

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**OTÁVIO AUGUSTO MARTINS MORAIS**

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA POTÊNCIA DO ARRANJO FOTOVOLTAICO PARA  
OPERAÇÃO DE UM INVERSOR PROJETADO**

**MEDIANEIRA**

**2022**

**OTÁVIO AUGUSTO MARTINS MORAIS**

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA POTÊNCIA DO ARRANJO FOTOVOLTAICO PARA  
OPERAÇÃO DE UM INVERSOR PROJETADO**

**Analysis of power variation of the photovoltaic arrangement for operation of a  
designed inverter**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Filipe Marangoni

**MEDIANEIRA**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**OTÁVIO AUGUSTO MARTINS MORAIS**

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA POTÊNCIA DO ARRANJO FOTOVOLTAICO PARA  
OPERAÇÃO DE UM INVERSOR PROJETADO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 21/novembro/2022

---

Filipe Marangoni  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Alberto Noboru Miyadaira  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Evandro André Konopatzki  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**MEDIANEIRA**

**2022**

## RESUMO

Através do desenvolvimento da sociedade pode-se dizer que o uso de energia elétrica é uma das suas principais necessidades. Com crescimento acelerado das tecnologias e com a industrialização a energia elétrica é indispensável, atrelado ao conceito de desenvolvimento sustentável a busca por fontes alternativas torna-se cada vez maior, com isso, houve uma maior procura pela energia fotovoltaica. Para este estudo foi analisada a influência da variação da potência do arranjo fotovoltaico de entrada sobre o período de operação de um inversor monofásico. Os dados utilizados foram obtidos com a utilização do software PVsyst. Foram encontrados os valores de temperatura e irradiação horária para o dia com maior e menor irradiação em cada mês para a cidade de Medianeira-PR. Na sequência a temperatura e irradiação foram utilizadas para traçar os gráficos I-V e P-V por hora, do painel fotovoltaico CS3W-450MS da empresa Canadian Solar. Todos os dados obtidos foram exportados para o Excel para que fosse possível realizar as análises. Para que o inversor considerado funcione adequadamente, é necessário que a tensão mínima na entrada seja de 190V e a corrente de 1A, e para isso foi considerado um arranjo com 5 painéis em série. A partir dos gráficos pode-se observar que no mês de janeiro (verão) o inversor funcionaria das 6h até às 18h. No mês de julho (inverno) o arranjo de painéis fornece a tensão e/ou corrente necessárias somente das 8h até às 16h. Para toda a alteração do modelo do painel ou alteração da localidade devem ser refeitas as análises para verificar os horários que apresentem as condições mínimas para a operação do inversor.

**Palavras-chave:** células fotoelétricas; geração de energia fotovoltaica; inversores elétricos.

## ABSTRACT

Through the development of society it can be said that the use of electricity is one of its main needs. With the accelerated growth of technologies and industrialization, electric energy is indispensable, linked to the concept of sustainable development, the search for alternative sources becomes increasing, with this, there was a greater demand for photovoltaic energy. For this study, the influence of the power variation of the input photovoltaic array on the period of operation of a single-phase inverter was analyzed. The data used were obtained using the PVsyst software. The values of temperature and hourly irradiation were found for the day with the highest and lowest irradiation in each month for the city of Medianeira-PR. Next, the temperature and irradiation were used to plot the I-V and P-V graphs per hour of the CS3W-450MS photovoltaic panel from the Canadian Solar company. All data obtained were exported to Excel so that the analysis could be performed. For the considered inverter to work properly, it is necessary that the minimum voltage at the input is 190V and the current is 1A, and for that an arrangement with 5 panels in series was considered. From the graphs, it can be seen that in January (summer) the inverter would work from 6 am to 6 pm. In the month of July (winter) the panel arrangement provides the voltage and/or current needed only from 8 am to 4 pm. For any change in the panel model or change in location, the analyzes must be carried out to verify the times that present the minimum conditions for the operation of the inverter.

**Keywords:** photoelectric cells; photovoltaic power generation; electric inverters.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de sistema elétrico interligado com geração distribuída .....	16
Figura 2 – Distribuição da radiação solar .....	18
Figura 3 – Mapa do potencial de geração solar fotovoltaica no Brasil .....	19
Figura 4 – Esquema básico de uma célula fotovoltaica .....	20
Figura 5 – Sistema fotovoltaico .....	21
Figura 6 – Ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos .....	22
Figura 7 – Modelo ideal de uma célula fotovoltaica.....	23
Figura 8 – Curva característica $I - V$ ideal de uma célula fotovoltaica .....	25
Figura 9 – Modelo real de uma célula fotovoltaica .....	25
Figura 10 – Curvas características $I - V$ e $P - V$ (em cor vermelha).....	27
Figura 11 – Influência da irradiação solar na operação do painel fotovoltaico .....	28
Figura 12 – Influência da temperatura na operação do painel fotovoltaico .....	28
Figura 13 – Ligação de painéis fotovoltaicos em série .....	32
Figura 14 – Topologia HERIC .....	33
Figura 15 – Interface inicial do software PVsyst 7.2.3.....	34
Figura 16 – Interface da aba “Bases de dados” .....	35
Figura 17 – Janela para adicionar uma nova localização ao PVSyst 7.2 .....	35
Figura 18 – Interface “Tabelas e gráficos meteorológicos” janela “Tabelas” .....	36
Figura 19 – Interface “Tabelas e gráficos meteorológicos” janela “Gráficos” .....	38
Figura 20 – Gráfico de irradiação solar no PVsyst - 3 de janeiro .....	38
Figura 21 – Gráfico de temperatura no PVsyst - 3 de janeiro .....	39
Figura 22 – Gráfico de temperatura e irradiação solar - 3 de janeiro .....	40
Figura 23 – Gráfico de temperatura e irradiação solar - 6 de janeiro .....	40
Figura 24 – Gráfico de temperatura e irradiação solar - 6 de julho .....	41
Figura 25 – Gráfico de temperatura e irradiação solar - 12 de julho .....	41
Figura 26 – Dados técnico do módulo CS3W-450MS .....	42
Figura 27 – Interface da função para plotar curvas do painel no PVsyst .....	43
Figura 28 – Curva $I - V$ do painel no dia 3 janeiro.....	44
Figura 29 – Curva $P - V$ do painel no dia 3 de janeiro.....	44
Figura 30 – Curva $I - V$ do painel no dia 6 janeiro.....	45
Figura 31 – Curva $P - V$ do painel no dia 6 de janeiro.....	45
Figura 32 – Curva $I - V$ do painel no dia 6 de julho.....	46
Figura 33 – Curva $P - V$ do painel no dia 6 de julho.....	46
Figura 34 – Curva $I - V$ do painel no dia 12 de julho.....	47
Figura 35 – Curva $P - V$ do painel no dia 12 de julho.....	47
Figura 36 – Potência gerada em cada hora .....	48
Figura 37 – Corrente e tensão de operação por módulo – 3 de janeiro .....	50
Figura 38 – Potência de operação por módulo – 3 de janeiro .....	51
Figura 39 – Corrente e tensão de operação por módulo – 6 de janeiro .....	52
Figura 40 – Potência de operação por módulo – 6 de janeiro .....	53
Figura 41 – Corrente e tensão de operação por módulo – 6 de julho .....	55
Figura 42 – Potência de operação por módulo – 6 de julho .....	55
Figura 43 – Corrente e tensão de operação por módulo – 12 de julho .....	57
Figura 44 – Potência de operação por módulo – 12 de julho .....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Maiores potências fotovoltaicas instaladas em 2020.....	13
Tabela 2 – Escolha do ângulo de inclinação .....	23
Tabela 3 – Dias do ano selecionados .....	37
Tabela 4 – Valores de operação por módulo – 3 de janeiro.....	51
Tabela 5 – Valores de operação do inversor fotovoltaico – 3 de janeiro .....	52
Tabela 6 – Valores de operação por módulo – 6 de janeiro.....	53
Tabela 7 – Valores de operação do inversor fotovoltaico – 6 de janeiro .....	54
Tabela 8 – Valores de operação por módulo – 6 de julho .....	56
Tabela 9 – Valores de operação do inversor fotovoltaico – 6 de julho .....	56
Tabela 10 – Valores de operação por módulo – 12 de julho .....	58
Tabela 11 – Valores de operação do inversor fotovoltaico – 12 de julho .....	58
Tabela 12 – Tempo de funcionamento do inversor Solar .....	59

