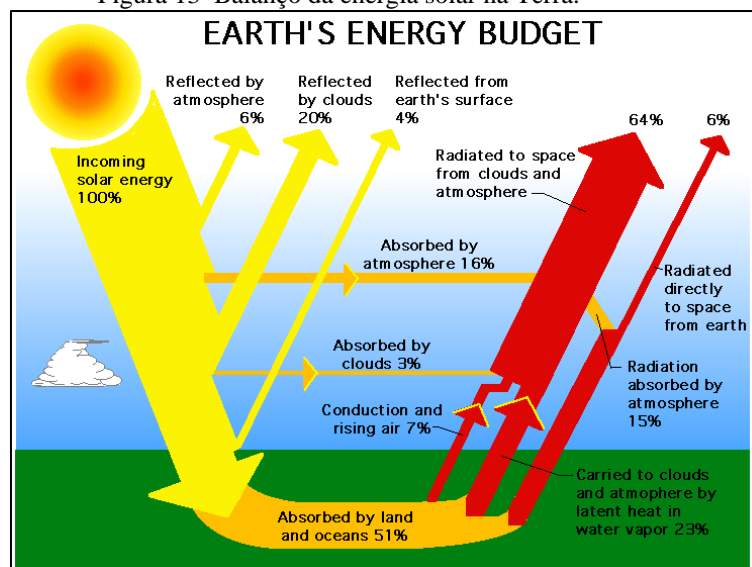
Figura 12 – Os três tipos de radiação solar.



Fonte: (VILLALVA, 2012).

A figura 13 apresenta diversos valores percentuais sobre os raios refletidos e absorvidos.

Figura 13–Balanço da energia solar na Terra.



Fonte: (GEOENGINEERING.GLOBAL, 2014).

Segundo os dados da figura, 51% da radiação solar gerada diretamente pelo Sol é absorvida pelo solo e pelos oceanos.

## 2.6 Tipos de energia solar

Collins (2022) classifica a energia solar em três tipos:

- a) Energia solar fotovoltaica: energia solar utilizada para produzir eletricidade;
- b) Energia solar térmica: energia solar utilizada para produzir energia térmica; e
- c) Energia solar passiva: aquela que aproveita diretamente as vantagens da luz solar.

Os primeiros dois tipos são chamados de energia solar ativa e o terceiro de energia solar passiva.

Define-se a energia solar ativa como aquela aproveitada de forma artificial, utilizando-se de tecnologias que captam e processam a energia solar.

Já a energia solar passiva é aquela aproveitada de forma natural, sem qualquer mecanismo para coleta e processamento.

Segundo Planas (2017), a energia solar térmica ativa representa uma economia maior que os sistemas passivos em função de seu maior rendimento na transferência de calor.

O autor afirma que, com o uso de software de análise de dados de termodinâmica, é possível realizar uma comparação entre “os resultados de várias estratégias solares ativas e passivas”.

### 2.6.1 Energia solar fotovoltaica

Para Collins (2022), a energia solar fotovoltaica é a energia elétrica proveniente da radiação solar que foi convertida diretamente em eletricidade através de painéis solares fotovoltaicos – sistemas constituídos por conjuntos de células ou células solares que convertem a luz (fótons) em energia elétrica (elétrons).

Tolmasquim (2016) também conceitua a energia solar fotovoltaica como aquela obtida em decorrência da conversão direta da luz solar em eletricidade através do efeito fotovoltaico.

Como os painéis solares fotovoltaicos não produzem calor, eles não são capazes de armazenar energia solar. Contudo, o excedente de energia gerada pode ser transferido para a rede de consumo, gerando créditos de energia solar (COLLINS, 2022).

### 2.6.2 Energia solar térmica

Ainda segundo Collins (2022), a energia solar térmica (ou heliotérmica) é a energia térmica proveniente do calor do Sol, sendo posteriormente utilizada para fornecer energia a residências e indústrias, podendo ser convertida em energia mecânica e a partir desta obter também energia elétrica.

A energia solar térmica é captada por meio de coletores – painéis ou espelhos – que absorvem e concentram o calor do Sol em um receptor que, por sua vez, acumula o calor recebido para aquecer um fluido volátil a fim de gerar vapor para movimentar uma turbina que produz eletricidade ou então para ser conduzido em tubos para uso em edifícios ou instalações.

De acordo com a temperatura gerada pelos coletores, a energia solar térmica se classifica em três tipos:

- d) Energia solar térmica de baixa temperatura: inferior a 65°C;
- e) Energia solar térmica de média temperatura: até 300°C; e
- f) Energia solar térmica de alta temperatura: superior a 500°C.

Tolmasquim (2016) explica que a energia solar heliotérmica é, a princípio, convertida em energia térmica para posteriormente ser transformada em energia elétrica. A captação dessa energia ocorre através da concentração de radiação solar em um ponto focal, no qual localiza-se um receptor em que transita fluidos absorvedores de calor.

Em seguida, esses fluidos, após absorverem calor, expandem-se, atingindo uma turbina ou aquecendo outro fluido para ser expandido, semelhantemente a uma “termelétrica convencional que utiliza um conjunto turbina-gerador”.

### 2.6.3 Energia solar passiva

Ainda de acordo com Collins (2022), a energia solar passiva é a energia solar aproveitada de forma natural, principalmente através da arquitetura bioclimática.

A arquitetura bioclimática é um princípio de projeto de edifícios que busca maximizar o aproveitamento da energia solar para manter o edifício ou residência aquecidos durante a noite e iluminados durante o maior tempo possível, mas evitando o calor excessivo durante as horas de maior incidência de luz solar.

Em suma, a arquitetura bioclimática busca, através do uso de diferentes materiais e orientações, reduzir a necessidade de iluminar, aquecer ou arrefecer o edifício ou residência através do aproveitamento sistemático da luz solar.

Planas (2015) dá exemplos de elementos encontrados na arquitetura bioclimática, tais como paredes grossas e isoladas, tetos com ventilação externa, orientação ao Sol e vegetação.

## **2.7 Formas de captação**

De acordo com Collins (2022), a energia solar pode ser captada a partir de painéis e espelhos, podendo ser transformada em energia elétrica ou energia térmica. Segue-se uma explicação desses dois meios de captação:

- a) Células fotovoltaicas: dispositivos que convertem a luz solar diretamente em eletricidade devido ao efeito fotoelétrico, fenômeno que consiste na geração de corrente elétrica a partir da capacidade de absorver fótons e elétrons livres, propriedade presente em alguns materiais; e
- b) Coletores solares térmicos: sistemas compostos de painéis ou espelhos destinados a “absorver e concentrar o calor do Sol, transferi-lo para um líquido e conduzi-lo através de tubos para uso em edifícios e instalações ou também para produção de eletricidade”.

