



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**

Instituto de Ciência e Tecnologia

Câmpus de Sorocaba

**ROBSON LUIZ FERNANDES JUNIOR**

**DIMENSIONAMENTO DE USINA FOTOVOLTAICA PARA UNIDADES  
CONSUMIDORAS DE BAIXA TENSÃO NA REGIÃO DE SOROCABA-SP**

Sorocaba

2024

ROBSON LUIZ FERNANDES JUNIOR

**DIMENSIONAMENTO DE USINA FOTOVOLTAICA PARA UNIDADES  
CONSUMIDORAS DE BAIXA TENSÃO NA REGIÃO DE SOROCABA-SP**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Glória Caño de Andrade

Coorientador: Prof. Me. Fábio Alex da Silva

Sorocaba

2024

F363d

Fernandes Junior, Robson Luiz

Dimensionamento de usina fotovoltaica para unidades consumidoras de baixa tensão na Região de Sorocaba-SP / Robson Luiz Fernandes Junior. -- Sorocaba, 2024

88 p. : il., tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientadora: Maria Glória Caño de Andrade

Coorientador: Fábio Alex da Silva

1. Geração de energia fotovoltaica. 2. Energia solar. 3. Células solares. I. Título.

**DIMENSIONAMENTO DE USINA FOTOVOLTAICA PARA UNIDADES  
CONSUMIDORAS DE BAIXA TENSÃO NA REGIÃO DE SOROCABA-SP**

**ROBSON LUIZ FERNANDES JUNIOR**

**ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO  
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
BACHAREL EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

**Prof. Dr. Everson Martins  
Coordenador**

**BANCA EXAMINADORA:**

**Prof. Dr. MARIA GLÓRIA CAÑO DE ANDRADE  
Orientador/UNESP - Campus de Sorocaba**

**Prof. Dr. José Roberto Ribeiro Bortoleto  
UNESP - Campus de Sorocaba**

**Prof. Sidnei De Oliveira Nascimento  
IFSP - Campus de Sorocaba**

**Sorocaba-SP  
2024**

Dedico a todos os familiares, colegas e amigos que acreditaram e estiveram ao meu lado nos melhores e principalmente mais difíceis momentos.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por permitir o livre arbítrio e colocar pessoas e cenários que cooperaram para este momento.

Aos meus pais e irmã, por sempre acreditarem em mim e me motivarem.

A minha namorada, por todo apoio moral e engajamento, por me fazer querer ser melhor todos os dias.

A Prof. Dr. Maria Glória Caño de Andrade pela confiança, dedicação e ser extremamente coerente científica e pessoalmente, por compartilhar conhecimento compartilhado em sala de aula

Ao Prof. Me. Fábio Alex da Silva pela dedicação e prontidão, dentro e fora de sala de aula, sempre auxiliando nas dúvidas e guiando para os melhores caminhos.

Ao Prof. Dr. Marilza Antunes de Lemos, por acreditar e confiar em mim desde o primeiro semestre, onde juntos pudemos colocar o nome da UNESP Sorocaba-SP três anos seguidos nos pódios Latino-Americanos de robótica.

Ao Prof. Dr. José Roberto Ribeiro Bortoleto, por ensinar de forma tão majestosa conceitos eletromagnéticos e matemática aplicada, visando sempre a conexão interdisciplinar em suas aulas, pesquisas e projetos.

Aos servidores Sra. Lilian Helena Mathilde, Sr. Lucas Santacapita Mathias, Sr. Sandro Garcia Almeida, Sr. Cláudio Roberto Ferreira Martins e Sr. Marcos Dionizio Silva por todo apoio, suporte, alegria e humildade demonstradas em todas as interações

Aos professores do Curso de Engenharia de Controle e Automação que contribuíram para minha formação profissional.

A toda equipe administrativa, de limpeza, portaria e vigilância que sempre fazem o trabalho com excelência e felizes.

Agradeço aos meus colegas e amigos que contribuíram para minha formação.

## RESUMO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso aborda o tema "Dimensionamento de Usina Fotovoltaica para Unidades Consumidoras de Baixa Tensão na Região de Sorocaba-SP". Neste estudo, foram realizados cálculos rigorosos e uma simulação utilizando a ferramenta PVsyst para dimensionar sistemas fotovoltaicos adequados às necessidades das unidades consumidoras de baixa tensão na região de Sorocaba-SP. A pesquisa buscou comparar e analisar os resultados obtidos por meio dos cálculos teóricos com aqueles obtidos na simulação no PVsyst, garantindo assim a precisão e a confiabilidade dos resultados. Esse confronto entre os resultados teóricos e práticos permitiu avaliar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos dimensionados. Além disso, o estudo também se concentrou na avaliação do impacto ambiental positivo da implementação de usinas fotovoltaicas nas unidades consumidoras de baixa tensão na região de Sorocaba-SP. A análise levou em consideração a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), a diminuição da dependência de fontes de energia não renováveis e os benefícios associados à geração de energia limpa e sustentável. Os resultados deste trabalho contribuem para o avanço do conhecimento na área de energias renováveis e destacam a viabilidade técnica e ambiental do dimensionamento de usinas fotovoltaicas para atender às necessidades das unidades consumidoras de baixa tensão na região de Sorocaba-SP. Além disso, este estudo ressalta a importância da adoção de fontes de energia limpa como uma estratégia para mitigar os impactos das mudanças climáticas e promover a sustentabilidade energética.

**Palavras-chave:** usina fotovoltaica; energia solar; células solares.

## **ABSTRACT**

The present bachelor's thesis addresses the topic "Photovoltaic Plant Sizing for Low-Voltage Consumer Units in the Sorocaba-SP Region." In this study, rigorous calculations and simulations using the PVSyst tool were conducted to size photovoltaic systems tailored to the needs of low-voltage consumer units in the Sorocaba-SP region. The research aimed to compare and analyze the results obtained through theoretical calculations with those obtained in PVSyst simulations, ensuring the accuracy and reliability of the results. This comparison between theoretical and practical results allowed for the assessment of the efficiency of the sized photovoltaic systems. Furthermore, the study also focused on evaluating the positive environmental impact of implementing photovoltaic plants in low-voltage consumer units in the Sorocaba-SP region. The analysis considered the reduction of greenhouse gas emissions, the decrease in dependence on non-renewable energy sources, and the associated benefits of clean and sustainable energy generation. The results of this bachelor's thesis contribute to the advancement of knowledge in the field of renewable energy and highlight the technical and environmental feasibility of sizing photovoltaic plants to meet the needs of low-voltage consumer units in the Sorocaba-SP region. Additionally, this study underscores the importance of adopting clean energy sources as a strategy to mitigate the impacts of climate change and promote energy sustainability.

**Keywords:** photovoltaic power plant; solar energy; solar cells.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oferta interna de Energia.....	19
Figura 2 - Relação entre a Oferta Interna de Energias renováveis e não renováveis no Brasil.....	19
Figura 3 - Relação de Oferta Interna de Energias não renováveis por fonte.....	20
Figura 4 - Relação de Oferta Interna de Energias renováveis por fonte.....	21
Figura 5 - Esquema da geração de energia fotovoltaica.....	21
Figura 6 - Esquemático da geração heliotérmica.....	22
Figura 7 - Oferta Interna de Energias Solar.....	23
Figura 8 - Representação de do espectro da luz solar.....	24
Figura 9 - Respostas espectrais para diversas tecnologias de células solares fotovoltaicas.....	24
Figura 10 - Representação da Radiação Direta e Difusa.....	25
Figura 11 - Representação do ângulo zenital.....	26
Figura 12 - Representação do potencial energético solar na Terra.....	27
Figura 13 - Representação das estações do ano e do movimento translacional da Terra em torno do Sol..	27
Figura 14 - Perfil de irradiância solar ao longo de um dia.....	28
Figura 15 - Representação da média anual típica da radiação solar global diária no Brasil.....	28
Figura 16 - Representação da média anual típica da radiação solar global diária mundial.....	29
Figura 17 - Representação do angulo azimutal no plano horizontal e angulo zenital no plano vertical.....	30
Figura 18 - Representação da declinação aparente do sol ao longo do ano.....	31
Figura 19 - Representação da posição solar em relação ao plano zenital x azimutal replementar a orientação ao norte.....	31
Figura 20 - Representação dos efeitos fotovoltaico e fotoelétrico em materiais.....	32
Figura 21 - Representação dopagem semiconductor tipo P.....	33
Figura 22 - Representação dopagem semiconductor tipo N.....	33
Figura 23 - Estrutura de uma célula fotovoltaica.....	34
Figura 24 - Silício ultrapuro em formato poroso (a), lingote de silício monocristalino (b) e as lâminas de silício monocristalino (c).....	35
Figura 25 - Lingote de silício policristalino.....	36
Figura 26 - Representação esquemática da associação de células fotovoltaicas.....	39
Figura 27 - Representação das camadas que compõem um painel solar.....	40
Figura 28 - Representação esquemática modulo fotovoltaico.....	41
Figura 29 - Representação esquemática associação em série de módulos fotovoltaicos.....	42
Figura 30 - Gráfico de tensão e corrente da associação de módulos fotovoltaicos em série.....	43
Figura 31 - Representação esquemática associação em paralelo de módulos fotovoltaicos.....	44
Figura 32 - Gráfico de tensão e corrente da associação de módulos fotovoltaicos em paralelo.....	44
Figura 33 - Curvas características I-V e P-V de módulos fotovoltaicos.....	46

Figura 34 - Gráfico V-I de células fotovoltaicas com diferentes irradiâncias.....	47
Figura 35 - Relação da temperatura na curva V-I característica de módulos fotovoltaicos.....	47
Figura 36 - Mapa de ângulos de correção para encontrar o norte geográfico a partir da bussola.....	48
Figura 37 - Representação da inclinação da incidência solar em módulos solares.....	48
Figura 38 - Representação esquema eletrônico inversor de tensão CC-CA.....	49
Figura 39 - Representação saída do inversor de tensão na Figura 28.....	49
Figura 40 - Curva característica MPPT (a), efeito da irradiância na potência (b), efeito da temperatura (c).....	50
Figura 41 - Especificações espaciais do painel solar linha JKM da Jinko.....	53
Figura 42 - Dados de irradiação solar para a cidade de Sorocaba-SP.....	61
Figura 43 - Ilustração da associação dos painéis solares em série.....	64
Figura 44 - Trecho da tabela C2 da NBR 16612.....	66
Figura 45 - Esquema para determinação de grau de proteção IP.....	67
Figura 46 - Configuração dos dados de coordenadas geográficas para importação da irradiância da cidade de Sorocaba-SP.....	68
Figura 47 - Dados climatológicos para Sorocaba-SP em média por mês.....	69
Figura 48 - Configuração dos parâmetros de referência de temperatura no PVSyst.....	69
Figura 49 - Orientação azimutal da queda do telhado.....	70
Figura 50 - Configuração da inclinação e orientação dos painéis solares.....	70
Figura 51 - Dados inseridos para modelagem do sistema fotovoltaico no software PVSyst.....	71
Figura 52 - Resultados da produção energética total e rendimento da usina fotovoltaica.....	72
Figura 53 - Resultados da produção energética por mês.....	73
Figura 54 - Diagrama de perdas elétricas da usina solar fotovoltaica.....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação de eficiência de células fotovoltaicas de diferentes topologias	38
Tabela 2 - Distribuição percentual de custos de produção de um módulo fotovoltaico	41
Tabela 3 - Dados técnicos de algumas características do modulo Shell SM 100-12	42
Tabela 4 - Histórico de consumo de uma residência do Grupo B da região de Sorocaba-SP	61
Tabela 5 - Comparativo da produção da USF e o consumo da conta de referência	74
Tabela 6 - Projeção de economia anual com a usina solar fotovoltaica	75

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A - Ampère

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas;

AC - Corrente Alternada

Ah - Ampère hora

ANEEL - Agência Nacional de Engenharia Elétrica;

C - Graus Celsius

CA - Corrente Alternada

CC - Corrente contínua

CD - Custo de Disponibilidade

CPV - Concentrated Photovoltaic

CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito;

CSI - Current Source Inverter

CSP - Concentrated Solar Power

CT - Consumo Total

CV - Cavalos vapor

EP - Energia a ser produzida

GaAs - Arseneto de Gálio

GW - Giga Watts

InP - Fosfato de Índio

Irr - Irradiação Solar Média diária

Isc - Corrente de curto-circuito

kW - Quilowatt pico

kWh - Quilowatt hora

MIGDI - Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica

MW - Mega watt

MWp - Megawatt pico

N - Número de Placas

RN - Resolução Normativa

SFCR - Sistema fotovoltaico conectado à rede

SFD - Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares

SFI - Sistemas Fotovoltaicos Isolados

SI- Silício

SIGFI - Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente

TC - Transformador de corrente

TUG - Tomada de uso geral

UC - Unidade Consumidora

V - Volts

Vdc - Tensão em corrente contínua

Vip - Máxima tensão de entrada do inversor

Voc - Tensão em circuito aberto

Wh - Watt hora

Wp - Watt hora pico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>OBJETIVO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2</b>	<b>ESTRUTURA DO TRABALHO .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>REVISÃO HISTÓRICA .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>REVISÃO CONCEITUAL .....</b>	<b>18</b>
2.2.1	<i>Tipos de energia elétrica .....</i>	<i>18</i>
2.2.1.1	Não renováveis .....	19
2.2.1.2	Renováveis.....	20
2.2.2	<i>Energia Solar.....</i>	<i>21</i>
2.2.3	<i>Radiação solar.....</i>	<i>25</i>
2.2.3.1	Tipos de radiação solar .....	25
2.2.4	<i>Radiação solar no brasil .....</i>	<i>26</i>
2.2.4.1	Irradiância .....	29
2.2.4.2	Insolação .....	30
2.2.4.3	Ângulo azimutal.....	30
2.2.4.4	Altura solar .....	31
2.2.5	<i>Efeito fotovoltaico e fotoelétrico .....</i>	<i>32</i>
2.2.6	<i>Células fotovoltaica .....</i>	<i>32</i>
2.2.6.1	Silício monocristalino .....	34
2.2.6.2	Silício policristalino.....	35
2.2.6.3	Filmes finos .....	36
2.2.6.4	Comparação entre as topologias .....	37
2.2.7	<i>Módulos fotovoltaicos.....</i>	<i>39</i>
2.2.8	<i>Associação módulos fotovoltaicos.....</i>	<i>41</i>
2.2.8.1	Conexão em série.....	42
2.2.8.2	Conexão em paralelo .....	43
2.2.9	<i>Características elétricas dos módulos solares .....</i>	<i>45</i>
2.2.9.1	Curvas característica i-v e p-v .....	45
2.2.10	<i>Condições características elétricas dos módulos solares .....</i>	<i>46</i>
2.2.10.1	Intensidade luminosa (irradiância) .....	46
2.2.10.2	Temperatura das células .....	47
2.2.11	<i>Orientação das placas solares.....</i>	<i>48</i>
2.2.12	<i>Inversores de tensão .....</i>	<i>49</i>
2.2.12.1	MPPT .....	50
2.2.12.2	Inversor solar on grid.....	51
2.2.12.3	Inversor solar off grid .....	51
2.2.12.4	Inversor solar híbrido.....	52
2.2.12.5	Microinversor solar.....	52

<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>53</b>
<b>3.1</b>	<b>PAINEL FOTOVOLTAICO</b> .....	<b>53</b>
<b>3.2</b>	<b>INVERSOR</b> .....	<b>54</b>
<b>3.3</b>	<b>MEDIDOR BIDIRECIONAL</b> .....	<b>54</b>
<b>3.4</b>	<b>ELEMENTOS DE PROTEÇÃO ELÉTRICA</b> .....	<b>55</b>
3.4.1	<i>Diodos de string</i> .....	55
3.4.2	<i>Disjuntores</i> .....	56
3.4.2.1	Bipolar .....	56
3.4.2.2	Diferencial / Residual .....	56
3.4.2.3	DPS .....	57
3.4.3	<i>Fusíveis</i> .....	57
3.4.4	<i>String box</i> .....	57
<b>3.5</b>	<b>PVSYST</b> .....	<b>58</b>
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>60</b>
<b>4.1</b>	<b>POTÊNCIA FOTOVOLTAICA NECESSÁRIA</b> .....	<b>60</b>
<b>4.2</b>	<b>NÚMERO DE PAINÉIS SOLARES</b> .....	<b>62</b>
<b>4.3</b>	<b>SELEÇÃO DE INVERSOR DE TENSÃO</b> .....	<b>63</b>
<b>4.4</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DO CABEAMENTO</b> .....	<b>64</b>
<b>4.5</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DAS STRINGS BOX</b> .....	<b>66</b>
4.5.1	<i>Involucro</i> .....	67
<b>4.6</b>	<b>CONFIGURAÇÕES DE SIMULAÇÃO</b> .....	<b>68</b>
4.6.1	<i>Dados climáticos de Sorocaba-SP</i> .....	68
4.6.2	<i>Determinação da geolocalização</i> .....	69
4.6.3	<i>Configurações finais da simulação</i> .....	71
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>72</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>77</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>78</b>
	<b>APENDICE A – RELATÓRIO DE RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NO PVSYST</b> .....	<b>83</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes de energia sustentáveis tem ganhado destaque global, impulsionada pela necessidade urgente de mitigar os impactos ambientais associados ao uso predominante de combustíveis fósseis (UNEP, 2021). Neste contexto, a energia solar emerge como uma alternativa essencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover uma transição eficaz para uma matriz energética mais limpa e sustentável (IEA, 2020).

Diante desse cenário, a busca por aproveitar a energia gerada pelo Sol, tanto como fonte de calor quanto de luz, revela-se como uma das alternativas energéticas mais promissoras para suprir as necessidades humanas. O Sol é não apenas a origem primordial da energia, mas também a precursora de praticamente todas as demais fontes energéticas na Terra (Pinho; Galdino, 2014).

O registro inaugural da geração de energia solar remonta a 1839, quando o físico francês Edmond Becquerel observou o efeito fotovoltaico de placas de material semicondutor em contato com um eletrólito. No entanto, foi somente em 1954 que a primeira célula solar eficiente foi desenvolvida por Calvin Fuller, apresentando 6% de eficiência e encontrando aplicação prática em Americus, Georgia, alimentando uma rede telefônica (Vallêra; Brito, 2006).

Estudos recentes revelam que a energia solar fotovoltaica, iniciada na década de 1950, está ganhando destaque no cenário nacional. A conversão da energia solar em elétrica através de painéis fotovoltaicos destaca-se como uma forma promissora de energia alternativa, impulsionando a produção de energia limpa em demandas residenciais e empresariais (MME, 2020).

Visando contribuir para uma compreensão abrangente dos sistemas fotovoltaicos residenciais em Sorocaba-SP, este estudo não apenas fornece insights valiosos sobre o dimensionamento, mas também busca oferecer diretrizes práticas embasadas em dados específicos da região e em considerações climáticas (CRESESB, 2022). As contribuições deste trabalho não se limitam ao contexto acadêmico; ele se apresenta como um guia essencial para a maximização do potencial da energia solar em residências de baixa tensão em Sorocaba-SP, contribuindo para a construção de comunidades mais sustentáveis e resilientes (ONU, 2020).

## 1.1 Objetivo

Este estudo concentra sua atenção no dimensionamento de usinas fotovoltaicas destinadas a unidades consumidoras de baixa tensão na região de Sorocaba-SP. Abordando não apenas aspectos técnicos, mas também considerando os desafios específicos dessa localidade, o projeto se propõe a contribuir para a expansão da adoção de fontes de energia renovável.

O contexto global de mudanças climáticas e a necessidade de reduzir a pegada de carbono convergem diretamente com a crescente importância de iniciativas sustentáveis, como as usinas fotovoltaicas em nível residencial (CRESESB, 2022).

## **1.2 Estrutura do trabalho**

Na exploração conceitual do Capítulo 1, serão abordados aspectos fundamentais relacionados à energia solar, tais como altura solar, efeitos fotovoltaicos e tipos de células fotovoltaicas, comparando suas topologias (Kazmerski, 2010). Além disso, serão discutidos módulos fotovoltaicos, suas características elétricas e fatores que afetam essas características, com destaque para a importância da orientação adequada dos painéis solares e a introdução aos diferentes tipos de inversores de tensão, como on-grid, off-grid, híbridos e microinversores, incluindo a tecnologia de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT) (Chaves-Neto, 2018).

No Capítulo 2, serão apresentados os materiais e métodos utilizados neste estudo, detalhando os componentes essenciais de um sistema fotovoltaico, como painéis fotovoltaicos, inversores, medidores bidirecionais e elementos de proteção elétrica, com base em referências bibliográficas de órgãos especializados (IEA, 2020). Destaca-se a relevância da ferramenta PVsyst, que desempenha um papel crucial na simulação e análise de sistemas fotovoltaicos (IEA, 2020).

No Capítulo 3, será abordada a fase de desenvolvimento, com ênfase na determinação da potência fotovoltaica necessária, seleção do número de painéis solares, escolha do inversor adequado, dimensionamento do cabeamento e configuração das strings boxes. Este capítulo ressaltará a importância da utilização de dados climáticos específicos para a região de Sorocaba-SP e discutirá as configurações finais de simulação, fundamentando-se em dados do CRESESB e de fontes climáticas locais (CRESESB, 2022).

O Capítulo 4, por sua vez, conduzirá às conclusões deste estudo abrangente, destacando a viabilidade e sustentabilidade dos sistemas fotovoltaicos para unidades consumidoras de baixa tensão em Sorocaba-SP. Ele enfatizará não apenas o potencial da adoção de energia limpa para mitigar as mudanças climáticas, mas também para promover a sustentabilidade energética na região, com base em informações do BEN (Balanço Energético Nacional) e dados climáticos específicos (MME, 2020). Este trabalho, assim, fornecerá insights valiosos sobre o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, consolidando-se como um guia abrangente para otimizar o aproveitamento da energia solar em Sorocaba-SP.

## 2 REVISÃO

Para trazer a lucidez sobre o tema abordado e conhecimentos necessários para o desenvolvimento do trabalho, a revisão histórica e conceitual a seguir simplifica a compreensão da abordagem utilizada neste trabalho.

### 2.1 Revisão Histórica

A eletricidade tem sua história contada, provavelmente desde antes de Cristo. Referências em trabalhos filosóficos apontam sobre a atração que o âmbar exercia em corpos leves, segundo constatação de Tales de Mileto (640-546 a.C.). Foi ele também que, observou a atração do ferro pelo ímã (Cindra; Teixeira, 2005).

Depois de vários apontamentos, ainda na Grécia, observou que minerais atritados também exerciam atração em corpos leves, o tema conhecido atualmente como eletricidade estática teve protagonismo em um trabalho publicado por volta de 1600 por Willian Gilbert (1544 – 1603) intitulado *De Magnete, Magneticisque Corporibus, et Magno Magnete Tellure*. Neste trabalho, Gilbert observa que a fricção em corpos como vidro e enxofre induzia o mesmo efeito observado por Mileto ao friccionar o âmbar, efeito denominado por *electricus* (Guimarães, 2019).

Ainda por volta de 1600, já na segunda metade do século, é inventada por Otto Von Guericke o que é conhecida como a primeira máquina eletrostática, numa descrição livre de Otto, “uma pluma é atraída pela bola e ao entrar em contato com ela, é repelida, contudo acompanha à distância o movimento da bola. Ouvem-se sons crepitantes e os sinais são visíveis no escuro” (Guericke, 1672).

Já no século XVIII, Stephen Gray (1666 – 1736), trouxe o conceito da passagem da propriedade elétrica através de diferentes materiais, dando início ao estudo de materiais condutores e não condutores. Charles-François de Cisternay Dufay (1698 – 1739) menciona o conceito de eletricidade *vítrea* e *resinosa* que trouxe o tema tratado atualmente como cargas de diferentes polaridades que exercem atração elétrica uma sobre a outra.

Este conceito foi mais explorado em *Experiences et observations sur l'électricité* publicado por Benjamin Franklin (1706-1790) em Londres (Boss, 2012).

A ideia de corpos eletrizados positivamente e negativamente, além de considerar a eletricidade como um fluido impregnado em todos os corpos, trouxe também o princípio da conservação da carga elétrica, que diz que uma carga elétrica não pode ser criada e nem destruída e que a quantidade de cargas positivas e negativas no universo é sempre conservada

e dada pela diferença da soma das cargas elétricas positivas menos as negativas (Martins, 2019). No mesmo século, Charles Augustin de Coulomb (1736 – 1806) propõe a lei da força que atua entre cargas elétricas e entre polos magnéticos, reforçando o estudo de Franklin dizendo que a eletricidade é composta por fluidos elétricos positivos e negativos (Nardi; Silva, 2021)

No final do século XVIII e começo do século XIX, Alessandro Volta (1745 – 1827), que não concordava com o experimento da eletricidade animal descrita por Luigi Galvani (1737 – 1798), desenvolveu a pilha elétrica com discos de prata e zinco separados por carões embebidos de água salgada. Neste experimento ele notou que conforme inseria mais discos, maior era a intensidade de choques elétricos (Frazão, [201-]).

No mesmo período, André-Marie Ampère (1775 – 1836) cria a convenção sobre o sentido em que a corrente elétrica flui, propondo que ela sai do positivo em direção ao negativo e com a criação de um instrumento chamado galvanômetro, que realiza a medição da energia e indica o sentido da corrente (Frazão, [201-]).

Ainda no século XIX, Alexandre Edmond Becquerel (1820 – 1891) enquanto conduzia experiências eletroquímicas, notou que a exposição à luz de eletrodos de platina ou prata gerava um efeito fotovoltaico, ou seja, quando expostos ao sol, os eletrodos geravam corrente elétrica (Fadigas, 2012).

A serendipidade ocorreu também para a construção da primeira célula fotovoltaica quando Willoughby Smith (1828 – 1891) desenvolvia elementos para obter uma alta resistência para sistema de sinalização, submergiu barras de selênio e notou que a resistividade dos materiais se alterava de acordo com a intensidade da luz a que eram submetidas (IST, 2004).