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
GC	Geração Centralizada
GD	Geração Distribuída
HERIC	<i>Highly Efficient and Reliable Inverter Concept</i>
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
MPP	<i>Maximum Power Point</i>



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
2	OBJETIVO .....	15
2.1	Objetivos específicos.....	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
3.1	Geração distribuída.....	16
3.2	Radiação solar .....	17
3.3	Energia solar no Brasil .....	18
3.4	Célula fotovoltaica.....	20
3.5	Sistemas fotovoltaicos .....	21
3.6	Ângulo de inclinação .....	22
3.7	Modelo matemático das células fotovoltaicas do painel .....	23
3.8	Curvas características de um painel fotovoltaico .....	26
3.9	Influência da radiação solar .....	27
3.10	Influência da temperatura.....	28
3.11	Dimensionamento do arranjo fotovoltaico.....	29
3.11.1	Número máximo de painéis fotovoltaicos em série .....	30
3.11.2	Número mínimo de painéis fotovoltaicos em série .....	30
3.11.3	Número de fileira .....	31
3.12	Inversor .....	32
4	DESENVOLVIMENTO .....	34
4.1	Coleta de dados meteorológicos .....	34
4.2	Elaboração de gráficos meteorológicos .....	39
4.3	Gráficos do painel .....	42
4.4	Dados do inversor e quantidade de painéis fotovoltaicos .....	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	50
5.1	Valores de operação no verão.....	50
5.2	Valores de operação no inverno .....	54
5.3	Tempo de funcionamento do inversor nas datas selecionadas.....	59
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	60
6.1	Sugestões para trabalhos futuros .....	60
	REFERÊNCIAS.....	61
	APÊNDICE A - Gráficos de temperatura e irradiação por hora .....	64
	APÊNDICE B - Curvas características do painel ( $I - V$ e $P - V$ ).....	68

## 1 INTRODUÇÃO

O uso da energia elétrica é uma das principais características da sociedade moderna. A industrialização, o desenvolvimento econômico e os padrões de vida atuais necessitam da utilização da eletricidade. As crises energéticas enfrentadas na década de 70 evidenciaram como a energia elétrica é indispensável para o cotidiano da sociedade, além disso, também se teve uma preocupação cada vez maior com o meio ambiente e seu uso de maneira mais sustentável. Desta forma, as pessoas começaram a procurar formas alternativas para geração própria de energia. Com esse panorama mundial de consumo energético, fontes alternativas de energia como a eólica e a solar vem ganhando mais atenção (HINRICHS; KLEINBACH, 2003).

Estudos e aplicações, relacionados à energia solar fotovoltaica vem crescendo expressivamente no cenário mundial nos últimos anos, devido a políticas públicas de incentivo, pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias e também ao aumento dos preços internacionais do petróleo, carvão e gás natural, além das questões ambientais (PEREIRA; OLIVEIRA, 2015). Seu primeiro grande impulso veio na década de 50 através de programas espaciais, para energização de satélites (HINRICHS; KLEINBACH, 2003).

Segundo dados da *International Renewable Energy Agency* (IRENA), em 2020, a China ocupava o primeiro lugar do mundo em potência instalada, tendo uma geração de energia fotovoltaica cerca de 3 vezes maior que a dos Estados Unidos, que se encontra no segundo lugar. A Tabela 1 apresenta os 10 principais países na geração de energia fotovoltaica.

**Tabela 1 – Maiores potências fotovoltaicas instaladas em 2020**

Ranking	País	Potência instalada [MW]
1º	China	254.354,800
2º	Estados Unidos	75.571,700
3º	Japão	68.665,489
4º	Alemanha	53.783,000
5º	Índia	39.211,158
6º	Itália	21.600,345
7º	Austrália	17.344,000
8º	Vietnã	16.504,490
9º	Coreia do Sul	14.574,791
10º	Espanha	14.089,018

Fonte: Adaptado de IRENA (2020)

De acordo com a ANEEL (2015), a Resolução Normativa nº 687, passou a permitir que o consumidor produza sua própria energia, através de fontes renováveis,

sendo uma das normativas mais importantes do cenário de geração distribuída nacional. O mercado de energia solar brasileiro é um dos setores econômicos que mais vem crescendo nos últimos anos, ficando cada vez mais viável a utilização de energia solar fotovoltaica nas residências, empresas, indústrias e demais estabelecimentos.

Em 2013, foi fundada no Brasil a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), entidade sem fins lucrativos, que reúne empresas de toda a cadeia do setor solar fotovoltaico com operações no país.

Segundo ABSOLAR (2021), o Brasil ultrapassou a marca de 11,5 gigawatts [GW] de potência operacional proveniente de fontes solares fotovoltaicas. Os dados levam em consideração usinas de grande porte, sendo elas classificadas como geração centralizada, e instalações em telhados e terrenos, sendo elas classificadas como geração distribuída.

Devido a sua posição geográfica no globo terrestre, o Brasil conta com características naturais privilegiadas para a geração fotovoltaica, o clima brasileiro apresenta altos níveis de incidência solar na maior parte do ano, fator que potencializa a atração de investidores e o desenvolvimento de um mercado interno (EPE, 2012).

As principais vantagens da utilização de sistemas fotovoltaicos para a geração de energia são: fonte de energia renovável, não polui o meio ambiente, é economicamente competitiva tendo rápidos períodos para o retorno do seu investimento, a tecnologia encontrada no mercado já está bem aprofundada e não exige grandes manutenções (PEREIRA; OLIVEIRA, 2015).

Como toda essa energia fotovoltaica gerada pelos painéis é em corrente contínua e a rede elétrica da concessionária é na forma de corrente alternada, faz-se necessária a utilização de um conversor estático de energia CC-CA, conhecido como inversor.

Para que seja possível que um inversor projetado opere corretamente, inicialmente deve ser estudado a curva de potência de um painel fotovoltaico e sua variação de acordo com a temperatura e a irradiação. Na sequência é necessário a análise da variação da potência do arranjo fotovoltaico ao longo do dia e de acordo com as estações do ano para se determinar os limites de operação do inversor.

## **2 OBJETIVO**

O objetivo desse Trabalho de Conclusão de Curso é realizar a análise da variação da potência do arranjo fotovoltaico (ao longo do dia e durante as estações do ano) para o funcionamento adequado de um inversor fotovoltaico projetado.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Estudar a modelagem matemática do painel para compreender sua dependência da temperatura e da irradiação;
- Analisar dados de temperatura e irradiação de Medianeira e encontrar os dias com maior e menor irradiação em cada mês;
- Traçar as curvas características do painel para cidade de Medianeira;
- Determinar o tempo de funcionamento do inversor nas datas selecionadas a partir do fornecimento (pelo arranjo fotovoltaico) dos valores mínimos de corrente e tensão necessários.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente tópico tem como objetivo apresentar os fundamentos e definições relacionados à sistemas fotovoltaicos, necessárias para compreender os conceitos que serão abordados no decorrer do trabalho.