Além desses recursos, a energia solar também pode ser utilizada de forma passiva, isto é, sem qualquer recurso de coleta, por meio de técnicas arquitetônicas bioclimáticas.

## **2.8 Vantagens dos sistemas fotovoltaicos**

Segundo o site Beny (2022), as vantagens do uso de energia solar por meio dos sistemas fotovoltaicos incluem:

- a) Alta confiabilidade: embora os sistemas fotovoltaicos estejam sujeitos a condições climáticas adversas, eles ainda são altamente confiáveis. Com matrizes fotovoltaicas, as fontes de alimentação críticas podem operar de forma contínua e ininterrupta;
- b) Forte persistência: os painéis solares são normalmente cobertos por garantias de 25 anos ou mais, e a maioria permanece operacional por muitos anos;
- c) Uma fonte de energia limpa: as células fotovoltaicas fornecem energia limpa e verde, que é a vantagem mais significativa. Não há preocupação com os painéis que emitem gases nocivos do efeito estufa, como o dióxido de carbono na atmosfera;

- d) Matérias-primas gratuitas: também é vantajoso porque não há necessidade de comprar matérias-primas. As células solares dependem do Sol para produzir eletricidade, que está abundantemente disponível ao seu redor;
- e) Baixos custos de manutenção: os sistemas fotovoltaicos requerem apenas inspeções ocasionais e trabalhos de reparo em comparação com sistemas de combustível convencionais;
- f) Consumo zero de combustível: ao contrário dos sistemas convencionais que exigem combustível, os sistemas fotovoltaicos não exigem custos de aquisição, armazenamento ou transporte;
- g) A poluição sonora é pequena: apesar dos movimentos mecânicos mínimos, o sistema fotovoltaico pode operar tranquilamente;
- h) Supervisão fotovoltaica: Os sistemas fotovoltaicos podem precisar adicionar alguns módulos para melhorar sua eficiência energética;
- i) Fácil de instalar: painéis solares residenciais podem ser instalados apenas no chão ou em telhados sem interromper o estilo de vida do cliente;
- j) Forte segurança: sistemas fotovoltaicos são seguros não só para o meio ambiente, mas também para o indivíduo. Eles têm modificações que protegem a casa em caso de desastres naturais ou mecânicos;
- k) Forte independência: muitas áreas residenciais estão adotando essa nova tecnologia devido à sua produção de energia independente e à independência das concessionárias.

### 3 SISTEMA FOTOVOLTAICO

Neste t3pico ser3 realizada uma explica33o acerca de diversos elementos relacionados a um sistema fotovoltaico.

#### 3.1 Efeito fotovoltaico e efeito fotoel3trico

Segundo Kemp (2009), a capta33o do calor solar 3 a transforma33o da energia eletromagn3tica em energia t3rmica pelos corpos e materiais que recebem sua radia33o. Quando as ondas eletromagn3ticas incidem sobre um corpo que tem a capacidade de absorver radia33o, a energia eletromagn3tica 3 transformada em energia cin3tica e transmitida para as mol3culas e 3tomos que comp3em esse corpo. Esse processo corresponde 3 transmiss3o de calor ou energia t3rmica. Quanto maior o estado de agita33o dos 3tomos e mol3culas, maior a temperatura do corpo. Em outras palavras, a temperatura de um corpo depende da energia t3rmica que ele possui. Essa energia pode aumentar ou diminuir, dependendo da quantidade de radia33o recebida por ele.

As ondas eletromagn3ticas ao incidirem sobre determinados materiais, em vez de transmitir calor, podem produzir altera33es nas propriedades el3tricas ou originar tens3es e correntes el3tricas. Existem diversos efeitos el3tricos da radia33o eletromagn3tica sobre os corpos, sendo dois deles o efeito fotovoltaico e o fotoel3trico (KEMP, 2009).

##### 3.1.2 Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico, que 3 a base dos sistemas de energia solar fotovoltaica para a produ33o de eletricidade, consiste na transforma33o da radia33o eletromagn3tica do Sol em energia el3trica atrav3s da cria33o de uma diferen3a de potencial, ou uma tens3o el3trica, sobre uma c3lula formada por uma sobreposi33o de materiais semicondutores. Se a c3lula for conectada a dois eletrodos, haver3 tens3o el3trica sobre eles. Se houver um caminho el3trico entre os dois eletrodos, surgir3 uma corrente el3trica (KEMP, 2009).

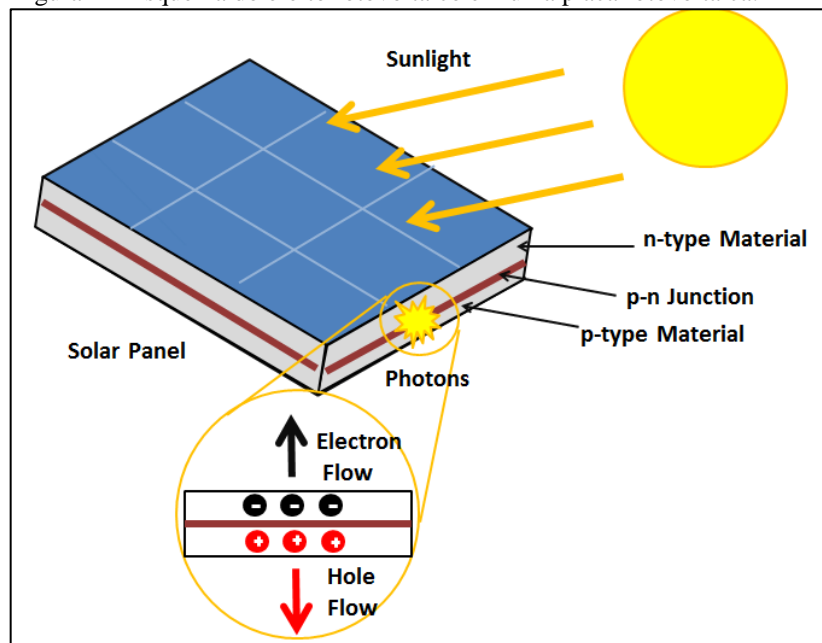
Nas palavras de Villalva (2012), o efeito fotovoltaico 3 o fen3meno que consiste na gera33o de uma diferen3a de potencial em um sistema de materiais semicondutores quando atingido pela radia33o solar.

O autor explica que uma c3lula fotovoltaica 3 um conjunto formado pela uni3o de duas camadas de material semicondutor, uma do tipo *p* e outra do tipo *n*.