Por volta de 1877, o primeiro dispositivo sólido de foto produção de eletricidade foi desenvolvido, constituído por um filme de selênio depositado em um substrato de ferro e um filme fino de ouro para contato frontal.

Este dispositivo foi aprimorado por Charles Fritts (1850 – 1903) que construiu o que é conhecido hoje como as primeiras células solares, ainda com os mesmos elementos do dispositivo de foto-produção, mas variando a topologia e quantidades (IST, 2004).

Apesar desta invenção, as células ganharam mercado após aplicações práticas feitas por Werner Siemens (1816 – 1892) que comercializou o fotômetro, dispositivo que mede intensidade da luz (IST, 2004). Foi por volta de 1954 que Russel Ohl (1898 – 1987) utilizando conceito de dopagem de silício desenvolveu a primeira célula solar (IST, 2004).

Datada como uma das primeiras utilizações, os painéis solares, (nome dado a um painel composto por várias células solares), ocorreram em 1958 no satélite *Vanguard I*, em um painel que produzia 1 W para alimentar o sistema de comunicação (Vallêra; Brito, 2006).

Em 1976, ocorreu a criação das primeiras células de silício amorfo pelos engenheiros David Carlson e Christopher Wronski, essas células que tinha uma eficiência de 1,1% (Machado; Miranda, 2015). Anos depois, por volta de 1992, na Universidade da Florida do Sul, foi desenvolvida uma célula de filme fino que tinha uma eficiência de 15,89%.

Com os estudos sobre células solares em alta, por volta de 1994 nos Estados Unidos, no *National Renewable Energy Laboratory*, NREL, no Colorado, foi obtida uma célula que passou de 30% de eficiência, utilizando dopagens de gálio fosforeto de índio/arsenito de gálio (Machado; Miranda, 2015).

Foi em 1999 que a capacidade mundial de energia elétrica gerada a partir de painéis solares atingiu a marca de 1 GW, gigawatts. Estes sistemas ainda eram *off-grids*, ou seja, desconectados da rede elétrica pública.

No ano 2000, foram constituídos os sistemas *on-grid*, sistemas conectados na rede elétrica convencional, com o objetivo de suprir energia à rede (DISOLE, [201-]).

Em 2012, surge a resolução normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica do Brasil, ANEEL que estabeleceu as condições gerais de microgeração e minigeração. A Resolução normativa 482 permite ao consumidor gerar sua própria energia renovável conectada à rede de distribuição, disponibilizando créditos energéticos. Em 2015 a ANEEL traz a definição de microgeração (potência até 75kW) e minigeração (de 75kW a 5MW), a Resolução normativa 687 de 2015.

Nota-se que desde a invenção até a popularização da energia solar passaram-se menos de 30 anos, sendo regulamentada no Brasil há menos de 10 anos, o que torna o conceito de energia renovável recente. Segundo estudo publicado em 2018 no Congresso Brasileiro de Energia Solar CBENS, a energia solar fotovoltaica, comparada a outras energias limpas é a que possui menores impactos ambientais, sendo estes impactos relacionado principalmente a produção e descarte dos painéis (Alves, 2016), uma vez que a produção energética demanda de uma quantidade mínima de água na etapa de manutenção para lavagem.

## **2.2 Revisão Conceitual**

### *2.2.1 Tipos de energia elétrica*

A energia elétrica pode ser descrita como as movimentações dos elétrons em um material condutor ou semicondutor, como por exemplo, em materiais metálicos que conectam a tomada até a televisão (EPE, 2022)

É possível notar o aumento percentual de energias renováveis oferta interna de energia, OIE, no Brasil com relação as energias não renováveis, como visto na Figura 1, (EPE, 2022) baseando-se em valores energéticos de tonelada equivalente em petróleo (tep).

Figura 1 - Oferta interna de Energia

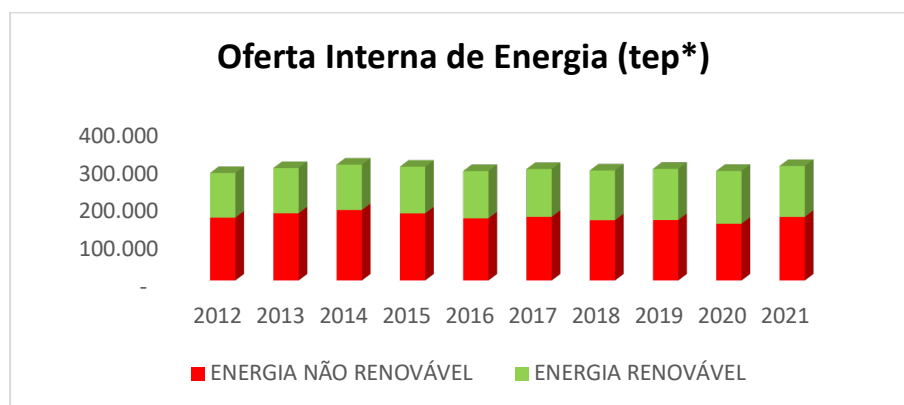
IDENTIFICAÇÃO	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	IDENTIFICATION
<b>ENERGIA NÃO RENOVÁVEL</b>	<b>164.634</b>	<b>176.166</b>	<b>184.724</b>	<b>175.879</b>	<b>162.791</b>	<b>166.827</b>	<b>157.768</b>	<b>158.316</b>	<b>148.518</b>	<b>166.597</b>	<b>NON-RENEWABLE ENERGY</b>
PETRÓLEO E DERIVADOS	111.118	116.197	119.981	111.602	105.170	106.075	99.407	100.898	95.247	103.625	PETROLEUM AND OIL PRODUCTS
GÁS NATURAL	32.598	37.792	41.373	40.971	35.569	37.938	35.905	35.909	33.824	40.225	NATURAL GAS
CARVÃO MINERAL E COQUE	15.288	16.479	17.521	17.625	15.920	16.791	16.421	15.435	14.027	17.017	COAL AND COKE
URÂNIO (U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	4.286	4.107	4.036	3.855	4.211	4.193	4.174	4.292	3.727	3.900	URANIUM - U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
OUTRAS NÃO RENOVÁVEIS	1.343	1.592	1.814	1.826	1.921	1.831	1.860	1.780	1.693	1.829	OTHER NON-RENEWABLE
<b>ENERGIA RENOVÁVEL</b>	<b>118.392</b>	<b>119.957</b>	<b>120.567</b>	<b>123.771</b>	<b>125.422</b>	<b>126.673</b>	<b>131.922</b>	<b>135.642</b>	<b>139.966</b>	<b>134.881</b>	<b>RENEWABLE ENERGY</b>
HIDRÁULICA <sup>1</sup>	39.181	37.094	35.020	33.898	36.267	35.024	36.460	36.364	36.215	33.189	HYDRAULIC AND ELECTRICITY <sup>1</sup>
LENHA E CARVÃO VEGETAL	25.683	24.580	24.936	24.900	23.095	24.423	25.527	25.725	25.710	26.083	FIREWOOD AND CHARCOAL
DERIVADOS DA CANA-DE-AÇÚCAR	43.557	47.603	48.170	50.648	50.318	49.758	50.090	52.841	54.933	49.442	SUGAR CANE PRODUCTS
EÓLICA	434	566	1.050	1.860	2.880	3.644	4.169	4.815	4.906	6.217	WIND
SOLAR	0	0	1	5	7	72	298	572	924	1.441	SOLAR
OUTRAS RENOVÁVEIS	9.537	10.114	11.390	12.460	12.855	13.751	15.378	15.325	17.277	18.510	OTHER RENEWABLE
<b>TOTAL</b>	<b>283.026</b>	<b>296.123</b>	<b>305.291</b>	<b>299.650</b>	<b>288.212</b>	<b>293.501</b>	<b>289.690</b>	<b>293.957</b>	<b>288.483</b>	<b>301.478</b>	<b>TOTAL</b>

1. Inclui importação de eletricidade oriunda de fonte hidráulica. 1 kWh = 860 kcal (equivalente térmico teórico - primeiro princípio da termodinâmica).

Fonte: EPE (2022)

Com base nos dados da Figura 1 é possível observar o comportamento relacional da Oferta Energética Interna, na Figura 2, onde há um aumento na Energia Renovável.

Figura 2 - Relação entre a Oferta Interna de Energias renováveis e não renováveis no Brasil



Fonte: Adaptado de EPE (2022)

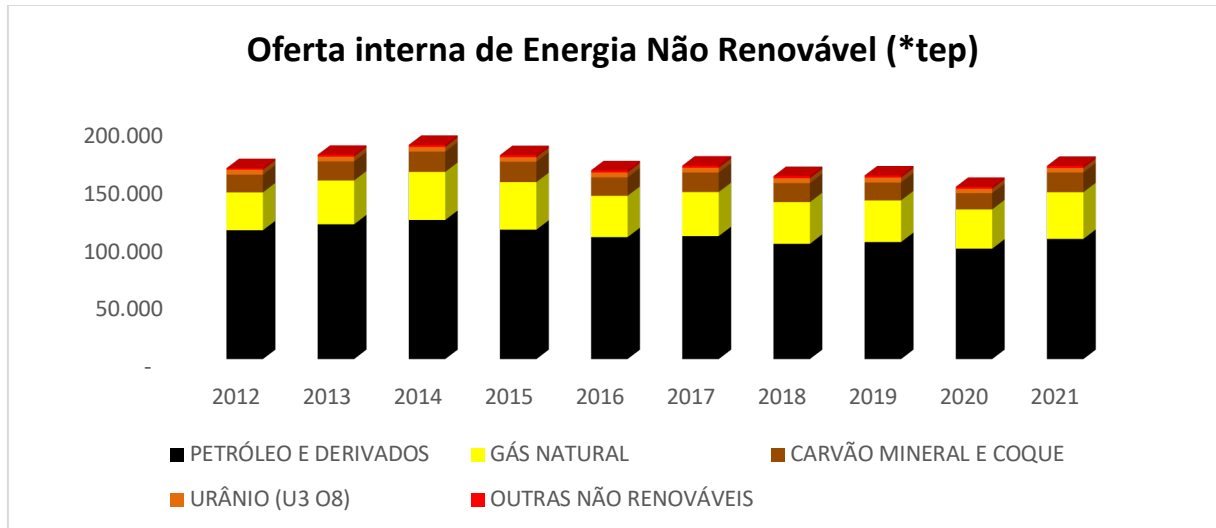
\*tep, tonelada equivalente em petróleo, 1 tep = 41,86 x 10<sup>9</sup> J

### 2.2.1.1 Não renováveis

São consideradas energias não renováveis aquelas que pertencem ao grupo de energias finitas ou esgotáveis. Sua produção é menor que a demanda pela matéria prima, ou seja, quanto mais usadas, menor o estoque total (EPE, 2022).

Conhecidas também como fontes de energias convencionais, são de fontes fósseis, como o carvão mineral, gás natural (derivado do petróleo) ou energia nuclear.

Figura 3 - Relação de Oferta Interna de Energias não renováveis por fonte



Fonte: Adaptado de EPE (2022)

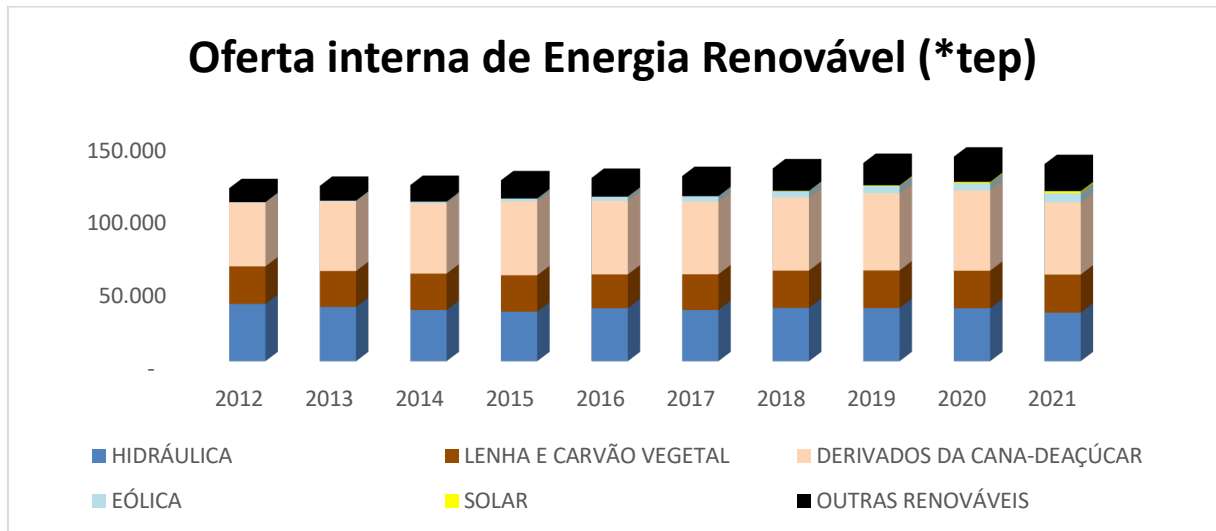
Pela Figura 3 é possível notar as principais fontes de ofertas internas energias, na qual o petróleo e o gás representam uma decrescente no valor total, com leve alta em 2021, representando 34,4% da Oferta total.

#### 2.2.1.2 Renováveis

São consideradas energias renováveis aquelas cuja fonte principal responsável pela geração da energia elétrica é considerada inesgotável (EPE, [ca. 2018]), pois as quantidades se renovam constantemente ao serem usadas.

Energias renováveis são consideradas como energias limpas, pois emitem menos gases do efeito estufa, GEE, tendo um impacto positivo e boa inserção no mercado brasileiro e mundial (EPE, [ca. 2018]). Na Figura 4 é possível notar a relação entre as fontes de energia renovável no Brasil.

Figura 4 - Relação de Oferta Interna de Energias renováveis por fonte



Fonte: Adaptado de EPE (2022)

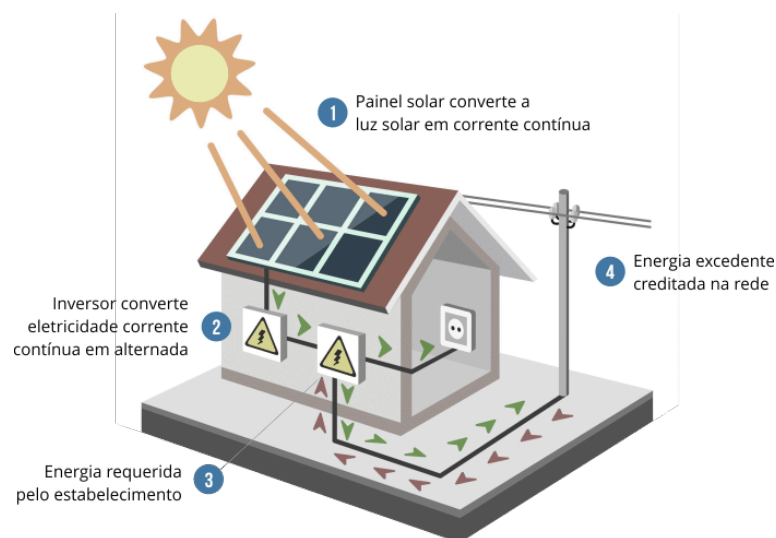
\*tep, tonelada equivalente em petróleo

### 2.2.2 Energia Solar

Apesar de existirem vários tipos de fontes de energia renováveis no Brasil, dar-se-á ênfase à energia solar, foco deste estudo. Ela pode ser gerada a partir da luz solar (que incide em painéis fotovoltaicos) ou aproveitando calor, nas usinas heliotérmicas.

Nos painéis fotovoltaicos, a radiação solar interage com o material semicondutor, gerando eletricidade (EPE, [ca. 2018]). Este fluxo está descrito na Figura 5:

Figura 5 - Esquema da geração de energia fotovoltaica

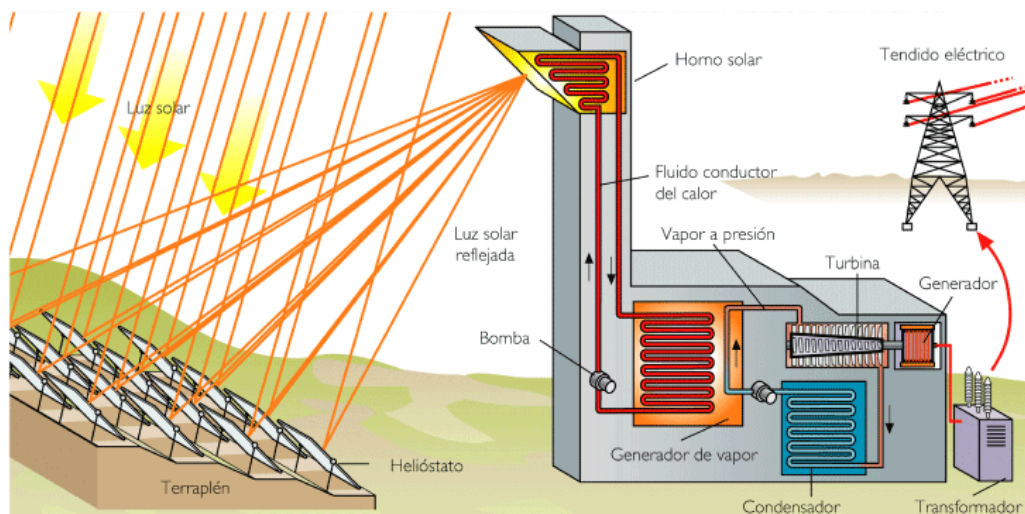


Fonte: COGERA (2021)

A energia heliotérmica consiste em direcionar a luz do sol para um receptor, este receptor aquece a água que está conectada entre um condensador e a turbina, este aquecimento faz com que a água flua para a turbina, onde o fluxo mecânico gera uma energia cinética na turbina que é convertida em energia elétrica por um gerador.

O fluxo da água é fechado, portanto, após sair da turbina a água retorna ao reservatório, passando por um condensador para esfriar e repetir o processo (EPE, [ca. 2018]). A energia gerada passa por uma transformação para ser disponibilizada na rede elétrica, como visto na Figura 6.

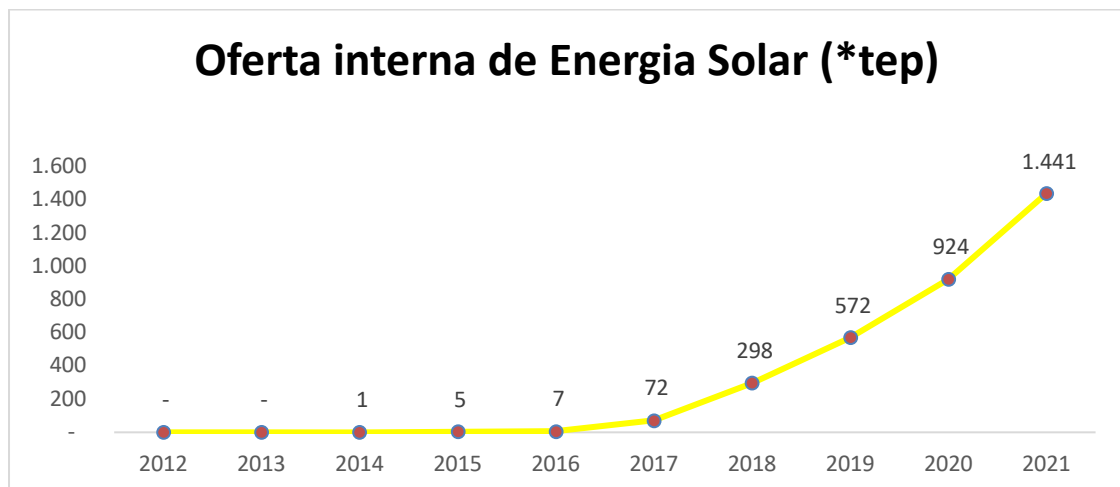
Figura 6 - Esquemático da geração heliotérmica



Fonte: ELETROBRAS (2004)

Apesar de não representar um percentual expressivo, como visto na Figura 4, a energia solar tem apresentado um crescimento exponencial no aspecto de Oferta interna de Energia desde 2014. Pela Figura 7 é possível notar tal comportamento.

Figura 7 - Oferta Interna de Energias Solar



Fonte: Adaptado de EPE (2022)

A energia solar é transmitida para a Terra na forma de radiação eletromagnética sendo assim, possui frequências e comprimentos de ondas distintos, como representado na Figura 8.

A energia transmitida está relacionada diretamente a frequência, enquanto o comprimento da onda é inversamente proporcional a sua frequência (Villalva; Gazoli, 2012).

Pela equação (1) de Plank-Einstein é possível relacionar a frequência e energia de uma onda eletromagnética:

$$E = h * f \quad (1)$$

Onde:

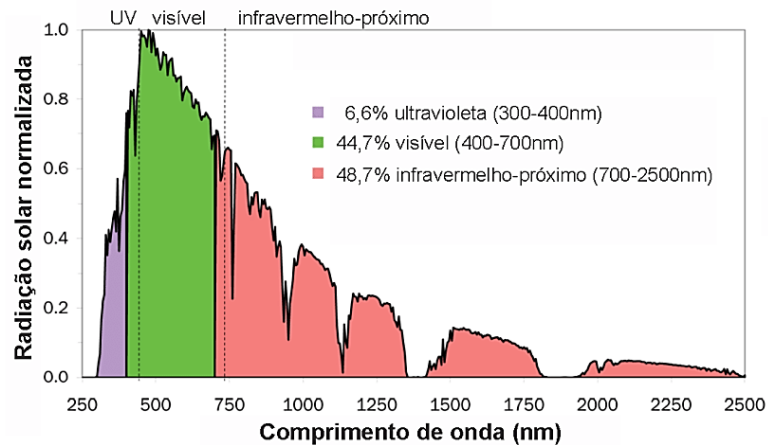
$E$  equivale a energia da onda (expressa em Joules [J] ou elétrons-volt [eV]);

$f$  é a frequência em Hertz [Hz]

$h$  representa a constante física de proporcionalidade (constante de Plank) que equivale aproximadamente a  $6,636.10^{-34}$ [J.s]

Considerando a propagação da luz solar, conforme equação (2) é possível denotar os diferentes espectros incidentes na atmosfera terrestre, como representados na figura 8:

Figura 8 - Representação de do espectro da luz solar

Fonte: Souza *et al* (2017)

$$c = \lambda * f \quad (2)$$

Onde:

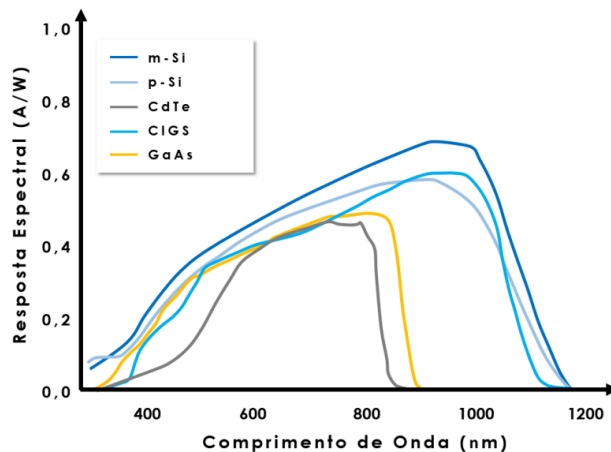
C equivale a velocidade da luz no vácuo (aproximadamente 300.000 km/s);

$\lambda$  representa o comprimento da onda (em metros);

As ondas eletromagnéticas oriundas do Sol se difundem em diferentes frequências onde uma pequena parcela pode ser captada pelo olho humano, mas o maior intervalo é imperceptível a olho nu, como denotado na figura 8.

Quando considerado diferentes topologias, como Silício monocristalino (m.Si), Silício Policristalino (p.Si), Telureto de Cádmio (CdTe), Disseleneto de Cobre – Índio – Gálio (CIGS) e Arseneto de Gálio (GaAs), nota-se que segundo representado na figura 9, a maior geração fotovoltaica é vista nos comprimentos dentro do espectro visível.

Figura 9 - Respostas espectrais para diversas tecnologias de células solares fotovoltaicas



Fonte: Linhares, Soares e Medeiros (2018)

### 2.2.3 Radiação solar

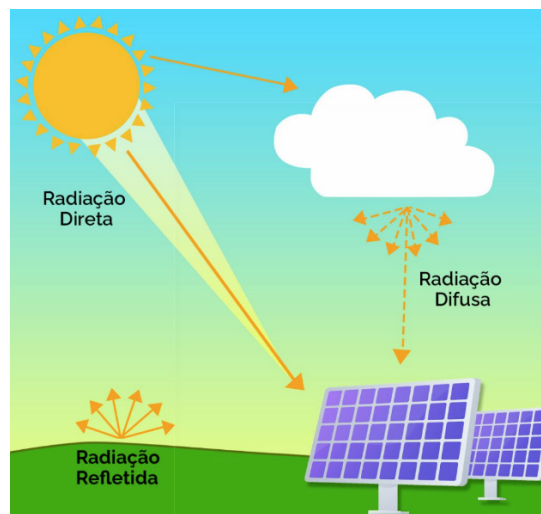
A radiação solar pode ser definida como o conjunto de todas as frequências de ondas eletromagnéticas emitidas pelo Sol. Todo espectro de radiação transporta energia podendo ser captada como calor ou energia elétrica. Antes de atingir a atmosfera, cerca de 53% da radiação é invisível para o olho humano, se dividindo por uma pequena parcela de comprimento infravermelho e maior parcela em ultravioleta. Os outros 47% estão no espectro de comprimento visíveis sendo estes comprimentos os mesmos utilizados por plantas para realização da fotossíntese (Villalva; Gazoli, 2012).

