

Projeto de Graduação



27 de junho de 2021

# **Eficiência energética em sistemas fotovoltaicos**

Ana Beatriz Pinheiro Soares



[www.ele.puc-rio.br](http://www.ele.puc-rio.br)

Projeto de Graduação



## **Eficiência energética em sistemas fotovoltaicos**

**Aluna: Ana Beatriz Pinheiro Soares**

**Orientador: Rodrigo Flora Calili**

Trabalho apresentado com requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

## **Agradecimentos**

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, por iluminar a minha caminhada, principalmente durante esse período de muitos aprendizados. Depois a família, pela dedicação, amor, carinho e apoio diário nessa jornada, que está apenas no começo, em especial ao meu pai que me concedeu sua bolsa para conclusão desse curso e ao meu esposo que me apoiou de maneira indispensável para que fosse possível chegar até aqui. Depois a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, pela bolsa, por todo apoio digital e psicológico nessa jornada. Aos meus amigos de estudos, e brevemente de profissão, que fizeram a diferença para que eu pudesse tirar o melhor proveito de toda essa fase. Aos professores, e principalmente à Rodrigo Flora Calili, que, de forma muito solícita, me forneceu informações imprescindíveis, sem as quais não seria possível a realização deste projeto. Por fim, agradeço ao coordenador do curso, Guilherme Temporão, por toda atenção e ensinamentos que iremos levar por toda a nossa vida.

## Resumo

Este trabalho tem como objetivo analisar impactos sobre eficiência energética em um sistema fotovoltaico, evidenciando assim que sistemas melhor estudados tendem apresentar maiores rendimentos no aproveitamento solar fotovoltaico. Dessa forma é possível provar que a escolha do local de implementação da usina, tendo em vista que a irradiação solar varia a depender do local. Além disso, como a escolha adequada dos equipamentos deve-se considerar a temperatura de operação como fator determinante para a eficiência. Neste trabalho é feita uma análise, dentre as diferentes tecnologias disponíveis, à luz do impacto da temperatura de operação quais podem apresentar maior rendimento e avaliar os fatores determinantes para o aproveitamento solar pela geração fotovoltaica. Para tanto, são considerados sistemas em geração centralizada e distribuída afim de evidenciar os impactos reais na eficiência de projetos fotovoltaicos. A escolha adequada dos equipamentos deve-se considerar a temperatura de operação como fator determinante para a eficiência. Pois, como podemos observar nos projetos apresentados no decorrer desse trabalho ela é um grande fator de perda de eficiência, entre 10,5% e 11% nas simulações feitas nos projetos propostos. O impacto da temperatura em diferentes arranjos de instalação indicou que a eficiência é dependente da instalação utilizada. Ou seja, em arranjo livres, típicos de usinas centralizadas, o impacto da temperatura é menor, se comparado às instalações integradas às edificações comumente da aplicação para geração distribuída.

**Palavras-chave: energia solar fotovoltaica; temperatura; eficiência energética**

## Energy efficiency in photovoltaic systems

### Abstract

This work aims to analyze impacts on energy efficiency in a photovoltaic system, thus showing that better studied systems tend to have higher yields in solar photovoltaic use. In this way, it is possible to prove that the choice of the plant implementation site, considering the solar irradiation, varies depending on the location, as well as the proper choice of equipment. Besides, the operating temperature must be considered as a determining factor for efficiency. In this work we analyze, among the different technologies available, the impact of the operating temperature, which ones can have higher yields and evaluates the determining factors for solar exploitation by photovoltaic generation, such as irradiance. Thus, the centralized and distributed generation are considered to highlight the real impacts on the efficiency of photovoltaic projects. The proper choice of equipment must consider the operating temperature as a determining factor for efficiency. Because, as we can see in the projects presented in the course of this work, it is a big factor in the loss of efficiency, between 10.5% and 11% in the simulations carried out in the proposed projects. The impact of temperature on different installation arrangements indicated that efficiency is dependent on the installation used. In other words, in free arrangements, typical of centralized plants, the impact of temperature is smaller, if compared to installations integrated to buildings commonly used for distributed generation applications.

**Keywords: photovoltaic solar energy; temperature; energy efficiency**

## Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Geração Centralizada.....  | 11 |
| Figura 2: Expansão da Geração Centralizada Solar.....                              | 11 |
| Figura 3: Composição tecnológica da matriz MMGD.....                               | 13 |
| Figura 4 : Célula Fotovoltaica.....  | 14 |
| Figura 5 : Módulo OPV.....   | 14 |
| Figura 6 : Módulos Monocristalino.....   | 15 |
| Figura 7: Módulo Policristalino.....   | 15 |
| Figura 8: Curva do módulo fotovoltaico em diferentes temperaturas de operação..... | 16 |
| Figura 9: Relação entre eficiência e temperatura.....                              | 17 |
| Figura 10: Inversor <i>string</i> .....  | 18 |
| Figura 11: Microinversor. Fonte: APsystems,2021.....                               | 19 |
| Figura 12: Esquema de ligação no microinversor.....                                | 19 |
| Figura 13: Componentes da irradiância solar.....                                   | 20 |
| Figura 14: Frações da luz solar.....   | 21 |
| Figura 15: Trajetória do sol durante o ano. Fonte:.....                            | 21 |
| Figura 16: Irradiação brasileira.....  | 22 |
| Figura 17: Variação da irradiação global nas regiões brasileiras.....              | 22 |
| Figura 18: Relações geométricas dos raios solares.....                             | 23 |
| Figura 19: Rastreador Solar.....   | 24 |
| Figura 20: Comparação de energia gerada fixo x rastreador.....                     | 24 |
| Figura 21: Rastreador Solar de um eixo. Fonte:.....                                | 25 |
| Figura 22: Rastreador solar de dois eixos.....                                     | 25 |
| Figura 23: Otimizador.....   | 26 |
| Figura 24: Otimizadores de dois módulos.....                                       | 26 |
| Figura 25: Localização do projeto desenvolvido de pequeno porte.....               | 27 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 26: Projeto desenvolvido de usina de pequeno porte. ....                              | 27 |
| Figura 27: Resultado do sistema desenvolvido de pequeno porte. Fonte: HelioScope, 2021 ..... | 28 |
| Figura 28: Resultado da usina desenvolvida de pequeno porte com otimizadores. ....           | 30 |
| Figura 29: Usina desenvolvida de grande porte. Fonte: HelioScope, 2021 .....                 | 30 |
| Figura 30: Configurações da usina de grande porte. Fonte: HelioScope, 2021 .....             | 31 |
| Figura 31: Resultado da usina desenvolvida de grande porte. ....                             | 31 |
| Figura 32: Usina desenvolvida de grande porte. ....  | 32 |
| Figura 33: Componentes utilizados na usina desenvolvida de grande porte. ....                | 32 |
| Figura 34: Resultado da usina desenvolvida de grande porte. ....                             | 33 |
| Figura 35: Perdas da usina desenvolvida de grande porte. ....                                | 33 |

## Lista de Tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1: Maiores usinas fotovoltaica no Brasil. Fonte: Confecção própria.....                    | 11 |
| Tabela 2: Projeção MMDG 2050. Fonte: PNE, 2050 .....  | 12 |
| Tabela 3: Componentes utilizados na usina desenvolvida de pequeno porte. ....                     | 28 |
| Tabela 4: Resultado do sistema desenvolvido de pequeno porte.....                                 | 28 |
| Tabela 5: Componentes utilizados na usina desenvolvida de pequeno porte com<br>otimizadores. .... | 29 |
| Tabela 6: Resultado com a utilização de otimizadores.....   | 29 |
| Tabela 7: Resultado da planta de geração compartilhada com estrutura fixa. ....                   | 31 |

## Sumário

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1. | Introdução.....                                    | 10 |
| 2. | Sistemas Fotovoltaicos.....                        | 10 |
| a. | Efeito fotovoltaico .....                          | 10 |
| b. | Tipos de gerações .....                            | 11 |
| 3. | Principais equipamentos.....                       | 13 |
| a. | Módulos.....                                       | 13 |
| b. | Inversores.....                                    | 17 |
| 4. | Variáveis que influenciam o desempenho .....       | 20 |
| a. | Irradiância.....                                   | 20 |
| b. | Ângulo azimutal e inclinação dos módulos.....      | 23 |
| 5. | Componentes que otimizam a geração de energia..... | 24 |
| a. | <i>Tracker</i> .....                               | 24 |
| b. | Otimizadores.....                                  | 26 |
| 6. | Análise de plantas fotovoltaicas junto.....        | 27 |
| a. | Planta junto à carga .....                         | 27 |
| b. | Planta de geração compartilhada.....               | 30 |
| 7. | Conclusão .....                                    | 34 |
| 8. | Referência e Bibliografia.....                     | 35 |

## 1. Introdução

A energia solar tem se mostrado cada vez mais como uma fonte de energia necessária e presente no cenário energético brasileiro. A disponibilidade de recursos renováveis coloca o Brasil em uma situação de destaque na busca pela mitigação dos efeitos das mudanças climáticas. A utilização da energia no mundo corresponde a aproximadamente dois terços do total de gases de efeito estufa emitidos atualmente. Isso deixa o setor energético em uma posição de liderança no desenvolvimento e ampliação do uso de tecnologias menos poluentes. Entretanto, as tecnologias renováveis também são impactadas pelas mudanças climáticas, o que aponta diversas possibilidades de estudos para viabilização destas tecnologias em maior escala mundial (MIDEKSA & KALLBEKKEN, 2010).

O potencial solar no Brasil apresenta destaque ao ser comparado, através dos níveis de irradiação observados no país, com os níveis observados em países do hemisfério norte (MARTINS et al., 2007). Conforme será observado ao longo do estudo até mesmo no Brasil o nível de irradiação presente no hemisfério sul é significativamente menor quando comparado com os níveis presentes no hemisfério norte.

Por conta do grande potencial evidenciado na energia solar os equipamentos seguem evoluindo constantemente, além disso cada vez mais surgem tecnologias que oferecem uma melhor eficiência na geração.

No nível de módulos, também há aprimoramentos constantes. Nos últimos anos, os módulos aumentaram seu tamanho padrão, de cerca de 1.6 m<sup>2</sup> para 2 m<sup>2</sup>, o número de células foi incrementado e novas configurações foram propostas, com uso de células cortadas ao meio, e com o polímero posterior sendo substituído por um segundo vidro, permitindo o aproveitamento da radiação nesta face (em células que tenham essa característica), nos chamados módulos bifaciais, que oferecem uma maior eficiência do que os módulos tradicionais. (PNE, 2020)

Este trabalho tem como objetivo analisar impactos sobre eficiência energética em um sistema fotovoltaico, evidenciando assim que sistemas melhor estudados tendem apresentar maiores rendimentos no aproveitamento solar fotovoltaico.

Com isto será analisado: os tipos de gerações, os impactos na eficiência do sistema fotovoltaico de módulos e inversores, como a irradiância e o ângulo azimutal influenciam na eficiência energética do sistema, a utilização de *tracker* e otimizadores na eficiência dos sistemas fotovoltaico e por fim através de simulações em alguns projetos verificaremos como os impactos apontados e discutidos anteriormente afetam a eficiência do projeto.