Assim, o material  $n$  possui um excedente de elétrons e o material  $p$  possui falta de elétrons, o que gera uma diferença de potencial com a presença da energia solar fornecida pela radiação, fazendo com que os elétrons da camada  $n$  fluam para a camada  $p$  e “criem um campo elétrico dentro de uma zona de depleção – barreira de potencial – no interior da estrutura da célula”.

O fenômeno responsável por possibilitar que essas camadas semicondutoras gerem energia elétrica é denominado de efeito fotovoltaico.

Figura 14–Esquema do efeito fotovoltaico em uma placa fotovoltaica.



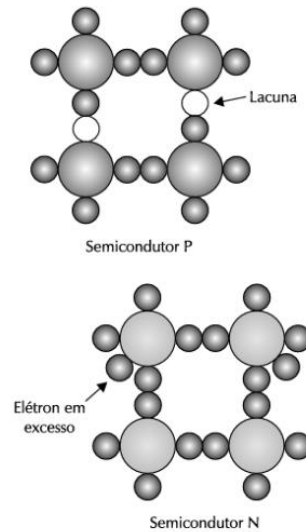
Fonte:(HANANIA ET AL, 2015).

Segundo Hanania et al (2015), o efeito fotovoltaico ocorre quando dois tipos de semicondutores – tipo  $p$  e tipo  $n$ – são unidos para dar origem a uma junção  $p-n$ . Quando essa junção é atingida pelos raios solares, forma-se um campo elétrico nessa região e a energia transmitida pelos fótons é transferida para os elétrons que, adquirindo energia suficiente, salta da camada de valência na direção  $n$ , ocasionando buracos nessa camada. Esses buracos também podem se mover, porém na direção  $p$ . Esse processo é ilustrado na figura 14.

Semelhantemente, Villalva (2012) explica que o semicondutor  $n$  é uma camada tão fina que, com a penetração da luz, os elétrons ficam energizados ao ponto de vencer a barreira de potencial e deslocar-se para a camada semicondutorap. Esse fenômeno está ilustrado a nível molecular na figura 15.



Figura 15 - Estrutura moleculares dos semicondutores *p* e *n*.

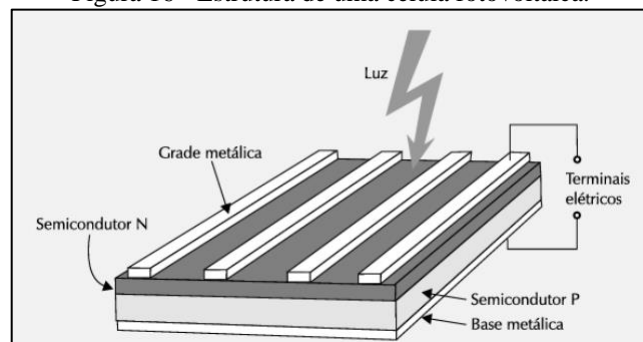


Fonte: (VILLALVA, 2012).

Disso, decorre que é o par elétron-buraco o responsável pela corrente elétrica nos materiais com essa capacidade.

A figura 16 apresenta a estrutura de uma célula fotovoltaica.

Figura 16 - Estrutura de uma célula fotovoltaica.

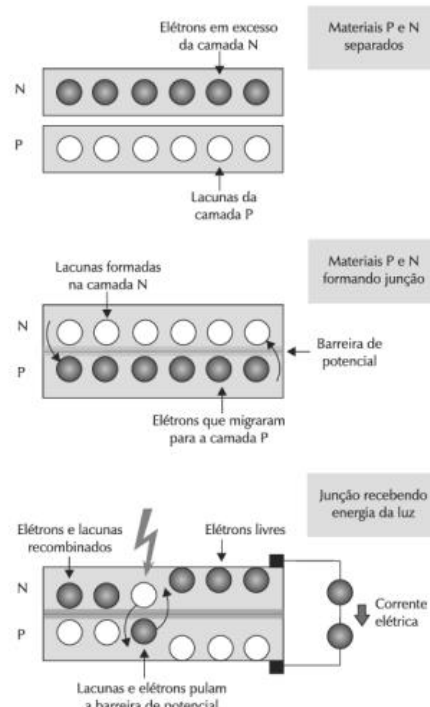


Fonte: (VILLALVA, 2012).

Conforme a figura 16, os elétrons, ao se movimentarem, direcionam-se aos eletrodos metálicos. Caso haja um circuito fechado, os elétrons vão se direcionar aos eletrodos da camada *n*, o que formará uma corrente elétrica. Parte dos elétrons são retidos nas lacunas presentes na camada *n*, porém a maioria permanece livre para a formação da corrente (HANANIA ET AL, 2015).

A figura 17 fornece mais uma explicação a respeito do par elétron-buraco. Nela, é possível verificar que, quando os materiais *p* e *n* formam uma junção, forma-se uma barreira de potencial e os elétrons e lacunas mudam seus posicionamentos.

Figura 17 - Materiais semicondutores em três situações diferentes: separados, unidos para formar uma junção e por último com a junção exposta à luz para produzir corrente elétrica.



Fonte: (VILLALVA, 2012).

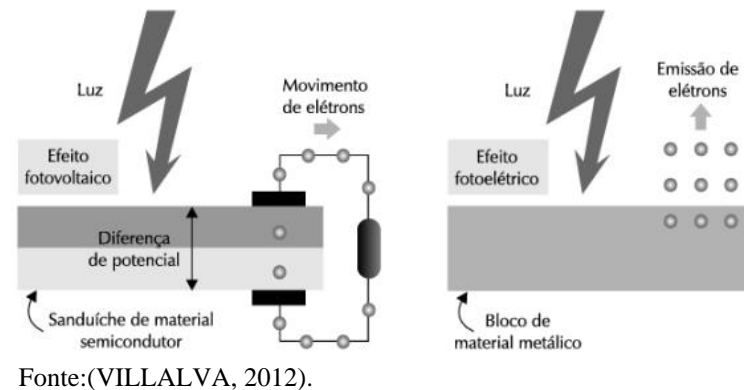
Quando a junção recebe energia da luz, os elétrons e lacunas recombina-se, pulando a barreira de potencial e formando uma corrente elétrica.

Curiosamente, a ausência de condutor entre as duas camadas não significa necessariamente a ausência de corrente elétrica, pois pode-se observar uma tensão elétrica de aproximadamente “0,6 V entre os dois lados das células, causada pelo campo elétrico da barreira de potencial” (VILLALVA, 2012).