#### 3.1 Geração distribuída

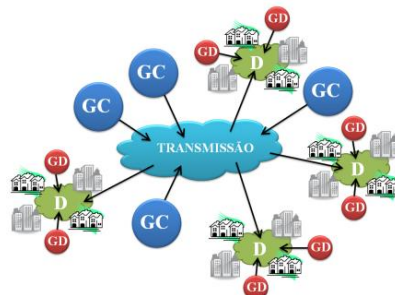
Segundo Severino (2008) Geração Distribuída (GD) é a denominação genérica que se dá a distribuição da geração de energia elétrica, diferenciando-se da geração centralizada por se encontrar em áreas onde não seria instalada uma usina geradora convencional. A geração distribuída acaba contribuindo com a expansão geográfica da geração de energia elétrica em determinada região.

De acordo com Severino (2008) uma fonte de energia elétrica pode ser considerada uma geração distribuída quando:

- Está conectada diretamente a rede de distribuição;
- Se encontra conectada ao lado de um consumidor conectado a alguma parte do sistema elétrico;
- Supre as cargas elétricas de uma instalação que se encontra eletricamente isolada;
- Está conectada diretamente a rede de transmissão, mas não pertence a geração centralizada.

Além da geração distribuída se caracterizar, na maioria das vezes, pela utilização de fontes renováveis de energia, ela também tem como característica ser localizada próxima às cargas, conforme ilustrado na Figura 1, tal característica dá-se para que a energia gerada possa ser diretamente utilizada (SHAYANI, 2010).

**Figura 1 – Esquema de sistema elétrico interligado com geração distribuída**



**Fonte: Shayani (2010)**

Destaca-se que GC com o fundo azul representa a Geração Centralizada, que poderiam ser hidrelétricas, termelétrica, entre outras. A Geração Distribuída é representada pelo GD com fundo vermelho, que poderia ser, por exemplo, mini e micro sistemas fotovoltaicos ou eólicos. O sistema de distribuição é representado pelo D com fundo verde.

As fontes renováveis que costumam ser mais utilizadas na geração distribuída são aquelas em que sua geração de energia se renova naturalmente, principalmente devido a incidência da radiação solar na Terra (SHAYANI, 2010).

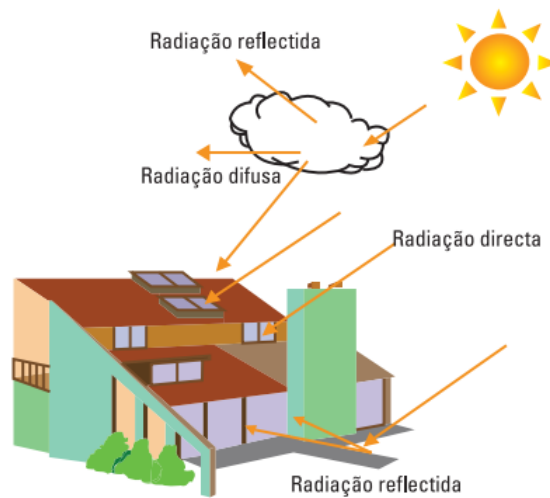
### **3.2 Radiação solar**

No interior do Sol tem-se reações nucleares que dão lugar a emissões de energia solar. Nele ocorrerá uma emissão de potência térmica em diversas direções, conhecidas como radiações solares (VIAN et al., 2021).

As radiações provenientes do Sol são as principais fontes de energia do nosso planeta. Em um intervalo de 6 horas, a quantidade de energia fornecida para Terra é superior a quantidade de energia consumida no mundo em um período de 1 ano. Para evidenciar ainda mais sua importância, pode-se salientar que além do Sol ser uma fonte de energia renovável e inesgotável, diversas outras formas de geração de eletricidade acabam dependendo indiretamente da energia solar (VILLALVA, 2012).

A superfície da Terra está constantemente recebendo radiação solar, sua disposição é alterada conforme passa através das nuvens, vegetação, vapor de água e poeiras. Como pode ser observado na Figura 2, depois de passar pela atmosfera, a radiação solar atinge a superfície da Terra de três maneiras diferentes: radiação direta, após atravessar a atmosfera atinge diretamente o receptor; radiação difusa, desviada em várias direções pelos componentes atmosféricos; radiação refletida, após atravessar a atmosfera e atingir o solo e outros objetos é refletida para o receptor (VIAN et al., 2021).

**Figura 2 – Distribuição da radiação solar**



**Fonte: Pereira e Oliveira (2015)**

O movimento da Terra em torno do Sol faz com que a energia presente disponibilidade variável ao longo do dia, do ano e do lugar considerado. Além da Terra realizar o movimento de rotação em seu próprio eixo, inclinada de  $23^\circ$  a  $27^\circ$ , ela também percorre a órbita ao redor do Sol, realizando o movimento de translação, o qual determina as estações do ano: primavera, verão, outono e inverno. O outono e primavera possuem durações iguais para seus dias, já no inverno os dias são mais curtos e as noites mais longas e no verão ocorre o inverso, devido a essas variações as estações do ano possuem uma grande influência na geração de energia solar na Terra (VIAN et al., 2021).

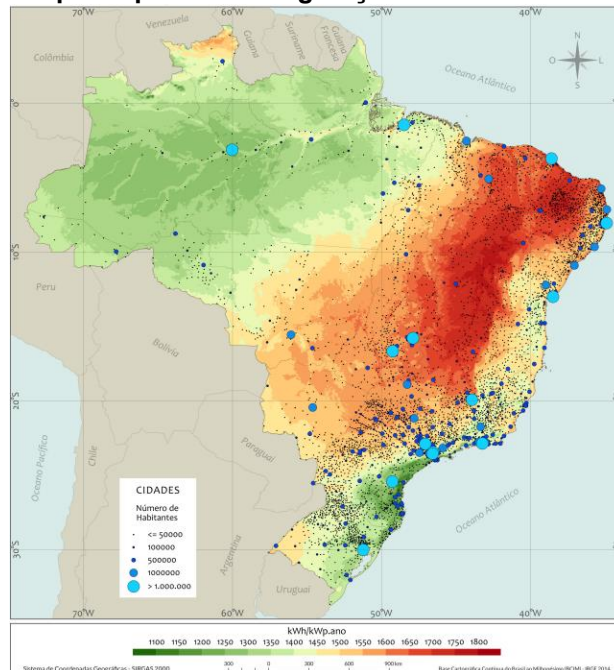
### 3.3 Energia solar no Brasil

Devido sua localização no globo terrestre ser próximo a linha do equador o Brasil tem um potencial energético muito privilegiado. Sua menor incidência de radiação solar encontra-se em Santa Catarina com  $4,25 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$ , e a maior está localizada no norte do Piauí com  $6,5 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$ . Com esta localização geográfica o índice de radiação solar anual do Brasil varia entre  $1.550$  e  $2.280 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$ , sendo superior ao de países que fizeram grandes investimentos em energia solar fotovoltaica, como Espanha variando entre  $1200$  e  $1850 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$ , como Alemanha variando entre  $900$  e  $1.250 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$  e como França variando entre  $900$  e  $1650 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$  (PEREIRA et al., 2006).

A Figura 3 mostra o rendimento energético anual máximo em todo o Brasil, tanto para usinas de grande porte centralizadas e instaladas em solo, como para

geração através de painéis fotovoltaicos instalados em telhados e coberturas de edifícios (PEREIRA et al., 2017).

**Figura 3 – Mapa do potencial de geração solar fotovoltaica no Brasil**



**Fonte: Pereira et al. (2017)**

Em 2012 a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) publicou a resolução normativa nº 482, que estabeleceram condições gerais de acesso à micro e pequena geração distribuída de energia para os sistemas de distribuição e o sistema de compensação de energia elétrica, além de outras diretrizes, funcionando como um impulso para o avanço de energia solar no Brasil (VIAN et al., 2021).

Segundo Vian et al. (2021), atualmente existem diversos projetos de geração fotovoltaica no Brasil, dentre eles, as aplicações mais populares são:

- Bombeamento de água para abastecimento doméstico, irrigação e piscicultura;
- Aplicações de uso coletivo, como em eletrificação de escolas, postos de saúde e centros comunitários;
- Geração de energia para atendimento residencial e comercial;
- Estações de telefonia e de atendimento remoto.