## 2. Sistemas Fotovoltaicos

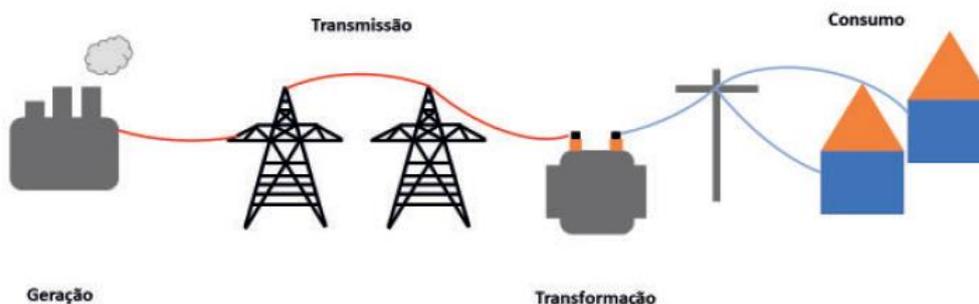
### a. Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico consiste na conversão de fótons em corrente elétrica, tendo sido observado pela primeira vez em 1839 por Alexandre-Edmond Becquerel após ter exposto uma célula eletrolítica (composta por cloreto de prata em uma solução ácida conectada com eletrodos de platina) à luz (AYRÃO, 2018).

## b. Tipos de gerações

A geração energia pode se dividir em duas grandes categorias que são: geração centralizada e geração distribuída.

Por conta da necessidade de geração e fornecimento de energia existem usinas hidrelétricas, termonucleares, termoeletrica, bem como usinas fotovoltaicas e usinas eólicas. Em função de suas características técnicas e físicas se encontram em regiões afastadas dos grandes centros urbanos. De modo geral, geração centralizada geralmente consiste em usinas de grande porte de gerações de energia e geralmente localizadas longe dos centros de distribuição, tendo a necessidade se construir linhas de transmissão.



**Figura 1: Geração Centralizada.**

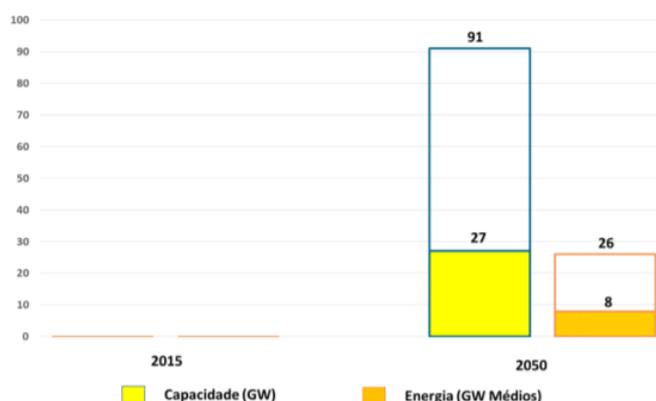
Fonte: AYRÃO, 2018

As maiores usinas fotovoltaicas no Brasil são apresentadas na tabela 1.

**Tabela 1: Maiores usinas fotovoltaica no Brasil. Fonte: Confecção própria**

| Nome da usina           | Potência (MW) | Cidade-UF                           |
|-------------------------|---------------|-------------------------------------|
| Usina Solar São Gonçalo | 475           | São Gonçalo – PI                    |
| Usina Solar Pirapora    | 321           | Pirapora – MG                       |
| Usina Solar Nova Olinda | 292           | Nova Olinda – Ribeira do Piauí – PI |
| Usina Solar Ituverava   | 292           | Tabocas do Brejo Velho – BA         |

Segundo o relatório do PNE (Plano Nacional de Energia) de 2050 a geração centralizada de energia solar deve atingir ao em torno de 27 e 90 GW em termo de capacidade instalada e entre 8 e 26 GW médio em termo de energia, resultando em um aumento na matriz elétrica entre 5 e 16% em capacidade instalada e 4 a 12% em energia. Conforme pode ser visto na figura 2.



**Figura 2: Expansão da Geração Centralizada Solar.**

Fonte: PNE, 2050

A geração distribuída é expressão utilizada para identificação de geração elétrica junto ou próximo ao consumidor. Segundo a definição do INEE (Instituto Nacional de Eficiência Energética, 2021):

*"Geração Distribuída (GD) é uma expressão usada para designar a geração elétrica realizada junto ou próxima do(s) consumidor(es) independente da potência, tecnologia e fonte de energia. As tecnologias de GD têm evoluído para incluir potências cada vez menores. A GD inclui:*

- Cogeneradores
- Geradores que usam como fonte de energia resíduos combustíveis de processo;
- Geradores de emergência;
- Geradores para operação no horário de ponta;
- Painéis fotovoltaicos;
- Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH's."

Segundo a Resolução Normativa Nº 482/2012a micro ou minigeração distribuída são definidas:

*I - Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;*

*II - Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5MW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;*

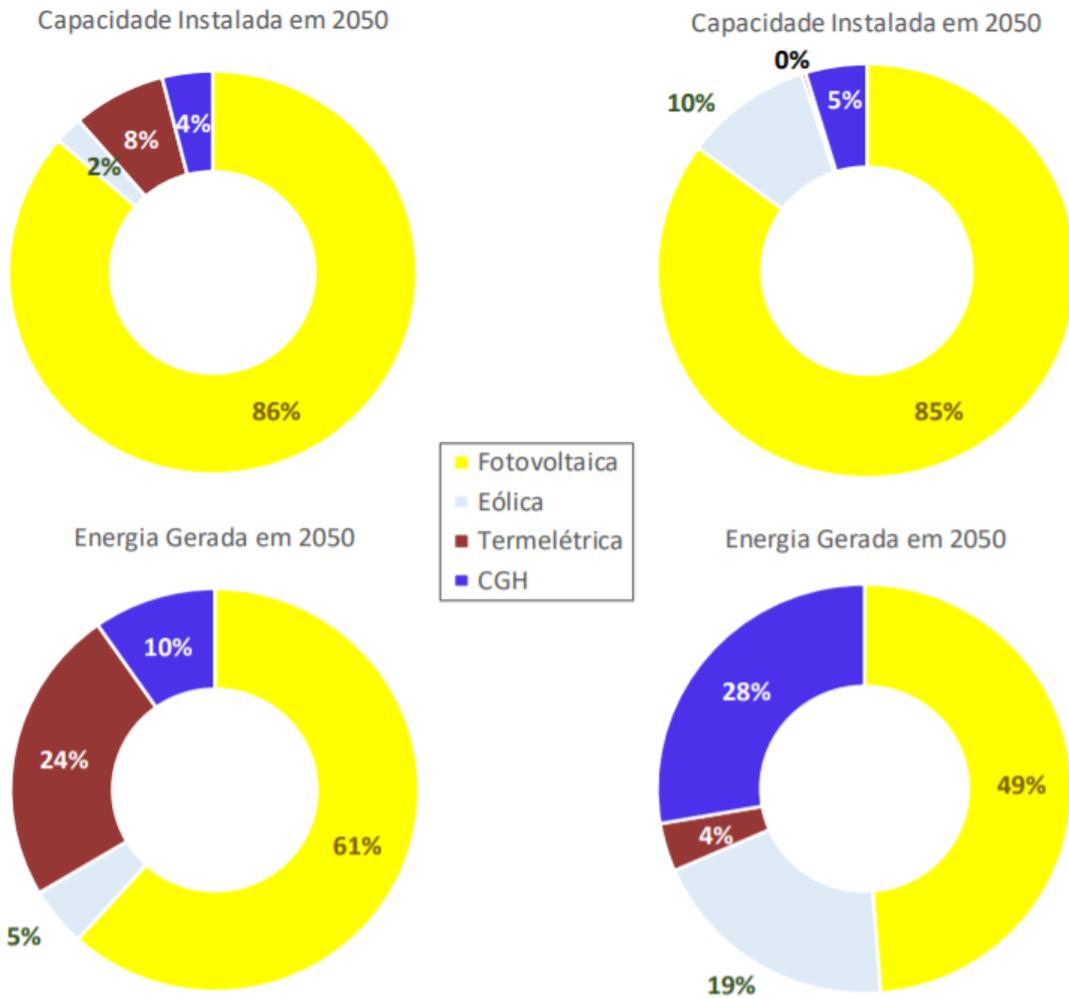
Segundo o relatório do PNE em junho 2019 a marca de 1 GW foi atingida e superou a expectativa que o setor tinha para a modalidade de micro e minigeração distribuída (MMGD).

Ainda segundo o relatório do PNE a GD alcançaria entre 28 e 50 GW em 2050 o que representaria cerca de 4 a 6% da carga total, conforme a tabela abaixo.

**Tabela 2: Projeção MMGD 2050. Fonte: PNE, 2050**

| Indicador                | 2030       |                     | 2040       |                     | 2050       |                     |
|--------------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|
|                          | Estagnação | Desafio da Expansão | Estagnação | Desafio da Expansão | Estagnação | Desafio da Expansão |
| Potência Instalada (MW)  | 3.180      | 13.669              | 5.525      | 27.728              | 8.395      | 49.888              |
| Energia Gerada (MWmédio) | 1.146      | 2.720               | 2.092      | 5.729               | 3.664      | 10.452              |
| % da Carga Total         | 1,6        | 2,5                 | 2,8        | 3,9                 | 4,8        | 5,6                 |

Como destacado abaixo (figura 3), podemos observar que com base na projeção apresentada a composição tecnológica da matriz energética de geração distribuída seria predominantemente de energia solar.



**Figura 3: Composição tecnológica da matriz MGD.**

Fonte: PNE, 2050

Quando se pensa em eficiência, a geração distribuída apresenta entre muitos benefícios um que se destaca por como apresenta geração próxima ao local do consumo, pois há redução de perdas técnicas pela passagem da corrente elétrica nas linhas de transmissão e distribuição, bem como no uso dos transformadores no complexo sistema elétrico centraliza.

### 3. Principais equipamentos

A escolha dos equipamentos é crucial quando se discute a eficiência energética do projeto de geração solar, tendo em vista que a escolha de um inversor sem a consideração das diferentes angulações de um telhado entre outras variáveis pode acarretar uma perda significativa da eficiência do projeto e por consequência inviabilizar um negócio.

Na próxima seção serão apresentadas algumas tecnologias de módulos fotovoltaicos que se encontram no mercado brasileiro. Na seção seguinte, serão apresentados os inversores que também se encontram no mercado nacional.

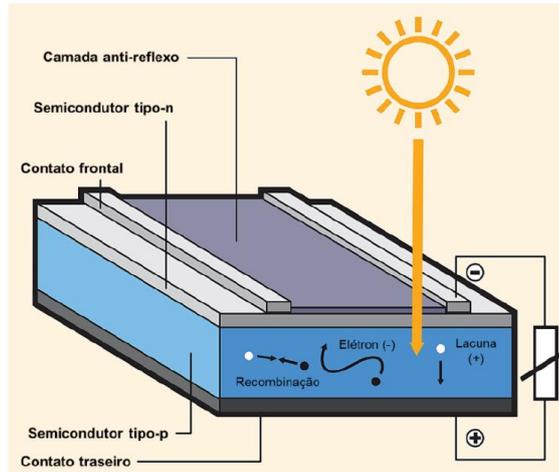
#### a. Módulos

O efeito fotovoltaico consiste na conversão de fótons em corrente elétrica e foi observado pela primeira vez em 1839 por Alexandre-Edmond Becquerel após ele expor uma célula eletrolítica (composta por cloreto de prata em uma solução ácida conectada com eletrodos de platina) à luz.

O módulo é constituído por células fotovoltaicas interligadas elétrica e mecanicamente, o fluxo de partículas eletromagnéticas caracterizado como fótons, que por sua vez são altamente enérgicos, e a

partir de reações fotoelétricas em semicondutores as células fotovoltaicas podem converter a luz solar em energia elétrica.