### 3.1.3 Efeito fotoelétrico

Villava (2012) explica que o efeito fotoelétrico ocorre em materiais metálicos e não metálicos sólidos, líquidos ou gasosos. Ele ocasiona a remoção de elétrons, mas não é capaz de criar uma tensão elétrica sobre o material.

Figura 18 – Efeito fotovoltaico e efeito fotoelétrico.



A figura 18 esquematiza os efeitos fotovoltaico e fotoelétrico. O efeito fotoelétrico é muitas vezes confundido com o efeito fotovoltaico, embora estejam relacionados, são fenômenos diferentes.

### 3.2 Tipos de células fotovoltaicas

Segundo Luceño-Sánchez et al (2019), existem quatro categorias de células fotovoltaicas, sendo tais categorias denominadas gerações.

As gerações das células fotovoltaicas são as seguintes:

- a) Primeira geração: tem como base as tecnologias do silício cristalino, isto é, o silício monocristalino e o silício policristalino, além do arseneto de gálio (GaAs). Trata-se de materiais de médio a baixo custo com resultados moderados;
- b) Segunda geração: inclui as células de filmes finos de silício amorfo (a-Si) e de silício microcristalino ( $\mu\text{c-Si}$ ), o sulfureto de telureto/cádmio (CdTe/CdS) e células solares de seleneto de cobre-índio-gálio (CIGS). Trata-se de materiais de baixa eficiência e baixo custo de manufatura;
- c) Terceira geração: envolve tecnologias baseadas nos compostos mais recentes, incluindo filmes nanocristalinos, pontos quânticos ativos, multicamadas empilhadas ou em tandem de compostos inorgânicos baseados em materiais III-V, tais como GaAs/GaInP, células solares baseadas em polímeros orgânicos, células solares com tingimento sensibilizado, etc. Trata-se de materiais caros, mas muito eficientes; e
- d) Quarta geração: conhecida como “inorgânica-no-orgânico”, trata-se da combinação do baixo custo e flexibilidade dos filmes finos poliméricos com a estabilidade das nanoestruturas de inorgânicos novos tais como nanopartículas e óxidos de metal ou nanomateriais orgânicos

tais como nanotubos de carbono, grafeno e seus derivados. Encontra-se ainda sob investigação.

O mercado voltado a materiais para o desenvolvimento de placas solares é dominado por duas dessas categorias, a saber a primeira e a segunda geração.

### **3.3 Célula, módulo, placa ou painel fotovoltaicos**

Villalva (2012) elucida que a célula fotovoltaica é a unidade básica para a captação da energia solar. Como uma célula gera um baixo valor de energia elétrica, é necessário agrupá-las para a formação de painéis, placas ou módulos.

Na literatura técnica, utiliza-se indistintamente os termos painel, placa ou módulo para se referir a “um conjunto empacotado de células fotovoltaicas disponível comercialmente”.

Assim, um módulo fotovoltaico é um conjunto de células agrupadas em “uma estrutura rígida e conectadas eletricamente”, sendo dispostas em série para gerar tensões maiores.

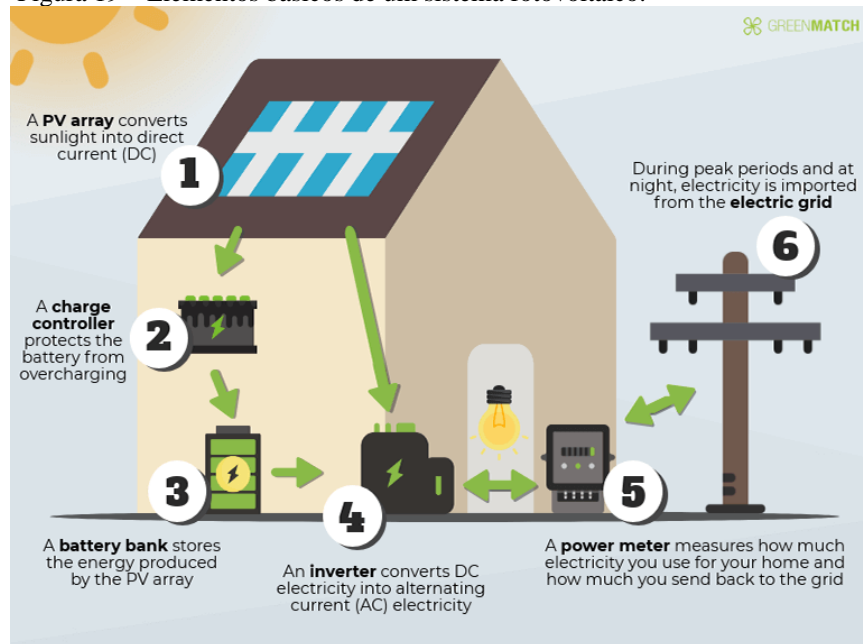
### **3.4 Componentes de um sistema fotovoltaico**

Segundo Natalie Kunz (2021), os sistemas fotovoltaicos geralmente consistem em seis componentes individuais: o conjunto solar fotovoltaico, um controlador de carga, um banco de baterias, um inversor, um medidor de utilidade e uma rede elétrica. A instalação correta de todos esses componentes determina a eficiência dos painéis solares.

Embora as matrizes solares fotovoltaicas produzam energia quando expostas à luz solar, os outros componentes são necessários para converter, distribuir e armazenar adequadamente a energia que foi produzida pelos painéis solares (NATALIE KUNZ, 2021).

A figura 19 ilustra o sistema fotovoltaico e a relação de seus componentes individuais.

Figura 19 – Elementos básicos de um sistema fotovoltaico.



Fonte: (NATALIE KUNZ, 2021).

Uma matriz solar fotovoltaica (*PV array*) consiste em uma série de painéis solares fotovoltaicos que estão conectados eletricamente. A matriz solar fotovoltaica gera eletricidade DC a partir da luz solar (NATALIE KUNZ, 2021).

É importante ter em mente que sistemas fotovoltaicos devem ser instalados em estruturas de montagem estáveis que possam suportar a matriz e suportar condições climáticas como vento, chuva e corrosão para as próximas décadas (SOLAR ENERGY INTERNATIONAL, 2013).

Os controladores de carga (*charge controller*) regulam o DC dos painéis solares para garantir que as baterias não sobrecarreguem. Um controlador de carga pode medir se as baterias estão totalmente carregadas e pode impedir que a corrente flua para evitar que as baterias sejam danificadas permanentemente (NATALIE KUNZ, 2021).

Como nem todo sistema fotovoltaico possui um banco de baterias solares, nem sempre é necessário incluir um controlador de carga em seu sistema. Em outras palavras, só é necessário um controlador de carga na presença de um banco de baterias (SOLAR ENERGY INTERNATIONAL, 2013).