Alguns materiais possuem a capacidade de absorção de radiação quando incididos por ondas eletromagnéticas transformando essa radiação em energia cinética, essa energia pode ser transmitida em forma de energia térmica. Essa transmissão agita as moléculas do material e quanto maior a radiação recebida, maior a agitação das moléculas e conseqüentemente, maior a temperatura percebida. (Pinho; Galdino, 2014).

#### 2.2.3.1 Tipos de radiação solar

A radiação solar, antes de incidir na superfície terrestre pode sofrer interferências das nuvens, ar atmosférico e poluição. A radiação total, também denominada de radiação global, incidente na superfície terrestre é composta por raios solares que chegam de todas as direções, são absorvidos ou refletidos por partículas de ar, vapor poeira e nuvens, ou incididos diretamente. Essas formas de radiação são denominadas de radiação difusa e radiação direta, respectivamente, como é possível verificar na Figura 10.

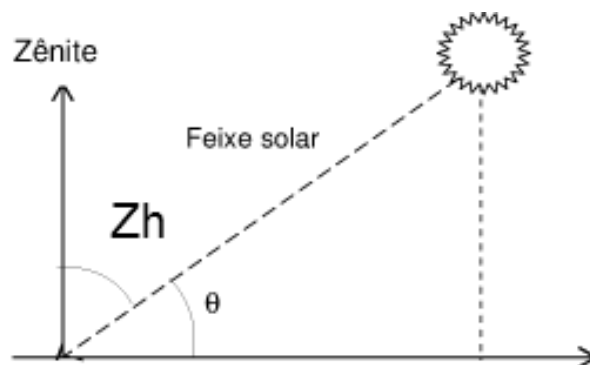
Figura 10 - Representação da Radiação Direta e Difusa



Fonte: Villalva e Gazoli (2023)

A direção do raio solar é definida pelo ângulo zenital que é formada pelo zênite, também conhecido como linha imaginária do observador até a esfera celeste. O ângulo zenital é um parâmetro crucial na captação de energia solar, e sua compreensão é fundamental para o dimensionamento adequado dos sistemas fotovoltaicos (Rabl; Dannberg, 1988). Ele representa o ângulo vertical entre a direção do Sol e uma linha perpendicular à superfície da Terra em um local específico. Quanto mais próximo de 90 graus estiver o ângulo zenital, mais diretamente a luz solar atinge a superfície, resultando em maior intensidade de radiação. À medida que o ângulo zenital aumenta, a luz solar percorre uma trajetória mais longa através da atmosfera, o que pode reduzir a quantidade de radiação solar que atinge um painel solar ou outra superfície de captação (Kalogirou, 2014), como visto na Figura 11

Figura 11 - Representação do ângulo zenital



Fonte: Elaborado pelo autor

A radiação direta corresponde aos raios solares incididos em linha reta no plano horizontal dependente do ângulo zenital enquanto a radiação difusa é resultado de reflexões durante a incidência da radiação, chegando à superfície zenital com direção distinta a inclinação direta do plano zenital (Villalva; Gazoli, 2012).

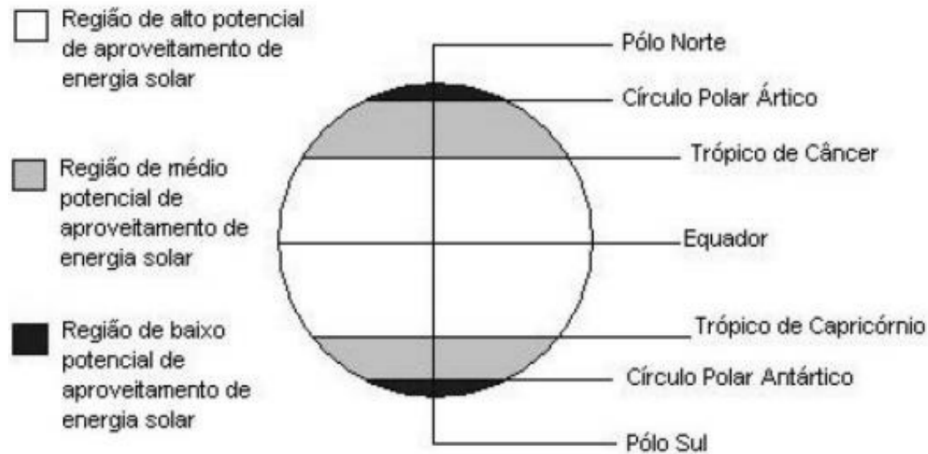
#### 2.2.4 Radiação solar no brasil

A energia solar incidida na Terra em um ano é cerca de 40 vezes maior do que as reservas de urânio, carvão, gás natural e petróleo somadas (OPEC, 2005) e esta mesma energia é cerca de 5 mil vezes maior do que o consumo mundial de eletricidade e energia térmica somados (Hoyt, 1997).

A disponibilidade de radiação solar, também denominada como energia total incidente sobre a superfície terrestre, é dependente das condições atmosféricas, latitude, estações do ano, hora do dia e condições climáticas (ANEEL, 2023). As condições que influenciam podem ser definidas como (Lima, 2003):

Latitude é a distância da linha do Equador medida ao longo do meridiano de Greenwich. Conforme a latitude aumenta a superfície terrestre recebe uma menor radiação, como visto na Figura 12:

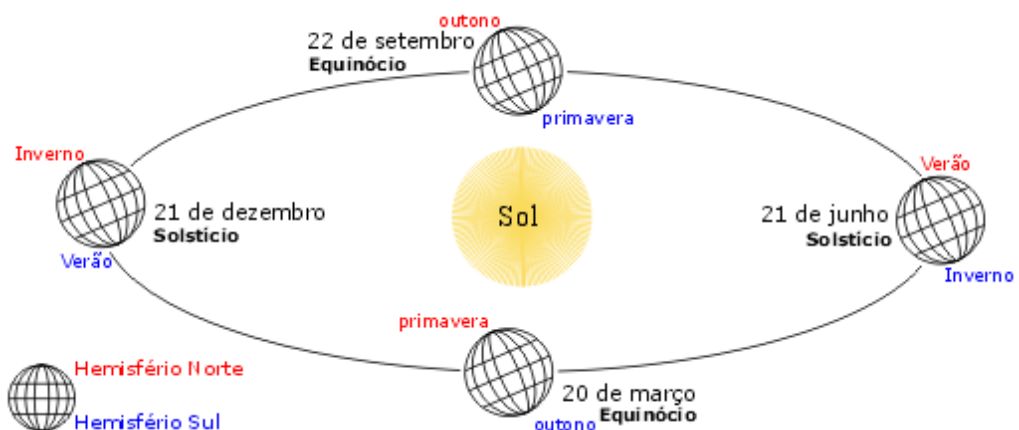
Figura 12 - Representação do potencial energético solar na Terra



Fonte: Sáles (2008)

Estações do ano ditam a intensidade da radiação incidente na superfície terrestre. O movimento de translação da Terra em torno do sol descreve uma órbita elíptica plana em torno do sol, além disso, o eixo de rotação da Terra tem inclinação de  $23^{\circ}27'$  com relação ao plano translacional. Esta inclinação em períodos do ano expõe mais o hemisfério Sul à radiação solar em um período do ano e em outro período o hemisfério norte, como representado na Figura 13.

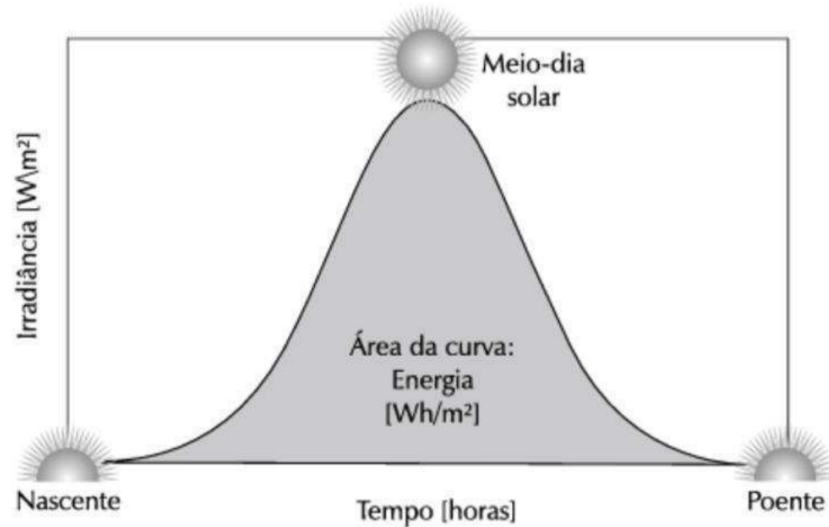
Figura 13 - Representação das estações do ano e do movimento translacional da Terra em torno do Sol



Fonte: Oliveira (2014)

O ângulo zenital pode variar no decorrer do dia, variando a distância da radiação e como visto na equação 1, aumentando a distância  $h$ , a quantidade de energia diminui pelo princípio de conservação de cargas, também denotado na Figura 14.

Figura 14 - Perfil de irradiância solar ao longo de um dia

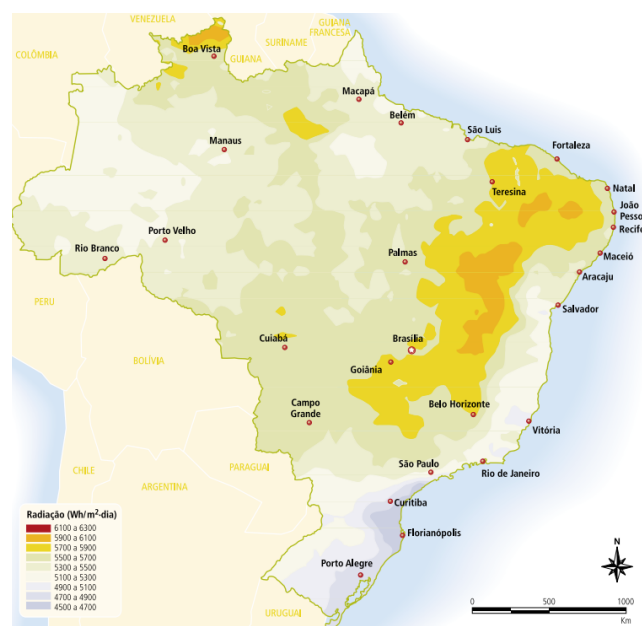


Fonte: Villalva e Gazoli (2012)

Condições atmosféricas, dias enfumaçados, nublados ou poluídos alteram a radiação disponível (Lima, 2003). Contudo, este fator tem ação reduzida de influência, já que a radiação incidente pode ser direta e difusa. Em dias claros, cerca de 10% da radiação é difusa e em dias nublados a radiação difusa representa, frequentemente, toda a radiação disponível (Markel, 1985).

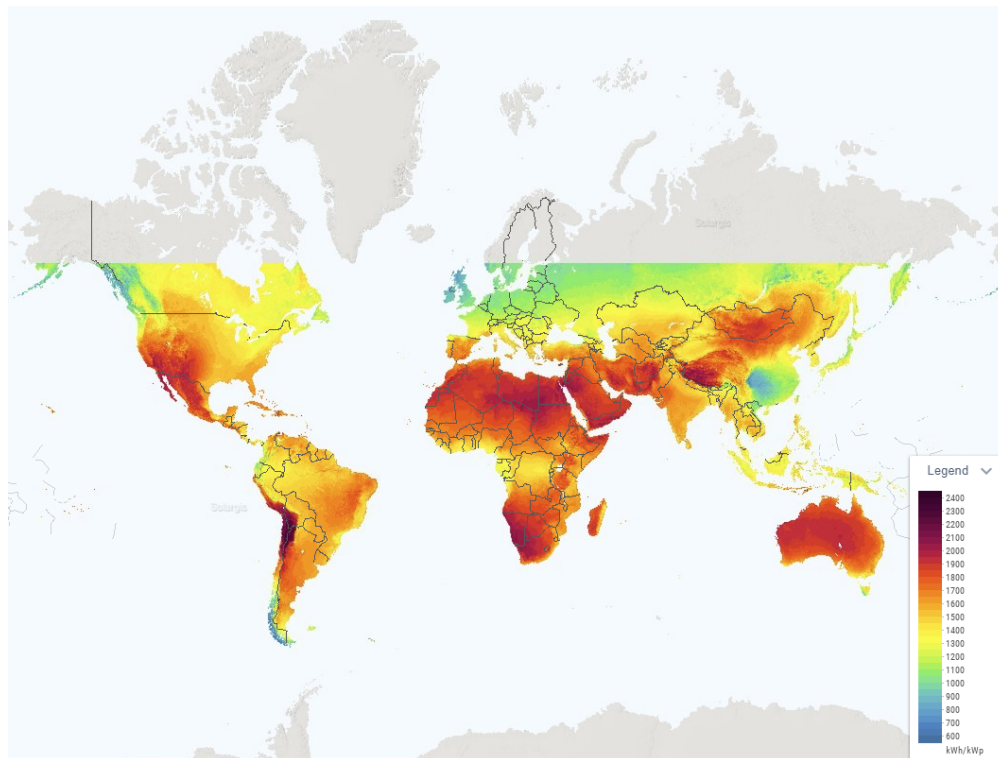
O Brasil encontra-se em uma região entre os trópicos e próxima a linha do equador, privilegiando-se dos elevados índices solarimétricos (Sales, 2008). Este argumento é apoiado pelo atlas solar da ANEEL visto na Figura 15 e o atlas solar global da *Solar and Wind Energy Resource Assessment*, SWERA, visto na Figura 16:

Figura 15 - Representação da média anual típica da radiação solar global diária no Brasil



Fonte: ANEEL (2023)

Figura 16 - Representação da média anual típica da radiação solar global diária mundial



Fonte: SWERA (2023)

#### 2.2.4.1 Irradiância

A irradiância, também denominada como irradiação, é uma grandeza utilizada para quantificar a radiação solar, expressa em  $\text{W/m}^2$  (watt por metro quadrado). Trata de uma unidade de potência e como se sabe, potência é uma grandeza física que expressa energia transportada por um intervalo ou taxa de variação temporal. Pode-se afirmar que quanto maior a potência da radiação solar, irradiância, maior a quantidade de energia transportada por um intervalo de tempo.

Na superfície terrestre a irradiância é em torno de  $1 \text{ kW/m}^2$  e no espaço entre a Terra e o Sol é cerca de  $1,353 \text{ kW/m}^2$ . A irradiância adotada como padrão na indústria fotovoltaica é de  $1 \text{ kW/m}^2$  em praticamente todos os catálogos. Este valor possibilita na avaliação da eficiência de células e módulos fotovoltaicos, sendo este o parâmetro de potência de entrada comparado o resultado com a potência de saída (Villalva; Gazoli, 2012). Desta forma a eficiência dos módulos é a razão entre a potência de saída sobre a potência de entrada padronizada em  $1 \text{ kW/m}^2$  na atmosfera terrestre.

### 2.2.4.2 Insolação

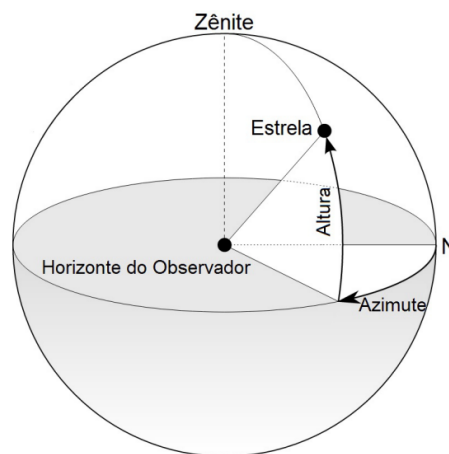
A insolação é uma grandeza que mensura a densidade de irradiância em um intervalo de tempo. Em outras palavras, a insolação, descrita pela unidade  $\text{Wh/m}^2$  (watt hora por metro quadrado) expressa a energia solar incidente em uma área plana por um determinado intervalo de tempo (Villalva; Gazoli, 2012).

É uma grandeza utilizada comumente em tabelas, uma vez que medidores energéticos usualmente mensuram potência por Wh (watt hora).

### 2.2.4.3 Ângulo azimutal

O ângulo azimutal descreve a orientação dos raios solares em relação ao norte geográfico, denotado na Figura 17. Diferentemente do ângulo zenital que utiliza o observador como ponto para a criação do plano vertical, o ângulo azimutal utiliza como referência o plano horizontal orientado ao norte.

Figura 17 - Representação do ângulo azimutal no plano horizontal e ângulo zenital no plano vertical



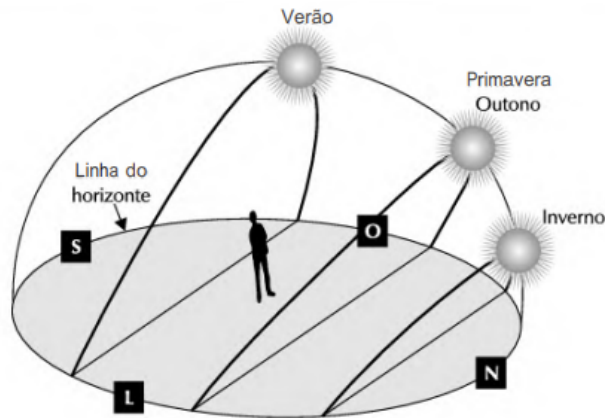
Fonte: Costa e Maroja (2018)

Considerando que a movimentação do sol vai de Leste a oeste, quando o ângulo azimutal coincide com o norte polar para um observador no hemisfério sul, o ângulo azimutal é nulo e este fenômeno é denominado como meio-dia solar (Villalva; Gazoli, 2012). Para observadores do hemisfério norte, o fenômeno pode ser observado orientando o eixo horizontal para o sul geográfico.

#### 2.2.4.4 Altura solar

Outro aspecto que influencia na irradiância é a altura solar, que, devido a movimentos de translação e rotação da Terra é diretamente afetada pelo ângulo de declinação solar, como visto na Figura 18.

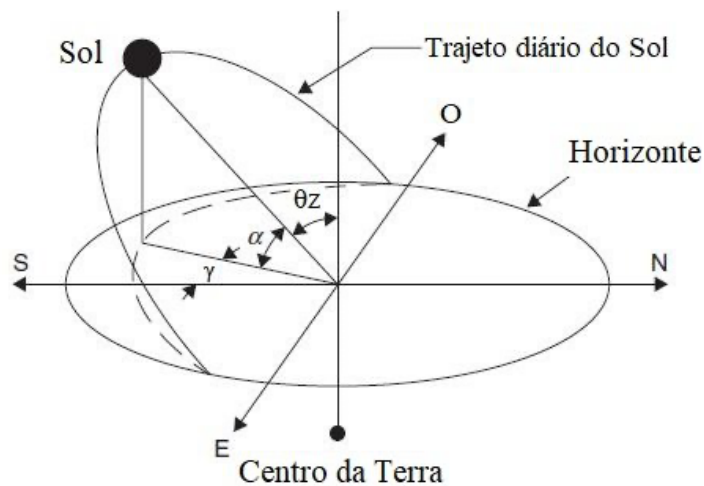
Figura 18 - Representação da declinação aparente do sol ao longo do ano



Fonte: Villalva e Gazoli (2012)

É possível observar a partir da Figura 18, para um observador orientado ao norte, o Sol tem altura maior em épocas de verão e decresce em outras estações. Considerando a Figura 19 nota-se que no verão o ângulo zenital ( $\theta_z$ ) é menor e conseqüentemente, apoiado pelo teorema de Pitágoras, pode-se validar que a distância percorrida pelos raios solares é menor e considerando a conservação de energia com base na equação (1) nota-se que a irradiância nesta estação é mais intensa.

Figura 19 - Representação da posição solar em relação ao plano zenital x azimutal complementar a orientação ao norte

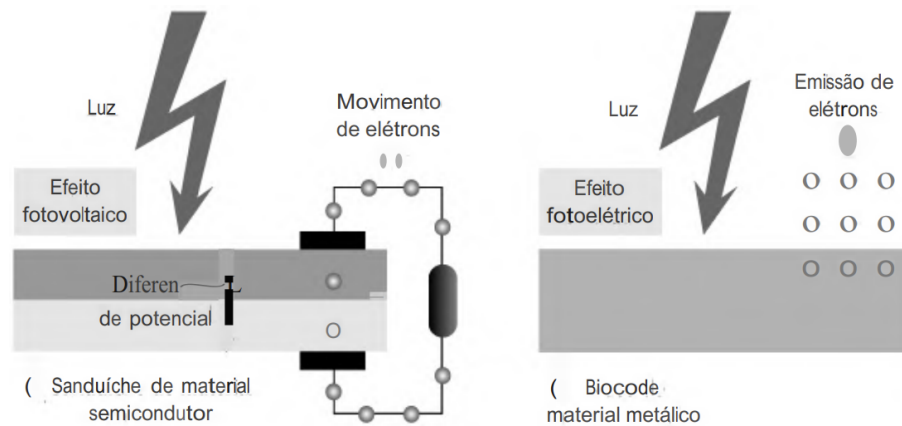


Fonte: Villalva e Gazoli (2012)

### 2.2.5 Efeito fotovoltaico e fotoelétrico

Além da transmissão de calor, as ondas eletromagnéticas podem causar alterações nas propriedades elétricas de materiais específicos. Os efeitos elétricos da radiação podem causar diferentes reações, sendo as de interesse neste estudo o efeito fotovoltaico e fotoelétrico, representados na Figura 20.

Figura 20 - Representação dos efeitos fotovoltaico e fotoelétrico em materiais



Fonte: Villalva e Gazoli (2012)

O efeito fotoelétrico consiste na remoção de elétrons quando incidido a um campo eletromagnético, porém essa remoção não é capaz de gerar diferença de potencial, este efeito pode ser percebido em materiais metálicos não metálicos sólidos, líquidos ou gasosos.

O efeito fotovoltaico consiste na transformação da radiação eletromagnética do Sol em Energia Elétrica através de uma diferença de potencial, também chamada de tensão elétrica. Caso sejam sobrepostos dois semicondutores com características fotovoltaicas e incidir radiação solar, é possível medir uma diferença de potencial e caso seja utilizado um condutor entre as duas camadas que formam o sanduíche, é possibilitada a circulação de elétrons, também denominada como corrente elétrica (Villalva; Gazoli, 2012).

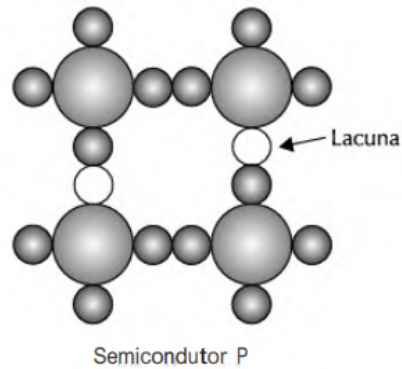
### 2.2.6 Células fotovoltaica

As células fotovoltaicas, constituídas por materiais semicondutores com propriedades fotovoltaicas têm a capacidade de converter a radiação solar em eletricidade.

Tipicamente, células fotovoltaicas são compostas por uma junção de duas camadas de semicondutores, uma do tipo N e outra do tipo P (Pinho; Galdino, 2014). É possível encontrar células com diversas junções P-N, mas do ponto de vista teórico, possui

funcionamento idêntico a de junção única, contudo, não são tão usuais devido ao alto custo de fabricação. Os materiais de silício tipo P são materiais que possuem falta de elétrons. A dopagem deste material gera lacunas nas ligações moleculares, como visto na Figura 21.

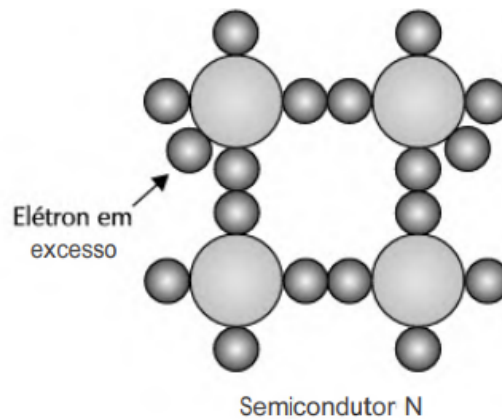
Figura 21 - Representação dopagem semiconductor tipo P



Fonte: Pinho e Galdino (2014)

Materiais de silício tipo N são materiais que possuem excesso de elétrons, a dopagem desse material gera uma sobra de elétrons nas ligações moleculares como visto na Figura 22

Figura 22 - Representação dopagem semiconductor tipo N



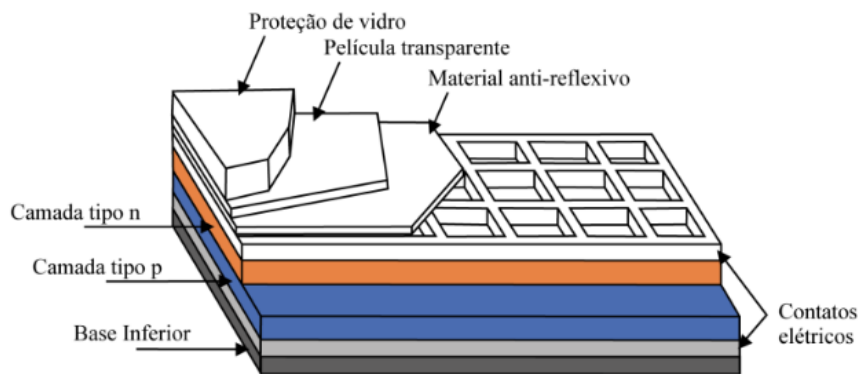
Fonte: Pinho e Galdino (2014)

Quando camadas de semicondutores com diferenças de concentração de elétrons são sobrepostas, isso resulta na formação de uma região chamada de camada de depleção no interior da estrutura da célula fotovoltaica. Essa camada de depleção cria uma barreira de potencial que impede a livre circulação de elétrons entre as regiões tipo N e tipo P do dispositivo. Basicamente, a junção na zona de depleção atua como um "portão" que permite a passagem de elétrons da região tipo N para a região tipo P somente se um potencial elétrico externo for aplicado, superando a resistência na zona de depleção.