Os semicondutores que constituem as células fotovoltaicas são formados por camadas que a partir da adição de impurezas possibilitam a criação de um campo elétrico em uma interface de junção p-n (figura 4).



**Figura 4 : Célula Fotovoltaica.**

**Fonte: SIMIONI, 2017**

Os semicondutores que constituem as células fotovoltaicas são formados por camadas que a partir da adição de impurezas possibilitam a criação de um campo elétrico em uma interface de junção p-n.

Os módulos fotovoltaicos são geralmente nomeados e classificados conforme a sua composição e fabricação. Dentre as principais tecnologias destacam-se: a silício cristalino que são a tecnologia mais utilizada no mercado, e a tecnologia filmes finos ou OPV.

### Tecnologia OPV

Módulos com tecnologia OPV (figura 5), devido a sua composição costumam ser módulos mais maleáveis e mais leves possibilitando a instalação em diversas estruturas, possuem uma menor perda em decorrência a temperatura que os de tecnologia silício cristalino, entretanto possuem uma eficiência menor do que os módulos de tecnologia silício cristalino, além de uma menor vida útil.



**Figura 5 : Módulo OPV.**

**Fonte: Sebrae Setorial Energia, 2021**

### Tecnologia Silício Monocristalino

Módulos com tecnologia silício cristalino (c-Si) possuem cerca de 85% da produção mundial segundo o (Portal Solar, 2021) e podem ser classificadas como: monocristalinos, policristalinos. Um cristal único e uniforme é utilizado para tecnologia monocristalina, já a tecnologia policristalina se utiliza de cristais multifacetados. O arranjo cristalino da célula fotovoltaica constitui a diferença entre os dois. Na figura 6, podem ser vistas a parte da frente e de trás de um módulo monocristalino.



**Figura 6 : Módulos Monocristalino.**

**Fonte: Trina Solar, 2021**

Os monocristalinos são submetidos a um processo de fabricação muito mais rigoroso que os policristalinos e podendo apresentar uma eficiência de até 25% enquanto os policristalinos costumam assumir eficiência entre 12% e 15%. Além disso módulos monocristalinos apresentam uma maior capacidade de geração quando comparados com policristalinos (figura 7). Apesar disso, os módulos monocristalinos e têm um processo de fabricação mais complexo, que requer maior uso e recursos em sua fabricação, gerando maior impacto ambiental.



**Figura 7: Módulo Policristalino.**

**Fonte: Trina Solar, 2021**

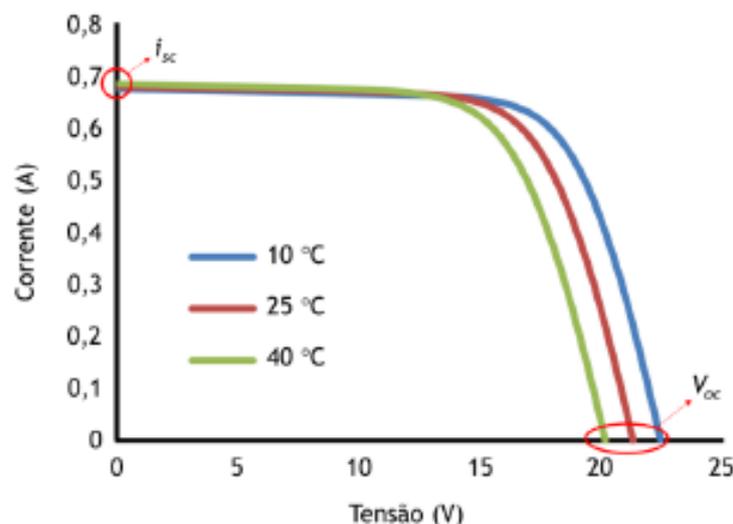
## Eficiência

Segundo HERSCH (1982) os principais fatores para perda de eficiência em células fotovoltaicas são:

- Reflexão na superfície da célula;
- Não absorção de fótons que não possuem energia suficiente para separar os elétrons das ligações atômicas;
- Não absorção de fótons com energia além daquela necessária para separar os elétrons das ligações atômicas;
- Não aproveitamento dos fótons que produziram elétrons e lacunas que se unem ou recombinam aleatoriamente antes de contribuir para o desempenho da célula;
- Neutralização de elétrons e lacunas que se recombinaram na superfície ou nos defeitos internos dos materiais da célula;
- Resistência à corrente elétrica;
- Auto sombreamento dos contatos da superfície superior;
- Degradação causada pela operação em temperaturas diferentes da ideal.

O efeito da temperatura em células fotovoltaicas é o principal e mais representativos fatores de perda.

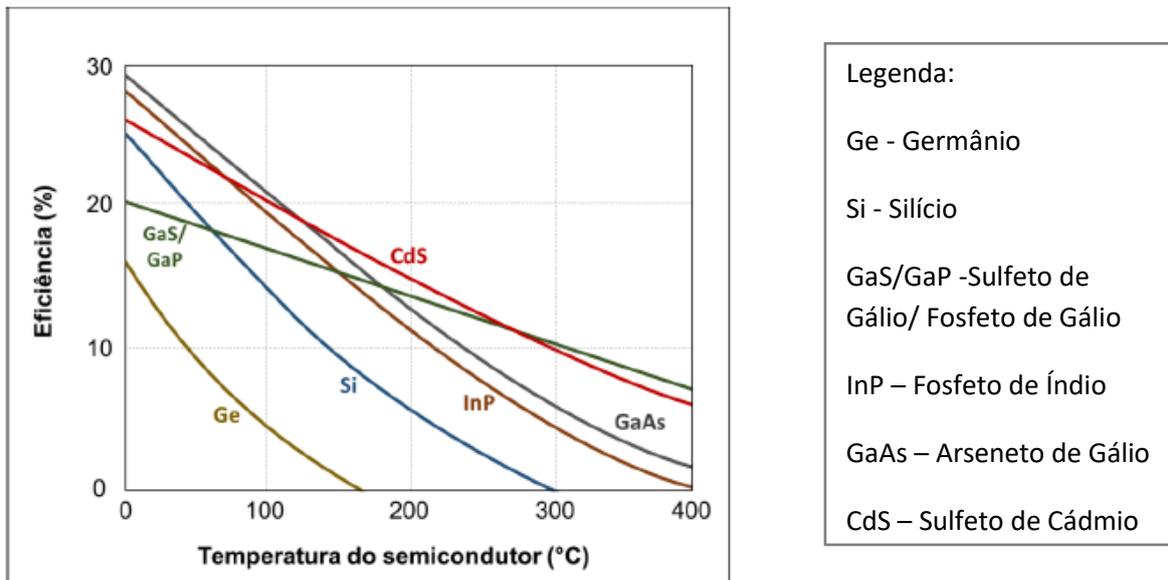
A operação dos módulos é sempre maior que a temperatura ambiente devido aos a troca térmica entre os módulos, seus componentes e o ambiente. O aumento da temperatura das células leva à redução do *bandgap* do semiconductor, o que eleva a corrente de curto-circuito ( $i_{sc}$ ) e diminui a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), conforme ilustrado na figura 8. O aumento de  $i_{sc}$  e a diminuição de  $V_{oc}$  geram perdas de eficiência e consequente redução da potência gerada. (SHARMA & CHANDEL, 2013; CHANDER et al., 2015).



**Figura 8: Curva do módulo fotovoltaico em diferentes temperaturas de operação.**

**Fonte: SIMIONI, 2017**

Vale ressaltar que diferentes tecnologias possuem diferentes relações entre temperatura de operação e eficiência de conversão. A figura 9 expressa a relação entre temperatura e eficiência para diversas tecnologias.



**Figura 9: Relação entre eficiência e temperatura.**

Fonte: SIMIONI, 2017

## b. Inversores

O efeito fotovoltaico consiste na conversão de fótons em corrente elétrica e foi observado pela primeira vez em 1839 por Alexandre-Edmond Becquerel após ele expor uma célula eletrolítica (composta por cloreto de prata em uma solução ácida conectada com eletrodos de platina) à luz.

Para se garantir um projeto eficiente energeticamente a escolha do inversor é fundamental e precisa considerar alguns elementos como: tipo de instalação, quantidade de módulos e fatores que interferem na potência do inversor como temperatura.

Os inversores são equipamentos que convertem energia gerada pelos módulos em corrente contínua em corrente alternada com tensão e frequência compatível com a concessionária de distribuição de energia. De modo geral, os inversores possuem duas principais características que são: maximizar a energia gerada pelos módulos e convertê-la de corrente contínua para alternada.

Esses por sua vez podem ser divididos em duas tecnologias: o inversor *string* e os com tecnologias MLPE que são microinversores e inversores que se utilizam de otimizadores, apesar do uso da tecnologia *string* ser predominante no Brasil.

Assim como os módulos existem algumas tecnologias em inversores fotovoltaicos, entre as principais estão duas: o inversor *string* e o microinversor.

### Seguidor de Máxima Potência

Como o nome diz o seguidor de ponto de potência máxima (SPPM), mas comumente conhecido como MPPT tem como função ajustar a entrada do inversor aos valores de potência variáveis que o gerador produz, obtendo em todo momento a maior quantidade de energia disponível, ou seja, a máxima potência.

Vale ressaltar que o valor de máxima potência por sua vez varia continuamente a depender da temperatura e irradiância. Geralmente, os inversores possuem essa função já integrada.

### Eficiência de Conversão de Energia

Atualmente tem-se como padrão para análise da eficiência de inversores fotovoltaicos três opções, a máxima eficiência, a eficiência europeia e a eficiência Californiana. Para efetuar essa comparação os inversores apresentam curvas de eficiência x carregamento para três tensões de entrada diferentes, uma é utilizada para a eficiência máxima e as outras duas nas tensões limites de operação do seguidor do ponto de máxima potência (SPMP). (ALMEIDA, 2011).

A eficiência de conversão do inversor é a relação entre a energia de saída do inversor e a energia de entrada do inversor, ou seja, a razão entre a energia entregue à rede elétrica e energia oriunda dos módulos, como pode ser visto na equação (1) a seguir.

$$i_{inv} = \frac{E_{CA}}{E_{CC}} = \frac{P_{CA} \cdot dt}{P_{CC} \cdot dt} = \frac{P_{CA} \cdot dt}{P_{CC} \cdot dt + P_p \cdot dt} \quad (1)$$

$E_{CA}$  é a energia elétrica em corrente alternada

$E_{CC}$  é a energia elétrica em corrente contínua

$P_{CA}$  é a potência elétrica entregue à rede

$P_{CC}$  é a potência elétrica na entrada do inversor

$P_p$  representa a perda no processo de conversão

As perdas do inversor podem ser divididas em duas categorias: as perdas devido a condução e as perdas devido a chaveamento. Que dependem das características dos semicondutores utilizados no dispositivo, da frequência e da carga.

### Inversor String

Na tecnologia do inversor *string* módulos são ligados em conjuntos series e paralelo, formando os arranjos fotovoltaicos (*string*). Sendo assim, cada modulo fornece uma potência e a interligação deles permite obter altas potencias na entrada do inversor. Entretanto, conforme ressaltado por (AYRÃO, 2018) deve-se observar as seguintes limitações para sistemas fotovoltaicos com inversor *string*:

- Os módulos de um mesmo arranjo fotovoltaico precisam possuir as mesmas características elétricas, o que dificulta futuras reposições em caso de manutenção, ou aproveitamento de estoque;
- A geração de energia de uma série é limitada pela pior geração individual da série, deste modo, o sombreamento em único módulo prejudica a geração de toda a série, limitando em alguns casos o aproveitamento da área disponível;
- Os arranjos fotovoltaicos ligados no mesmo MPPT precisam estar na mesma direção e inclinação.