Um banco de baterias (*battery bank*) garante que nenhuma energia não consumida seja desperdiçada, pois armazena a energia que está sendo produzida pela matriz fotovoltaica e não é consumida imediatamente. Assim, o banco de baterias permite o abastecimento de energia durante a noite ou durante um tempo muito nublado (NATALIE KUNZ, 2021).

Incluir um banco de baterias nos sistemas fotovoltaicos é opcional, mas pode dobrar a quantidade de energia solar utilizável(SOLAR ENERGY INTERNATIONAL, 2013).

Um inversor de energia solar (*inverter*) é uma parte fundamental de qualquer sistema solar fotovoltaico, pois converte eletricidade de DC para AC(NATALIE KUNZ, 2021).

O medidor de utilidade (*power meter*) é o sistema que registra o consumo de eletricidade por casa ou apartamento. A partir disso, ele define a eletricidade gerada a partir dos painéis fotovoltaicos que não foi armazenada ou utilizada, a qual será alimentada de volta para a rede elétrica(SOLAR ENERGY INTERNATIONAL, 2013).

A conexão do sistema fotovoltaico à rede elétrica (*electric grid*) permite que a energia extra gerada seja entregue aos pontos que não estejam sendo alimentados durante períodos em que o sistema fotovoltaico não esteja cobrindo suas necessidades energéticas(NATALIE KUNZ, 2021).

### **3.5 Tipos de sistemas fotovoltaicos**

Conforme Kathie Zipp (2015), existem três tipos principais de energia solar fotovoltaica e sistemas de armazenamento: ligados à rede, redes/híbridos e off-grid. Todos eles têm suas vantagens e desvantagens e isso realmente se resume ao fornecimento de energia atual do cliente e ao que eles querem tirar do sistema.

Segundo Greenovation (2021), a diferença essencial entre o sistema conectado à rede (ou on-grid) e o sistema off-grid é que este não é ligado na rede da concessionária, funcionando com o armazenamento de energia através de baterias.

#### **3.4.1 Sistema vinculado à rede**

Kathie Zipp (2015) afirma que um sistema ligado à rede é uma instalação solar básica que usa um inversor padrão ligado à rede e não tem nenhum armazenamento de bateria. Ele é ideal para clientes que já estão na rede e querem adicionar energia solar à sua casa.

Figura 20 – Esquema de um sistema conectado à rede.



Fonte: (GREENOVATION, 2021).

Sistemas ligados à rede são simples de projetar e são muito econômicos porque têm relativamente poucos componentes. O principal objetivo de um sistema vinculado à rede é reduzir a conta de energia (KATHIE ZIPP, 2015).

### 3.4.2 Sistema ligado à rede com backup de bateria

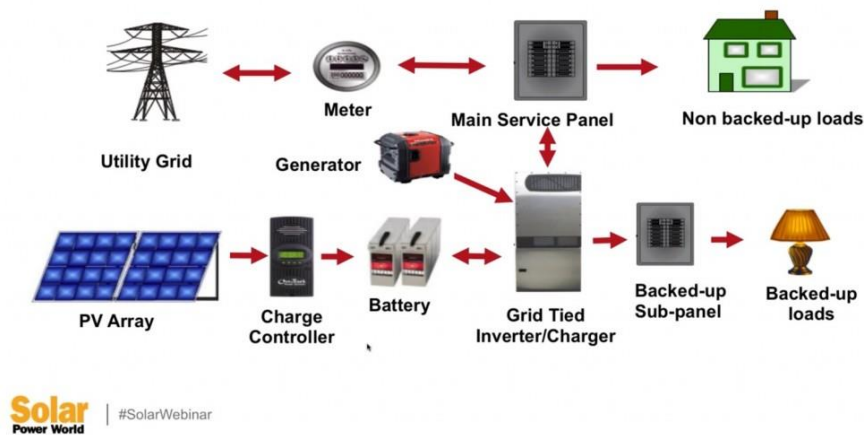
O sistema fotovoltaico ligado à rede com backup de bateria, também conhecido como sistema híbrido de rede, é aquele que permite a conexão à rede e, ao mesmo tempo, podem usufruir de backup da bateria (KATHIE ZIPP, 2015).

Bons candidatos para este tipo de sistema são clientes que são propensos a quedas de energia em sua área, ou geralmente só querem estar preparados para paralisações. Assim, se houver uma queda de energia, o backup da bateria permite a restauração da energia até que o sistema volte a funcionar (KATHIE ZIPP, 2015).

Sistemas baseados em rede com bateria fornecem energia durante uma paralisação e, com isso, é possível armazenar energia para uso em uma emergência. Porém, os contras deste sistema são que custam mais do que sistemas básicos ligados à grade, são menos eficientes e possuem mais componentes (KATHIE ZIPP, 2015).

Figura 21 – Elementos de um sistema ligado à rede com backup de bateria.

**Grid-Interactive System with Battery Backup - (Grid/Hybrid Systems)**



Fonte: (KATHIE ZIPP, 2015).

A figura 21 exibe os elementos de um sistema ligado à rede com backup de bateria.

### 3.4.3 Sistema off-grid

Os sistemas off-grid são aqueles que não são conectados à rede, sendo especiais para os clientes que, devido à localização geográfica ou alto custo para trazer a fonte de alimentação, podem se conectar facilmente à rede (KATHIE ZIPP, 2015).

Os benefícios de um sistema off grid é que o usuário pode se tornar autossuficiente deem relação à energia e pode alimentar lugares remotos longe da rede. Além disso, como o sistema é sua única fonte de energia, muitos sistemas off-grid contêm múltiplas fontes de carregamento, como solar, eólica e gerador(KATHIE ZIPP, 2015).

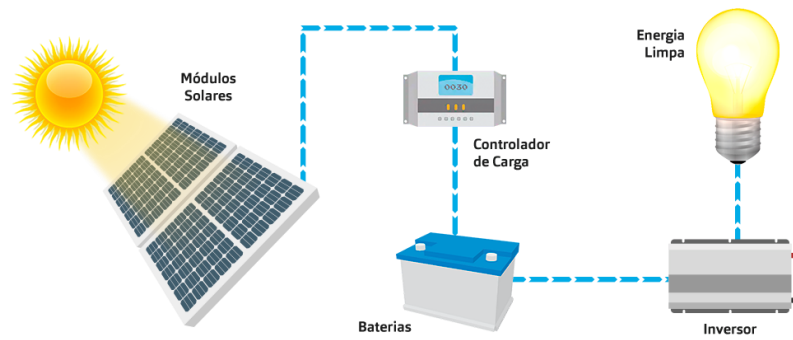
Uma desvantagem é que sistemas off-grid devem ser projetados para cobrir 100% das cargas de energia. Além disso, sistemas off-grid têm mais componentes e são mais caros do que um sistema padrão ligado à rede(KATHIE ZIPP, 2015).