Se a célula fotovoltaica não estiver exposta à radiação solar, os elétrons e as lacunas permanecem separados, ficando retidos nas respectivas regiões tipo N e tipo P, separados pela camada de depleção. A energia solar incidente sobre a célula, no entanto, fornece a energia necessária para que os elétrons e lacunas possam superar essa barreira de potencial e gerar uma corrente elétrica quando a célula está sob iluminação solar adequada.

Comercialmente, as células são compostas por duas camadas de semicondutor, P e N, contatos elétricos normalmente uma base metálica e uma grade superior metálica para permitir entrada da radiação solar no semicondutor, películas de proteção, material antirreflexivo para maior absorção da radiação solar e base inferior (Villalva; Gazoli, 2012).

Figura 23 - Estrutura de uma célula fotovoltaica



Fonte: Coelho (2013)

As camadas semicondutoras possuem vários tipos de materiais, estima-se que 95% das células fotovoltaicas no mundo são de silício, por se tratar de material abundantemente encontrado na natureza e barato (Villalva; Gazoli, 2012), quanto os outros 5 % são compostos por células de outras topologias.

#### 2.2.6.1 Silício monocristalino

O silício é extraído do mineral de quartzo. O Brasil é um dos principais produtores mundiais desse minério, contudo, a purificação e fabricação de células são feitas em outros países (Villalva; Gazoli, 2012).

A fabricação do silício monocristalino consiste na extração do silício do quartzo, gerando blocos de silício ultrapuro, resultado da aplicação do método de Czochralski (Fermin, 2018).

Nesse processo, um cristal inicial, geralmente chamado de semente, é colocado em um crisol e aquecido até se tornar líquido. Em seguida, uma haste de suporte com uma pequena semente é cuidadosamente mergulhada no material fundido, girada e lentamente retirada. Conforme a

haste é elevada, o material líquido adere à semente e começa a cristalizar, formando um único cristal com uma estrutura cristalina ordenada. O controle preciso da temperatura e da velocidade de resfriamento é fundamental para a qualidade do cristal resultante

O lingote resultante de silício monocristalino é constituído de uma estrutura com organização molecular homogênea e estrutura cristalina, como resultado, possui uma aparência reflexiva, como visto na Figura 24.

Figura 24 - Silício ultrapuro em formato poroso (a), lingote de silício monocristalino (b) e as lâminas de silício monocristalino (c)



Fonte: Pango Tech (2023)

Quando serrado, o lingote de silício monocristalino gera fatias conhecidas como *wafers*, ou finas lâminas de silício puro, visto na Figura 24.

As lâminas não possuem as propriedades de uma célula fotovoltaica, para ter tais propriedades, passam por uma dopagem onde são inseridos elementos chamados de impurezas, que tem a função de gerar materiais tipo N ou tipo P, a depender das impurezas inseridas.

Após a dopagem, o material já possui características fotovoltaicas, para finalização são inseridas as camadas representadas na Figura 23, gerando o produto denominado de célula fotovoltaica, neste caso, monocristalino, devido ao tipo de silício inseridos nas camadas tipo N e P.

#### 2.2.6.2 Silício policristalino

O processo de fabricação do lingote de silício policristalino tradicionalmente, é mais barato que o processo do lingote de silício monocristalino, onde é formado um aglomerado de pequenos cristais, com estruturas e orientações distintas, pois nesta obtenção, o silício derretido

é despejado em moldes de placas ou lingotes, além disso, é realizado um resfriamento rápido, o que diminui tanto a complexidade quanto o tempo de produção (Villalva; Gazoli, 2012). O resultado de um lingote pode ser visto na Figura 25.

Figura 25 - Lingote de silício policristalino



Fonte: Pango Tech (2023)

Similar ao processo de corte do silício monocristalino, o lingote de silício policristalino é cortado em formato de lâminas, dopado para inserção de impurezas responsáveis em torná-los em materiais tipos N ou P e inseridas as camadas representadas na Figura 23, formando uma célula fotovoltaica policristalina.

#### 2.2.6.3 Filmes finos

Filmes finos é uma tecnologia mais recente, posterior a fabricação de lingotes de silício. Esta tecnologia prevê a deposição de finas camadas de materiais de silício e outros materiais semicondutores sob uma base rígida ou flexível. Usualmente, o processo ocorre através da vaporização (plasma ou outros métodos), permitindo que pequenas quantidades de matéria prima sejam inseridas na fabricação, minimizando perdas, uma vez que não a cortes e sobras no resultado da deposição.

Este processo é mais fino e requer menos material do que as células solares de silício cristalino tradicionais, tornando-o mais econômico. Existem diferentes técnicas de deposição de filmes finos, incluindo deposição química de vapor (CVD), deposição de filmes finos por pulverização catódica e deposição por evaporação.

Na CVD, por exemplo, um gás precursor é introduzido em uma câmara de deposição, onde ele reage quimicamente para formar um filme fino de material semicondutor no substrato. O controle preciso das condições de deposição, como temperatura e pressão, é essencial para

garantir a qualidade do filme. Os materiais semicondutores de filmes finos comuns incluem telureto de cádmio (CdTe), dissulfeto de cobre índio gálio (CIGS) e silício amorfo (a-Si).

Essas células solares de filmes finos são geralmente menos eficientes do que as células solares de silício monocristalino de alta qualidade, mas têm a vantagem de custos mais baixos e maior flexibilidade, permitindo aplicações em telhados, fachadas de edifícios e em dispositivos integrados em superfícies diversas. Portanto, a fabricação de semicondutores de filmes finos desempenha um papel importante na produção de células solares mais acessíveis e versáteis.

A fabricação por meio de filmes finos, geram células de Silício Amorfo, silício microcristalino, tecnologias de telúrio de cádmio e tecnologia de CIGS (cobre- índio- gálio-selênio), onde as duas últimas, ainda tem pequena presença no mercado (Villalva; Gazoli, 2012).

#### 2.2.6.4 Comparação entre as topologias

Para comparação, foram vistos os materiais apontados como os mais presentes em mercado, avaliando custos de células e eficiências (Villalva; Gazoli, 2012).

Foram adotadas as células de silício monocristalino, silício policristalino, silício cristalino de filme fino, silício amorfo, silício micromorfo, célula solar híbrida, CIS, CIGS e telureto de cádmio.

As células de silício monocristalino são as que apresentam maior eficiência, como visto na Tabela 1, contudo, essa topologia possui um custo elevado de produção quando comparada as outras topologias, além de serem células rígidas e quebradiças, que dependem de estruturas que mantenham a resistência mecânica para uso prático.

As células de silício policristalino têm custo de fabricação menor que as células de silício monocristalino, apesar de ter uma eficiência menor, o custo inferior compensa a diferença de eficiência. Também são estruturas rígidas e quebradiças, dependentes de estruturas que mantenham a resistência mecânica da célula.

Células de filmes finos utilizam menos matéria prima e consomem menos energia no processo de fabricação, o que reduz custos de produção. Além disso, a complexidade de fabricação é menor, o que favorece produção em larga escala. Estas podem ser produzidas em qualquer dimensão, por isso não necessariamente existe a diferenciação de célula e módulo. Células fotovoltaicas de filmes finos, possuem melhor aproveitamento da luz solar em baixos níveis de radiação e para radiações difusas. Possuem também um coeficiente de temperatura

baixo, ou seja, a produção de energia elétrica em temperaturas elevadas tem menor variação do que de outras topologias. Apesar do menor custo de fabricação, células produzidas a partir da tecnologia de filmes finos (silício cristalino, amorfo, micromorfo) possuem baixa eficiência quando comparadas as topologias existentes no mercado, o que demanda de uma maior área das células para produção de energia similar as outras topologias. Outro ônus é que células de filmes finos tem degradação acelerada, o que gera uma vida útil menor que outras topologias.

Células híbridas, são obtidas pela tecnologia de filmes finos, acrescidos por impurezas que aumentam a resistência a degradação, chamada de camada intrínseca. Possui alta eficiência, comparado ao monocristalino, contudo, ainda não é produzida em larga escala (Pinho; Galdino 2014).

Tabela 1 - Comparação de eficiência de células fotovoltaicas de diferentes topologias

Tecnologia		Eficiência (%)
Silício	Monocristalino	25,0 ± 0,5
	Policristalino	20,4 ± 0,5
	Filmes finos transferidos <sup>4</sup>	20,1 ± 0,4
Compostos III A-VA (ou 13-15)	GaAs (filme fino)	28,8 ± 0,9
	GaAs (policristalino)	18,4 ± 0,5
	InP (monocristalino)	22,1 ± 0,7
Calcogênios Compostos II B-VI A (ou 12-16)	CIGS (CuIn <sub>x</sub> Ga <sub>(1-x)</sub> Se <sub>2</sub> ) (filme fino)	19,6 ± 0,6
	CdTe (filme fino)	18,3 ± 0,5
Silício amorfo / nanocristalino	Amorfo (a-Si) (filme fino)	10,1 ± 0,3
	Nanocristalino (nc-Si)	10,1 ± 0,2
Células Sensibilizadas por Corantes (DSSC)		11,9 ± 0,4
Células Orgânicas (filme fino)		10,7 ± 0,3
Multijunção	InGaP/GaAs/InGaAs	37,7± 1,2
	a-Si/nc-Si/nc-Si (filme fino)	13,4± 0,4

Fonte: CRESESB (2022)

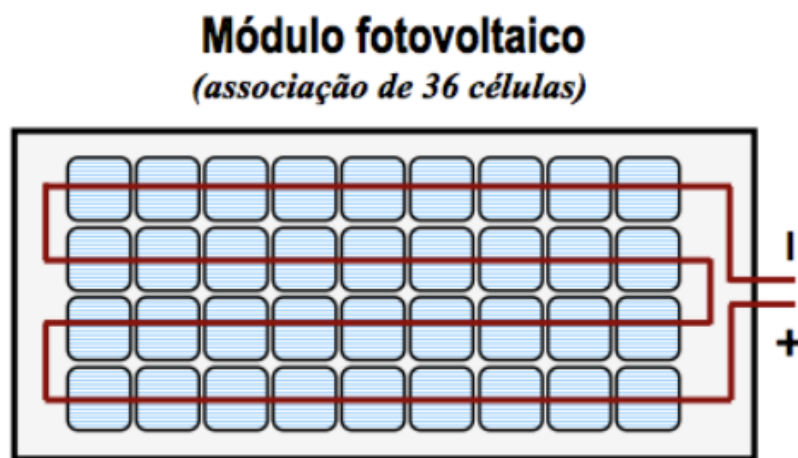
CIS ou CIGS é o acrônimo para cobre-índio-gálio-selênio oriundas da tecnologia de filme finos assim como Telureto de cádmio. Ambas ainda não são produzidas em larga escala, além disso, CIGS ainda possui custo elevado de fabricação o que dificulta a aceitação no mercado. Cádmio é um material tóxico e telúrio um material raro, o que onera na fabricação e aceitação destas topologias (Villalva; Gazoli, 2012).

### 2.2.7 Módulos fotovoltaicos

Conhecido também como placa ou painel fotovoltaico, os módulos fotovoltaicos são conjuntos de células fotovoltaicas agrupadas ou empacotadas disponíveis comercialmente (Pinho; Galdino 2014).

Os módulos fotovoltaicos, normalmente são montados a partir de uma estrutura rígida para as células fotovoltaicas, associadas eletricamente entre si. Normalmente, as células são associadas em série para produção de maiores tensões (Villalva; Gazoli, 2012).

Figura 26 - Representação esquemática da associação de células fotovoltaicas

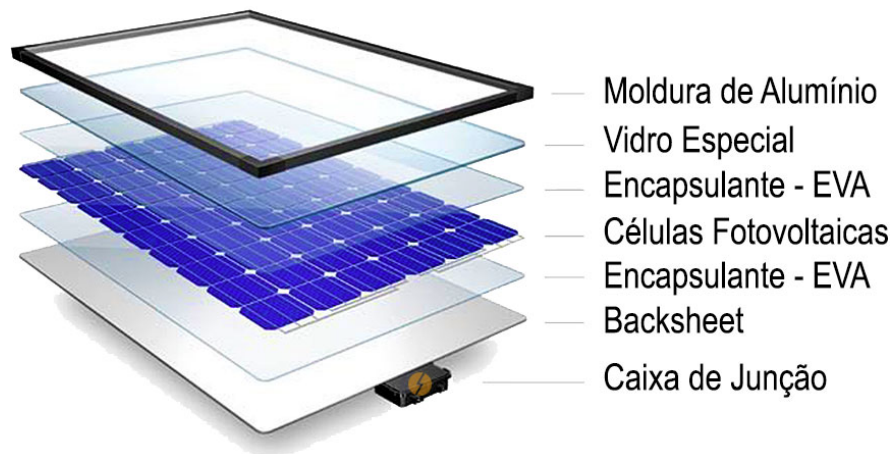


Fonte: Carneiro (2010)

A potência máxima de uma célula fotovoltaica, via regra geral, não supera uma potência de 3 W (Carneiro, 2010), sendo relativamente baixa para aplicações em geração de larga escala, que demandam, como neste trabalho, de 150.000 vezes desta potência. Por esta razão, as células são agrupadas, normalmente em associação em série como visto na Figura 26, para elevar a tensão produzida por cada módulo.

Estruturalmente, as células fotovoltaicas são encapsuladas numa estrutura comumente de seis camadas como representado na Figura 27, composta pela moldura de alumínio, vidro especial também chamado de vidro fotovoltaico, Filme encapsulante para o painel solar – EVA, *Backsheet* (camada de material polimérico alocado abaixo das células fotovoltaicas), caixa de junção também chamada de PV – *Junction Box*, Molduras de alumínio anodizado (Pinho; Galdino, 2014).

Figura 27 - Representação das camadas que compõem um painel solar



Fonte: Portal Solar (2023)

As células fotovoltaicas representam cerca de 60% do valor de um painel solar, além de terem menos de 2mm de espessura, são os elementos responsáveis pela transformação de radiação solar em energia elétrica.

Vidro especial, ou vidro fotovoltaico, é um material ultrapuro com baixo teor de ferro, com especificidades de baixa reflexão, por conta da camada antirreflexiva presente em sua estrutura. A principal função é resistir às intempéries climáticas para maior proteção das células. Usualmente representam cerca de 10% do custo de fabricação do Painel solar.

Filme encapsulante, conhecido como EVA (*Ethylene Vinyl Acetat* ou acetato-vinilo de etileno) é especificamente projetado para painéis fotovoltaicos. Com características de cura rápida e selante, protege as células contra o envelhecimento causado pela radiação, temperaturas e humidade. É alocado na camada imediatamente acima e abaixo da célula fotovoltaica, representa aproximadamente 8% o custo de fabricação do painel solar.

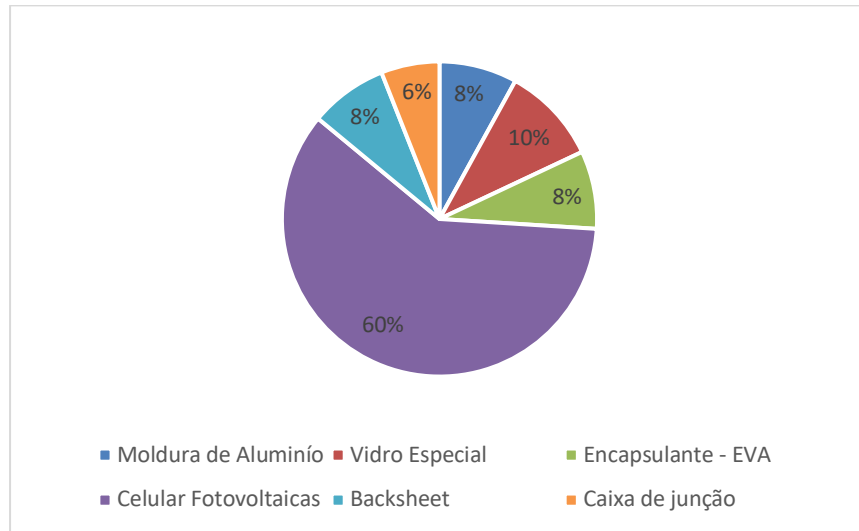
Com função de proteger os componentes internos do painel solar, o Backsheet tem a função de agir como isolante elétrico. Composto por três camadas do material polimérico que o compõem, representa cerca de 8% do custo de fabricação do painel solar.

A caixa de junção, normalmente fixada na base do painel solar por fita dupla face, contém a conexão elétrica das células fotovoltaicas em ligação em série, essa conexão pode ser encontrada como *string*. Possui também os diodos *by-pass*, chamados também de diodos de *string*, que prevê segurança e bom funcionamento do painel solar. Possui conectores específicos para interseccionar painéis em série ou paralelo. A caixa de junção representa cerca de 6% do custo de fabricação do painel solar.

A moldura de alumínio tem funções de aumentar resistência mecânica para evitar a flexão do painel, além de proteger durante transporte e instalação, par evitar que as células

fotovoltaicas, usualmente monocristalinas ou policristalinas, sejam flexionadas, gerando trincas, podendo minimizar e até extinguir a funcionalidade do painel. A estrutura metálica envolve toda a lateral do painel solar e representa cerca de 8% do custo total de fabricação (Portal Solar, 2023).

Tabela 2 - Distribuição percentual de custos de produção de um módulo fotovoltaico



Fonte: Adaptado de Portal Solar (2023)

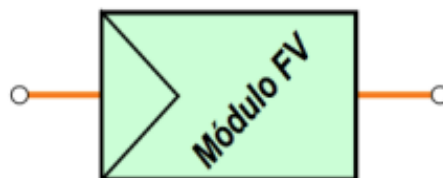
### 2.2.8 Associação módulos fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos podem ser associados com o objetivo de aumentar a potência máxima entre os painéis utilizados.

Considerando a estrutura dos painéis, é possível realizar dois tipos de conexões, em série ou paralelo (Carneiro, 2010).

Para ilustração das associações, o módulo fotovoltaico será representado pelo símbolo expresso na Figura 28.

Figura 28 - Representação esquemática módulo fotovoltaico

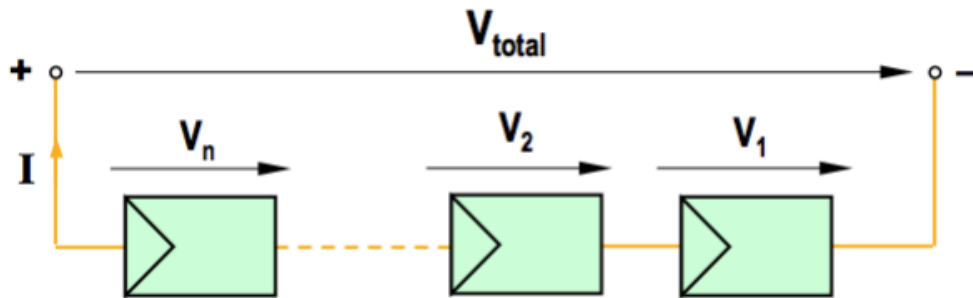


Fonte: Carneiro (2010)

### 2.2.8.1 Conexão em série

Conexões em série são organizações de ligações elétricas em fileiras. Tal tipo de associação é possível considerando que os módulos possuem mesmos parâmetros elétricos, para minimização de perdas elétricas associativas. A interconexão em série é representada pela Figura 29.

Figura 29 - Representação esquemática associação em série de módulos fotovoltaicos



Fonte: Carneiro (2010)

Pela Figura 29 é possível, com base na Lei de Kirchhoff, equacionar os comportamentos de tensão e corrente desta associação, como visto nas equações 3 e 4:

$$V_1 = V_2 = \dots V_n = V \rightarrow V_{total} = V_1 + V_2 + \dots + V_n = n * V \quad (3)$$

$$I_1 = I_2 = \dots I_n = I \quad (4)$$

Pelas equações 3 e 4 é possível afirmar que, em uma associação em série, a corrente é a mesma em todos os módulos e a tensão é multiplicada pelo número (n) de módulos presente na *string*. Logo, a estratégia de associação em série, prevê a elevação da tensão para aumento de potência total.

Carneiro (2010), propôs um ensaio para entendimento do comportamento destas associações, onde foi adotado o módulo Shell SM 100-12 com características expressas na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados técnicos de algumas características do módulo Shell SM 100-12

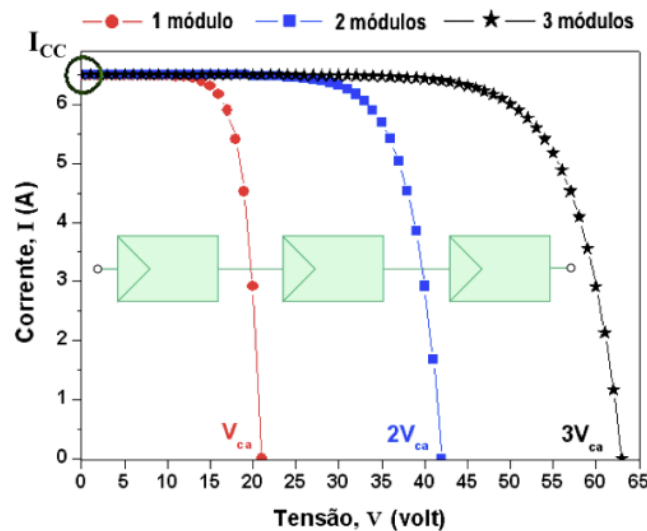
<b>Tipo de módulo: silício monocristalino</b>	<b>Símbolos</b>	<b>Unidade</b>	<b>Indicadores</b>
Potência máxima	$P_{max}$	W	100,3
Corrente máxima	$I_{max}$	A	5,9
Tensão máxima	$V_{max}$	V	17
Corrente de curto-circuito	$I_{cc}$	A	6,5

Tensão de circuito aberto	$V_{ca}$	V	21
Temperatura nominal de funcionamento	NOCT	°C	45
Coefficiente térmico para a corrente ICC	$\Delta I$	A/°K	$2,8 * 10^3$
Coefficiente térmico para a tensão Vca	$\Delta V$	V/°K	$-7,6 * 10^2$
Número de células em série	NCS		36
Comprimento	C	mm	1316
Largura	L	mm	660

Fonte: Carneiro (2010)

Para o ensaio, foram medidos os parâmetros de corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto nas extremidades da associação representada na Figura 29 e o resultado gerou o gráfico expresso na Figura 30.

Figura 30 - Gráfico de tensão e corrente da associação de módulos fotovoltaicos em série



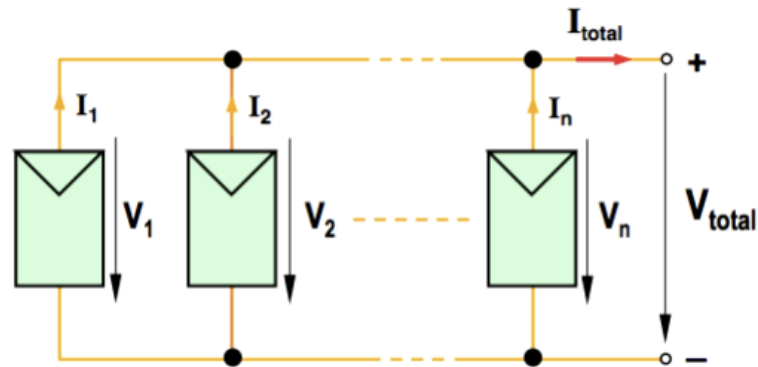
Fonte: Carneiro (2010)

A simulação denota o que foi representado matematicamente, pela Figura 30 é possível notar que independentemente do número de módulos, a corrente de curto-circuito conserva amplitude máxima nos três cenários. Enquanto isso, a tensão de circuito aberto é multiplicada pelo número de módulos, onde a tensão de circuito aberto de um módulo é entorno de 21 V e com três módulos é três vezes este valor,  $V_{ca} = 63V$ .

#### 2.2.8.2 Conexão em paralelo

Com o mesmo princípio de análise na Lei de Kirchhoff, é possível analisar o comportamento da associação em paralelo dos painéis fotovoltaicos. As conexões estão representadas na Figura 31.

Figura 31 - Representação esquemática associação em paralelo de módulos fotovoltaicos



Fonte: Carneiro (2010)

A análise pela Lei de Kirchhoff gera as seguintes equações 5 e 6:

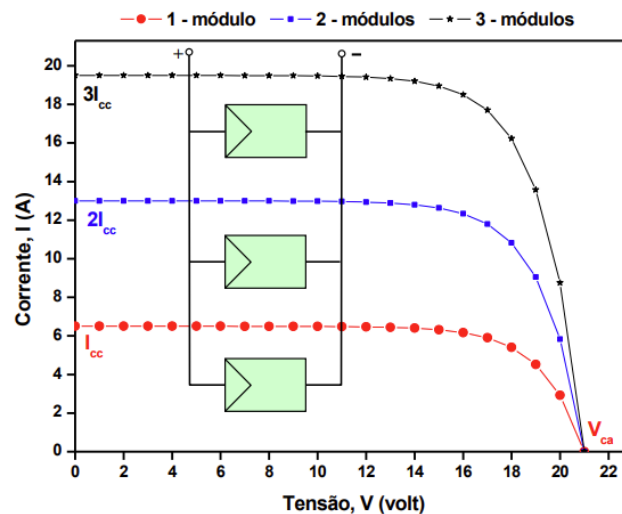
$$I_1 = I_2 = \dots I_n = I \rightarrow I_{total} = I_1 + I_2 + \dots + I_n = n * I \quad (5)$$

$$V_1 = V_2 = \dots V_n = V \quad (6)$$

Nesta conexão, o modelo matemático prevê que a tensão é a mesma e independente do número de módulos, enquanto a corrente se multiplica, a depender do número (n) de módulos.