**Figura 10: Inversor string.**

**Fonte: SunGrow, 2021**

Em função das limitações citadas acima muitas vezes, para que não haja uma grande perda de eficiência no projeto, perda que mais comumente se dá devido a sombreamento, opta-se pela utilização de microinversores ou otimizadores.

## Microinversores

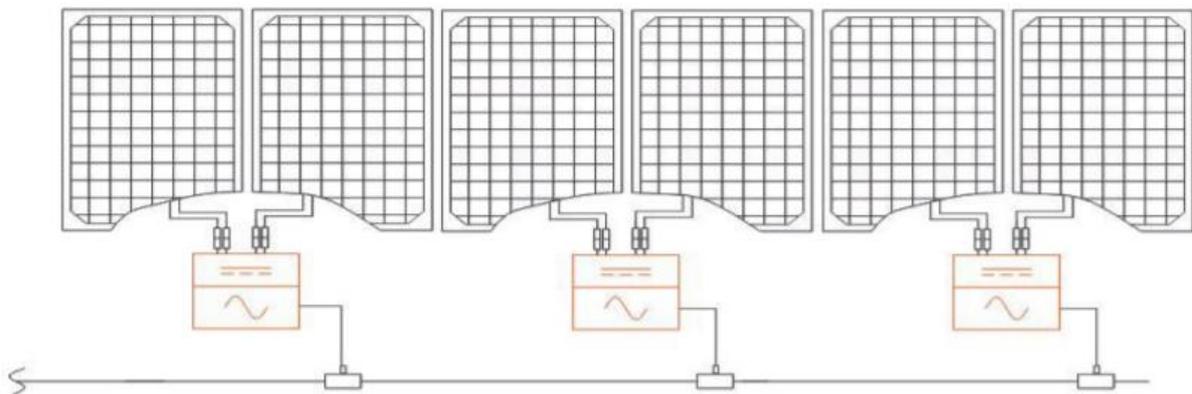
Na tecnologia dos microinversores a quantidade de módulos conectados ao microinversor está diretamente ligada a potência dos mesmos, sendo mais comum a interligação de 1 ou 2 módulos por microinversor.

Conforme definição da ABNT 16690, um microinversor pode ser definido como: "inversor onde cada entrada em corrente contínua está associada a um único dispositivo de seguimento do ponto de máxima potência – SPMP e que possui tensão máxima por entrada, em corrente contínua, não superior à faixa I da ABNT NBR 5410:2004, Tabela A.1"



**Figura 11: Microinversor.**

**Fonte: APsystems, 2021**



**Figura 12: Esquema de ligação no microinversor.**

**Fonte: APsystems, 2021**

## 4. Variáveis que influenciam o desempenho

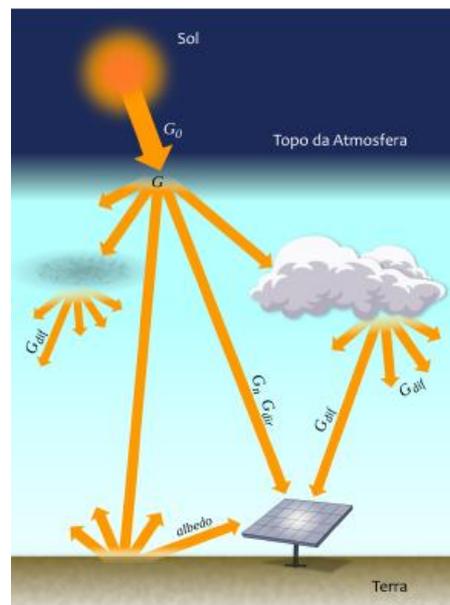
### a. Irradiância

A irradiância é um fator extremamente relevante quando falamos de eficiência em sistemas fotovoltaicos. Entretanto, antes de falar sobre irradiância precisamos antes falar de radiação solar.

A radiação solar é definida pela ABNT NBR 10899 como sendo a energia forma de transferência de energia advinda do sol, por meio da propagação de ondas eletromagnéticas (ou fótons). E irradiação solar como taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície, normalmente medida em watts por metro quadrado ( $W/m^2$ ).

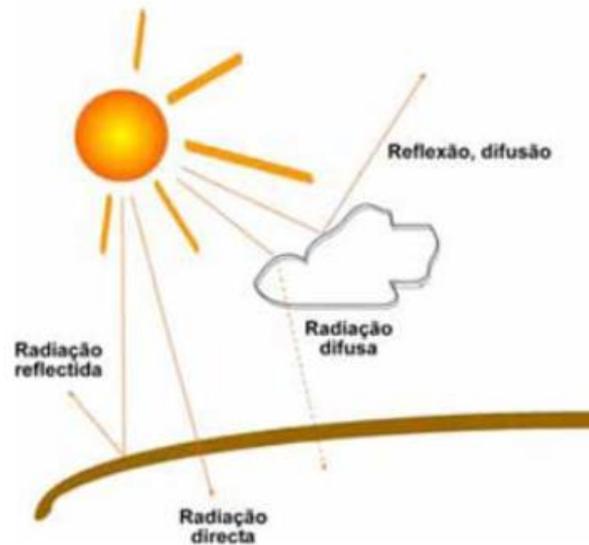
Existem duas frações que compõem a luz solar que atinge a superfície terrestre: a fração difusa e direta (figuras 13 e 14). A fração difusa é oriunda da atmosfera e depende de uma direção específica. A fração direta por sua vez segue a direção do sol e gera sombra bem definidas dos objetos. A componente difusa engloba a radiação proveniente de todas as demais direções que são correntes dos processos de espalhamento pelos gases e particulados presentes na atmosfera. A terminologia adotada por este Atlas Solar é a seguinte (figura 13):

- Irradiância extraterrestre ( $G_0$ ): é a taxa de energia incidente por unidade de área em um plano horizontal imaginário situado no topo da atmosfera. É também conhecido como irradiância no topo da atmosfera ou GTOA.
- Irradiância direta normal ( $G_n$ ): também conhecida como DNI, é a taxa de energia por unidade de área proveniente diretamente do Sol que incide perpendicularmente à superfície.
- Irradiância difusa horizontal ( $G_{d_{if}}$ ): é a taxa de energia incidente sobre uma superfície horizontal por unidade de área, decorrente do espalhamento do feixe solar direto pelos constituintes atmosféricos (moléculas, material particulado, nuvens etc.).
- Irradiância direta horizontal ( $G_{d_{ir}}$ ): é a taxa de energia por unidade de área do feixe solar direto numa superfície horizontal. Pode ser determinada como o produto entre a irradiância direta normal (DNI) e o cosseno do ângulo zenital solar.
- Irradiância global horizontal ( $G$ ): é a taxa de energia total por unidade de área incidente numa superfície horizontal. A irradiância global é dada pela soma  $G = G_{d_{if}} + G_{d_{ir}}$  ou  $G = G_{d_{if}} + G_n \cdot \cos(\theta_z)$  onde  $\theta_z$  é o ângulo zenital.
- Irradiância no plano inclinado ( $G_i$ ): é a taxa de energia total por unidade de área incidente sobre um plano inclinado na latitude do local em relação à superfície da Terra.



**Figura 13: Componentes da irradiância solar.**

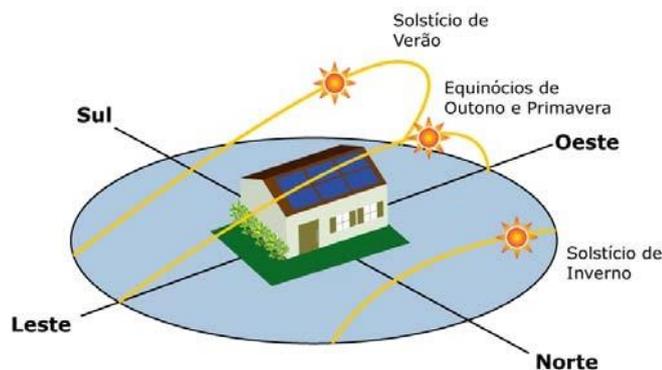
**Fonte: Atlas Solar, 2017**



**Figura 14: Frações da luz solar.**

**Fonte: IST; DGS; UE, 2004**

A irradiância solar depende da altura do Sol, que é calculada a partir de uma base horizontal. Devido à sua trajetória, a altura do Sol muda durante o dia e durante o ano, como pode ser observado na Figura 15.



**Figura 15: Trajetória do sol durante o ano. Fonte:**

**TORRES, 2012**

O nível de irradiância na Terra atinge um valor aproximado de  $1.000 \text{ W/m}^2$  ao meio-dia, em boas condições climáticas, e isso independe da localização. A irradiação global anual pode ser medida em  $\text{Wh/m}^2$  e pode-se observar uma variação de acordo com as regiões, como pode ser observado no mapa de irradiação solar global horizontal (soma das parcelas de irradiação direta e difusa) média anual para o Brasil. O mapa abaixo representa a média anual do total diário de irradiação solar global no Brasil.

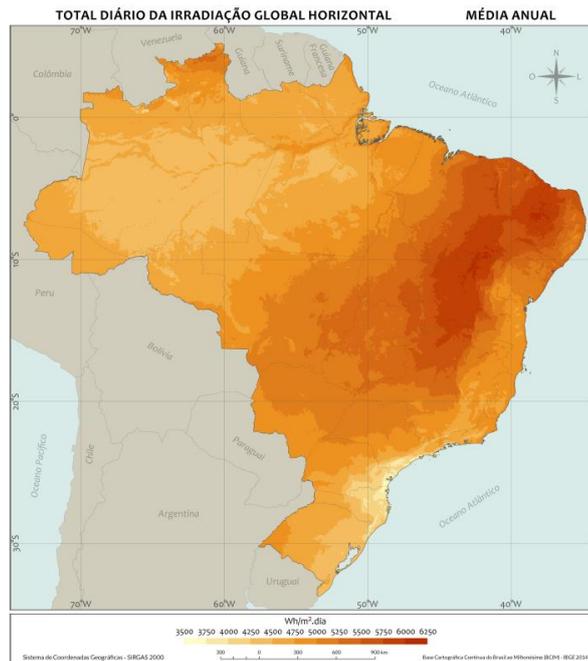


Figura 16: Irradiação brasileira.

Fonte: ATLAS BRASILEIRO, 2017

A região entre o norte do estado da Bahia, próxima ao Piauí, corresponde àquela com maiores valores de irradiação global: 6.5 kWh/m<sup>2</sup>/d. Esta região está inserida em uma grande área, que corresponde ao semiárido brasileiro, onde existe a maior disponibilidade do recurso solar no país ao longo de todo o ano. Os altos níveis de irradiação nesta região são ocasionados pelo clima e pela baixa precipitação ao longo do ano (MARTINS et al., 2007; PEREIRA et al., 2006).

A região com menor nível de irradiação global localiza-se no norte do estado de Santa Catarina, onde os valores são próximos a 4.25 kWh/m<sup>2</sup>/d. De forma geral, os estados do sul do Brasil são os que possuem os menores níveis de irradiação do país, o que se deve à alta precipitação anual e à latitude (MARTINS et al., 2007; PEREIRA et al., 2006).

É importante ressaltar a grande variabilidade da irradiação solar no Brasil durante todo o ano, conforme evidenciado na figura 17, nela pode-se observar que durante os meses e estações do ano a irradiância varia significativamente.