### 3.4 Célula fotovoltaica

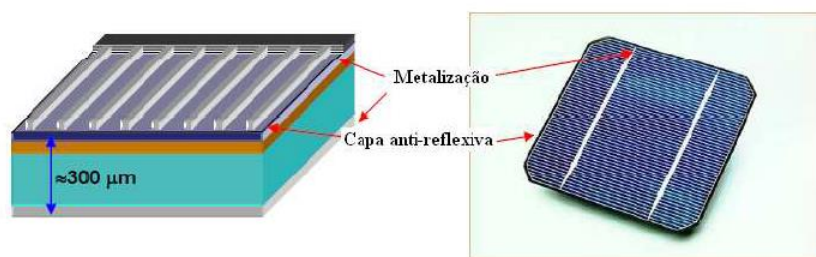
O componente básico para que se possa converter a energia fornecida pela radiação solar em eletricidade é a célula fotovoltaica, a qual é construída com a utilização de materiais semicondutores, sendo o silício ( $S_i$ ) o material semiconductor mais utilizado para a produção das células fotovoltaicas. Outros materiais, como o Arseneto de Gálio e Germânio também podem ser utilizados, mas devido aos seus altos custos tal utilização acaba não sendo viável (MARTIN; AGUILERA, 2005).

Na construção da célula fotovoltaica, alguns dos fatores que influenciam para a escolha do silício são por esse elemento possuir uma predisposição boa para interagir com os fótons do espectro solar, e também, o fato do processo de fabricação das lâminas de  $S_i$  ser bastante avançado, devido ao uso decorrente da indústria eletrônica (GRAY, 2003).

O silício ocupa um estado energético denominado estado de valência, isso ocorre pois ele apresenta elétrons fracamente ligados aos seus átomos. Quando uma fração de energia é fornecida aos elétrons da banda de valência, eles acabam se soltando dos átomos da banda de valência que estavam ligados, passando assim para um estado energético que é denominado banda de condução. Em tal processo, que também é conhecido como geração, os elétrons se encontram livres para poderem se deslocar pelo material, e com a aplicação de um campo elétrico, eles podem transferir a energia elétrica para fora da célula, podendo utilizar a eletricidade livremente (HEGEDUS; LUQUE, 2005).

De acordo com Martin e Aguilera (2005) a solução técnica para se criar o campo elétrico é a fabricação da célula por meio de uma junção p-n, sendo formada por duas placas bem finas de  $S_i$ , ambas compostas com quantidades controladas de impurezas, sendo mais utilizados componentes como o Fosforo e o Boro.

Figura 4 – Esquema básico de uma célula fotovoltaica



Fonte: Martin e Aguilera (2005)

Na Figura 4 é ilustrado uma célula fotovoltaica composta por uma lâmina de  $S_i$ , sendo sua espessura de aproximadamente  $300 \mu m$ . Como grande parte da geração ocorre nas primeiras camadas de átomos, sua junção p-n se encontra na parte frontal da célula, acarretando na presença de um campo elétrico mais próximo da superfície, conduzindo assim as cargas elétricas geradas até a rede.

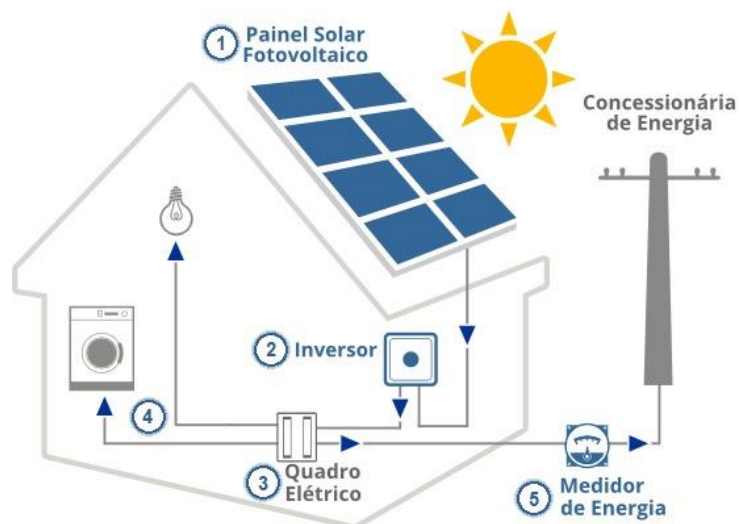
### 3.5 Sistemas fotovoltaicos

Painéis solares são fabricados para atuarem em ambientes externos, expostos a luz do sol, chuva, vento e outros fatores climáticos, convertendo a energia solar em elétrica, seu funcionamento deve ter uma eficiência aceitável em um período de 30 anos ou mais. Os sistemas de painéis fotovoltaicos são muitas vezes integrados na superfície do edifício, tendo como finalidade a geração de eletricidade (VIAN et al., 2021).

Na grande maioria das vezes a energia elétrica gerada é transmitida para uma rede de média ou baixa tensão ou utilizada para alimentar determinadas cargas em rede isolada. Assim, temos dois tipos de sistemas de energia solar fotovoltaica: sistemas ligados a rede e sistemas autônomos (FREITAS, 2008).

Para um melhor entendimento, a Figura 5 – Sistema fotovoltaico indica os componentes de um sistema fotovoltaico.

**Figura 5 – Sistema fotovoltaico**



Fonte: Adaptado de Siqueira (2019)

Em que:

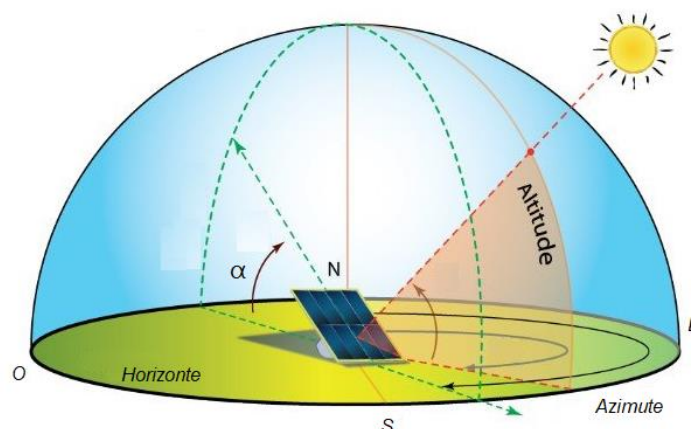
- O ponto 1 é o arranjo de painéis fotovoltaicos, responsável por gerar a energia solar fotovoltaica;
- O ponto 2 é o inversor solar, responsável por converter a corrente contínua em corrente alternada;
- O ponto 3 é quadro elétrico, responsável pela distribuição de energia para o edifício ou carga isolada;
- O ponto 4 representa as cargas locais que irão utilizar a energia;
- O ponto 5 é o medidor responsável por indicar o excesso de energia, a energia excedente vai para a distribuidora de energia local, gerando créditos para serem utilizados.

### 3.6 Ângulo de inclinação

Vários fatores externos podem afetar o rendimento de geração de energia do sistema fotovoltaico. Desses fatores o principal é a radiação solar, que irá variar de acordo com a localização geográfica da instalação (RUTHER, 2004).

Para que haja o mínimo de perdas na captação da radiação solar, deve-se levar em consideração o ângulo de inclinação do painel fotovoltaico demonstrado na Figura 6, este deve ser igual à latitude do local onde está sendo instalado. Se a instalação estiver no hemisfério Sul, o gerador deve estar voltado para o norte geográfico, já se a instalação estiver no hemisfério Norte, o painel deve estar voltado para o sul geográfico (ZILLES et al., 2012) (PINHO; GALDINO, 2014).

**Figura 6 – Ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos**



**Fonte: Adaptado de Reis (2018)**

A Tabela 2 mostra o ângulo de inclinação recomendado para diversas faixas de latitude geográfica.