Utilizando o módulo expresso na Tabela 3, foi realizado o ensaio da interconexão em paralelo expresso na Figura 31 e medido os parâmetros de tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito com três módulos e tabuladas as informações que geraram o gráfico da Figura 32.

Figura 32 - Gráfico de tensão e corrente da associação de módulos fotovoltaicos em paralelo



Fonte: Carneiro (2010)

Como esperado do modelo matemático, para a associação em paralelo, a tensão de circuito aberto é a mesma, independentemente do número de módulos, enquanto a corrente de curto-circuito aumenta a depender do número de módulos, onde a associação com três módulos gera uma corrente de curto-circuito três vezes maior quando comparada ao cenário com um único módulo fotovoltaico.

### 2.2.9 Características elétricas dos módulos solares

Os módulos fotovoltaicos, compostos por células que conseguem fornecer tensão elétrica de aproximadamente 0,6 V, possuem, tipicamente, 36, 54 ou 60 células policristalinas dependendo da potência do módulo (Villalva; Gazoli, 2012).

A corrente elétrica transformada por cada célula depende da área cuja radiação é incidida, pois a corrente elétrica é dependente da irradiação sob a célula. Sendo uma relação diretamente proporcional, módulos cristalinos fornecem cerca de 8 A enquanto módulos a partir de filmes finos comerciais fornecem em torno de 2 A.

#### 2.2.9.1 Curvas característica i-v e p-v

Comparado com fontes de energia elétricas encontradas em literaturas, os módulos fotovoltaicos não seguem um padrão convencional, uma vez que não entregam uma tensão de saída constante ou periódica nos terminais de saída (Villalva; Gazoli, 2012).

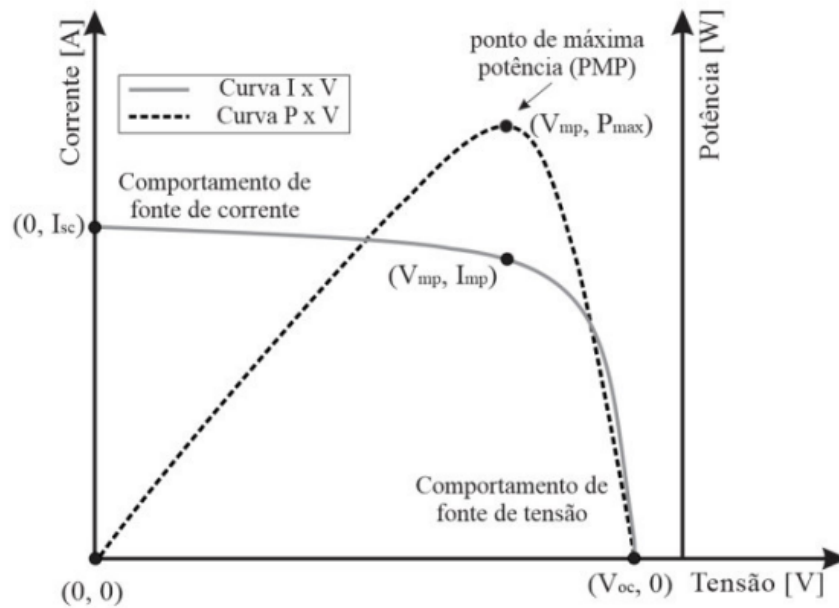
As curvas características podem ser observadas tanto em uma única célula quanto em um painel ou arranjo (*string* ou associação de painéis). O conhecimento das curvas características apoia o monitoramento de desempenho do painel, para detecção de falhas, sendo tanto por sombreamento oriundo de sujeira dos painéis, sombreamento, quanto por falhas de conexão ou anomalias (Bühler, 2007). Pela Figura 33 é possível observar as curvas características.

Para a análise das características tem os pontos importantes para projeção e caracterização - Corrente de curto-circuito, *short circuit* ( $I_{SC}$ ) – Valor máximo de corrente gerada em um sistema com carga de resistência nula.

Tensão de circuito aberto, *open circuit* ( $V_{oc}$ ) – Valor máximo de tensão entre os terminais sem carga aplicada, ou com carga de resistência com amplitudes que possam ser consideradas infinitamente grande.

Ponto de potência máxima ( $P_{max}$ ) – Ponto na curva cuja potência resultante da tensão e corrente geradas tem seu ponto máximo.

Figura 33 - Curvas características I-V e P-V de módulos fotovoltaicos



Fonte: Brito (2016)

Considerando a otimização da produção energética, o ponto de interesse é o ponto de máxima potência, pois desta forma, é possível a obtenção do melhor valor energético entregue para o sistema elétrico. Para isso, existem métodos manuais e automáticos, que regulam a tensão e corrente, para atingir o PMP (ponto máximo de potência), como por exemplo o *MPPT* (Brito, 2016).

#### 2.2.10 Condições características elétricas dos módulos solares

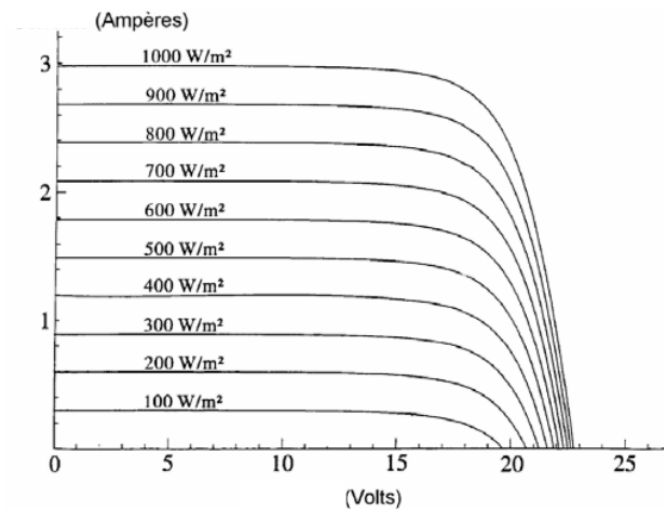
As condições de irradiação solar é de 1 kW/m<sup>2</sup> (quilowatt por metro quadrado) e temperatura de 25 °C (graus Celsius). Estes parâmetros podem variar de acordo com a geolocalização e temperatura, servindo como base de comparação na geração de tensão e corrente (CRESESB, 2022).

##### 2.2.10.1 Intensidade luminosa (irradiância)

Por fatores oriundos de translação, rotação, geolocalização e afins, a irradiação varia de acordo com a combinação dos parâmetros citados.

Tais fatores, impactam na radiação incidida na superfície dos painéis e a depender da irradiação incidida, a potência gerada varia, diretamente dependente da irradiação (CRESESB, 2022), como representa a Figura 34:

Figura 34 - Gráfico V-I de células fotovoltaicas com diferentes irradiâncias



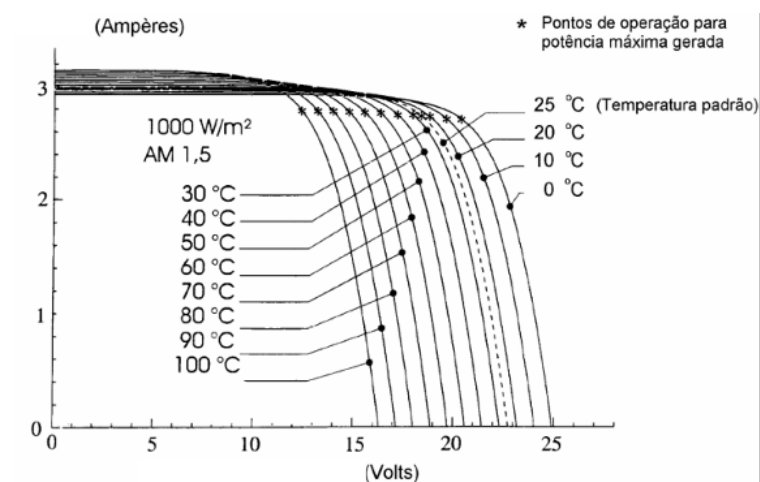
Fonte: CRESESB (2022)

Pela Figura 34 é possível notar que a curva característica V-I se mantém, com variações nas amplitudes de corrente (eixo vertical) e tensão (eixo horizontal), que estão variando linearmente entre si, na qual com o aumento da irradiância há o aumento de tensão com o aumento da irradiância há o aumento de tensão e corrente entregues pelo modulo fotovoltaico.

#### 2.2.10.2 Temperatura das células

O efeito da insolação aumenta a temperatura das células, este aumento pode reduzir a eficiência do modulo fotovoltaico. Este aumento de temperatura nas células tende a diminuir a tensão gerada pela célula fotovoltaica, gera também um aumento na corrente, porém um aumento desprezível. É possível notar a relação do efeito de diferentes temperaturas na Figura 35.

Figura 35 - Relação da temperatura na curva V-I característica de módulos fotovoltaicos



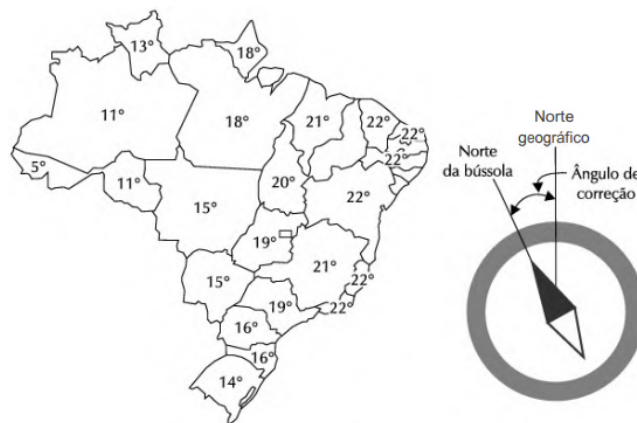
Fonte: CRESESB (2022)

### 2.2.11 Orientação das placas solares

A orientação azimutal é relevante para orientação do plano inclinado das placas solares, considerando que a maior eficiência de produção energética é a incidência solar perpendicular a superfície do material fotovoltaico, caso não seja possível seguir a variação azimutal da incidência solar, recomenda-se que os módulos fotovoltaicos fiquem orientados para o norte geográfico para regiões abaixo da linha do equador e para o sul em regiões acima da linha do equador.

Essa orientação pode ser observada com uma bússola magnética, onde o ângulo de inclinação de eficiência máxima dos módulos fotovoltaicos se dá pelo ângulo de correção entre o norte geográfico e norte da bússola, como visto na Figura 36

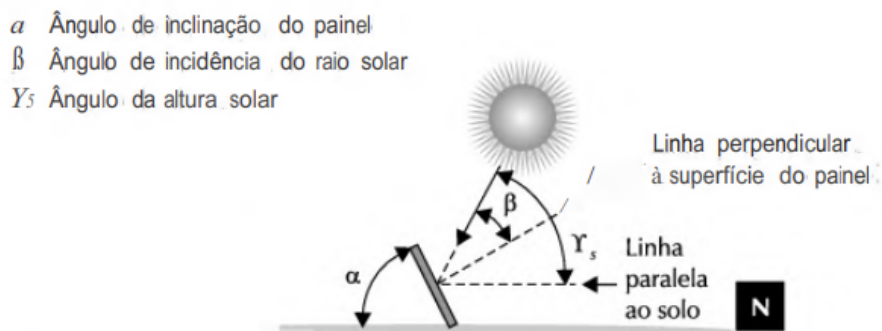
Figura 36 - Mapa de ângulos de correção para encontrar o norte geográfico a partir da bússola



Fonte: Villalva e Gazoli (2012)

O melhor aproveitamento da energia solar ocorre quando os raios incidem perpendicularmente no módulo, com ângulo  $\beta=0$ , representado na Figura 37. Logo, para maximizar captação de energia solar a inclinação do módulo deve adequar-se ao  $Y_s$  do dia (Villalva; Gazoli, 2012).

Figura 37 - Representação da inclinação da incidência solar em módulos solares



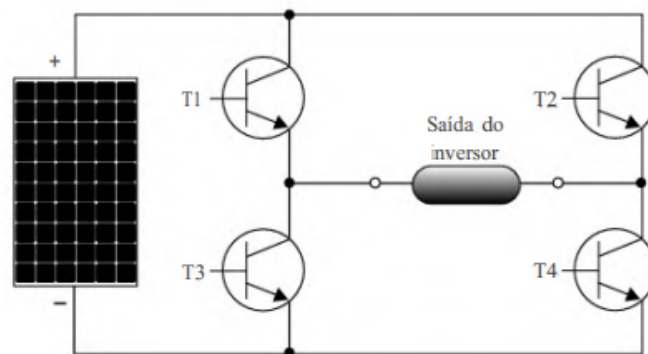
Fonte: Villalva e Gazoli (2012)

### 2.2.12 Inversores de tensão

Inversor de tensão é um equipamento eletrônico cuja característica é a conversão de formas de sinais de corrente elétrica, usualmente, corrente contínua em corrente alternada (Villalva; Gazoli, 2012).

Módulos fotovoltaicos geram energia elétrica em formato de corrente contínua, contudo, a energia elétrica distribuída em residências no Brasil é corrente alternada (ELETROBRAS, 2004) além de vários eletrodomésticos possuírem alimentação em corrente alternada, desta forma, o inversor de tensão tem o papel de conversão energética para permitir a distribuição elétrica sem alterações na estrutura elétrica presente.

Figura 38 - Representação esquema eletrônico inversor de tensão CC-CA

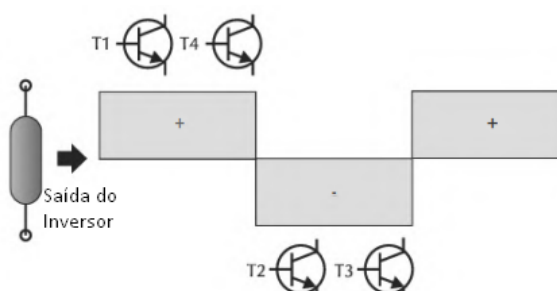


Fonte: Villalva e Gazoli (2012)

Pela Figura 38 é possível notar o esquema eletrônico do funcionamento de um inversor de tensão.

À esquerda, a representação de um painel fotovoltaico, representando o componente ativo do sistema, responsável pela geração de corrente contínua. A ponte de transistores, possuem seus gatilhos conectados a sistemas de controle, que serão responsáveis em gerar o sinal alternado visto na saída do inversor.

Figura 39 - Representação saída do inversor de tensão na Figura 28



Fonte: Villalva e Gazoli (2012)

Para o semiciclo positivo, os transistores T1 e T4 são acionados, gerando assim um fluxo da corrente elétrica da esquerda para a direita, do ponto de vista da saída do inversor.

Para o semiciclo negativo, os transistores T2 e T3 são acionados, gerando um fluxo da corrente elétrica da direita para a esquerda na saída do inversor.

Pela Figura 39 é possível verificar o sinal de saída do inversor conforme denotado acima.

Existem vários aspectos e parâmetros de interesse para qualificar a performance de um inversor. As principais características são:

Potência nominal – potência elétrica a ser disponibilizada pelo inversor em operações normais, previstas nas especificações.

Potência máxima – Também vista como potência de sobrecarga, sendo de possível disponibilização pelo inversor em um curto período, superior a potência nominal.

Tensão de entrada CC – é a tensão nominal de corrente contínua que alimenta o inversor.

Tensão de saída CA – é a tensão nominal de saída em corrente alternada entregue na saída do inversor.

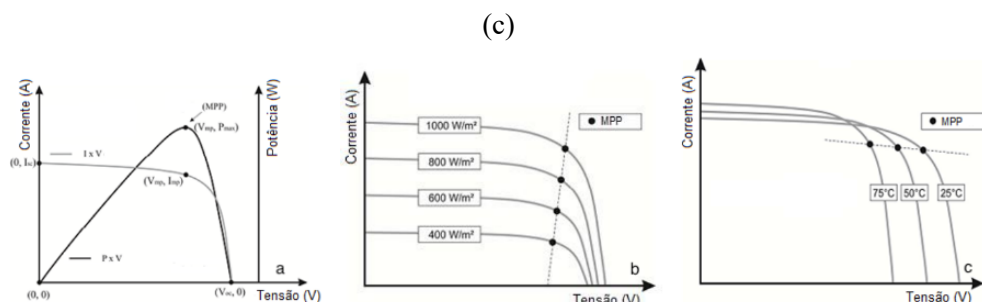
Frequência de saída – é a frequência da corrente alternada entregue na saída do inversor. No Brasil, a frequência entregue é de 60 Hz

Regulação de tensão – Variação percentual relativa da tensão de saída do inversor. Quando não há carga conectada na saída a tensão é máxima, quando há carga, a variação relativa geralmente é em torno de 0 a 10% da tensão de saída (Villalva; Gazoli, 2012).

### 2.2.12.1 MPPT

(Maximum Power Point Tracking) é uma técnica utilizada em inversores de tensão para maximizar a geração de energia a partir de painéis solares ou outras fontes de energia renovável. Seu objetivo é otimizar a eficiência do sistema, rastreamento continuamente o ponto de máxima potência dos painéis solares e ajustando a tensão de entrada do inversor (Kouro, 2010), representado na Figura 40.

Figura 40 - Curva característica MPPT (a), efeito da irradiância na potência (b), efeito da temperatura



Fonte: Hafemeister (2018)

Existem diferentes algoritmos de MPPT disponíveis, como o Perturba e Observa (P&O) e o *Incremental Conductance* (IncrCond). O algoritmo P&O realiza pequenas perturbações na tensão de entrada do inversor e observa como a potência varia em resposta a essas mudanças. Com base nessa observação, ele ajusta a tensão na direção que aumenta a potência até encontrar o ponto de máxima potência (Zhang, 2013).

Já o algoritmo IncrCond calcula a derivada da curva de potência em relação à tensão e compara esse valor com zero. Quando a derivada é igual a zero, o ponto de máxima potência é alcançado. O algoritmo ajusta a tensão de entrada para manter a derivada próxima a zero e, assim, rastrear continuamente o ponto de máxima potência (Zhang, 2013).

É fundamental destacar que o MPPT desempenha um papel crucial em sistemas de energia solar, pois aumenta significativamente a eficiência da conversão e maximiza a produção de energia dos painéis solares. Com o uso adequado do MPPT, é possível obter um desempenho otimizado do sistema de energia (Seera, 2019).

#### 2.2.12.2 Inversor solar on grid

O inversor solar on-grid é um componente essencial em sistemas de energia solar conectados à rede elétrica (Pinho; Galdino, 2014). Sua função principal é converter a corrente contínua (DC) gerada pelos painéis solares em corrente alternada (AC) para alimentar diretamente a rede elétrica.

Esses inversores são projetados para operar em sincronia com a rede elétrica e geralmente possuem uma função de monitoramento para garantir a conformidade com os requisitos da concessionária de energia. Além disso, eles permitem a injeção do excesso de energia produzida pelos painéis solares na rede, possibilitando a compensação de energia ou até mesmo a venda do excedente.

#### 2.2.12.3 Inversor solar off grid

O inversor solar off-grid é utilizado em sistemas de energia solar independentes, nos quais não há conexão com a rede elétrica. Esse tipo de inversor é responsável por converter a corrente contínua (DC) gerada pelos painéis solares em corrente alternada (AC) para alimentar diretamente os equipamentos e cargas conectados ao sistema. Normalmente, esses inversores estão integrados com um banco de baterias para armazenamento de energia, permitindo o fornecimento de eletricidade durante períodos sem luz solar. Os inversores off-grid geralmente

possuem recursos de gerenciamento de energia, como controle de carga e descarga das baterias, para garantir o fornecimento confiável de energia em sistemas isolados (Macedo, 2006).

#### 2.2.12.4 Inversor solar híbrido

O inversor solar híbrido é uma solução versátil que combina características dos inversores on-grid e off-grid. Esse tipo de inversor é capaz de funcionar tanto conectado à rede elétrica como em modo off-grid (desconectado da rede elétrica), permitindo que o sistema solar forneça energia tanto para as cargas conectadas quanto para carregar as baterias de armazenamento. Esses inversores possuem recursos avançados de gerenciamento de energia, como seleção automática de fonte de energia (rede ou bateria), controle de fluxo de energia bidirecional e integração com sistemas de monitoramento (Macedo, 2006). Essa versatilidade torna os inversores híbridos ideais para aplicações em que há intermitência na rede elétrica ou quando se deseja um alto nível de autonomia energética.

#### 2.2.12.5 Microinversor solar

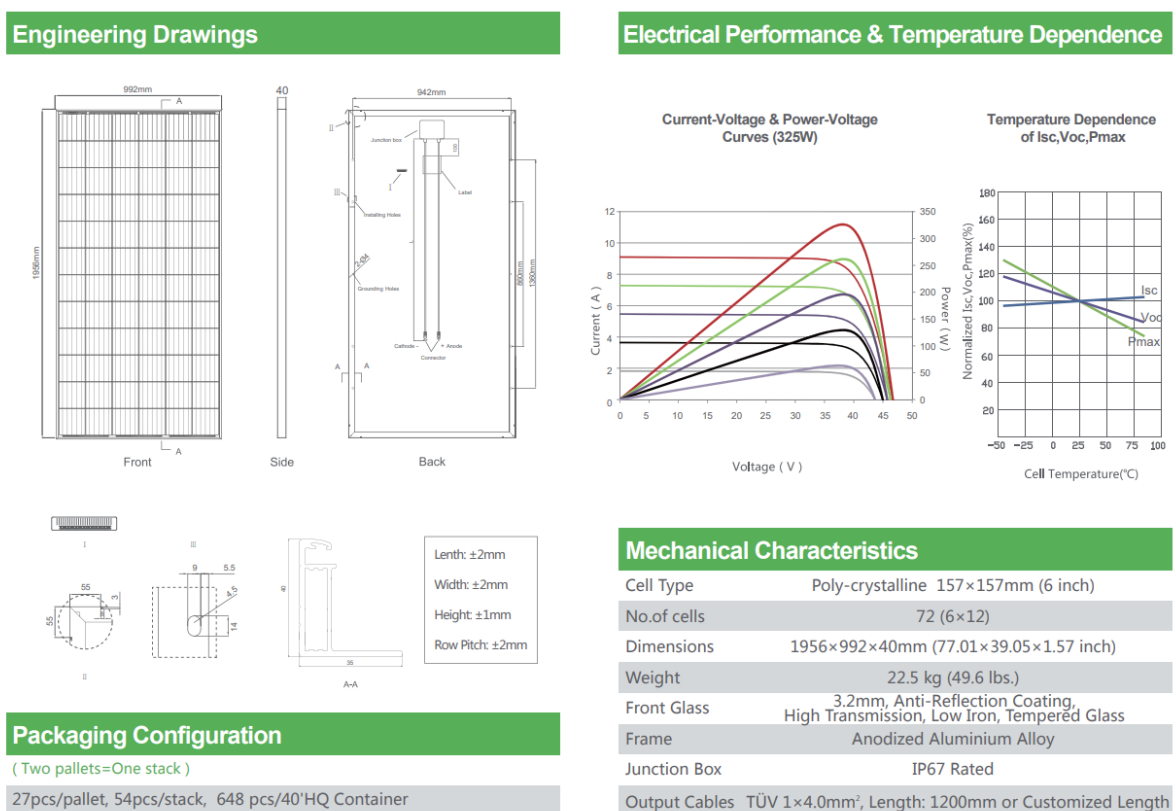
O micro inversor solar é uma alternativa aos inversores convencionais utilizados em sistemas fotovoltaicos. Diferentemente dos inversores centralizados, os microinversores são instalados em cada painel solar individualmente. Esses dispositivos convertem a corrente contínua (DC) gerada por cada painel em corrente alternada (AC) de forma independente, eliminando a necessidade de um único inversor central (Macedo, 2006). Com os microinversores, cada painel opera de forma independente, o que permite otimizar a produção de energia do sistema, minimizando as perdas causadas por sombreamento ou desempenho irregular de painéis individuais. Além disso, os microinversores oferecem recursos avançados de monitoramento e diagnóstico remoto, facilitando o acompanhamento do desempenho de cada painel do sistema.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Painel fotovoltaico

Para as simulações, foi escolhido o painel solar JKM330PP-72 da empresa Jinko, representado na Figura 41. O JKM330PP-72 possui uma potência nominal de 330 watts (W) e opera a uma tensão de 24 volts (V) além de dimensões de 1956 x 992 x 40 mm. É composto por células solares policristalinas de alta eficiência, que são responsáveis por converter a luz solar em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico.

Figura 41 - Especificações espaciais do painel solar linha JKM da Jinko



Fonte: Jinko Solar ([ca. 2020])

Além disso, o JKM330PP-72 possui uma estrutura robusta e resistente, com uma moldura de alumínio anodizado e vidro temperado de alta transmissão, o que o torna adequado para diferentes condições climáticas. O painel também é projetado para suportar cargas de neve e vento, proporcionando durabilidade e confiabilidade em sua operação.

O tamanho físico do JKM330PP-72 é de aproximadamente 1960 mm x 992 mm x 40 mm, com um peso de cerca de 22,5 kg. Essas dimensões permitem uma fácil instalação em diferentes tipos de sistemas solares, sejam eles residenciais, comerciais ou industriais.

### 3.2 Inversor

Equipamento utilizado em sistemas de energia solar fotovoltaica para converter a corrente contínua (DC) gerada pelos painéis solares em corrente alternada (AC) adequada para uso doméstico ou comercial.

Para efeitos de simulação, foi adotado o inversor PRIMO 5.0-1. Ele é fabricado pela empresa Fronius, conhecida por sua expertise em tecnologia de inversores solares. Esse inversor possui uma potência nominal de 5.000 watts (W) e opera com uma tensão de entrada de até 1.000 volts (V).

Uma das características marcantes do inversor PRIMO 5.0-1 é a sua eficiência energética. Ele é projetado para maximizar a conversão de energia solar em eletricidade utilizável, garantindo assim um melhor aproveitamento do potencial de geração dos painéis solares. Além disso, o PRIMO 5.0-1 utiliza uma tecnologia avançada de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), permitindo otimizar o desempenho do sistema, mesmo em condições de sombreamento parcial ou variações nas condições de irradiação solar.