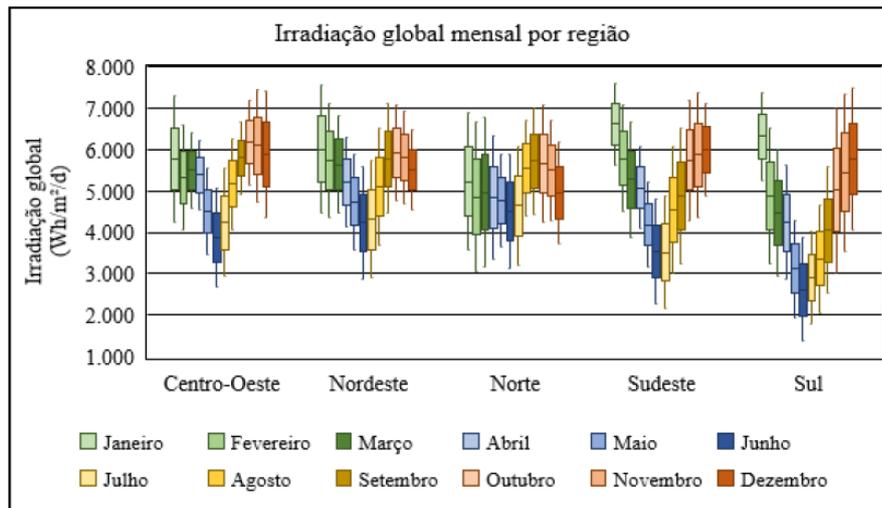


Figura 17: Variação da irradiação global nas regiões brasileiras.

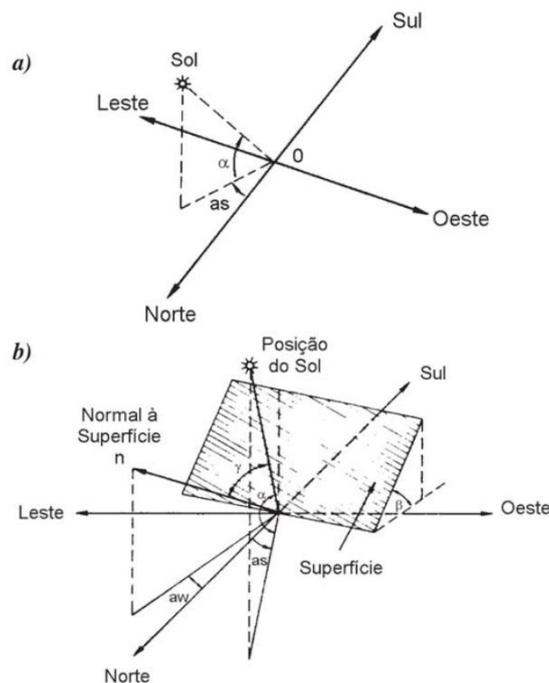
Fonte: SIMIONI, 2017

### b. Ângulo azimutal e inclinação dos módulos

O ângulo azimutal é um fator extremamente relevante quando se trata de eficiência em sistemas fotovoltaicos. Pois, para a garantia da melhor geração possível em usinas fotovoltaicas precisamos garantir que mesmo esteja projetado na melhor angulação ( $0^\circ$  - Norte). Outro fator fundamental é a inclinação do módulo em relação a superfície que assim como o ângulo azimutal precisa seguir parâmetros que garantam a sua melhor geração possível, nesse caso diversos artigos estimam essas variações em função da latitude do local, fornecendo, a princípio, o valor ótimo de inclinação para determinada região afim de maximizar a geração de energia anual.

As relações geométricas dos raios solares variam de acordo com o movimento aparente do Sol e a superfície terrestre, essas relações são descritas pelos ângulos (TORRES, 2012):

- Ângulo de incidência ( $\gamma$ ): ângulo formado entre os raios do Sol e a normal de superfície de captação.
- Ângulo Azimutal da Superfície ( $a_w$ ): ângulo entre a projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção Norte-Sul. O deslocamento angular tomado a partir do Norte (projeção a direita do Norte) –  $-180^\circ \leq a_w \leq 180^\circ$  (projeção a esquerda do Norte).
- Ângulo Azimutal do Sol ( $a_s$ ): ângulo entre a projeção do raio solar no plano horizontal e a direção Norte- Sul. Obedecendo a mesma convenção acima.
- Altura Solar ( $\alpha$ ): ângulo compreendido entre o raio solar e a projeção do mesmo sobre um plano horizontal.



**Figura 18: Relações geométricas dos raios solares.**

**Fonte: CRESESB, 2004**

O conhecimento exato da localização do Sol, é necessário para determinar os dados de radiação e a energia produzida pelas instalações solares. A localização do Sol pode ser definida em qualquer local, pela sua altura e pelo seu azimute. No campo da energia solar, o Sul é referido geralmente como  $\alpha = 0^\circ$ . O sinal negativo é atribuído aos ângulos orientados a Leste (Leste:  $\alpha = -90^\circ$ ) e o sinal positivo aos ângulos orientados a Oeste (Oeste:  $\alpha = 90^\circ$ ) (IST; DGS; UE, 2004).

Entretanto, na arquitetura e na construção, o ângulo de azimute é  $0^\circ$ , referindo-se ao Norte. Os demais ângulos surgem no sentido dos ponteiros do relógio (Leste:  $\alpha = 90^\circ$ ; Sul:  $\alpha = 180^\circ$ ; Oeste:  $\alpha = 270^\circ$ ) (IST; DGS; UE, 2004).

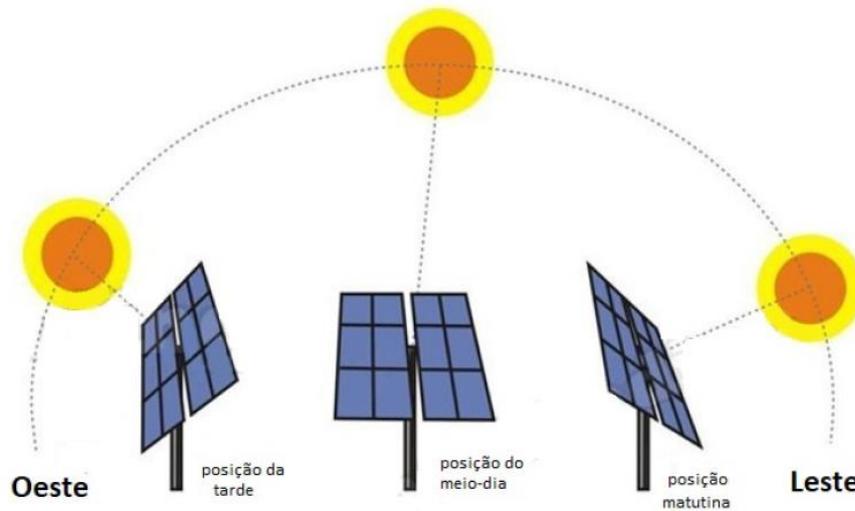
## 5. Componentes que otimizam a geração de energia

### a. Tracker

O *tracker*, também conhecido como rastreador solar é uma das formas mais utilizadas atualmente para otimizar a captação solar é o rastreamento solar ou heliotropismo. Utilizados principalmente em usinas de grande porte, a tecnologia diz respeito ao movimento tanto de plantas quanto de equipamentos mecânicos e elétricos na direção do Sol.

O sistema formado por equipamentos mecânicos e elétricos pode possuir um ou dois eixos e tem por objetivo posicionar o captador solar de forma perpendicular aos raios solares incidentes. Desta forma possibilita-se um melhor desempenho na captação de energia.

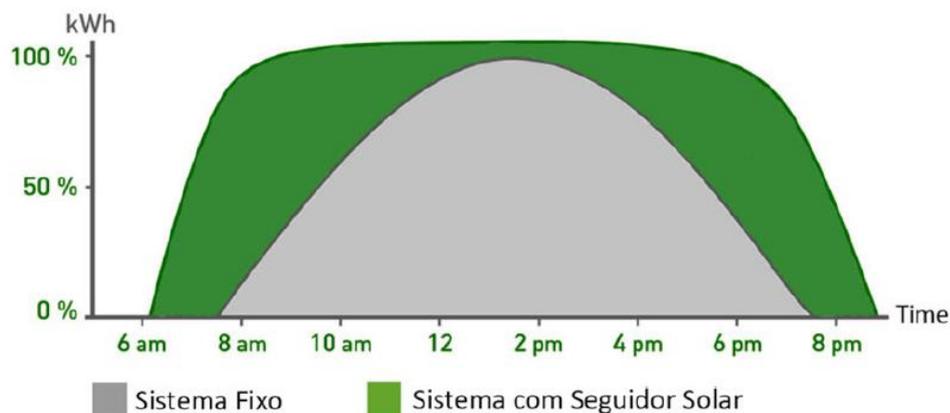
Diferentes dos sistemas fixos que alocam os módulos em uma inclinação otimizada e não permitem movimentação os sistemas com rastreadores solar alteram diversas vezes durante o dia a posição dos painéis fotovoltaicos afim de aumentar a produção de energia. Como podemos observar na figura 19 que ilustra o seu funcionamento.



**Figura 19: Rastreador Solar.**

**Fonte: Solar Motors, 2021**

Uma das maiores vantagens observadas em um *Tracker* está na relação como a potência é entregue à rede. Conforme a Figura 20, em um sistema fixo ocorre um aumento gradual na quantidade gerada de energia durante o dia de modo que por volta de meio-dia a produção de energia atinge o pico máximo. Já nos sistemas com rastreadores a produção é mantida constante desde o início da manhã até o fim da tarde. Além disso, os constantes avanços em relação à tecnologia e confiabilidade em eletrônica tem reduzido de forma expressiva a preocupação com a manutenção dos sistemas com seguidores solares.



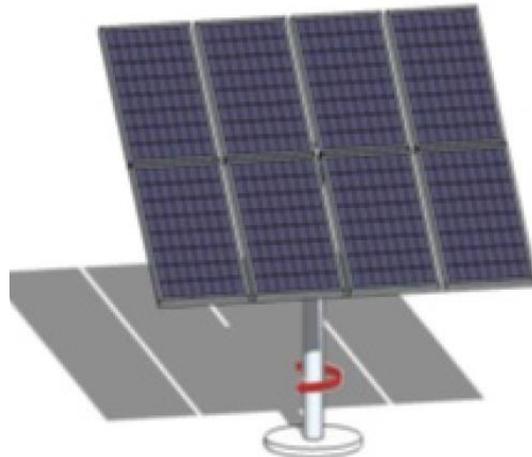
**Figura 20: Comparação de energia gerada fixo x rastreador.**

**Fonte: VALLDOREIX GREENPOWER, 2021**

Os rastreadores solares costumam ser classificados com relação ao seu movimento, esses equipamentos podem ser constituídos por um ou dois eixos.

### Rastreador Solar de um eixo

Esses sistemas fazem uso de apenas um eixo rotativo e seu posicionamento podem ser na horizontal, vertical ou com inclinação. E, sua orientação pode seguir dois sentidos já estabelecidos: Norte-Sul ou Leste-Oeste. Ainda que este tipo de tecnologia apresente um menor custo em relação ao rastreador solar de dois eixos, a precisão, conseqüentemente, também tende a ser inferior.