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

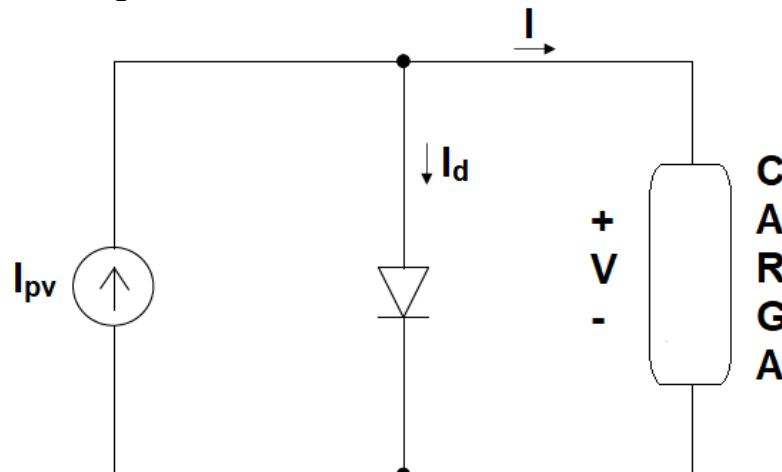
Fonte: Villalva (2012)

Recomenda-se a instalação de painéis fotovoltaicos com ângulos de no mínimo  $10^\circ$ , para favorecer sua autolimpeza em decorrência da ação da água da chuva, evitando um acúmulo de sujeira que pode afetar no desempenho do módulo (ZILLES et al., 2012) (PINHO; GALDINO, 2014).

### 3.7 Modelo matemático das células fotovoltaicas do painel

Os sistemas fotovoltaicos utilizam várias células compostas por materiais semicondutores, que transformam a energia solar em energia elétrica. O modelo teórico de células solares é derivado da física do estado sólido, tais derivações são elementares e resultam em modelos essenciais para o entendimento do comportamento de um sistema de painéis sob diferentes condições de operação. O circuito ideal de uma célula pode ser resumido conforme o modelo da célula solar mostrado na Figura 7 (RAUSCHENBACH, 2012).

Figura 7 – Modelo ideal de uma célula fotovoltaica



Fonte: Adaptado de Rauschenbach (2012)

No circuito da Figura 7 podemos observar que a célula fotovoltaica é composta por uma fonte de corrente ( $I_{pv}$ ), equivalente a intensidade luminosa e temperatura do local, além disso, um diodo com corrente ( $I_d$ ) e tensão nos terminais ( $V$ ).

Segundo Valente (2011) ao aplicar lei de Kirchoff no circuito da Figura 7, a corrente  $I$  que chega na carga é a diferença entre a corrente  $I_{pv}$  e a corrente  $I_d$ , demonstrada na Equação (1).

$$I = I_{pv} - I_d \quad (1)$$

Já a corrente que passa pelo diodo, em função da tensão, é escrita de acordo com a Equação (2).

$$I_d = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_D}{m \cdot V_T}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

Em que  $I_0$  representa a corrente inversa de saturação do diodo;  $V_D$  é a tensão aplicada nos terminais do diodo;  $m$  é o fator de idealidade do diodo (ideal  $m = 1$ ; real  $m > 1$ );  $V_T$  é designado por potencial térmico  $V_T = \frac{kT}{q}$ ;  $K$  representa a constante de Boltzmann ( $K = 1,38 \cdot 10^{-23} J/K$ );  $T$  é a temperatura absoluta da célula em K;  $q$  é a carga eléctrica do electrão  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} C$ .

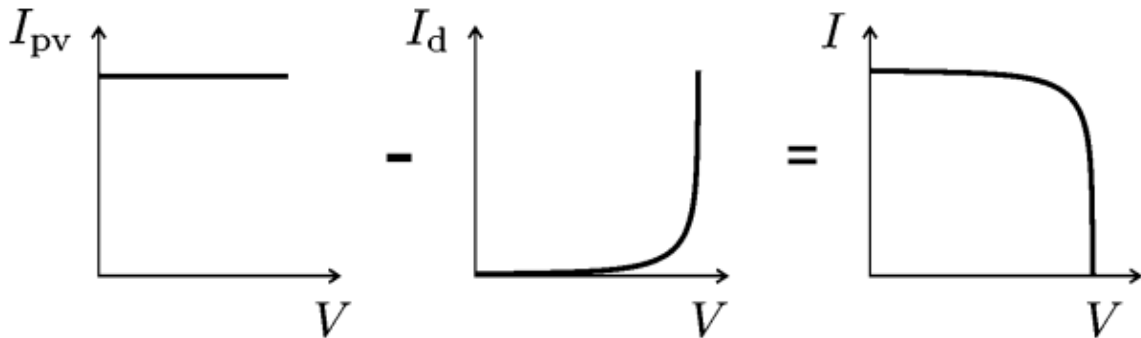
Sabendo que  $V_T = \frac{kT}{q}$ , pode se fazer a substituição na Equação (2), assim:

$$I_d = I_0 \left[ \exp\left(\frac{q}{m \cdot K \cdot T} \cdot V_D\right) - 1 \right] \quad (3)$$

Agora substituindo a Equação (4) na Equação (1), tem-se a corrente produzida pela célula fotovoltaica equacionada abaixo:

$$I = I_{pv} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q}{m \cdot K \cdot T} \cdot V_D\right) - 1 \right] \quad (4)$$

Figura 8 – Curva característica  $I - V$  ideal de uma célula fotovoltaica

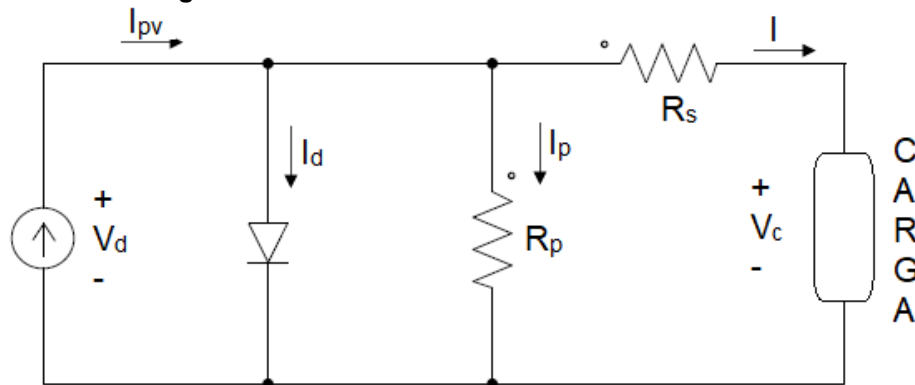


Fonte: Villalva, Gazoli e Filho (2009)

A Figura 8 demonstra a curva  $I - V$  originada da Equação (4).

Porém o modelo da célula solar básica derivada da física do estado sólido não reflete aos atributos reais das células solares para estudo na engenharia. Fato que acarreta na adição de duas resistências no circuito da Figura 7, que são:  $R_s$  e  $R_p$  (RAUSCHENBACH, 2012) (VALENTE, 2011), ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Modelo real de uma célula fotovoltaica



Fonte: Adaptado de Castro (2002)

No circuito da Figura 9 ocorre uma queda de tensão, a qual está sendo representada por uma resistência série ( $R_s$ ), também existem correntes de fuga, que são descritas por uma resistência paralela ( $R_p$ ) (CASTRO, 2002).