O site Greenovation (2021) afirma que se trata de um sistema autônomo que dispensa a conexão com a rede elétrica de modo que o sistema fotovoltaico executa abastecimento de energia de forma direta.

Assim, em consonância com Kathie Zipp (2015), ele é ideal para a geração de energia em locais remotos, gerando energia, a qual é instantaneamente armazenada em baterias, e que posteriormente garante o abastecimento em períodos nos quais a luz solar está ausente.



Figura 22 – Elementos de um sistema ligado à rede com backup de bateria.



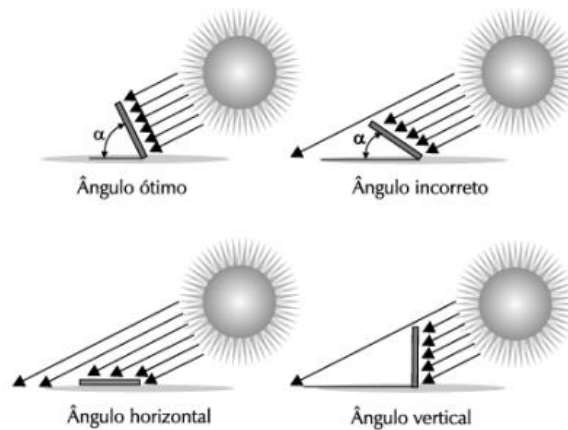
Fonte: (GREENOVATION, 2021).

A figura 22 exibe os componentes de um sistema off-grid.

## 4 PARÂMETROS PARA INSTALAÇÃO

Segundo o Solar Energy International (2004), para a instalação dos sistemas fotovoltaicos, é necessário definir um ângulo correto para a sua melhor eficiência, uma vez que a “escolha incorreta da inclinação reduz a captação dos raios solares e compromete a produção de energia elétrica pelo módulo fotovoltaico”.

Figura 23 – Efeito da inclinação do módulo fotovoltaico na captação de energia.



Fonte: (VILLALVA, 2012).

A figura 23 exibe os diferentes efeitos causados pelos diferentes ângulos de inclinação do módulo solar em relação ao solo.

No primeiro caso, percebe-se a existência de um ângulo de inclinação  $\alpha$  responsável pela incidência perpendicular dos raios solares à superfície do módulo, sendo o ângulo que produz o melhor efeito na captação da radiação solar direta.

No segundo caso, o módulo tem um ângulo de inclinação  $\alpha$  ligeiramente menor, não sendo ideal, pois é nítido que uma parte do feixe de raios solares não incide sobre o módulo, o que significa uma captação menor de energia.

Nos demais casos, os módulos são instalados na posição horizontal e vertical.

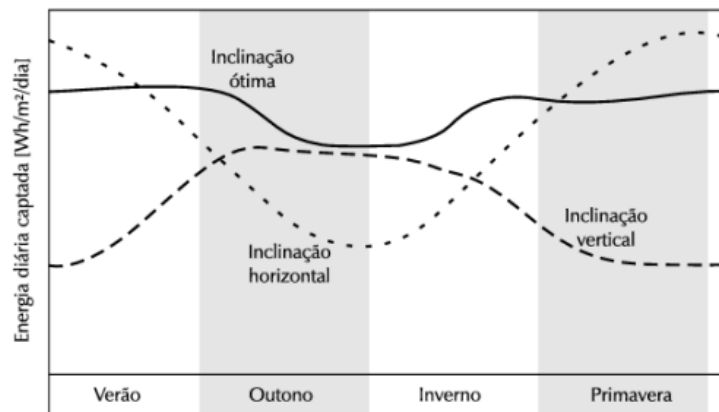
Na posição horizontal a captação de energia é defasada nos meses de inverno, quando a altura solar é menor, e otimizada nos meses de verão, quando a altura solar é maior. Contudo, na posição vertical a geração de energia é maior no inverno e menor no verão (SOLAR ENERGY INTERNATIONAL, 2004).

É inevitável a perda de eficiência ao longo dos dias e meses do ano, pois, uma vez que os ângulos dos módulos são fixos, seria necessário alterar esse posicionamento frequentemente, o que não seria viável. Todavia, é perfeitamente possível escolher um ângulo

que permita uma produção média otimizada de energia ao longo do ano (SOLAR ENERGY INTERNATIONAL, 2004).

A figura 24 apresenta um gráfico da energia captada por um módulo com três ângulos de inclinações diferentes. A depender da inclinação especificada, a energia gerada pode ser otimizada ao longo do ano, somente nos meses de verão ou somente nos meses de inverno.

Figura 24 – Energia solar captada ao longo do ano com diferentes inclinações.



Fonte: (VILLALVA, 2012).

Não há um consenso a respeito do melhor método para escolher o ângulo de inclinação para a instalação de um módulo solar, uma vez que, como dito anteriormente, a inclinação horizontal otimiza a geração de energia no verão, enquanto a inclinação vertical a geração de energia no inverno (VILLALVA, 2012).

Um dos critérios a ser adotado é a determinação de um ângulo de acordo com a latitude geográfica, permitindo uma boa geração média de energia ao longo do ano, não sendo recomendado a instalação com ângulo de inclinação inferiores a 10° para evitar o acúmulo de poeira sobre as placas (BOSCH SOLAR ENERGY).

#### 4.1 Regras fundamentais para a instalação

Segundo o Solar Energy International (2004), pode-se assumir duas regras fundamentais para a instalação de um sistema fotovoltaico:

- Regra 1: Sempre que possível, orientar o módulo com sua face voltada para o norte geográfico, pois isso maximiza a produção média diária de energia; e
- Regra 2: Ajustar o ângulo de inclinação correto do módulo com relação ao solo para otimizar a produção de energia ao longo do ano. Para isso, deve-se escolher o ângulo de

inclinação em função do ângulo da latitude geográfica da localidade onde o sistema é instalado.

Segundo o site HCC Energia Solar (2022), os seguintes fatores são essenciais para a instalação correta do sistema fotovoltaico:

- a) Ponto de instalação: deve-se buscar um ponto onde não haja nenhum resquício de sombra;
- b) Orientação: no hemisfério sul, deve-se orientar o sistema fotovoltaico para o norte geográfico, o qual não deve ser confundido com o norte magnético; e
- c) Inclinação: recomenda-se utilizar o ângulo da latitude local.