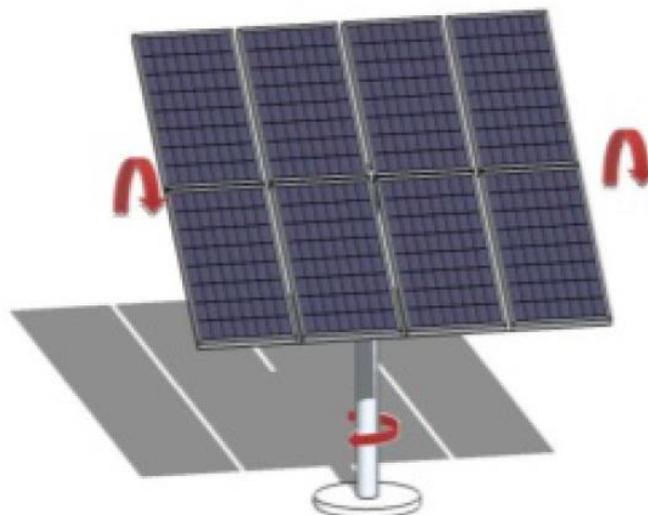


**Figura 21: Rastreador Solar de um eixo. Fonte:**

**LSF do IEE/USP, 2021**

### Rastreador Solar de dois eixos

O rastreador solar com dois eixos, possui características mecânicas e de controle mais complexas que o rastreador solar com um único eixo. Além de necessitar de uma área maior de terreno para sua instalação. Na Figura 22, observa-se que seus dois eixos rotativos de movimentação, vitais para proporcionar um grande desempenho de captação da energia solar, possuem funcionalidades diferentes. Um desses eixos é utilizado para acompanhar a trajetória solar enquanto o outro por ajustar a sua inclinação. Desta forma, esta topologia entrega uma melhor taxa de conversão de energia porque possibilita o acompanhamento de todos os movimentos solares.



**Figura 22: Rastreador solar de dois eixos.**

**Fonte: LSF do IEE/USP, 2021**

## b. Otimizadores

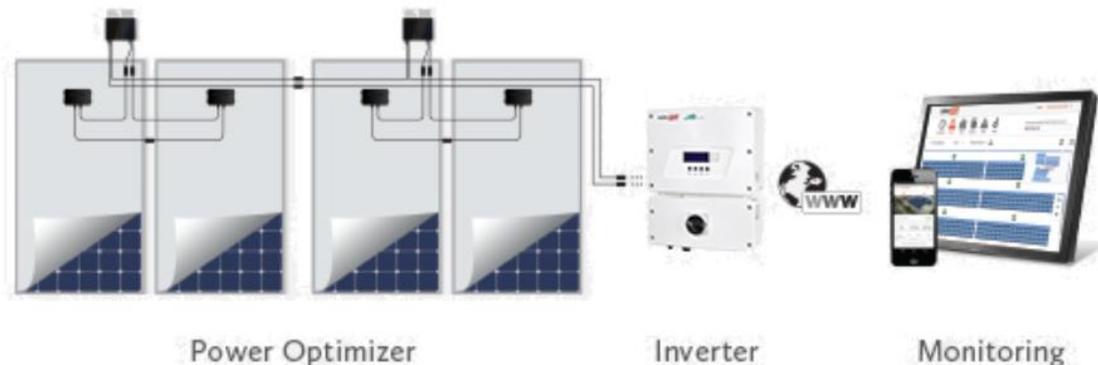
Os otimizadores oriundos da tecnologia MLPE – do inglês: *Module-Level Power Electronics* que significa eletrônica de potência à nível de módulo. Essa tecnologia diferentemente da tecnologia de rastreadores solares costuma ser utilizada e bem requisitada em sistemas de menor potência, como telhados residências. Os principais fatores que justificam seu uso é sombreamento e melhoria *mismatch* (também conhecido como incompatibilidade ou descasamento) de módulos fotovoltaicos.



**Figura 23: Otimizador.**

**Fonte: Ecori, 2021**

O sombreamento em sistemas situados em áreas urbanas está diretamente relacionado com a perda da eficiência do sistema, geralmente causados por edifícios e árvores. Quando temos um módulo sombreado em uma *string* de um inversor todos os módulos da *string* ainda que não estejam sombreados passam a possuir a mesma eficiência daquele módulo, resultando em uma diminuição significativa da eficiência do sistema em geral.



**Figura 24: Otimizadores de dois módulos.**

**Fonte: Ecori, 2021**

Temos dois módulos ligados em série conectados à entrada de cada otimizador. Após, a saída de cada otimizador é ligada em série com o otimizador seguinte até finalizar um segmento de otimizadores. A quantidade de segmentos possíveis depende do modelo de inversor utilizado e o tamanho do segmento varia de acordo com o modelo dos módulos e otimizadores utilizados.

## 6. Análise de plantas fotovoltaicas junto

Neste capítulo, serão apresentados resultados de dois projetos: um junto à carga em endereço residencial, e outro de geração compartilhada em endereço isolado da área urbana. O projeto feito junto à carga será simulado no software HelioScope, sendo um sistema de pequeno porte em telhado. O projeto de geração compartilhada será desenvolvido no PVSyst e no HelioScope sendo um sistema de grande em solo.

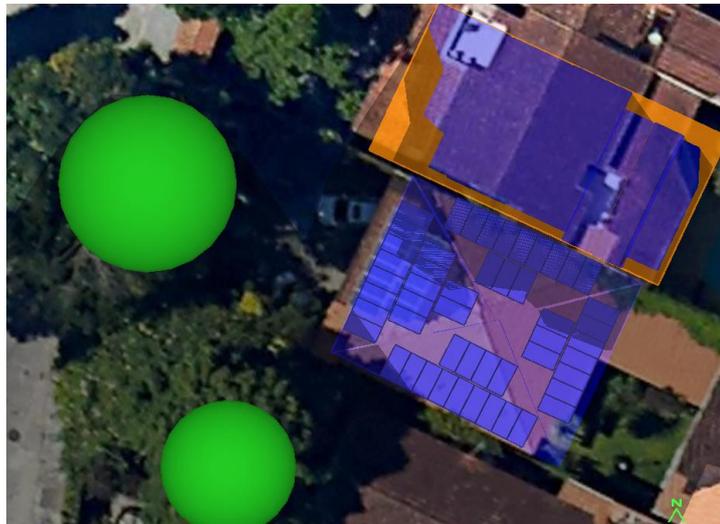
### a. Planta junto à carga

Análise da planta desenvolvida a partir do software HelioScope sendo um sistema de pequeno porte em telhado residencial ou comercial (figuras 25 e 26). Localização do sistema em questão: Estrada da Gávea, Rio de Janeiro.



**Figura 25: Localização do projeto desenvolvido de pequeno porte.**

**Fonte: Google Earth, 2021**



**Figura 26: Projeto desenvolvido de usina de pequeno porte.**

**Fonte: HelioScope, 2021**

Como se pode observar nas figuras 25 e 26, a residência em questão apresenta bastante sombreamento, oriundos da residência ao norte mais alta e da árvore também ao norte da residência, ambas impactam de maneira significativa na eficiência do sistema em questão.

Na tabela 3 mostra os componentes utilizados nesse projeto, foram utilizados 2 inversores do modelo SG8K-D da fabricante Sungrow cada um com 8kW de potência e 50 módulos do modelo CS1Y-405MS da fabricante Canadian Solar cada um com 405W de potência.

**Tabela 3: Componentes utilizados na usina desenvolvida de pequeno porte.**

Fonte: HelioScope, 2021

| Components |                                   |              |
|------------|-----------------------------------|--------------|
| Component  | Name                              | Count        |
| Inverters  | SG8K-D (Sungrow)                  | 2 (16.0 kW)  |
| Strings    | 10 AWG (Copper)                   | 6 (133.0 m)  |
| Module     | Canadian Solar, CS1Y-405MS (405W) | 50 (20.3 kW) |

Utilizando os componentes descritos na tabela 3, obtém-se resultados apresentados na tabela 4 e figura 27:

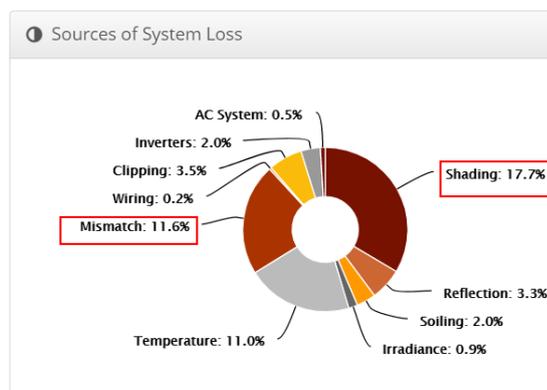
A potência do sistema que é 20.3 kWp, a potência em módulos do sistema que é de 16kW com um fator de carregamento (potência em módulos/ potência em inversores) de 1.27 (CC/CA), a performance ratio avalia a geração real de um projeto em relação a sua geração teórica máxima possível em outras palavras o rendimento efetivo do sistema que é de 57,1%, kWh/kWp ou eficiência de 1038.8 e a base meteorologia considerada para análise do sistema que é Santos Dumont/Rio, informações descritas na tabela 4.

**Tabela 4: Resultado do sistema desenvolvido de pequeno porte.**

Fonte: HelioScope, 2021

|                       |                                     |
|-----------------------|-------------------------------------|
| Module DC Nameplate   | 20.3 kW                             |
| Inverter AC Nameplate | 16.0 kW<br>Load Ratio: 1.27         |
| Annual Production     | 21.04 MWh                           |
| Performance Ratio     | 57.1%                               |
| kWh/kWp               | 1,038.8                             |
| Weather Dataset       | TMY, SANTOS_DUMONT/RIO, SWERA (epw) |

A figura 27 por sua vez nos apresenta as perdas do sistema que somam um total de 52,7%.



**Figura 27: Resultado do sistema desenvolvido de pequeno porte.**

Fonte: HelioScope, 2021

Geralmente em sistemas fotovoltaicos a maior perda de energia está associada a temperatura, mas como podemos observar nesse sistema, as principais perdas estão ligadas ao sombreamento (17,7%) e ao *mismatch* (11,6%), em função disso como já abordamos no capítulo anterior podemos fazer uso de otimizados que tem como principal objetivo diminuir essas perdas.

Para minimizar o impacto desse sombreamento adotamos o uso de otimizadores a fim de reduzir os impactos causados na eficiência pelo sombreamento e *mismatch*, adotados o uso dos seguintes componentes descritos na tabela 5, foram utilizados 1 inversores do modelo SE17K com 17kW de potência combinado a utilização de 26 otimizadores cada um com 850W de potência ambos do fabricante SolarEdge e 50 módulos do modelo CS1Y-405MS da fabricante Canadian Solar cada um com 405W de potência.

**Tabela 5: Componentes utilizados na usina desenvolvida de pequeno porte com otimizadores.**

Fonte: HelioScope, 2021

| Components |                                   |              |
|------------|-----------------------------------|--------------|
| Component  | Name                              | Count        |
| Inverters  | SE17K (SolarEdge)                 | 1 (17.0 kW)  |
| Strings    | 10 AWG (Copper)                   | 2 (37.4 m)   |
| Optimizers | P850 (SolarEdge)                  | 26 (22.1 kW) |
| Module     | Canadian Solar, CS1Y-405MS (405W) | 50 (20.3 kW) |

Utilizando os componentes descritos na tabela 5, obtém-se resultados apresentados na tabela 6 e figura 28:

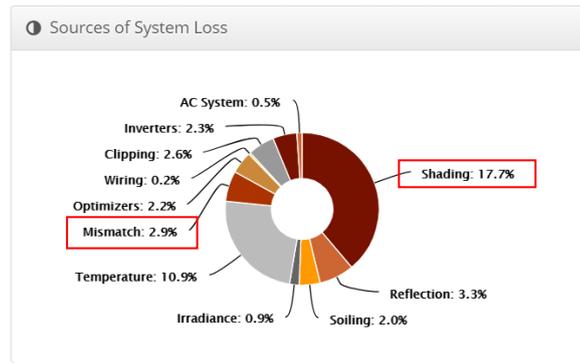
A potência do sistema que é 20.3 kWp, a potência em módulos do sistema que é de 17kW com um fator de carregamento (potência em módulos/ potência em inversores) de 1.19 (CC/CA), a performe ratio avalia a geração real de um projeto em relação a sua geração teórica máxima possível em outras palavras o rendimento efetivo do sistema que é de 61,6%, kWh/kWp ou eficiência de 1120,9 e a base meteorologia considerada para análise do sistema que é Santos Dumont/Rio, informações descritas na tabela 6.