O inversor PRIMO 5.0-1 também oferece recursos de monitoramento e controle avançados. Por meio de interfaces de comunicação, como Wi-Fi ou Ethernet, é possível acompanhar em tempo real o desempenho do sistema e obter informações detalhadas sobre a produção de energia. Além disso, o inversor pode ser conectado a plataformas de monitoramento online, permitindo o acesso remoto aos dados do sistema por meio de dispositivos móveis ou computadores.

Em termos de design e construção, o PRIMO 5.0-1 possui uma estrutura compacta e de fácil instalação. Sua caixa é feita de materiais duráveis e resistentes, garantindo uma longa vida útil e proteção contra condições ambientais adversas. O inversor também possui recursos de segurança, como proteção contra surtos de tensão e circuitos de desligamento automático em caso de falhas ou sobrecarga.

### 3.3 Medidor Bidirecional

O medidor de corrente bidirecional é um dispositivo utilizado em sistemas solares on-grid para monitorar e medir a quantidade de energia elétrica que flui tanto da rede elétrica para o sistema solar quanto do sistema solar para a rede elétrica.

Esse medidor desempenha um papel na operação de sistemas solares conectados à rede, permitindo a contabilização da energia injetada na rede elétrica pelos painéis solares, bem como a energia consumida do sistema elétrico. Ele monitora e registra a direção e a quantidade de

corrente elétrica em ambos os sentidos, possibilitando o cálculo preciso da energia líquida fornecida ou recebida do sistema.

O medidor de corrente bidirecional é instalado geralmente próximo ao ponto de conexão entre o sistema solar e a rede elétrica. Ele deve ser certificado e atender às regulamentações e padrões específicos do país ou região onde é utilizado.

O dispositivo geralmente possui uma tela ou display que exibe informações como a potência instantânea, energia gerada e energia consumida. Além disso, ele pode ser conectado a sistemas de monitoramento e controle, permitindo o acesso remoto aos dados de desempenho do sistema solar.

A inclusão de um medidor de corrente bidirecional em um sistema solar on-grid é importante para fins de monitoramento, contabilização e controle da energia produzida e consumida. Esses dados são essenciais para operar o sistema eficientemente, garantir a conformidade com as regulamentações de conexão à rede elétrica e auxiliar na análise do desempenho e retorno sobre o investimento do sistema solar.

### **3.4 Elementos de proteção elétrica**

#### *3.4.1 Diodos de string*

O diodo de *string* é um componente essencial em sistemas fotovoltaicos, projetado para proteger os painéis solares contra possíveis danos causados por sombreamento parcial ou irregularidades nas células solares (Hörteis, 2018).

Em um sistema fotovoltaico, os painéis solares são conectados em série para formar uma *string* ou cadeia de painéis. Essa configuração em série permite que a tensão total do sistema seja aumentada, proporcionando maior eficiência na conversão da energia solar em eletricidade.

No entanto, quando um ou mais painéis solares estão sujeitos a sombreamento parcial, sujeira ou mau funcionamento, a corrente gerada por esses painéis pode ser significativamente reduzida. Isso pode levar a uma diminuição acentuada do desempenho de todo o sistema.

Neste momento atua o diodo de *string*. Ele é instalado em cada cadeia de painéis solares, conectado em paralelo aos painéis. Sua função principal é desviar o fluxo de corrente elétrica caso a tensão gerada por algum dos painéis solares da *string* esteja abaixo de um determinado limite.

Quando um painel solar está sombreado ou enfrenta um mau funcionamento, sua tensão de saída é significativamente reduzida. O diodo de *string* atua como uma espécie de "válvula de desvio", permitindo que a corrente flua através dele em vez de passar pelo painel com baixa tensão. Isso evita que o painel sombreado afete negativamente o desempenho de toda a *string*.

Além disso, o diodo de *string* também desempenha um papel importante na segurança do sistema. Em situações em que o sistema fotovoltaico é desligado, como durante a manutenção ou em caso de emergência, o diodo de *string* interrompe o fluxo de corrente elétrica, ajudando a evitar riscos de choque elétrico (Stein, 2019).

Em resumo, o diodo de *string* desempenha duas funções principais em sistemas fotovoltaicos: proteção contra sombreamento parcial ou mau funcionamento dos painéis solares e segurança elétrica ao interromper o fluxo de corrente em situações de desligamento do sistema. Sua presença é crucial para garantir o desempenho adequado e a confiabilidade do sistema fotovoltaico.

### 3.4.2 Disjuntores

Disjuntores são dispositivos de proteção elétrica amplamente utilizados em sistemas fotovoltaicos e em outras instalações elétricas. Eles são projetados para interromper o fluxo de corrente elétrica em casos de sobrecarga ou curto-circuito, protegendo assim os componentes do sistema contra danos e minimizando o risco de incêndios e choques elétricos (Horteis, 2018).

#### 3.4.2.1 Bipolar

Um disjuntor bipolar é um tipo de disjuntor que pode interromper a corrente elétrica em dois condutores simultaneamente. No contexto de sistemas fotovoltaicos, os disjuntores bipolares são frequentemente utilizados para proteger os circuitos de corrente contínua (DC) que conectam os painéis solares aos inversores. Eles permitem a interrupção segura da corrente em ambos os polos do circuito, garantindo a proteção adequada do sistema.

#### 3.4.2.2 Diferencial / Residual

O disjuntor diferencial, também conhecido como disjuntor residual ou DR, é um dispositivo de proteção que atua detectando e interrompendo a corrente de fuga de terra. Em sistemas fotovoltaicos, o disjuntor diferencial é essencial para garantir a segurança dos usuários e a proteção contra falhas de isolamento. Ele compara a corrente de entrada com a corrente de saída e, caso haja uma diferença significativa, o disjuntor é acionado para interromper o fluxo de corrente e proteger contra choques elétricos.

### 3.4.2.3 DPS

O DPS, ou Dispositivo de Proteção contra Surtos, é um componente utilizado em sistemas fotovoltaicos para proteger os equipamentos eletrônicos contra danos causados por surtos de tensão. Esses surtos podem ocorrer devido a descargas atmosféricas, manobras na rede elétrica ou outras fontes de transientes de tensão. O DPS atua como um caminho de baixa resistência para desviar a corrente do surto para o aterramento elétrico, evitando que os equipamentos sejam danificados.

### 3.4.3 Fusíveis

Os fusíveis são dispositivos de proteção elétrica que são projetados para interromper o fluxo de corrente elétrica em casos de sobrecarga ou curto-circuito. Eles são compostos por um filamento metálico que se funde quando a corrente elétrica excede o valor nominal do fusível. Em sistemas fotovoltaicos, os fusíveis são frequentemente utilizados para proteger os cabos e circuitos contra sobrecargas. Quando uma corrente excessiva passa pelo fusível, o filamento se funde, interrompendo o fluxo de corrente e protegendo os componentes do sistema contra danos.

### 3.4.4 String box

*String box*, ou caixa de *strings*, é um componente essencial em sistemas fotovoltaicos que consiste em uma caixa de junção onde as *strings* de painéis solares são conectadas e protegidas. A função principal da *string box* é fornecer conexões seguras e eficientes entre os painéis solares e os demais componentes do sistema (Dias, 2018).

A *string box* é normalmente instalada no campo solar, próximo aos painéis solares, e atua como um ponto de conexão centralizado para as *strings* de painéis. Ela abriga os dispositivos de proteção e os dispositivos de monitoramento necessários para garantir o desempenho e a segurança do sistema fotovoltaico (Dias, 2018).

Existem diferentes componentes que podem ser encontrados em uma *string box*, incluindo:

- Disjuntores ou fusíveis: Esses dispositivos de proteção são instalados em cada *string* individual para interromper a corrente em caso de sobrecarga ou curto-circuito. Eles ajudam a proteger os painéis solares e o restante do sistema contra danos.

- Dispositivo de proteção contra surtos (DPS): O DPS é responsável por proteger o sistema contra surtos de tensão causados por descargas atmosféricas ou outras fontes de transientes de

tensão. Ele desvia a corrente do surto para o aterramento, evitando danos aos componentes do sistema.

- Conectores e cabos: A *string box* também abriga os conectores e cabos necessários para interligar as *strings* de painéis solares. Esses componentes devem ser projetados para suportar as condições ambientais e a corrente elétrica do sistema.

- Dispositivos de monitoramento: Alguns modelos de *string box* possuem recursos de monitoramento integrados. Eles podem fornecer informações em tempo real sobre o desempenho das *strings* de painéis, como a tensão, corrente e potência, permitindo um acompanhamento detalhado do sistema fotovoltaico.

### 3.5 PVSYST

O PVsyst é um software amplamente utilizado na indústria fotovoltaica para análise, simulação e dimensionamento de sistemas de energia solar. Desenvolvido pela empresa PVsyst SA, o software oferece uma ampla gama de ferramentas e recursos para auxiliar na avaliação do desempenho e na otimização de sistemas fotovoltaicos.

O software PVsyst é reconhecido pela sua precisão e confiabilidade na modelagem de sistemas solares, permitindo aos projetistas e engenheiros realizar simulações detalhadas e análises técnicas. Alguns dos recursos principais oferecidos pelo software incluem:

- Banco de dados de componentes solares: O PVsyst possui um extenso banco de dados com uma ampla gama de módulos solares, inversores, baterias e outros componentes utilizados em sistemas fotovoltaicos. Isso permite que os usuários selecionem e avaliem os componentes mais adequados para o sistema em questão.

- Modelagem e simulação: O software PVsyst oferece recursos avançados de modelagem e simulação, permitindo que os usuários criem representações precisas de sistemas fotovoltaicos. Ele considera fatores como a geometria do local, inclinação e orientação dos painéis, perdas por sombreamento, eficiência dos inversores e outras condições ambientais para calcular a produção de energia esperada.

- Análise financeira: O PVsyst também oferece ferramentas para análise financeira, permitindo que os usuários avaliem o desempenho econômico de um sistema fotovoltaico. Isso inclui cálculos de retorno sobre o investimento, período de *payback*, fluxo de caixa e outras métricas financeiras relevantes.

- Relatórios e documentação: O software PVsyst permite a geração de relatórios detalhados e documentação técnica, que podem ser úteis para apresentações, estudos de viabilidade e comunicação com clientes e parceiros.

A escolha do software se deu por sua versatilidade e por permitir testes gratuitos de 30 dias para utilização de suas ferramentas e gerações de relatórios.

## 4 DESENVOLVIMENTO

### 4.1 Potência fotovoltaica necessária

A da Potência fotovoltaica  $P_{KWP}$ , é a variável de maior interesse para dimensionamento da demanda elétrica necessária para a usina solar fotovoltaica.

Sua determinação pode ser dada pela seguinte equação:

$$P_{KWP} = \frac{\overline{C_{kWh/ano}} - CD}{I_{rr} * \eta * 365/12} \quad (7)$$

Onde:

$\overline{C_{kWh/ano}}$  é a média dos últimos doze meses de consumo elétrico mensal, este valor pode ser obtido na fatura enviada mensalmente pela concessionária de energia elétrica.

$CD$  é o custo de disponibilidade mínimo para o fornecimento bifásico previsto pela ANEEL

$I_{rr}$  é o valor da média de irradiação em quilowatt por metro quadrado por dia do ano [kWh/m<sup>2</sup>.dia], para uma geolocalização adotada.

$\eta$  é o rendimento da usina fotovoltaica, ou seja, a energia disponibilizada para a rede sobre a energia gerada pelos painéis solares

A ANEEL, por meio da Resolução Normativa nº 1.000/2021 descreve algumas especificações, dentre elas os grupos Tarifários.

Sendo estes, o Grupo A, composto por Unidades consumidoras da Alta Tensão (Subgrupos A1, A2 e A3), Média Tensão (Subgrupos A3a e A4), e de sistemas subterrâneos (Subgrupo AS). E o Grupo B, Unidades consumidoras da Baixa Tensão, das Classes Residencial (Subgrupo B1), Rural (B2), Demais Classes (B3) e Iluminação Pública (B4).

O enfoque deste trabalho se enquadra no Grupo B, mais especificamente no Subgrupo B1, onde o custo de disponibilidade é de 50 kWh.

O consumo elétrico para efeitos de dimensionamento, considerou os dados descritos na Tabela 4, que se trata de uma fatura real de uma residência categorizada como B1 da cidade de Sorocaba-SP.

Tabela 4 - Histórico de consumo de uma residência do Grupo B da região de Sorocaba-SP

Histórico de consumo		KWh	Dias
fev/22		400	28
jan/22		560	31
dez/21		650	30
nov/21		540	32
out/21		370	30
set/21		400	31
ago/21		290	32
jul/21		320	30
jun/21		310	28
mai/21		400	33
abr/21		490	29
mar/21		540	33
fev/21		430	28
<b>Media</b>		<b>438,46</b>	

Fonte: Elaborado pelo Autor

Pela Tabela 4 nota-se alguns comportamentos de interesse para uma usina fotovoltaica. O fato de o consumo energético desta residência nos meses de inverno ser menor que nos meses de verão, sendo este o comportamento esperado da usina, uma vez que a irradiância no inverno tende a ser menos intensa (CRESESB, 2022). Tem-se uma média de 438,46 kWh/mês, sendo este valor utilizado para os cálculos.

Segundo a Resolução Normativa Nº 414 (ANEEL, 2010), o custo de disponibilidade para sistemas bifásico é de 50kWh. Desta forma, o valor referente a resolução será cobrado independente do consumo inferior ao valor mínimo. Por isso, para efeitos de dimensionamento, é considerado 50kWh a menos, uma vez que este consumo é mandatório e será contabilizado na conta elétrica.

Considerando os dados do CRESESB, 2022, pela Figura 42 tem-se a média de irradiação fornecida na latitude de Sorocaba-SP bem como a inclinação com maior potencial energético.

Figura 42 - Dados de irradiação solar para a cidade de Sorocaba-SP

#### Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Sorocaba  
Município: Sorocaba, SP - BRASIL  
Latitude: 23,5° S  
Longitude: 47,549° O  
Distância do ponto de ref. (23,5° S; 47,549° O) : 0 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m <sup>2</sup> .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	5,52	5,73	5,03	4,42	3,61	3,36	3,46	4,47	4,60	5,19	5,60	6,07	4,76	2,70
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	24° N	4,97	5,45	5,18	5,04	4,51	4,42	4,44	5,36	4,92	5,06	5,11	5,36	4,99	1,03
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	21° N	5,07	5,52	5,20	5,00	4,42	4,32	4,34	5,28	4,91	5,11	5,20	5,48	4,99	1,20
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	32° N	4,67	5,21	5,09	5,11	4,67	4,65	4,63	5,49	4,88	4,88	4,82	5,00	4,93	,86

Fonte: CRESESB (2022)

Como visto na Figura 42 o ângulo de inclinação com maior média anual é de 21° N, sendo recomendada para instalação da placa na cidade de Sorocaba-SP e a média anual de irradiação é de 4,99 kWh/m<sup>2</sup>.d

Para determinação do rendimento, é necessário informações como:

$$\eta = \frac{\text{Energia Gerada}}{\text{Energia Teórica}} \quad (8)$$

Onde:  $E.T. = I_{rr} * t * A * \eta_{modulo} \quad (9)$

Logo:  $\eta = \frac{\text{Energia Gerada}}{I_{rr} * t * A * \eta_{modulo}} \quad (10)$

$$\eta = \frac{\text{Energia Gerada}}{\text{Energia Teórica}} \quad (8)$$

Sendo:

A área ocupada pelos módulos do sistema de geração fotovoltaico em m<sup>2</sup> e  $\eta$  o coeficiente de rendimento do módulo fotovoltaico.

Para efeitos teóricos, um rendimento médio de 80 % pode ser obtido nas condições de radiação solar do Brasil (Pinho; Galdino, 2014). Considerando um coeficiente de segurança e perdas associadas globais de 30%, adotou-se o coeficiente de rendimento 0,7. Pela eq. (10) tem-se:

$$P_{KWP} = \frac{\overline{C_{KWh/ano}} - CD}{I_{rr} * \eta * 365/12}$$

$$P_{KWP} = \frac{438,36 - 50}{4,99 * 0,7 * 365/12}$$

$$P_{KWP} = 3,66 \text{ kWp}$$

A potência fotovoltaica da usina deve suprir uma demanda elétrica de 3,66 kWp (Quilowatt pico).

## 4.2 Número de painéis solares

Para simulação, foram adotados os painéis de silício policristalino da empresa Jinko JKM330PP-72, com potência nominal de 330 Wp ( $P_{stc}$ ) ou potência de curto-circuito.

Sendo assim, para dimensionar a quantidade de placas foi realizado o seguinte cálculo:

$$Qtd_{placas} = \frac{P_{kWp}}{P_{STC}} \quad (11)$$

$$Qtd_{placas} = \frac{3660_{Wp}}{330_{STC}}$$

$$Qtd_{placas} = 11,09$$

Onde foram determinados 12 painéis solares.

Desta forma, a Potência fotovoltaica passa a ser:

$$P_{KWP} = 330(kWp) * 12 \quad (12)$$

$$P_{KWP} = 3,96 kWp$$

Nota-se que o valor gerado pelas placas é cerca de 8,2% maior que a potência fotovoltaica demandada pelo sistema. Mantiveram esses valores como um parâmetro de segurança para o dimensionamento da usina solar fotovoltaica.

### 4.3 Seleção de inversor de tensão

Para a escolha do inversor, é adequado um inversor com FDI (fator de desempenho do inversor) em torno de 80 % (Burger; Ruther, 2005).

Este cálculo pode ser obtido pela equação:

$$FDI = \frac{P_{kWp}}{P_{INVERSOR}} \quad (13)$$

$$0,8 = \frac{3,96}{P_{INVERSOR}}$$

$$P_{INVERSOR} = 4,95 kWp$$

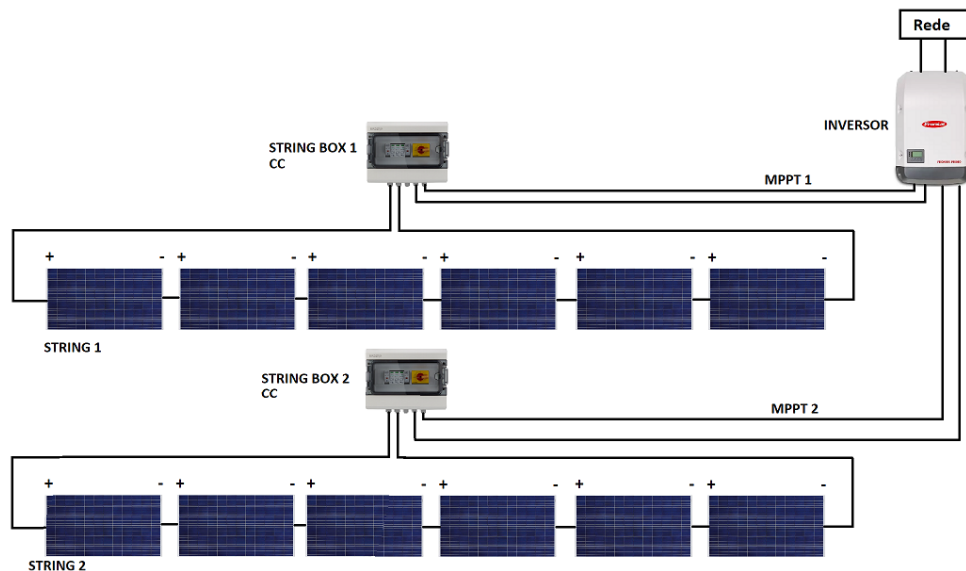
Logo, a Potência do inversor ( $P_{inversor}$ ) é de 4,95 kWp.

Segundo o site da Clean Energy Reviews (2021), que fez um estudo com as principais marcas que fabricam inversores de tensão voltados a usinas solares fotovoltaicas, utilizando critérios como qualidade e confiabilidade, serviço de suporte, monitoramento, garantia, recursos e preços, a Fabricante Fronius se saiu em primeiro lugar para inversores de até 10 kWp.

Neste cenário foi adotado o inversor PRIMO 5.0-1 da empresa Fronius, que entrega 5,0 kWp de saída.

Como o inversor possui 2 entradas *MPPT* e os painéis fotovoltaicos foram associados em série e duas *strings*, conforme visto na Figura 43:

Figura 43 - Ilustração da associação dos painéis solares em série



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.4 Dimensionamento do cabeamento

Para efeito de cálculos, foram dimensionados os cabamentos considerando 4% de perda (NBR 5410), e a lei de Ohm pelas equações:

$$R_{\text{cabamento}} = \frac{V_{\text{perda}}}{I_{MP}} \quad (14)$$

Sendo,

$$V_{\text{perda}} = V_{MP} * 4\% \quad (15)$$

$$E, \quad R_{cabeamento} = \frac{\rho * 2L}{S_{mm^2}} \quad (16)$$

Reescrevendo a equação  
tem-se:

$$S_{mm^2} = \frac{\rho * 2L * I_{MP}}{V_{perda}} \quad (17)$$

Onde,

$\rho$  é a resistividade do material, neste caso o cobre tem 0,017  $\Omega.m$  (NBR 5410)

L é o comprimento do fio de cobre, neste caso considerado como 20m a distância entre os painéis e o inversor

$S_{mm^2}$  a área da seção transversal do cabo

$V_{perda}$  é a queda de tensão prevista no fio que conduz a tensão máxima dos painéis associados ( $V_{MP}$ )

$I_{MP}$  representa a corrente máxima dos painéis associados

Resolvendo as equações, tem-se:

$$V_{perda} = (35,3) * 4\%$$

$$V_{perda} = 1,412 V$$

E a seção transversal do fio a ser utilizada:

$$S_{mm^2} = \frac{0,017 * (2 * 20) * 7,05}{1,412}$$

$$S_{mm^2} = 3,39 \approx 4mm^2$$

Logo, é correto afirmar que sejam utilizados fios de 4mm<sup>2</sup> para a conexão entre os painéis e os inversores.

Confrontando os resultados com a NBR 16612 que regulamenta os cabos de potência para sistemas não halogenados, isolados, com cobertura, tem-se que:

$$S_{mm^2} = 1,5 * I_{curto-circuito} \quad (18)$$

$$I_b = 1,5 * 7,45$$

$$I_b = 11,175 A$$

Sendo  $I_b$  a corrente de projeto.

Pela tabela c.2, atendendo o critério do Modo 1 que isola os cabos de luz solar, tem-se uma seção mínima de 1,5mm<sup>2</sup> como visto na figura 44:

Figura 44 - Trecho da tabela C2 da NBR 16612

Seção	Instalação ao Ar Livre Protegida do Sol				Instalação ao Ar Livre Exposta ao Sol			
	Modo de Instalação:				Modo de Instalação:			
mm <sup>2</sup>	1	2	3	4	1	2	3	4
1,5	26	26	30	26	23	22	27	23
2,5	35	35	40	35	31	30	36	31
4	47	46	53	47	41	40	48	41
6	60	59	68	60	51	51	61	52
10	83	82	95	84	71	71	85	73
16	110	110	125	113	93	93	112	97
25	146	147	166	151	123	124	147	129
35	181	183	207	189	151	153	182	161
50	229	232	260	240	189	193	228	204

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020).

Nota-se a discrepância na seção transversal entre os dois métodos aplicados para dimensionamento do cabeamento que conecta os painéis ao inversor.

Neste cenário, vale considerar o custo-benefício de instalação, sendo utilizado para as análises o cabeamento de maior seção transversal de 1,5 mm<sup>2</sup>, de forma a minimizar as perdas por efeito joule nos cabos elétricos.

#### 4.5 Dimensionamento das strings box

A *string box* para usinas fotovoltaicas segue as NBR 5410, norma brasileira de instalações elétricas de baixa tensão e NBR 16690, norma brasileira sobre sistemas fotovoltaicos. Essas normas têm como objetivo a proteção contra choque elétrico do usuário, proteção contra incêndios e efeitos térmicos, proteção contra sobrecorrente e sobretensão e capacidade de seccionamento (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004, 2020)

No mercado, é comum encontrar a *string box* com os elementos básicos: Involucro, dispositivo seccionador, dispositivo de proteção contra sobretensão – DPS, Dispositivo de proteção contra sobrecorrente – disjuntor ou fusível, cabos de corrente contínua.

#### 4.5.1 Involucro

O involucro é responsável em alocar os dispositivos de proteção e cabos elétricos. A função principal é proteger os dispositivos das ações das intempéries e proteger o usuário contra choques elétricos.

Sua classificação se dá de acordo a tolerância de vedação contra poeira e água. A forma de mensurar essa tolerância de ingressão é vista na tabela IP, vista na figura 45 a seguir:

Figura 45 - Esquema para determinação de grau de proteção IP



Fonte: Kimotor ([ca. 2020]).

Os involucros podem ser caracterizados, segundo a ABNT NBR IEC 60529 de proteção mínima IP2X para ambientes internos e proteção mínima IP55 para ambientes externos.

Segundo a NBR 5410 prevê, um invólucro não pode conter em seu interior circuitos mistos de corrente contínua e corrente alternada, somente uma forma de corrente por invólucro. A norma recomenda que a taxa máxima de ocupação do involucro seja de 50%, visando limitar o efeito de sobreaquecimento dos dispositivos que estarão em ambiente fechado.

## 4.6 Configurações de simulação

### 4.6.1 Dados climáticos de Sorocaba-SP

Foi utilizado dados de localização de uma residência de Sorocaba-SP, onde foi determinada a latitude e longitude para exportar os dados de irradiância como visto na Figura 46:

Figura 46 - Configuração dos dados de coordenadas geográficas para importação da irradiância da cidade de Sorocaba-SP

Fonte: Captura de tela do software PVSyst.