Na prática, o ângulo de inclinação utilizado é, muitas vezes, o mesmo ângulo da inclinação do telhado, pois isso ameniza os efeitos indesejados do vento sobre os painéis. Porém, isso não é recomendado para alcançar o maior grau de eficiência energética.

O site HCC Energia Solar (2022) recomenda uma fórmula para calcular a inclinação do painel, dada por “inclinação = latitude + (latitude/3)”. Contudo, essa fórmula é questionável.

De acordo com Villalva (2020), o ângulo de inclinação deve ser dado pela latitude  $L-23,45^\circ$  no solstício de verão, quando a altura solar é máxima, e  $L+23,45^\circ$  no solstício de inverno, quando a altura solar é mínima.

Contudo, para otimizar a produção de energia durante todo o verão, e não somente no solstício, recomenda-se utilizar a inclinação como  $L-15^\circ$  e para otimizar a produção durante o todo inverno, recomenda-se  $L+15^\circ$ .

Essa fórmula é recomendada por vários autores pelo fato de que  $15^\circ$  corresponde ao “valor médio entre os ângulos de declinação solar mínimo e máximo, entre os equinócios e os solstícios”.

Entretanto, a fim de manter uma média geral de produção durante todo o ano, é recomendável inclinar os módulos com o próprio ângulo de latitude  $L$  do local. Porém, para uma escolha mais assertiva, pode-se realizar análises via softwares como o PVSyst, que traz um banco de dados solarimétricos históricos, considerando também fatores climáticos e não somente geométricos para a escolha da inclinação.

## 5 METODOLOGIA

Para verificar o efeito provocado pela inclinação do módulo fotovoltaico em seu rendimento energético foi realizado um estudo de caso na cidade de Bueno Brandão – MG.

Nesse estudo, foi realizada uma comparação de dois módulos fotovoltaicos com todos os parâmetros definidos igualmente, exceto o ângulo de inclinação.

Ambos os sistemas estavam orientados na direção nordeste, possuindo 7 módulos BYD 390W, com inversor Growatt 3000TL-X.

Os dados levantados são de janeiro a julho de 2022.

Para o estudo, o módulo fotovoltaico pertencente ao projeto 1036 foi inclinado com  $13^\circ$  e o módulo pertencente ao projeto 1037 com  $19^\circ$ . Os ângulos utilizados foram escolhidos com base na inclinação do telhado.

A figura 25 mostra uma fotografia do projeto 1036.

Figura 25 – Projeto 1036.



Fonte: (O AUTOR, 2022).

Já a figura 26 mostra uma fotografia do projeto 1037.

Figura 26 – Projeto 1037.



Fonte: (O AUTOR, 2022).

A figura 27 apresenta uma fotografia do inversor Growatt, integrado em ambos os projetos, mais a sua ficha técnica.

Figura 27 – Inversor Growatt e sua ficha técnica.



Fonte: (O AUTOR, 2022).

Para a coleta dos dados a respeito da produção de energia dos sistemas fotovoltaicos, foi utilizado o site de monitoramento da Growatt, o qual, por meio do smartphone Growatt Shinephone, coleta dados em tempo real do sistema fotovoltaico conectado a ele.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o projeto 1036, pode-se perceber que, em cerca de metade do mês avaliado, a produção de energia ficou próxima de 15 kWh, ultrapassando esse valor em vários dias.

Figura 28 – Produção diária de energia do projeto 1036.



Fonte: (O AUTOR, 2022).

Para o projeto 1037, percebe-se que, ao contrário do projeto 1036, em metade do mês a produção se aproximou de 15 kWh, mas não ultrapassou e sequer alcançou esse valor.

Figura 29 – Produção diária de energia do projeto 1037.



Fonte: (O AUTOR, 2022).

Em relação à produção mensal, contata-se que, em seu ápice, a produção chegou a 400 kWh para o projeto 1036.

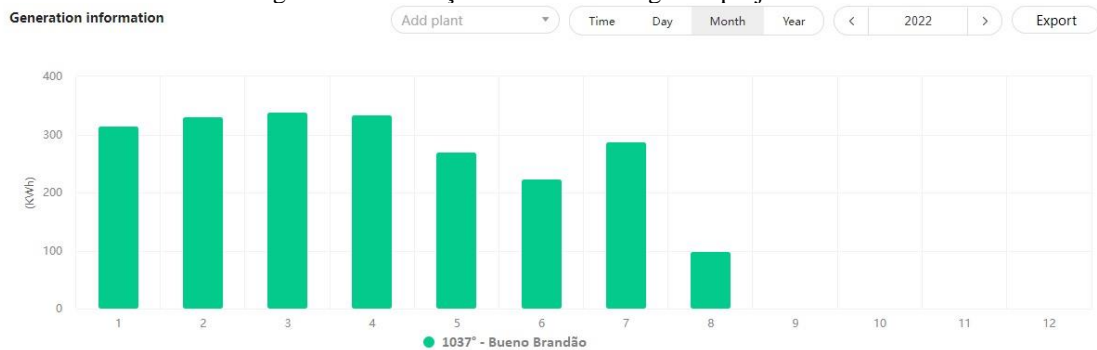
Figura 30 – Produção mensal de energia do projeto 1036.



Fonte: (O AUTOR, 2022).

Já em relação à produção mensal do projeto 1037, sua produção mais otimizada se deu no valor de cerca 350 kWh.

Figura 31 – Produção mensal de energia do projeto 1037.



Fonte: (O AUTOR, 2022).

Em ambos os projetos, o melhor mês de produção foi o de março, podendo-se constatar que o sistema fotovoltaico do projeto 1036, inclinado com 13°, desempenhou um rendimento mais otimizado que o sistema do projeto 1036, inclinado com 19°, podendo-se estimar um valor de 50 kWh de diferença para o mês de maior produção.

Pode-se deduzir, então, que apenas 6° foi responsável por uma perda de 50 kWh.



## 7 CONCLUSÃO

O presente trabalho tratou de elaborar uma pesquisa bibliográfica a respeito da energia solar, buscando explicar sua natureza e origem, os parâmetros envolvidos em sua caracterização, além de expor os fatores astronômicos, atmosféricos e ambientais relacionados a interferência da energia solar na Terra, os quais, por sua vez, definem a intensidade de energia solar e o aproveitamento que pode ser feito dele.

Também foi abordado os tipos de energia solar existentes e suas formas de captação, dando especial atenção à energia solar fotovoltaica, o qual foi objeto de estudo deste trabalho.

Foi realizada uma descrição do sistema fotovoltaico, tratando de elucidar suas principais características, assim como seu funcionamento. Foi traçada uma explicação dos tipos de células fotovoltaicas e os componentes de um sistema fotovoltaico.