Considerando agora, o esquema do modelo real da célula fotovoltaica representada na Figura 9, de acordo com Valente (2011) ao aplicar as leis de Kirchoff ao circuito, as somas das correntes elétricas serão:

$$0 = I_{pv} - I_d - I_p - I \quad (5)$$

Entendendo que a corrente  $I_d$  é a que percorre pelo diodo, já vista anteriormente na Equação (3) e sabendo que  $V_D = V_L + I.R_s$ , pode-se deduzir a seguinte equação:

$$I_p = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V_L + I.R_s}{R_p} \quad (6)$$

Agora substituindo as Equações (3) e (6) na Equação (5), teremos a expressão que descreve a corrente de saída da Figura 9:

$$I = I_{pv} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q}{m.K.T} \cdot (V_L + I.R_s - 1) \right) \right] - \frac{V_L + I.R_s}{R_p} \quad (7)$$

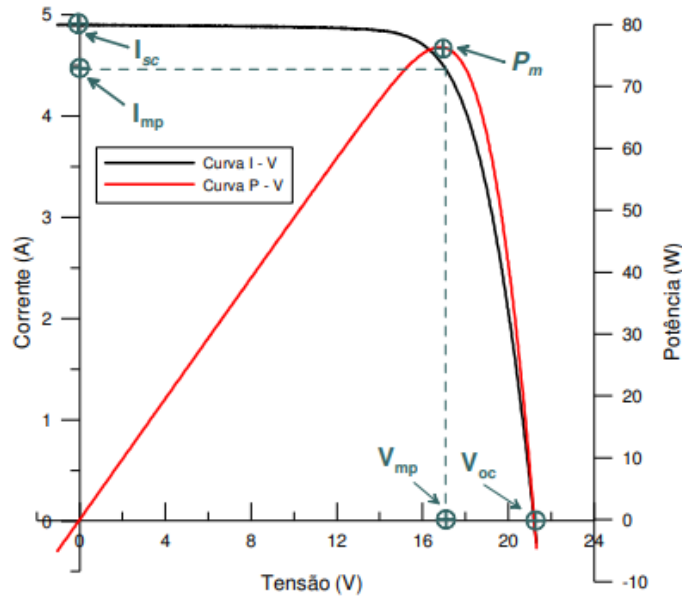
O modelo acima descrito pode ser aplicado para a maioria das células fotovoltaicas reais atuais.

### 3.8 Curvas características de um painel fotovoltaico

As curvas características de um painel fotovoltaico, seja ela uma célula ou um módulo, consiste na representação matemática tanto da corrente elétrica em função da tensão, como da potência em função da tensão. A determinação da curva característica é fundamental na indicação dos modelos fotovoltaicos, pois é através dela que se obtêm informações sobre o desempenho do módulo fotovoltaico (BÜHLER, 2007).

Todos os módulos fotovoltaicos possuem características semelhantes, assim para cada curva  $I - V$  tem-se uma curva  $P - V$  correspondente, assim como ilustrado na Figura 10, demonstrando a relação entre a tensão e a corrente de saída de um módulo fotovoltaico e também que a potência do módulo fotovoltaico varia em função da tensão (VILLALVA, 2012).

Figura 10 – Curvas características  $I - V$  e  $P - V$  (em cor vermelha)



De acordo com Villalva (2012) os pontos destacados na Figura 10 – Curvas características  $I - V$  e  $P - V$  (em cor vermelha) representam:

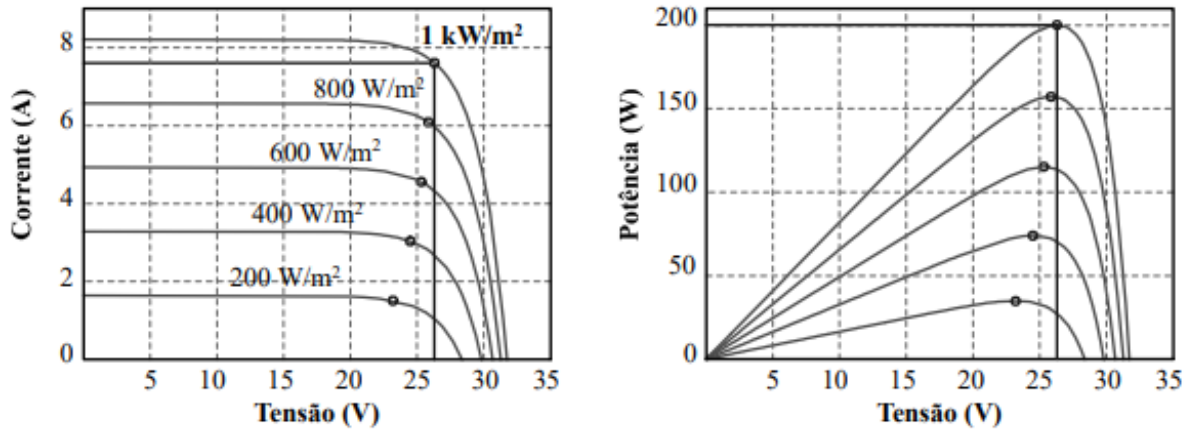
- $I_{sc}$  – a corrente de curto-circuito da célula, que é a corrente máxima que o painel fornece quando a tensão está tendendo a zero;
- $I_{mp}$  – a corrente onde há máxima geração de potência;
- $P_m$  – o ponto em que o painel entrega a máxima potência;
- $V_{mp}$  – a tensão para ocorrer a máxima geração de potência;
- $V_{oc}$  – a tensão de circuito aberto, que é o valor máximo de tensão que o painel consegue fornecer quando a corrente for zero.

### 3.9 Influência da radiação solar

A corrente elétrica que o painel pode fornecer é diretamente proporcional à intensidade da radiação solar que atinge suas células. A variação da tensão com a irradiância ocorre de forma logarítmica, visto que a relação entre a corrente e a tensão é dada por uma função exponencial. Assim pode-se traçar as curvas características  $I - V$  e  $P - V$  ilustradas na Figura 11, evidenciando a influência da intensidade da irradiação solar na corrente, tensão e potência do painel fotovoltaico (BÜHLER, 2007) (GASPARIN, 2009).



Figura 11 – Influência da irradiação solar na operação do painel fotovoltaico

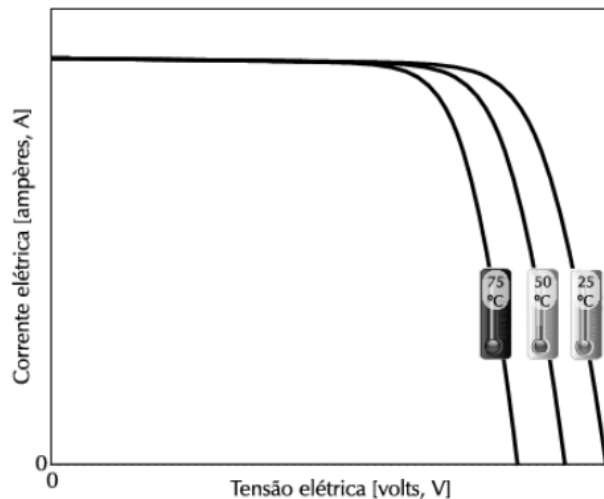


Fonte: Marangoni (2012)

### 3.10 Influência da temperatura

A temperatura ambiente tem grande influência na tensão que o painel fotovoltaico fornece em seus terminais, conseqüentemente influenciará na potência fornecida. Em altas temperaturas as tensões serão menores (RAUSCHENBACH, 2012) (VILLALVA, 2012), conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Influência da temperatura na operação do painel fotovoltaico



Fonte: Villalva (2012)

A corrente fornecida pelo módulo sofre pouca alteração com a temperatura. Uma consequência da variação de temperatura sobre o painel fotovoltaico é que, quando a temperatura aumentar sua potência fornecida irá diminuir, pois a potência do módulo nada mais é que o produto de sua tensão com sua corrente (VILLALVA, 2012).

### 3.11 Dimensionamento do arranjo fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é a criação de energia elétrica através da exposição a luz do Sol, no entanto, essa energia é gerada em CC e a maioria das cargas elétricas utilizam CA, para que ocorra a transformação de corrente contínua em corrente alterna é necessário a utilização de um inversor. Desta forma, o inversor é um equipamento indispensável para sistemas fotovoltaicos, tanto por causa da transformação de energia, como pela alteração a forma da onda (PEREIRA; OLIVEIRA, 2015).