**Tabela 6: Resultado com a utilização de otimizadores.**

Fonte: HelioScope, 2021

|                       |                                     |
|-----------------------|-------------------------------------|
| Module DC Nameplate   | 20.3 kW                             |
| Inverter AC Nameplate | 17.0 kW<br>Load Ratio: 1.19         |
| Annual Production     | 22.70 MWh                           |
| Performance Ratio     | 61.6%                               |
| kWh/kWp               | 1,120.9                             |
| Weather Dataset       | TMY, SANTOS_DUMONT/RIO, SWERA (epw) |

A figura 31 por sua vez nos apresenta as perdas do sistema que somam um total de 45,5%.



**Figura 28: Resultado da usina desenvolvida de pequeno porte com otimizadores.**

**Fonte: HelioScope, 2021**

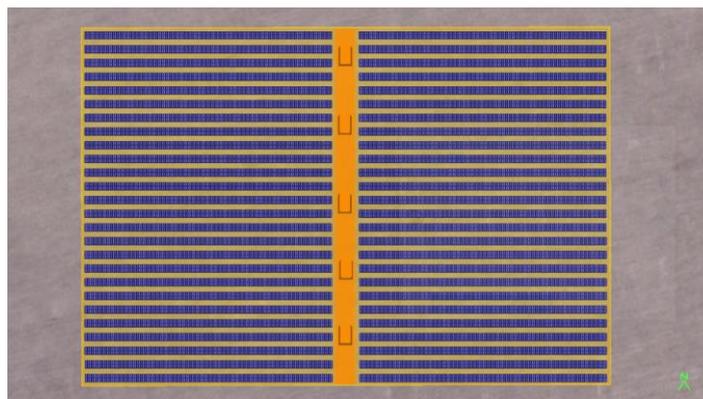
Podemos observar que o uso dos otimizadores aparentemente não impacta de maneira a minimizar o sombreamento do projeto, mas isso não é verdade. Pois, a como sombreamento apresentado é originado a partir da média de sombreamento dos módulos ela tende a permanecer a mesma apesar do seu impacto na eficiência do projeto diminuir de maneira significativa.

Se comparamos a eficiência do projeto sem otimizadores (1038.8) e a eficiência do projeto com otimizadores (1120.9) e as perdas do conjunto *mismatch* + sombreamento do projeto sem otimizadores (29.3%) e com otimizadores (20.6%). Podemos observar que com a utilização da tecnologia de otimizadores as perdas do conjunto *mismatch* + sombreamento impactam cerca de 30% menos o sistema e há uma melhoria da eficiência do sistema num todo de cerca de 8%.

#### b. Planta de geração compartilhada

Análise da planta desenvolvida a partir do software HelioScope e do PVSyst sendo um sistema de grande em terreno. A usina em questão fica situada no município de Luiz Eduardo Magalhães, BA. Conforme podemos observar no capítulo 4, na Figura 16 essa região é uma das regiões com maiores índices de irradiação global.

No HelioScope foi desenvolvido um projeto com estrutura fixa, conforme Figura 29.

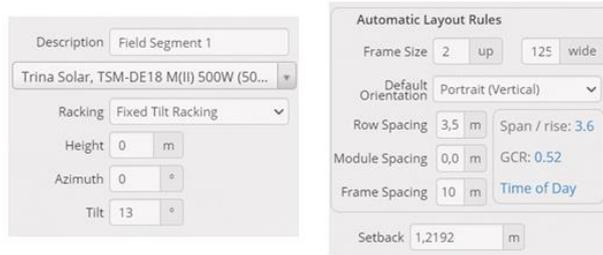


**Figura 29: Usina desenvolvida de grande porte.**

**Fonte: HelioScope, 2021**

A fim de obtermos a melhor eficiência possível consideramos as seguintes configurações, conforme descrito na figura 33, sistema de estrutura com inclinação fixa, altura de 0m já que o sistema se encontra em solo, ângulo *azimuth* está com inclinação 0° indicando que os módulos estão completamente posicionados ao norte, *tit* representa a inclinação dos módulos com relação ao solo, geralmente consideramos a latitude local acrescida de uma unidade nesse caso  $12+1=13^\circ$ , estrutura de 2 fileiras de módulos cada fileira com 125 módulos e na orientação retrato, o espaçamento entre as

estruturas é de 3,5 metros afim de minimizar o sombreamento e o espaçamento central de 10 metros locomoção durante manutenção e implementação do sistema.



**Figura 30: Configurações da usina de grande porte.**

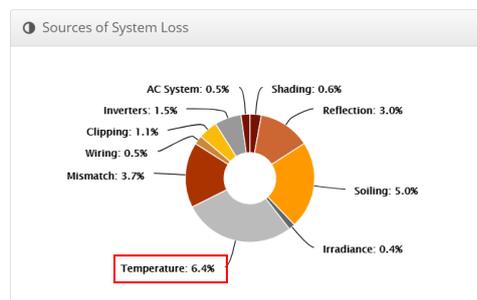
**Fonte: HelioScope, 2021**

A potência do sistema que é 20.3 kWp, a potência em módulos do sistema que é de 17kW com um fator de carregamento (potência em módulos/ potência em inversores) de 1.19 (CC/CA), a performe ratio avalia a geração real de um projeto em relação a sua geração teórica máxima possível em outras palavras o rendimento efetivo do sistema que é de 61,6%, kWh/kWp ou eficiência de 1120,9 e a base meteorologia considerada para análise do sistema que é Santos Dumont/Rio, informações descritas na tabela 6.

**Tabela 7: Resultado da planta de geração compartilhada com estrutura fixa.**

**Fonte: HelioScope, 2021**

|                       |                                       |
|-----------------------|---------------------------------------|
| Module DC             |                                       |
| Nameplate             | 6.50 MW                               |
| Inverter AC Nameplate | 5.00 MW<br>Load Ratio: 1.30           |
| Annual Production     | 10.72 GWh                             |
| Performance Ratio     | 79.4%                                 |
| kWh/kWp               | 1,650.0                               |
| Weather Dataset       | TMY, 10km Grid, meteonorm (meteonorm) |

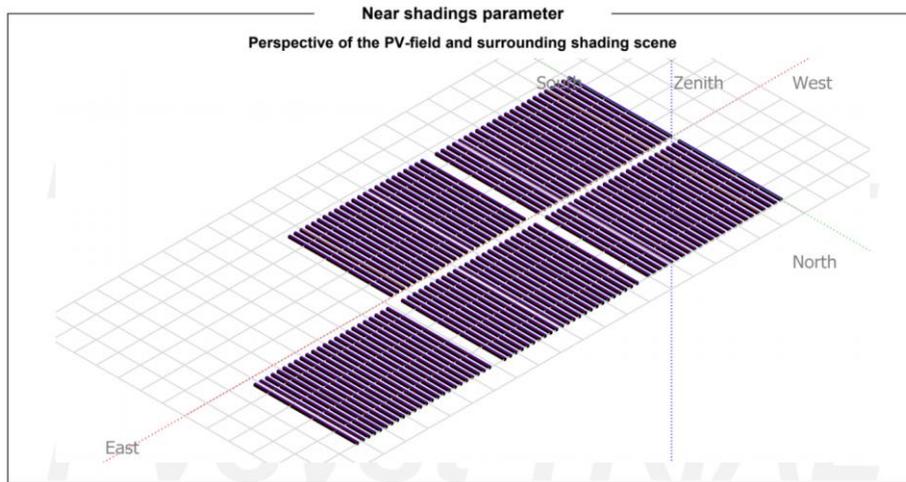


**Figura 31: Resultado da usina desenvolvida de grande porte.**

**Fonte: HelioScope, 2021**

Nesse projeto a maior perda está associada a temperatura e ele apresenta uma eficiência de 1650.0 kWh/kWp essa excelente eficiência se justifica pela sua excelente localização.

Com o objetivo de aumentarmos a eficiência da usina em questão iremos projetar uma usina de 6,5kWp também no município de Luiz Eduardo Magalhães, BA. Porém adequaremos o projeto para o uso de rastreadores solares (*tracker*), conforme Figura 32.



**Figura 32: Usina desenvolvida de grande porte.**

Fonte: PVsyst, 2021

Na usina em questão foi considerado o uso do módulo bifacial de mesma potência e composição do módulo utilizado no projeto do HelioScope, os inversores por sua vez foram mantidos.

| PV Array Characteristics         |                                  |                             |            |
|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------|
| <b>PV module</b>                 |                                  | <b>Inverter</b>             |            |
| Manufacturer                     | Generic                          | Manufacturer                | Generic    |
| Model                            | TSM-DEG18MC-20-(II)-500-Bifacial | Model                       | SG125-HV   |
| (Original PVsyst database)       |                                  |                             |            |
| Unit Nom. Power                  | 500 Wp                           | Unit Nom. Power             | 125 kWac   |
| Number of PV modules             | 13000 units                      | Number of inverters         | 40 units   |
| Nominal (STC)                    | 6500 kWp                         | Total power                 | 5000 kWac  |
| Modules                          | 500 Strings x 26 In series       | Operating voltage           | 860-1450 V |
| <b>At operating cond. (50°C)</b> |                                  | Pnom ratio (DC:AC)          |            |
| Pmpp                             | 6028 kWp                         | 1.30                        |            |
| U mpp                            | 988 V                            |                             |            |
| I mpp                            | 6100 A                           |                             |            |
| <b>Total PV power</b>            |                                  | <b>Total inverter power</b> |            |
| Nominal (STC)                    | 6500 kWp                         | Total power                 | 5000 kWac  |
| Total                            | 13000 modules                    | Nb. of inverters            | 40 units   |
| Module area                      | 31331 m <sup>2</sup>             | Pnom ratio                  | 1.30       |

**Figura 33: Componentes utilizados na usina desenvolvida de grande porte.**

Fonte: PVsyst, 2021

A eficiência do projeto em questão é de 2216 kWh/kWp. Dessa forma reforçasse assim que o uso do rastreadores solares tem o poder de maximizar a eficiência do sistema porque ao compararmos o sistema sem rastreadores e o sistema com rastreadores solares há um aumento significativo de cerca de 34,3%.