Por fim, este trabalho tratou de descrever a questão envolvida com o ângulo de inclinação dos sistemas fotovoltaicos, buscando encontrar o problema envolvido nessa discussão.

Em relação a parte prática, buscou-se analisar dois sistemas fotovoltaicos definidos pelos mesmos parâmetros, porém diferenciados apenas pelos ângulos de inclinação. Com este parâmetro isolado, foi possível verificar como uma pequena diferença na angulação pode provocar um rendimento energético prejudicado.

Isso demonstra que, sem a atuação profissional, as instalações de sistemas fotovoltaicos por pessoas inexperientes podem custar caro, desestimulando o uso da energia solar por parte da sociedade, uma vez que pode-se propagar a ideia de que eles são ineficientes.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil**. [2022]. 1 infográfico. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 05 mai. 2022
- BENY. Solar PV system components. **Beny**, 2022. Disponível em: <https://www.beny.com/solar-pv-system-components-101/>. Acesso em: 01 out. 2022.
- BOSCH SOLAR ENERGY. Installation and Safety Manual of the Bosch Solar Modules c-Si M 60-225-16 c-Si M 60-230-16, c-Si M 60-235-16, c-Si M 60-240-16.
- CENTER FOR SUSTAINABLE SYSTEMS. Photovoltaic Energy Factsheet. **University of Michigan**, 2021. Disponível em: <https://css.umich.edu/publications/factsheets/energy/photovoltaic-energy-factsheet>. Acesso em: 01 out. 2022.
- COLLINS, Paul. Solar Energy: Definition, Advantages and disadvantages. **Selectra Climate**, 2022. Disponível em: <https://climate.selectra.com/en/environment/solarenergy>. Acesso em: 14 mar. 2022.
- ENERGIA SOLAR OFF GRID. **Greenovation**, 2021. Disponível em: <http://greenovation.com.br/energia-solar-off-grid/>. Acesso em: 15 out. 2022.
- ENERGIA SOLAR ON GRID. **Greenovation**, 2021. Disponível em: <https://greenovation.com.br/energia-solar-on-grid/>. Acesso em: 15 out. 2022. energy. Acesso em: 14 mar. 2022.
- GEOENGINEERING.GLOBAL. Solar Radiation Management. **Geoengineering.global**, 2014. Disponível em: <https://geoengineering.global/solar-radiation-management/>. Acesso em: 10 out. 2022.
- HCC Energia Solar. Inclinação de painel solar: saiba o que considerar em sua instalação!. **HCC Energia Solar**, 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/como-determinar-o-angulo-de-inclinacao-dos-modulos-fotovoltaicos/>. Acesso em: 15 out. 2022.
- IPCC Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment **Report to the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Genève: IPCC, 2015.
- KEMP, W. H. **The renewable energy handbook**. Aztext Press, 2009.
- KUNZ, Natalie. Solar Photovoltaic Systems in the UK (2022). **GreenMatch**, 2021. Disponível: <https://www.greenmatch.co.uk/solar-energy/photovoltaics/photovoltaic-system>. Acesso em: 12 out. 2022.
- LUCENÑO-SÁNCHEZ, José; DÍEZ-PASCUAL, Ana María; CAPILLA, Rafael. Materials for Photovoltaics: State of Art and Recent Developments. **International Journal of Molecular Sciences**, Espanha, fev. 2019. Disponível em:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6412461/pdf/ijms-20-00976.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2022.

MALISZEWSKI, Eliza. Busca por energia solar cresce 117% no Brasil. **AgroLink**, 2021. Disponível em: [https://www.agrolink.com.br/noticias/busca-por-energia-solar-cresce-117--no-brasil\\_452132.html](https://www.agrolink.com.br/noticias/busca-por-energia-solar-cresce-117--no-brasil_452132.html). Acesso em: 14 mar. 2022.

MARSH, Jacob. Solar Panel Direction And Angle: Does It Matter?. **EnergySage**, 2022. Disponível em: <https://news.energysage.com/solar-panel-performance-orientation-angle/>. Acesso em: 01 out. 2022.

MARSH, Jacob. What is solar energy?. **EnergySage**, 2021. Disponível em: <https://news.energysage.com/what-is-solar-energy/>. Acesso em: 14 mar. 2022.

PEREIRA ET AL. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

PLANAS, Oriol. Què és l'energia solar activa?. **Energia Solar**, 2017. Disponível em: <https://pt.solar-energia.net/que-e-energia-solar/energia-solar-ativa>. Acesso em: 14 mar. 2022.

RIBEIRO, Thiago. Como montar uma empresa de instalação de energia solar?. **Bao Ribeiro**, 2021. Disponível em: <https://baoribeiro.com.br/blog/como-montar-uma-empresa-de-instalacao-de-energia-solar/>. Acesso em: 14 mar. 2022.

SOLAR ENERGY INTERNATIONAL. **Solar Electric Handbook: Photovoltaic Fundamentals and Applications**. 2 ed. Pearson Learning Solutions. Boston, MA, 2013.

SOLAR ENERGY INTERNATIONAL. **Photovoltaics design and installation manual**. New Society Publishers, 2004.

TIBA, C. **Atlas Solarimétrico do Brasil**. Recife: UFPE, 2000.

TOLMASQUIM, Mauricio. **Energia Renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica**. 1. ed. EPE: Rio de Janeiro, 2016.

TURGEON, Andrew; MORSE, Elizabeth. Solar Energy. **National Geographic Society**, 2022. Disponível em: <https://education.nationalgeographic.org/resource/solar-energy>. Acesso em: 10 out. 2022.

VIANELLO, R. L., ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. S. L.: Editora UFV. 2013.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.

VILLALVA, Marcelo. Como determinar o ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos? **Canal Solar**, 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/como-determinar-o-angulo-de-inclinacao-dos-modulos-fotovoltaicos/>. Acesso em: 15 out. 2022.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric science: an introductory survey**. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2006.

WENDT, Zach. 5 Methods of Harvesting Solar Energy. **Arrow**, 2020. Disponível em: <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/5-methods-of-harvesting-solar-energy>. Acesso em: 01 out. 2022.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2. ed. London: Academic Press, 2006.

YAMASOE, M. A., CORRÊA, M. P. **Processos radiativos na atmosfera: fundamentos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

ZIPP, Kathie. What are some common types of solar PV and storage installations?. **Solar Power World**, 2015. Disponível em: <https://www.solarpowerworldonline.com/2015/10/what-are-some-common-types-of-solar-pv-and-storage-installations/>. Acesso em: 03 out. 2022.