De acordo com Fernandes (2014) a escolha de um inversor para a instalação deve levar em consideração características técnicas do mesmo, sendo elas fornecidas no datasheet do produto. Um dos aspectos mais importantes na escolha do inversor tem a ver com seu rendimento (eficiência), em que sua eficiência é obtida através da Equação (8).

$$\eta = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \quad (8)$$

Em que:  $P_{AC}$  é a potência de saída em corrente alternada;  $P_{DC}$  é a potência de entrada em corrente contínua.

Um outro fator que deve ser levado em consideração na escolha do inversor e de quantos irá precisar é a potência do mesmo. Sendo que a potência do inversor deve estar compreendida dentro dos limites da Equação (9) (FERNANDES, 2014) (PESTANA, 2017).

$$0,7 \cdot P_{FV} < P_{inv\ dc} \cdot N_{inversores} < 1,2 \cdot P_{FV} \quad (9)$$

Sendo:  $P_{FV}$  a potência do gerador fotovoltaico [kW];  $P_{inv\ dc}$  a potência máxima do inversor [kW];  $N_{inversores}$  o número de inversores que se pretende utilizar.

Segundo Pestana (2017) feita a escolha do painel fotovoltaico e do inversor, é de extrema importância a realização do cálculo para análise do número máximo e mínimo dos painéis fotovoltaicos em série, assim como o número de fileiras. Para realização do cálculo, as informações necessárias podem ser encontradas no catálogo do fornecedor do material.

### 3.11.1 Número máximo de painéis fotovoltaicos em série

O valor da tensão do inversor vem da soma da tensão de cada painel que está ligado em série. Considerando que a tensão depende da temperatura, para o cálculo do número máximo de painéis fotovoltaicos ligados em série, considera-se uma situação onde a temperatura no painel chega na casa de  $-10^{\circ}\text{C}$ . No caso dos painéis fotovoltaicos, uma diminuição de temperatura irá acarretar em um aumento de tensão. Portanto o número de painéis fotovoltaicos ligados em série terá de fornecer uma tensão que não ultrapasse o valor da tensão máxima suportada pelo inversor. Este cálculo é realizado pelas Equações (10) e (11) (PEREIRA; OLIVEIRA, 2015).

$$V_{oc(-10^{\circ}\text{C})} = \left(1 - \frac{(25^{\circ}\text{C}) - (-10) \cdot C_{voc(\%)}}{100}\right) \cdot V_{oc(stc)} \quad (10)$$

Onde:  $V_{oc(-10^{\circ}\text{C})}$  é o ajuste da tensão em curto circuito aberto do painel para a temperatura mínima considerada [V];  $C_{voc(\%)}$  é a variação de tensão para cada grau de temperatura, em percentagem  $\left[\frac{\%}{\text{C}}\right]$ ;  $V_{oc(stc)}$  é a tensão em circuito aberto suportada pelos módulos, sob condições STC [V].

$$N_{max} = \frac{V_{mpp}^{max}}{V_{oc(10^{\circ}\text{C})}} \quad (11)$$

Em que:  $N_{max}$  é o número máximo de painéis em série;  $V_{mpp}^{max}$  é o valor máximo de tensão CC na entrada do inversor [V].

### 3.11.2 Número mínimo de painéis fotovoltaicos em série

O número mínimo de painéis fotovoltaicos ligados em série leva em consideração uma temperatura máxima na ordem de  $70^{\circ}\text{C}$ . O aumento da temperatura no painel irá implicar em uma tensão menor no sistema fotovoltaico, podendo causar uma certa instabilidade na eficiência do sistema. Para minimizar este problema é necessário garantir que a tensão do painel fotovoltaico não seja inferior a tensão do MPP (*Maximum Power Point*) do inversor. O seu cálculo é feito através das Equações (12) e (13) (PEREIRA; OLIVEIRA, 2015).

$$V_{mpp(70^{\circ}C)} = 1 - \frac{(25^{\circ}C - (70^{\circ}C) \cdot C_{voc(\%)})}{100} \cdot V_{mpp(stc)} \quad (12)$$

Onde:  $V_{mpp(70^{\circ}C)}$  é o ajuste da tensão do ponto de funcionamento máximo para altas temperaturas [V];  $V_{mpp(stc)}$  é o ponto de funcionamento máximo do painel em condições STC [V].

$$N_{min} = \frac{V_{mpp}^{min}}{V_{mpp(70^{\circ}C)}} \quad (13)$$

Sendo:  $N_{min}$  é o número mínimo de módulos em série;  $V_{mpp}^{min}$  é o valor mínimo de tensão CC na entrada do inversor [V].

### 3.11.3 Número de fileira

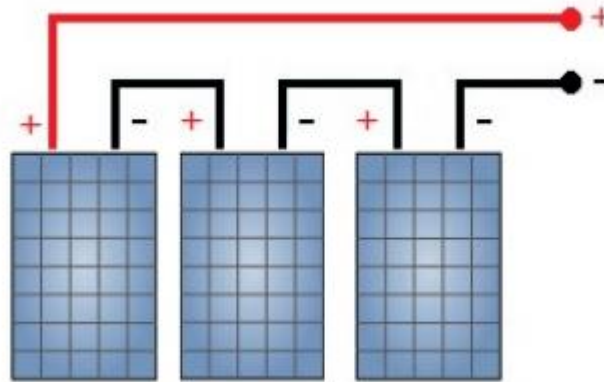
Por fim, é importante analisar se a corrente que entrará no inversor, gerada pelo painel fotovoltaico, não é superior a corrente de entrada do inversor. Nota-se que a corrente máxima gerada pelo sistema fotovoltaico será determinada pela multiplicação do número de fileiras com a corrente MPP do painel, verifica-se seu cálculo na Equação (14) (PEREIRA; OLIVEIRA, 2015).

$$N_{fileiras} \leq \frac{I_{mpp}^{max}}{I_{fileira}^{max}} \quad (14)$$

Em que:  $N_{fileiras}$  é o número de fileiras (também chamadas de *strings*);  $I_{mpp}^{max}$  é o valor da corrente máxima CC do inversor;  $I_{fileira}^{max}$  é o valor da corrente de fileira dos módulos em STC.

A Figura 13 demonstra uma simples conexão de painéis fotovoltaicos em série, onde os módulos estão interligados entre si até completar a fileira. Para cada fileira irá existir um terminal positivo e outro negativo que serão conectados posteriormente a um determinado inversor (PESTANA, 2017).

Figura 13 – Ligação de painéis fotovoltaicos em série



Fonte: Pestana (2017)

### 3.12 Inversor

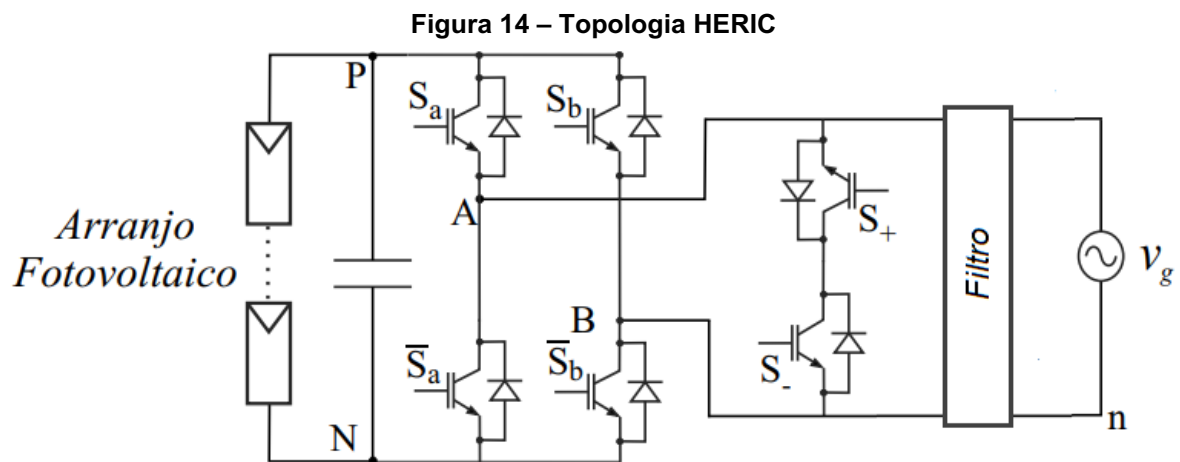
Para converter a energia elétrica produzida pelo painel fotovoltaico de CC para CA é necessário a utilização de conversores eletrônicos de potência. Os inversores são responsáveis por estabelecer a conexão entre o sistema fotovoltaico e a rede, tendo como principal finalidade a conversão de corrente, ajustando a frequência e nível de tensão para a rede em que estiver conectado (FREITAS, 2008).