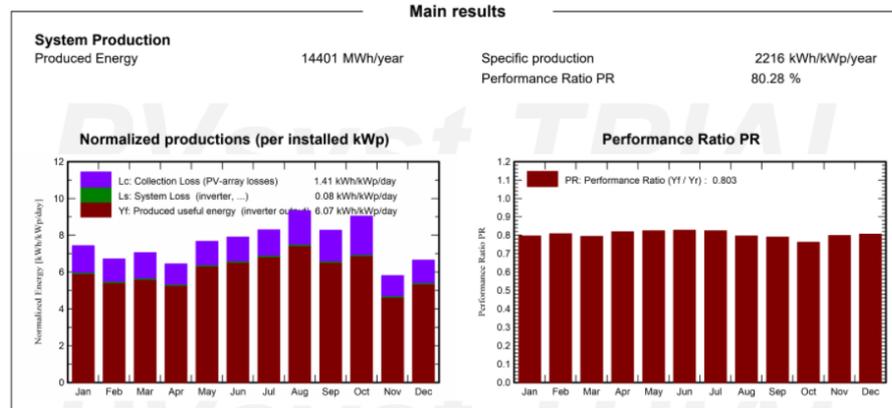


Figura 34: Resultado da usina desenvolvida de grande porte.

Fonte: PVsyst, 2021

Já com relação a temperatura podemos observar que o projeto com rastreadores solares apresenta uma perda de 10,95%.

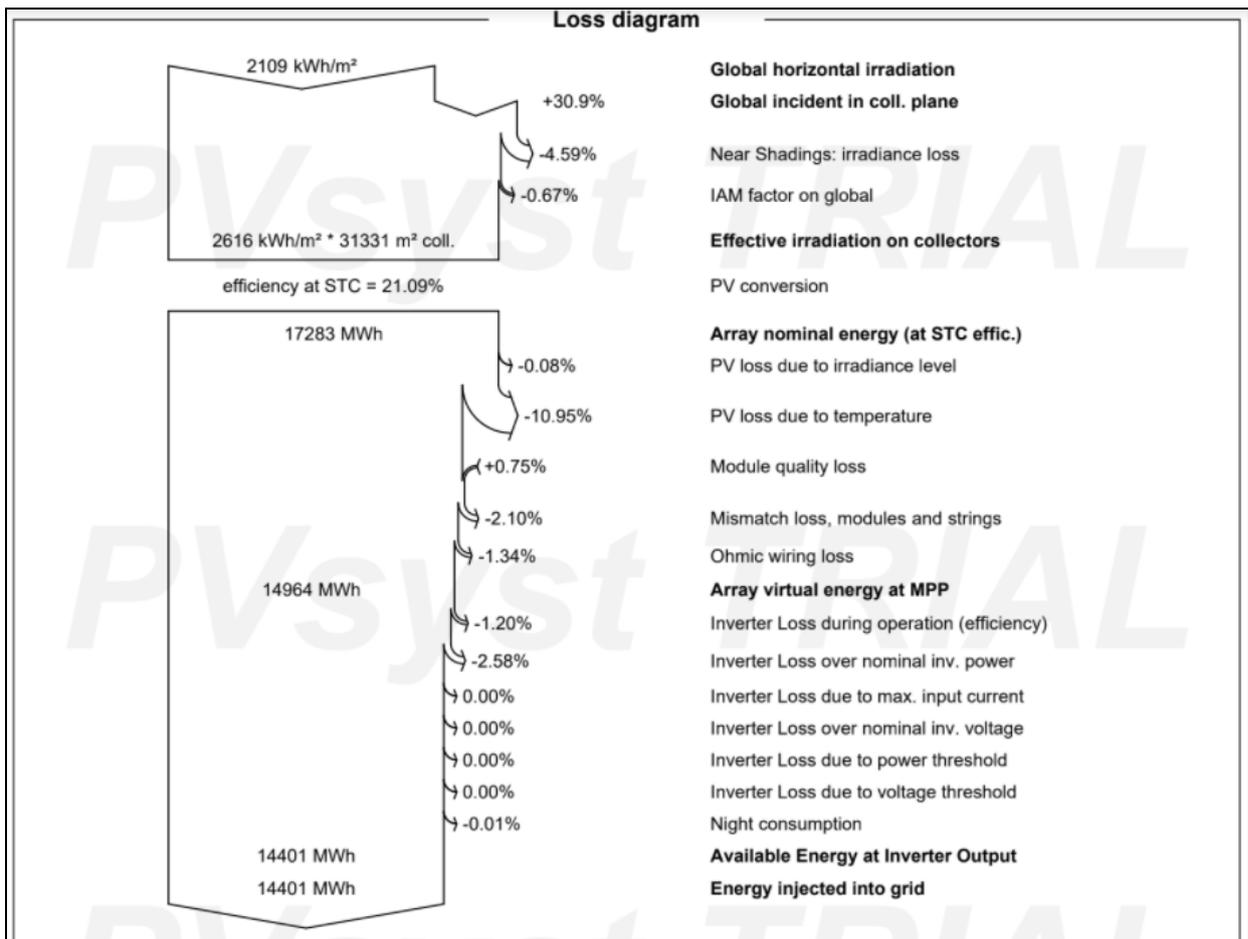


Figura 35: Perdas da usina desenvolvida de grande porte.

Fonte: PVsyst, 2021

## 7. Conclusão

Concluímos a partir de todas as premissas apresentadas nesse trabalho que há diversas situações que impactam de maneira significativa a eficiência energética em um sistema fotovoltaico, evidenciando a necessidade de um estudo do local a ser implementado o sistema.

Em projetos desenvolvidos em plantas residenciais ou comerciais em área urbana pode-se evidenciar que esses projetos tendem apresentar uma maior quantidade de sombreamento oriundo de edifícios e árvores que impactam grandemente a eficiência do sistema fotovoltaica. A utilização de equipamentos com otimizadores são uma solução provável já que conforme comprovado e em função da tecnologia adotada pelos mesmos, buscam minimizar o impacto do conjunto sombreamento+*mismatch*.

Dessa forma, é possível provar que a escolha do local de implementação da usina, tendo em vista no Brasil a irradiação solar varia a depender do local, bem como do mês já que ela varia ao longo do ano. Além disso, a escolha adequada dos equipamentos deve-se considerar a temperatura de operação como fator determinante para a eficiência. Pois, como podemos observar nos projetos apresentados no decorrer desse trabalho ela é um grande fator de perda de eficiência, entre 10,5% e 11% nos projetos propostos.

O impacto da temperatura em diferentes arranjos de instalação indicou que a eficiência é dependente da instalação utilizada. Ou seja, em arranjo livres, típicos de usinas centralizadas, o impacto da temperatura é menor, se comparado às instalações integradas às edificações comumente da aplicação para geração distribuída.

## 8. Referência e Bibliografia

HERSCH, Paul; ZWEIBEL, Kenneth. **Basic photovoltaic principles and methods**. Solar Energy Research Inst. Golden, CO, EUA. 1982.

SHARMA, V., CHANDEL, S. S. "Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: A review", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 2013.

CHANDER, Subhash et al. A study on photovoltaic parameters of mono-crystalline silicon solar cell 0 temperature. **Energy Reports**, 2015.

ATLAS BRASILEIRO. PEREIRA, B. E et al. **Atlas brasileiro de energia solar, 2ª edição**. São José dos Campos, Brasil, 2017.

ALMEIDA, M.; ZILLES, R.; PINTO, A. **Eficiência Brasileira de Inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. Avances en Energias Renovables y Medio Ambiente Vol 15, Argentina, 2011.

ABNT NBR 10899. **Energia Solar Fotovoltaica Terminologia**. 2010.

ABSOLAR. **Perspectivas para a Geração Centralizada Solar Fotovoltaica no Brasil**. Disponível em: < <https://www.absolar.org.br/artigos/perspectivas-para-a-geracao-centralizada-solar-fotovoltaica-no-brasil/>> Acesso em: 27 de junho de 2021.

ANEEL. **Geração Distribuída**. Disponível em: < <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida/>> Acesso em: 27 de junho de 2021.

ANEEL. **Resolução Normativa No 482**, de 17 de abril de 2012. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>> Acesso em: 27 de junho de 2021.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, CRESESB, 2004.

INMET. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. 2016. Disponível em: < <https://portal.inmet.gov.br/>> Acesso em 27 de junho de 2021.

MARTINS, F. R., PEREIRA, E. B., ABREU, S.L. "Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA project", **Solar Energy**. 2007.

MIDEKSA, T., K.; KALLBEKKEN, S. The impact of climate change on the electricity market: A review. **Energy Policy**. 2010.

PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., ABREU, S. L., RÜTHER, R. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2006.

IST; DGS; UE. **Energia fotovoltaica, manual sobre tecnologias, projeto e instalação**. 2004. Disponível em: < <http://www.greenpro.de/po/fotovoltaico.pdf>> Acesso em 27 de junho de 2021.

SIMIONI, T. **O impacto da temperatura para o aproveitamento do potencial solar fotovoltaico do Brasil**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), 2006.

AYRÃO, V. A. **Energia Solar Fotovoltáica no Brasil. Conceitos, aplicações e estudos de caso**. Brasil, 2018.

LIMA, C.G. **O impacto Eficiência Energética e Energia Solar Fotovoltaica em prédios públicos no setor de educação do nordeste do Brasil: O Caso da Expansão do IFRJ**. Rio de Janeiro:



TREVELIN, F. C. Estudo comparativo entre métodos de rastreamento solar aplicados a sistemas fotovoltaicos. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

TORRES, R. C. **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais**. São Carlos: Universidade de São Paulo (USP), Departamento de Engenharia Mecânica, 2012.

INEE. Instituto Nacional de Eficiência Energética. Disponível em <[www.inee.org.br](http://www.inee.org.br)> Disponível em 27 de junho de 2021

PNE. Plano Nacional de Energia. **Plano Nacional de Energia**. Disponível em <[www.epe.gov.br/pt](http://www.epe.gov.br/pt)> Disponível em 27 de junho de 2021.

LSF do IEE USP. Energia Descrição de Seguidores Solares e sua aplicação em centrais fotovoltaica conectadas à rede. Disponível em: <[www.iee.usp.br/sites/default/files/biblioteca/producao/2010/Trabalhos/pintonetodescricao.pdf](http://www.iee.usp.br/sites/default/files/biblioteca/producao/2010/Trabalhos/pintonetodescricao.pdf)> Acesso em 27 de junho de 2021.

Sebrae Setorial Energia. Startup desenvolve painel solar para motorista carregar o carro no estacionamento. Disponível em <<https://mgr.trinasolar.com/pt>> Acesso em 27 de junho de 2021.

Trina Solar. Disponível em <[www.sebraeinteligenciasetorial.com.br](http://www.sebraeinteligenciasetorial.com.br)> Acesso em 27 de junho de 2021.

Google Earth. Disponível em <<https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>> Acesso em 27 de junho de 2021.

HelioScope. Disponível em <<https://www.helioscope.com/>> Acesso em 27 de junho de 2021.

PVsys. **PVsys version 7.1 - software of studies, sizing and simulations**. Development for Group of Energy, Institute of Sciences of the Environment. University of Geneva, by Dr. André Mermoud. 2012

Sungrow. Disponível em <<https://br.sungrowpower.com/>> Acesso em 27 de junho de 2021.

APsystems. Disponível em <<https://latam.apsystems.com/en/>> Acesso em 27 de junho de 2021.

Solar Motors. Disponível em <<http://www.solar-motors.com/>> Acesso em 27 de junho de 2021.

Global Solar Atlas. Disponível em <<https://globalsolaratlas.info/map>> Acesso em 27 de junho de 2021.

Ecori. Disponível em <[www.ecorienergiasolar.com.br/](http://www.ecorienergiasolar.com.br/)> Acesso em 27 de junho de 2021.

VALLDOREIX GREENPOWER. Disponível em <<http://www.valldoreix-gp.com/valldoreix-greenpower/>> Acesso em 27 de junho de 2021.