Além disso, para o dimensionamento da usina é necessário conhecer as condições climáticas da região de instalação. Desta forma, consultou-se no site Climate data as condições climáticas vistas em Sorocaba-SP.

A temperatura mínima esperada em Sorocaba-SP, como visto na Figura 47 é de 12.3°C. Sendo arredondado para 12 °C nos parâmetros da simulação.

Para temperatura de inverno, entre os meses junho a setembro, pode-se considerar, para efeitos de simulação, uma temperatura máxima de 26 °C

Para temperaturas no verão, foi adotada 70 °C na placa no verão.

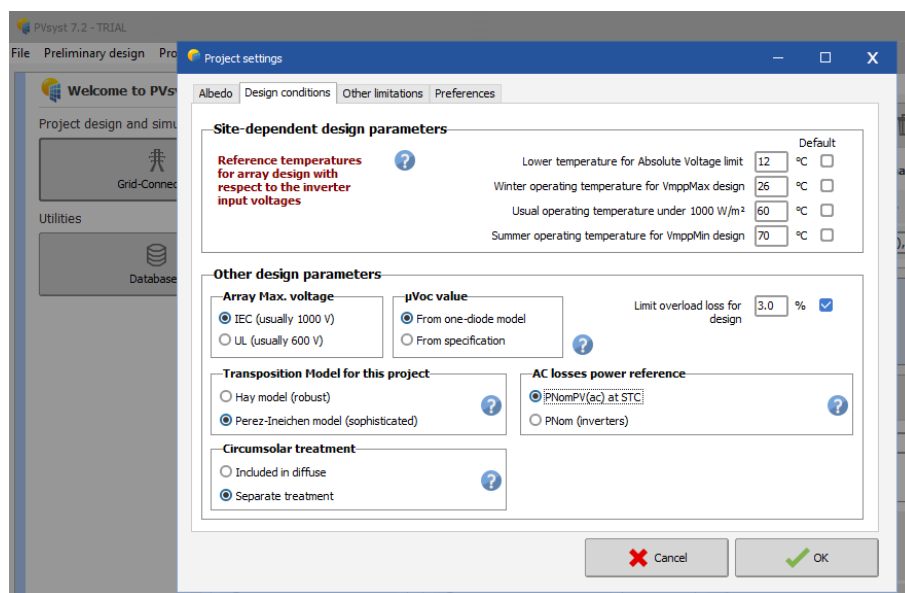
Figura 47 - Dados climatológicos para Sorocaba-SP em média por mês

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Temperatura média (°C)	23	23.3	22.4	21.1	18.3	17.3	16.9	18.3	20	21.4	21.5	22.7
Temperatura mínima (°C)	19.5	19.5	18.9	17.2	14.3	12.9	12.3	13.1	15.1	16.9	17.4	18.8
Temperatura máxima (°C)	27.5	27.9	27.1	28.1	23.3	22.7	22.7	24.7	28.2	27.2	26.6	27.5
Chuva (mm)	224	147	116	60	61	47	46	36	80	104	131	167
Umidade(%)	79%	79%	79%	75%	73%	73%	70%	65%	66%	70%	75%	77%
Dias chuvosos (d)	16	13	12	6	5	4	4	3	6	9	11	13
Horas de sol (h)	8.3	8.7	8.0	7.7	7.0	7.5	7.8	8.3	8.1	7.9	7.7	8.1

Fonte: Climate data (2023)

Pode-se ver os parâmetros de configurações do projeto aplicados no software pela Figura 48

Figura 48 - Configuração dos parâmetros de referência de temperatura no PVSyst

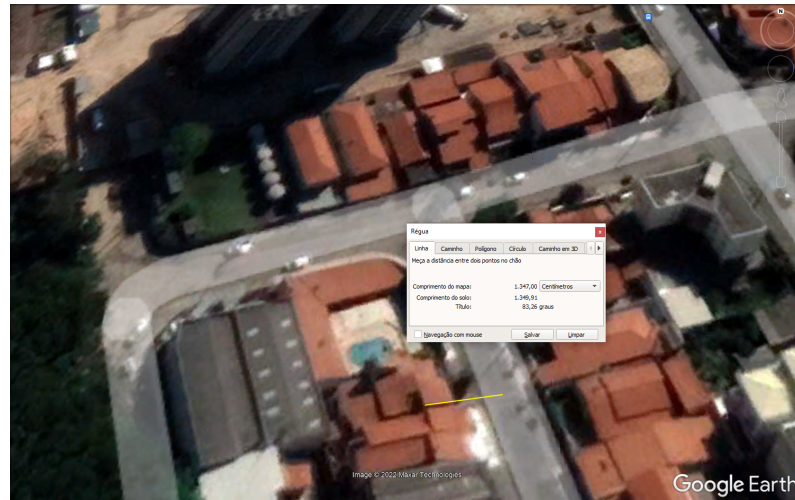


Fonte: Captura de tela do software PVSyst

#### 4.6.2 Determinação da geolocalização

Para configuração do ângulo de inclinação dos painéis fotovoltaicos foi considerada de  $10^\circ$  em relação ao plano horizontal e o ângulo azimutal de  $83,26^\circ$ , acompanhando a orientação do telhado, como visto na Figura 49.

Figura 49 - Orientação azimuthal da queda do telhado

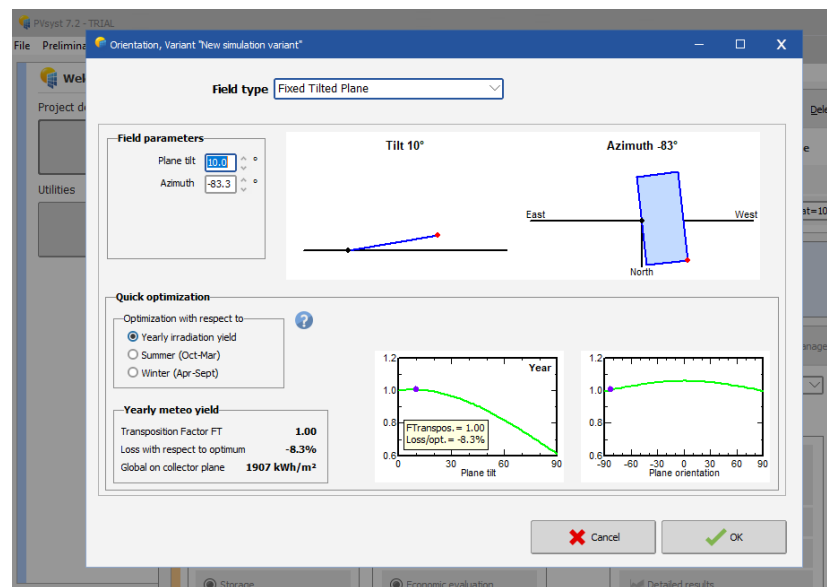


Fonte: Sorocaba (2022).

Preenchendo os dados no software, notou-se a necessidade de refletir os dados 180 graus uma vez que o PVSyst considera como grau positivo o Oeste, mas como visto na Figura 50 a orientação está para Leste.

Feita a reflexão, os parâmetros de orientação foram inseridos conforme representado na Figura 50.

Figura 50 - Configuração da inclinação e orientação dos painéis solares



Fonte: Captura de tela do software PVSyst.

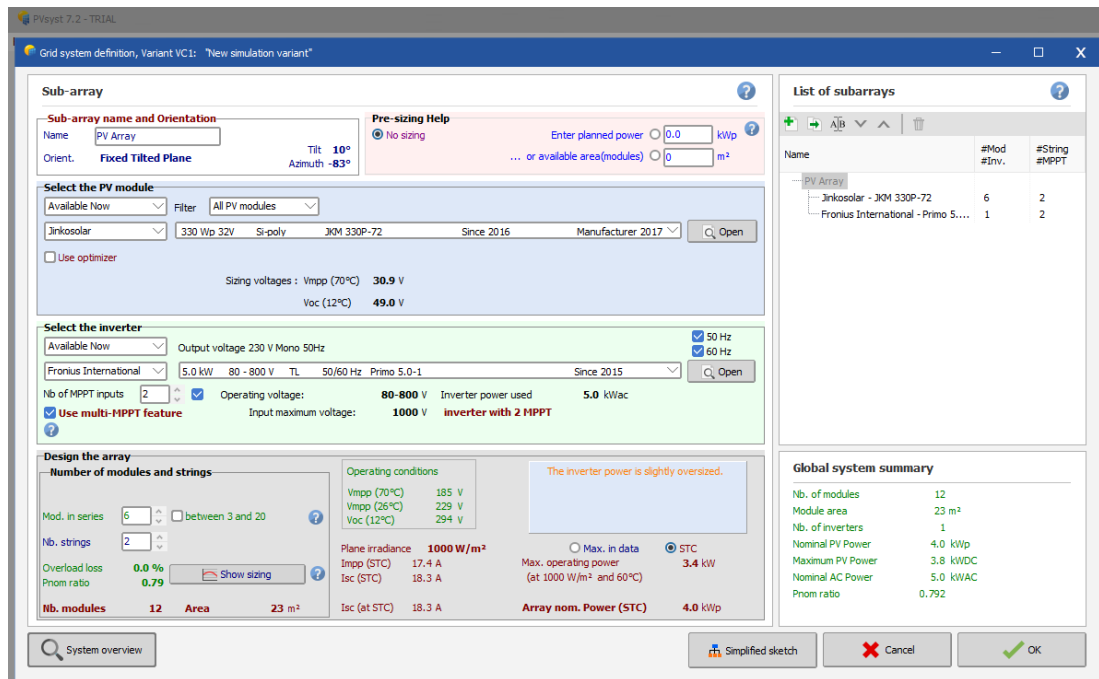
### 4.6.3 Configurações finais da simulação

Para a definição dos elementos do sistema, foi selecionado o painel solar Jinkosolar 325 Wp 325PP-72. Foi selecionado o inversor Fronius 5.0-1, da Fronius International, sendo utilizada as duas entradas MPPT do dispositivo.

O sistema contém duas *strings* com 6 painéis em série cada.

Os dados foram inseridos no PVSyst conforme visto na Figura 51:

Figura 51 - Dados inseridos para modelagem do sistema fotovoltaico no software PVSyst



Fonte: Captura de tela do software PVSyst

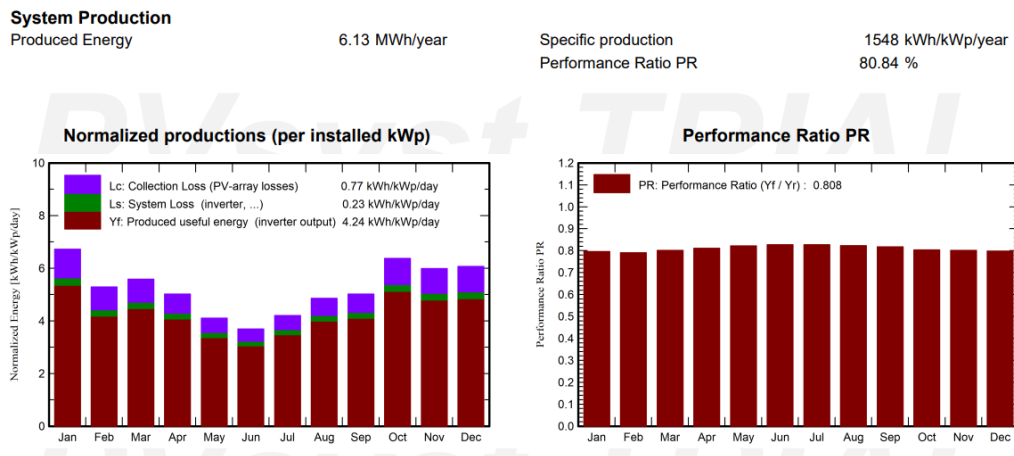
Dados os parâmetros, a simulação ocorreu sem maiores problemas.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após os cálculos teóricos, foi dimensionado no software PVSyst, que tem uma versão gratuita de 30 dias para simulações.

Com isso, foram feitas análises para o cenário de uma única orientação, ou seja, somente em uma mesma inclinação de telhado, gerando os seguintes resultados:

Figura 52 - Resultados da produção energética total e rendimento da usina fotovoltaica



Fonte: Captura do relatório gerado pelo PVSyst

Como observado na Figura 52, é possível notar a produção mensal da usina fotovoltaica, onde no gráfico a esquerda tem a produção total dividida em energia de saída entregue na saída do inversor (Yf), perdas nos painéis fotovoltaicos (Lc) e perdas associadas do sistema (Ls).

Além disso, no gráfico à direita é possível notar que o rendimento do sistema dado pela equação 7, considerado como 0,7 nos cálculos iniciais, apresentou resultado global de 0,813 o que indica uma eficiência próxima de 0,8 como esperado (Pinho; Galdino, 2014).

Pela Figura 53 nota-se os resultados principais obtidos pela usina para o inversor utilizado.

Figura 53 - Resultados da produção energética por mês

Balances and main results								
	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	PR
	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	°C	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	MWh	MWh	ratio
January	205.2	86.93	23.35	208.6	203.5	0.692	0.658	0.796
February	147.7	69.72	23.82	148.1	144.1	0.490	0.464	0.791
March	172.4	72.88	23.28	173.0	168.2	0.579	0.549	0.801
April	148.8	53.89	21.61	150.7	145.8	0.511	0.484	0.812
May	125.6	42.51	18.84	127.1	121.8	0.437	0.414	0.822
June	108.5	39.90	17.83	110.6	105.3	0.384	0.363	0.828
July	127.7	33.54	17.37	130.2	124.3	0.451	0.427	0.828
August	148.6	46.85	18.92	150.5	145.1	0.517	0.490	0.823
September	149.5	64.49	19.83	150.5	146.1	0.514	0.487	0.818
October	199.7	71.62	21.90	197.6	192.7	0.661	0.629	0.804
November	178.0	77.03	21.69	179.7	175.1	0.600	0.570	0.801
December	188.5	90.82	23.05	188.1	182.9	0.627	0.595	0.799
Year	1900.1	750.17	20.94	1914.8	1855.1	6.464	6.130	0.808

**Legends**

GlobHor Global horizontal irradiation

DiffHor Horizontal diffuse irradiation

T\_Amb Ambient Temperature

GlobInc Global incident in coll. plane

GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings

EArray Effective energy at the output of the array

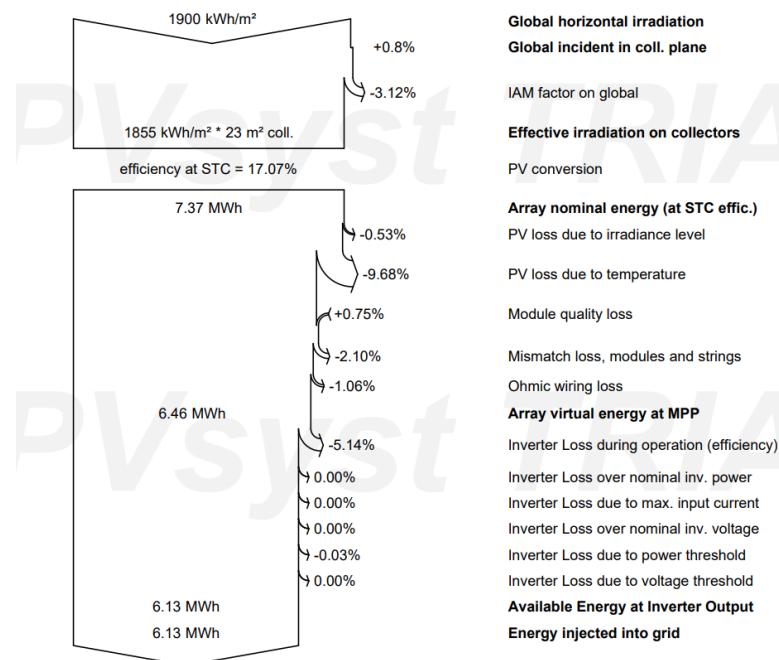
E\_Grid Energy injected into grid

PR Performance Ratio

Fonte: Captura do relatório gerado pelo PVSyst

Dentre os dados da Figura 53 vale destacar os dados de energia injetada na rede (E\_Grid) e a eficiência global (GlobEff) comparada a incidência global (GlobInc). Pode-se observar comportamentos que refletem numa geração dentro dos parâmetros de eficiência esperados no Brasil, a temperatura ambiente em níveis dentro do intervalo ótimo de funcionamento das placas solares em torno de 25 °C, massa de ar 1,5 e irradiação 1kW/m<sup>2</sup>, além de uma produção condizente à necessidade média levantada para a residência (Pinho; Galdino 2014).

Figura 54 - Diagrama de perdas elétricas da usina solar fotovoltaica



Fonte: Captura do relatório gerado pelo PVSyst

Pela Figura 54 é possível notar a influência das principais perdas no sistema, com ênfase nas perdas por temperatura que representa o maior percentual de perda da usina. Nota-se também uma perda de 5,14% proveniente do não atingimento da tensão mínima solicitada pelo inversor para operação.

Tabela 5 - Comparativo da produção da USF e o consumo da conta de referência

	<b>Produzido pela USF [kWh]</b>	<b>Conta de energia [kWh]</b>	<b>Conta/Produção</b>
<b>jan</b>	658	560	<b>118%</b>
<b>fev</b>	464	430	<b>108%</b>
<b>mar</b>	549	540	<b>102%</b>
<b>abr</b>	484	490	<b>99%</b>
<b>mai</b>	414	400	<b>104%</b>
<b>jun</b>	363	310	<b>117%</b>
<b>jul</b>	427	320	<b>133%</b>
<b>ago</b>	490	290	<b>169%</b>
<b>set</b>	487	400	<b>122%</b>
<b>out</b>	629	370	<b>170%</b>
<b>nov</b>	570	540	<b>106%</b>
<b>dez</b>	595	650	<b>92%</b>

Fonte: Elaborado pelo autor

Pela Tabela 5 é possível notar que no cenário otimista modelado para uma localização sem grandes influências de sombreamento, a produção da usina solar da forma que foi dimensionada, atenderia a necessidade de consumo elétrico da residência e disponibilizaria energia para a rede elétrica, tendo um abatimento total na fatura em todos os meses do.

Considerando o valor da conta de energia em anexo e considerando para os cálculos somente o consumo de uso do sistema consumo efetivo, a fatura teria o valor de R\$ 330,63 e o consumo deste mês foi de 400 kWh, logo, o custo por kWh foi:

$$C_T = \frac{\text{Valor Fatura}_{FEV22}}{\text{Consumo}_{kWh(Fev22)}} \quad (19)$$

$$C_T = \frac{330,63_{R\$}}{400_{kWh}}$$

$$C_T = 0,83_{R\$/kWh}$$

Neste cenário otimista, o kWh saiu a R\$ 0,83, desconsiderando as tributações, juros e eventuais multas por atraso em pagamento.

Com base nos valores de Tarifas da ANEEL referente a tarifação do fio B, nomenclatura dada a transmissão de energia no grupo B, é fluante, mas em média impacta em uma depreciação de cerca de 10% a cada kWh produzido.

Com base nesta depreciação, pela Tabela 6 é possível denotar o impacto da usina solar fotovoltaica na fatura paga, onde na coluna Valor fatura [R\$], denota-se o produto entre o consumo em kWh e valor por kWh, e na coluna Fatura Líquida [R\$] considera-se a diferença entre o valor na fatura e o valor pago considerando o valor produzido pela usina solar fotovoltaica depreciado 10% multiplicado pelo valor por kWh

Tabela 6 - Projeção de economia anual com a usina solar fotovoltaica

	Produzido pela USF [kWh]	Fatura de energia [kWh]	Valor Produzido pela USF [R\$]	Valor Fatura [R\$]	Fatura Líquida [R\$]
jan	658	560	491,53 -	464,80	26,73
fev	464	430	346,61 -	356,90	10,29
mar	549	540	410,10 -	448,20	38,10
abr	484	490	361,55 -	406,70	45,15
mai	414	400	309,26 -	332,00	22,74
jun	363	310	271,16 -	257,30	13,86
jul	427	320	318,97 -	265,60	53,37
ago	490	290	366,03 -	240,70	125,33
set	487	400	363,79 -	332,00	31,79
out	629	370	469,86 -	307,10	162,76
nov	570	540	425,79 -	448,20	22,41
dez	595	650	444,47 -	539,50	95,04
<b>Valor economizado/ano [R\$]</b>					<b>4.579,11</b>

Fonte: Elaborado pelo autor

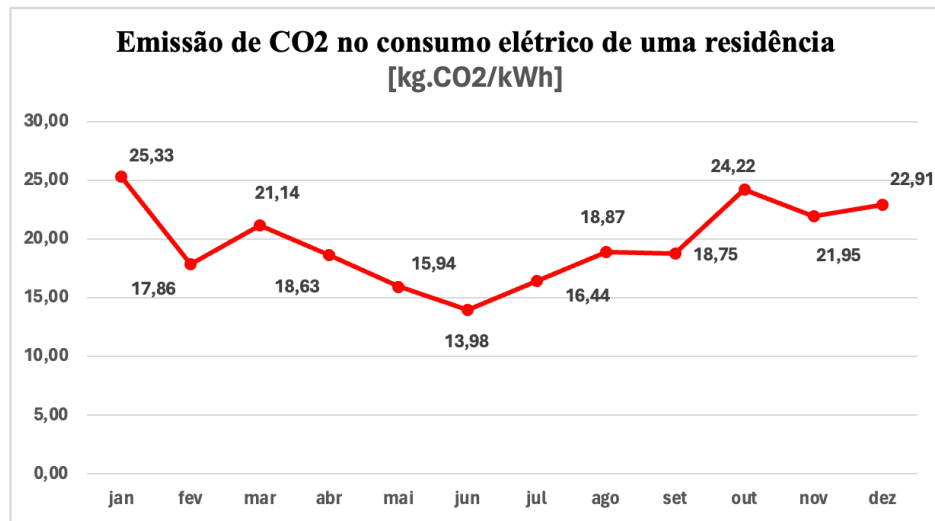
Nota-se, que no cenário onde a fatura não engloba nenhum encargo financeiro, anualmente é possível neste projeto, economizar R\$ 4.579,11/ano, descontado na fatura da concessionária. Sendo a durabilidade dos painéis de 20 anos, é possível economizar R\$ 91.582,20 com a instalação da usina solar fotovoltaica, considerando somente uma extrapolação linear.

A base de cálculo acima não considerou a projeção de inflação do cenário econômico brasileiro.

Considerando impactos ambientais segundo dados do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), no ano de 2023, cada kWh no sistema integrado nacional emite cerca de 0,0385 kg.CO<sub>2</sub>/kWh. Estes valores consideram todas as fontes sendo elas renováveis e não renováveis.

Como denotado pelo MCTI, a energia elétrica fotovoltaica não gera emissão de carbono em todo processo de produção direta, que implica, para uma única residência a diminuição de emissão de poluição de gás carbônico por quilowatt hora consumido, como denotado no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Análise de emissão de CO2 para uma residência



Fonte: Elaborado pelo autor

Como visto no gráfico 1, com a inserção de uma usina solar fotovoltaica, a emissão de dióxido de carbono para a residência, deixa de ser 236,01 kg.CO2 para zero, uma vez que a produção energética da residência foi superior a necessidade, injetando energia na concessionária, então além de zerar a emissão de carbono na produção direta, injetou energia sem emissão de carbono no Sistema Interligado Nacional.

## 6 CONCLUSÕES

Utilizando os dados do primeiro cálculo, utilizou-se de painéis de 325 Wp, que atenderam nas simulações em torno 90% da necessidade energética da residência. Financeiramente impactou numa economia de cerca de R\$ 650,00/ano.

Realizando a alteração do painel da mesma linha, mas de 330 Wp, o suprimento energético subiu para mais de 100%, impactando em uma economia em cerca de R\$ 5.000,00/ano.

A utilização de uma ferramenta para simulação se útil no dimensionamento, pois além de considerar a produção energética, trouxe a lucides para a área necessária para instalação dos painéis.

Além disso, nota-se a diminuição do impacto ambiental na produção elétrica da usina solar fotovoltaica. Já apontada como a forma de geração de energia elétrica que menos causa impactos ambientais, foi possível, com um dimensionamento adequado, minimizar os impactos de emissão de dióxido de carbono produzidos por uma residência para praticamente zero, diminuído mais de 235 kg anuais de emissão de CO<sub>2</sub>.

Financeiramente, com base em cotações atuais do mercado, a usina dimensionada neste trabalho, considerando materiais, homologação e mão de obra, sairia em torno de R\$ 22.000,00, o que levaria a um retorno de investimento em torno de 5 anos e uma economia de cerca de R\$ 70.000,00 em 20 anos.

Com a usina solar fotovoltaica bem dimensionada, como visto neste trabalho, é possível tornar uma residência autossustentável eletricamente, ou seja, toda a demanda elétrica ser suprida pelo sistema de microgeração de energia elétrica instalada nela.

Contudo, sendo a topologia adotada a on-grid e sem utilização de elementos de armazenamentos de energia, em casos de falta de energia na rede elétrica convencional, a tecnologia do inversor o desarma, interrompendo assim a disponibilização da energia gerada, já que neste cenário, a usina teria que demandar de energia para toda a rede, como não possui capacidade para tal demanda, levaria a sérios danos na usina.

Nota-se nas análises apresentadas neste documento que tanto financeiramente quanto ambientalmente, o que demonstra a importância do estudo apresentado e o correto dimensionamento de uma micro usina fotovoltaica.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, JED. **O Pico do Lítio e as dificuldades de armazenamento das energias renováveis**. Ecodebate, Rio de Janeiro, 21 dez. 2016. Disponível em: <http://www.ecodebate.com.br/2016/12/21/o-pico-do-litio-e-as-dificuldades-de-armazenamento-das-energias-renovaveis-por-jose-goldemberg/>. Acesso em: 15 set. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16612**: cabos de potência para sistemas fotovoltaicos, não halogenados, isolados, com cobertura: requisitos de desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5410**: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Matriz de Energia Elétrica**. 2023. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acesso em: 20 ago. 2023.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Programa de Incentivo às Fontes Alternativas**. 06 mar. 2017. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/proinfa>. Acesso em: 25 ago. 2023.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa N° 414**, de 9 set. 2010.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa N° 482**, de 17 abr. 2012.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa N° 687**, de 24 nov. 2015.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa N° 800**, de 19 set. 2017.
- BOSS, Sergio Luiz Bragatto; ASSIS, André K. T; CALUZI, João José. **Stephen Gray e a descoberta dos condutores e isolantes: tradução comentada de seus artigos sobre eletricidade e reprodução de seus principais experimentos**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2012.
- BRASIL. MCTI. **Emissões de Dióxido de Carbono por Queima de Combustíveis: Abordagem Top-Down. Relatórios de Referência: Setor Energia**. 2º Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Brasília, DF: MCTI, 2010.
- BRITO, Erick Matheus da Silveira; PEREIRA, H. A.; RIBEIRO, A.; Allan F. Cupertino. **Caracterização De Curvas De Painéis Fotovoltaicos Baseado Em Carga Capacitiva: Análise Do Transitório Do Capacitor**. In: VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016, Belo Horizonte. CBENS, 2016.
- BÜHLER, A. J. **Determinação de parâmetros fotovoltaicos a partir de ensaios de curvas características sem iluminação**. Dissertação de mestrado. Porto Alegre: UFRS, 2007.

BURGER, B.; RUTHER, R. **Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature** Received 20 December 2004, Revised 15 August 2005, Accepted 18 August 2005, Available online 10 October 2005.

CARDONA, M. S.; LÓPEZ, M.L. **Performance analysis of a grid-connected photovoltaic system.** *Energy*, New York, v. 24, n.1, p. 93-102, 1999.

CARNEIRO, J. **Electromagnetismo B: módulos fotovoltaicos: características e associações.** Guimarães, PT: Universidade do Minho, 2010. Disponível em: [https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16961/1/M%C3%B3dulos%20Fotovoltaicos\\_Caracteristicas%20e%20Associa%C3%A7%C3%B5es.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16961/1/M%C3%B3dulos%20Fotovoltaicos_Caracteristicas%20e%20Associa%C3%A7%C3%B5es.pdf). Acesso em: set. 2023.

CINDRA, J Louenço; TEIXEIRA, Odete P. Baierl. “**A evolução das ideias relacionadas aos fenômenos térmicos e elétricos: algumas similaridades**”, Caderno Brasileiro de Ensino de Física, 2005.

CLIMATE DATA. **Dados climáticos para Sorocaba, Brasil.** [S. I.], 2023. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/sao-paulo/sorocaba-756/#climate-graph>. Acesso em: 20 out. de 2023.

COLLE, S., PEREIRA, E.B. **Atlas de irradiação solar do Brasil (primeira versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície).** INMET, Brasília, Brasil. 1998.

COELHO, R.F. **Estudo dos conversores Buck e Boost Aplicados ao Rastreamento de Máxima Potência de Sistemas Solares Fotovoltaicos.** Dissertação (mestrado) – Universidade Regional de Blumenau, 2013.

COSTA, I. F. da., & Maroja, A. de M. (2018). **Astronomia diurna: medida da abertura angular do Sol e da latitude local.** *Revista Brasileira De Ensino De Física*, 40(Rév. Bras. Ensino Fís., 2018 40(1)). <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0301>

COGERA. **Entenda como funciona a energia fotovoltaica.** [S. I.]: Cogera, 2021. Disponível em: <https://cogera.com.br/como-funciona-a-energia-fotovoltaica/>. Acesso em: ago. 2023.

CRESESB, Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. **Potencial Solar – SunData v 3.0**, 2022. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>. Acesso em: 05 set. 2023.

DISOLE. Quem descobriu a energia solar? [S. I.], [201-]. Disponível em: <https://www.disoleenergia.com.br/post/quem-descobriu-e-energia-solar>. Acesso em: 20 ago. 2023.

ELETROBRÁS/PROCEL. **Energia Solar: Fundamentos e Aplicações.** Apostila do Curso Disseminação de Informações em Eficiência Energética. SENAI Dendezeiros. Salvador, 2004.

EPE (Brasil). **Balanco energético nacional 2022: ano base 2021.** Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2023. Acesso em: 10 ago. 2023.

EPE (Brasil). **Fontes de energia**. Rio de Janeiro: EPE, [ca. 2018]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia>. Acesso em: 10 ago. 2023.

FERMIN, José R. **De la arena a la oblea de silicio** – Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad del Zulia, 2018.

FRAZÃO, Dilva. **Biografia de Alessandro Volta**. [S. l.]: Ebiografia, [201-]. Disponível em: [https://www.ebiografia.com/alessandro\\_volta/](https://www.ebiografia.com/alessandro_volta/). Acesso em: 5 set. 2023.

GUERICKE, Otto Von. **Experimenta Nova (ut vocantur) Magdeburgica de Vacuo Spatio Primùm à R.P.** Gaspare Schotto. Amsterdam: J. Janssonium a Waesberge, 1672.

GUIMARÃES, A. P. **Os 400 anos do De magnete**. Ciência Hoje, [S. l.], v. 28, n. 167. p. 74-77. Disponível em: [http://cbpfindex.cbpf.br/publication\\_pdfs/artigoDeDivulgacaoCientifica\\_2019-03-29-10-40-13YXJ0aWdvRGVEaXZ1bGdhY2FvQ2lbnRpZmljYQ==.pdf](http://cbpfindex.cbpf.br/publication_pdfs/artigoDeDivulgacaoCientifica_2019-03-29-10-40-13YXJ0aWdvRGVEaXZ1bGdhY2FvQ2lbnRpZmljYQ==.pdf). Acesso em: 10 ago. 2023.

HAFEMEISTER, A., DIAS, J. B., POLTOSI, L. A. C. (2018). **Aplicação do algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) em módulos fotovoltaicos**. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, 17 a 20 de abril de 2018. Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

HÖRTEIS, M., Zappalà, D., & Weber, M. (2018). **Photovoltaic Diode String Failure Modes and its Impact on the String Performance**. 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), 732-735.

HOYT, D. V.; SCHATTEN, K. H. **The role of the sun in climate change**, New York: Oxford University Press, 1997.

IEA - Agência Internacional de Energia. **World Energy Outlook 2020: Principais Tendências, 2020**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>. Acesso em: 05 set. 2023.

IST. **Breve história da energia solar**. [S. l.], 2004. Disponível em: <http://web.ist.utl.pt/palmira/solar.html>. Acesso em: 15 ago. 2023.

JINKO SOLAR. **Eagle 72P 320-340 Watt**. [S. l.]: Jinko Solar, [ca. 2020]. Disponível em: [https://www.jinkosolar.com/uploads/5e93f9cc/Eagle%20JKM320-340PP-72-\(V\)-A3,1-EN.pdf](https://www.jinkosolar.com/uploads/5e93f9cc/Eagle%20JKM320-340PP-72-(V)-A3,1-EN.pdf). Acesso em: 20 set 2023.

KALOGIROU, S. A. (2014). **Solar Energy Engineering: Processes and Systems**. Academic Press.

KAZMERSKI, Lawrence L. (2010). **Solar Energy Fundamentals**. CRC Press.

KIMOTOR. IP: grau de proteção. [S. l.]: Kimotor, [ca. 2020]. Disponível em: <https://blog.kimotor.com.br/ip-grau-de-protecao/>. Acesso em: 12 out. 2023

KURTZ, Sarah et al. **Evaluation of high-temperature exposure of photovoltaic modules. Progress in photovoltaics: Research and applications**, v. 19, n. 8, p. 954- 965, 2011.

LINHARES, C. M., SOARES, I. A., & MEDEIROS, C. A. G. (2018). **Desenvolvimento de um simulador solar de baixo custo para fins didáticos**. In: XVI CEEL - ISSN 2178-8308. Universidade Federal de Uberlândia, 05 a 9 de novembro de 2018.

MACÊDO, Wilson N. **Análise do Fator de Dimensionamento do Inversor aplicado a Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. Tese de Doutorado, Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MACHADO, C. T.; Miranda, F. S.. **Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão**. Rev. Virtual Quim., 2015, 7 (1), 126-143. Data de publicação na Web: 14 de outubro de 2014.

MARTINS, R. A. **Aspectos Apriorísticos da Ciência: Lavoisier e a Lei da Conservação da Massa em Reações Químicas**. In: SILVA, A. P. B., and MOURA, B. A., eds. *Objetivos humanísticos, conteúdos científicos: contribuições da história e da filosofia da Ciência para o ensino de Ciências* [online]. Campina Grande: EDUEPB, 2019, pp. 11-51. ISBN: 978-85-78795-79-5. <http://doi.org/10.7476/9786586221664.0002>.

MENDES, I. M. **Dimensionamento de um Sistema de Energia Fotovoltaico para Autoconsumo**. ISEP, julho, 2019.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional**, 2020.

NARDI, L. M. C., & Silva, C. C.. (2021). **A matematização dos estudos elétricos antes de Coulomb: as contribuições de Johann Euler no século XVIII, acompanhada de uma tradução comentada de seu Recherches sur la Cause Physique de l'Electricité**. Revista Brasileira De Ensino De Física, 43(Rev. Bras. Ensino Fís., 2021 43). <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0396>

OLIVEIRA, E. Noite da Cruviana. [S. l.]: AreiabranquiCidade, 21 mar. 2014. Disponível em: <https://evaldoab.com/2014/03/21/noite-da-cruviana/>. Acesso em: 10 ago. de 2023.

ONU - Organização das Nações Unidas. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**, 2020. Disponível em: de <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 05 set. 2023.

PANGO TECH. (s.d.). **Silicon Wafer Product**, de 2023. Disponível em: <https://www.pgosemi.com/silicon-wafer/silicon-wafer-product.html>. Acesso em: 12 set. 2023.

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.

PINHEIRO, Elisângela et al. **Avaliação do potencial da geração fotovoltaica em diferentes condições climáticas na matriz elétrica brasileira**. In: V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife. 2014.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014.

PORTAL SOLAR. **Painel Solar**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/painel-solar-fotovoltaico.html>. Acesso em: 21 ago. de 2023.

SÁLES, I. C. F. **Análise da Substituição do Chuveiro Elétrico por Aquecedor Solar: Uma Contribuição ao Setor Elétrico na Conservação de Energia**. 158 f. Dissertação (mestrado) – Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2008. Disponível em:

<[http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select\\_action=&co\\_obra=129214](http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=129214)>.

SEERA, M., Sharma, R., & Shrivastava, S. (2019). **A review of maximum power point tracking techniques for solar PV systems**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 396-409.

SILVA, Lara Raquel de Jesus Rodrigues; SHAYANI, Rafael Amaral; DE OLIVEIRA, Marco Aurélio Gonçalves. **Análise comparativa das fontes de energia solar fotovoltaica, hidrelétrica e termelétrica, com levantamento de custos ambientais**. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018. 2018.

SOROCABA. **Sorocaba: Google**, 2022. 1 imagem de satélite, color., 2D. Disponível em: <https://earth.google.com/web/search/ana+augusta+soares/@-23.48330416,-47.43617618,555.59047736a,767.49079435d,35y,0h,0t,0r/data=Cn0aUxJNCiUweDk0Y2Y2MDBlZTcwMTljZWl6MHhiMjk1ODMxMzBjM2Q1ZWY3GQZr9wa6ezfAIQRrQZTU0fAKhJhbmEgYXVndXN0YSBzb2FyZXMYAiABliYkJKAKiJnupK3s3wBGvBzC8Inw3wBnHNtQiYbdHwCH3YIC1T7hHwDoDCgEw> Acesso em: 21 set. 2023.

SOUZA, R. B.; REBOITA, M. S.; WERLE, A. P.; COSTA, E. B. C. Influência das variáveis atmosféricas na degradação dos materiais da construção civil. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 1-19, jan./jun. 2017. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/reec/article/view/41448>. Acesso em: set. 2023

STEIN, J. S. (2019). **String Protection & Bypass Diodes in Photovoltaic Systems**. *SolarPro Magazine*. Retrieved from <https://solarprofessional.com/articles/design-installation/string-protection-bypass-diodes-in-photovoltaic-systems>.

SWERA, **Global Solar Atlas**. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/map?c=-22.164514,-49.482422,8&s=-23.493477,-47.466431&m=site>. Acesso em: set. 2023.

UNEP - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. **Energia Sustentável: Desafios e Oportunidades**, 2021.

VALLÊRA, A. M.; BRITO, M. C. **Meio século de história fotovoltaica**. *Gazeta de Física*, Lisboa, v. 29, n. 1-2, p. 10-15., 2006. Disponível em: <http://solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2023.

VILLALVA, M.; GAZOLI, J. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Erica, 2012.

ZHANG, R., Lin, X., & Zhang, Y. (2013). **Design of an advanced MPPT algorithm for photovoltaic system**. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 8(6), 1254-1262.

## APENDICE A – RELATÓRIO DE RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NO PVSYS



# PVsyst - Simulation report

Grid-Connected System

---

Project: Simulacao\_TG\_V1

Variant: New simulation variant No 3D scene defined, no shadings

System power: 3960 Wp

Address\_sorocaba - Brazil



## Project: Simulacao\_TG\_V1

Variant: New simulation variant

### PVsyst V7.2.12

VC1, Simulation date:  
12/03/22 18:15  
with v7.2.12

### Project summary

#### Geographical Site

Address\_sorocaba  
Brazil

#### Situation

Latitude -23.48 °S  
Longitude -47.44 °W  
Altitude 560 m  
Time zone UTC-3

#### Project settings

Albedo 0.20

#### Meteo data

Address\_Sorocaba  
Meteonorm 8.0 (2006-2017), Sat=100% - Synthetic

### System summary

#### Grid-Connected System

No 3D scene defined, no shadings

#### PV Field Orientation

Fixed plane  
Tilt/Azimuth 10 / -83 °

#### Near Shadings

No Shadings

#### User's needs

Unlimited load (grid)

#### System information

##### PV Array

Nb. of modules 12 units  
Pnom total 3960 Wp

##### Inverters

Nb. of units 1 unit  
Pnom total 5.00 kWac  
Pnom ratio 0.792

### Results summary

Produced Energy	6.13 MWh/year	Specific production	1548 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	80.84 %
-----------------	---------------	---------------------	-------------------	----------------	---------

### Table of contents

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Main results	4
Loss diagram	5
Special graphs	6



## Project: Simulacao\_TG\_V1

Variant: New simulation variant

## PVsyst V7.2.12

VC1, Simulation date:  
12/03/22 18:15  
with v7.2.12

## General parameters

## Grid-Connected System

No 3D scene defined, no shadings

## PV Field Orientation

## Orientation

Fixed plane

Tilt/Azimuth 10 / -83 °

## Sheds configuration

No 3D scene defined

## Models used

Transposition Perez

Diffuse Perez, Meteonorm

Circumsolar separate

## Horizon

Free Horizon

## Near Shadings

No Shadings

## User's needs

Unlimited load (grid)

## PV Array Characteristics

## PV module

Manufacturer

Generic

Model

JKM 330P-72

(Original PVsyst database)

Unit Nom. Power

330 Wp

Number of PV modules

12 units

Nominal (STC)

3960 Wp

Modules

2 Strings x 6 In series

## At operating cond. (60°C)

Pmpp

3395 Wp

U mpp

195 V

I mpp

17 A

## Total PV power

Nominal (STC)

4 kWp

Total

12 modules

Module area

23.3 m<sup>2</sup>

Cell area

21.0 m<sup>2</sup>

## Inverter

Manufacturer

Generic

Model

Primo 5.0-1

(Original PVsyst database)

Unit Nom. Power

5.00 kWac

Number of inverters

2 \* MPPT 50% 1 unit

Total power

5.0 kWac

Operating voltage

80-800 V

Pnom ratio (DC:AC)

0.79

## Total inverter power

Total power

5 kWac

Number of inverters

1 unit

Pnom ratio

0.79

## Array losses

## Thermal Loss factor

Module temperature according to irradiance

Uc (const)

20.0 W/m<sup>2</sup>K

Uv (wind)

0.0 W/m<sup>2</sup>K/m/s

## DC wiring losses

Global array res.

200 mΩ

Loss Fraction

1.5 % at STC

## Module Quality Loss

Loss Fraction

-0.8 %

## Module mismatch losses

Loss Fraction

2.0 % at MPP

## Strings Mismatch loss

Loss Fraction

0.1 %

## IAM loss factor

ASHRAE Param: IAM = 1 - bo(1/cosi -1)

bo Param.

0.05



## Project: Simulacao\_TG\_V1

Variant: New simulation variant

## PVsyst V7.2.12

VC1, Simulation date:  
12/03/22 18:15  
with v7.2.12

## Main results

## System Production

Produced Energy

6.13 MWh/year

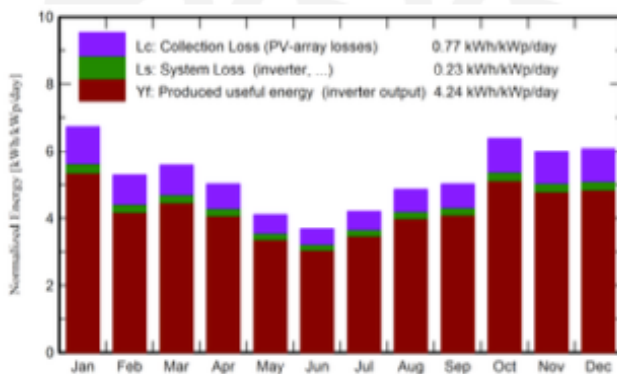
Specific production

1548 kWh/kWp/year

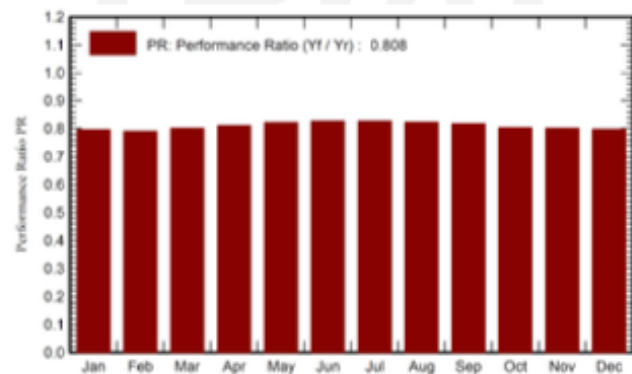
Performance Ratio PR

80.84 %

## Normalized productions (per installed kWp)



## Performance Ratio PR



## Balances and main results

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh/m <sup>2</sup>	T_Amb °C	GlobInc kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	EArray MWh	E_Grid MWh	PR ratio
January	205.2	86.93	23.35	208.6	203.5	0.692	0.658	0.796
February	147.7	69.72	23.82	148.1	144.1	0.490	0.464	0.791
March	172.4	72.88	23.28	173.0	168.2	0.579	0.549	0.801
April	148.8	53.89	21.61	150.7	145.8	0.511	0.484	0.812
May	125.6	42.51	18.84	127.1	121.8	0.437	0.414	0.822
June	108.5	39.90	17.83	110.6	105.3	0.384	0.363	0.828
July	127.7	33.54	17.37	130.2	124.3	0.451	0.427	0.828
August	148.6	46.85	18.92	150.5	145.1	0.517	0.490	0.823
September	149.5	64.49	19.83	150.5	146.1	0.514	0.487	0.818
October	199.7	71.62	21.90	197.6	192.7	0.661	0.629	0.804
November	178.0	77.03	21.69	179.7	175.1	0.600	0.570	0.801
December	188.5	90.82	23.05	188.1	182.9	0.627	0.595	0.799
Year	1900.1	750.17	20.94	1914.8	1855.1	6.464	6.130	0.808

## Legends

GlobHor Global horizontal irradiation

DiffHor Horizontal diffuse irradiation

T\_Amb Ambient Temperature

GlobInc Global incident in coll. plane

GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings

EArray Effective energy at the output of the array

E\_Grid Energy injected into grid

PR Performance Ratio

PVsyst TRIAL



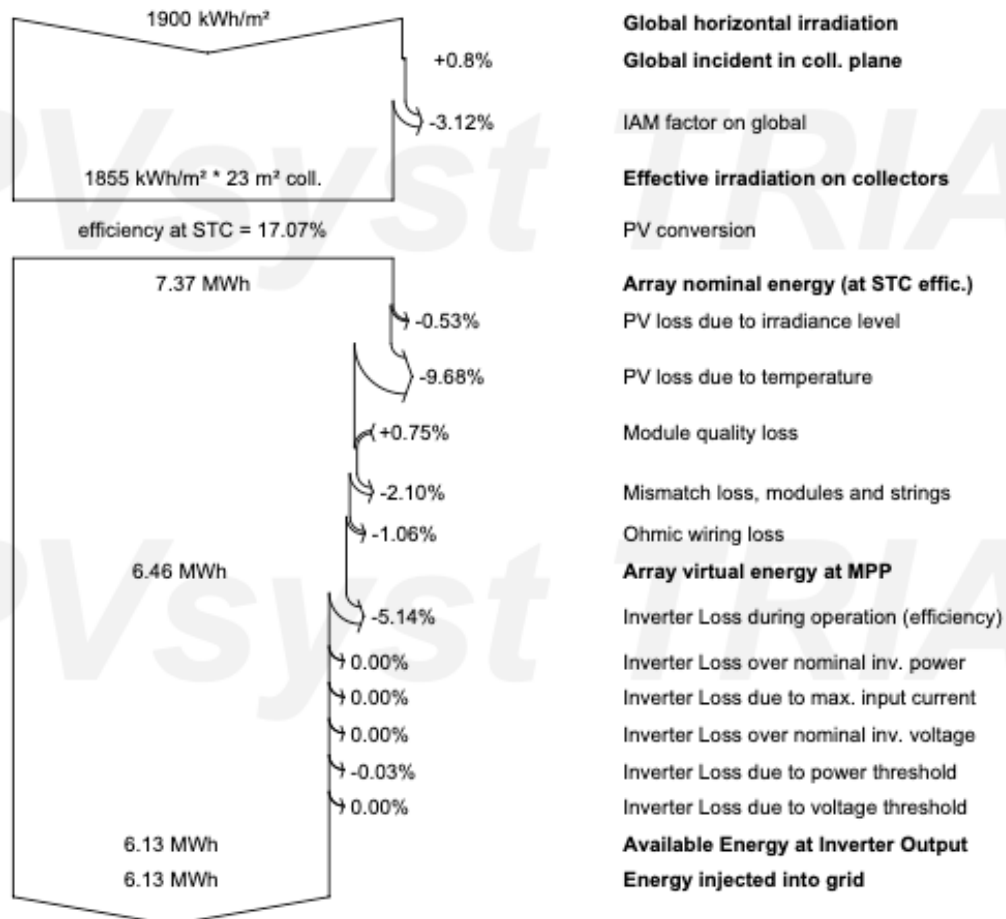
## Project: Simulacao\_TG\_V1

Variant: New simulation variant

### PVsyst V7.2.12

VC1, Simulation date:  
12/03/22 18:15  
with v7.2.12

### Loss diagram





Project: Simulacao\_TG\_V1

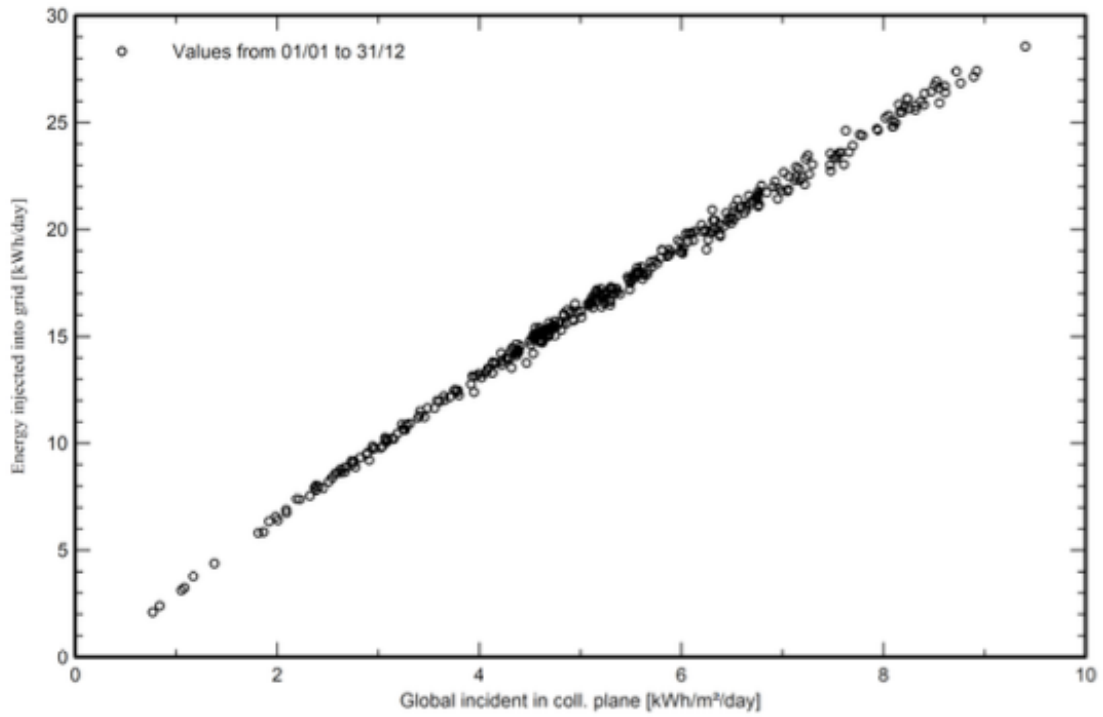
Variant: New simulation variant

PVsyst V7.2.12

VC1, Simulation date:  
12/03/22 18:15  
with v7.2.12

Special graphs

Daily Input/Output diagram



System Output Power Distribution