Além da conversão da energia elétrica CC em CA, de acordo com Pereira e Gonçalves (2008), os inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede, também possuem outras funções importantes, tais como:

- Rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*) - o sistema consegue fazer ajustes através do controle da corrente e da tensão, para que o painel fotovoltaico funcione perto do seu ponto de maior potência, variando de acordo com a radiação solar que está chegando ao painel;
- Desconexão e isolamento - se os níveis de corrente, tensão e frequência da rede não estejam dentro de uma faixa aceitável, o inversor deve desconectar o arranjo fotovoltaico e isolar o gerador fotovoltaico da rede quando o mesmo não estiver energizado, seja no caso de alguma falha ou até mesmo manutenção, a fim de evitar possíveis acidentes com o operador;
- Relatório de status - no *display* do inversor serão apresentados os dados de entrada e armazenamento, podendo ser registradas grandezas elétricas

como a corrente CC e CA, a tensão CC e CA, potência CA, energia CA diária e acumulada entregue a rede, frequência e parâmetros meteorológicos e térmicos.

São várias as topologias existentes no cenário de inversores, dentre elas, a topologia HERIC (*Highly Efficient and Reliable Inverter Concept*), que significa Inversor Altamente Eficiente e Confiável, é mostrado na Figura 14.



Fonte: Adaptado de Araújo, Zacharias e Mallwitz (2009)

A topologia HERIC demonstrada na Figura 14 é utilizada pela empresa alemã Sunways. A topologia fundamenta-se da adição de dois interruptores, a qual devem estar conectados em sentidos opostos, dividindo a operação do circuito em duas etapas, uma para quando a tensão da rede é positiva e outra para quando a tensão da rede é negativa. A partir dos interruptores será criado um caminho alternativo, para que no decorrer do período de roda-livre, a corrente não acabe retornando para o painel fotovoltaico, ou seja, a finalidade dos interruptores é de minimizar a corrente fuga que irá para o painel (MARANGONI, 2012).

## 4 DESENVOLVIMENTO

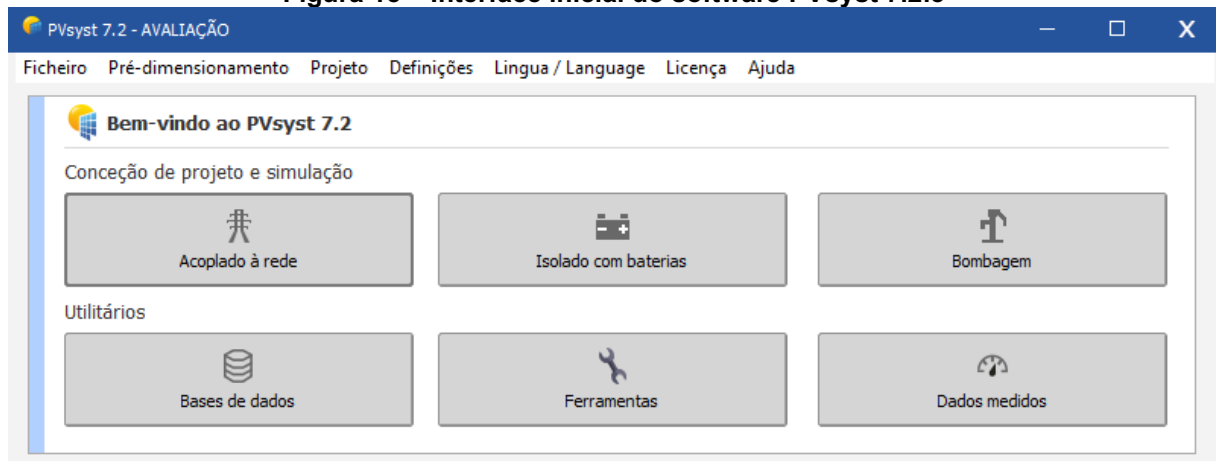
O presente capítulo consiste na utilização dos conceitos que foram apresentados no referencial teórico, com o intuito de identificar e compreender os passos para analisar o impacto da variação da potência do arranjo fotovoltaico para o projeto de um inversor. Os materiais que serão utilizados para elaboração consistem em livros, artigos científicos, documentos sobre o tema e o software PVsyst.

### 4.1 Coleta de dados meteorológicos

Nesta etapa do trabalho foram acessados os bancos de dados de temperatura e irradiação solar por hora de cada mês referentes a cidade de Medianeira-PR.

Para realizar a coleta das informações necessárias para o desenvolvimento do trabalho, foi utilizado o software PVsyst 7.2.3, o qual fornece uma versão gratuita no período de 1 mês, em que, é possível utilizar todos os recursos do programa, incluindo acesso completo a banco de dados meteorológicos com valores para a cidade de Medianeira-PR e dados técnicos de equipamentos utilizados para o trabalho. A Figura 15 demonstra a interface inicial do programa.

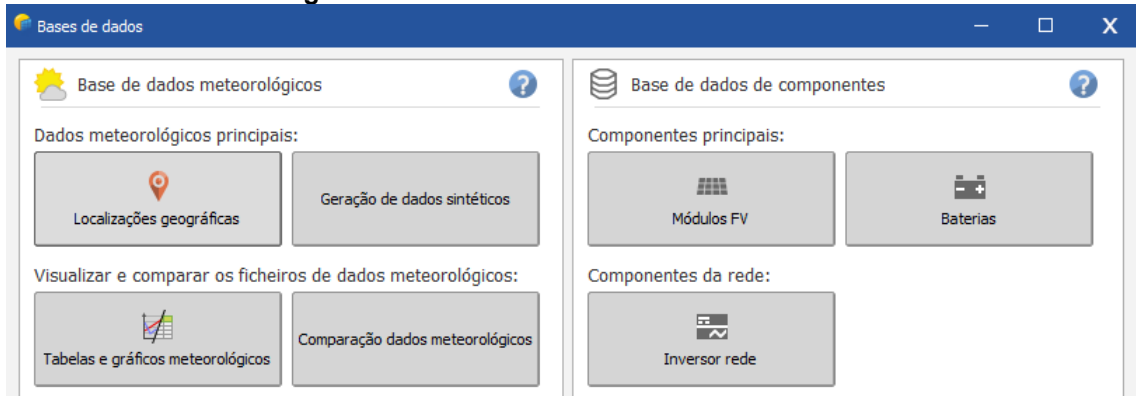
**Figura 15 – Interface inicial do software PVsyst 7.2.3**



**Fonte: Software PVsyst (2022)**

Para fins de coleta de dados, a função do software utilizada encontra-se na seção utilitários, sendo ela nomeada como “Bases de dados”, responsável por fornecer tanto dados meteorológicos da cidade de Medianeira, como dados de equipamentos utilizados (inversores e módulos fotovoltaicos) para a realização das análises do projeto de um inversor solar. Sua interface nomeada como “Bases de dados” está representada na Figura 16.

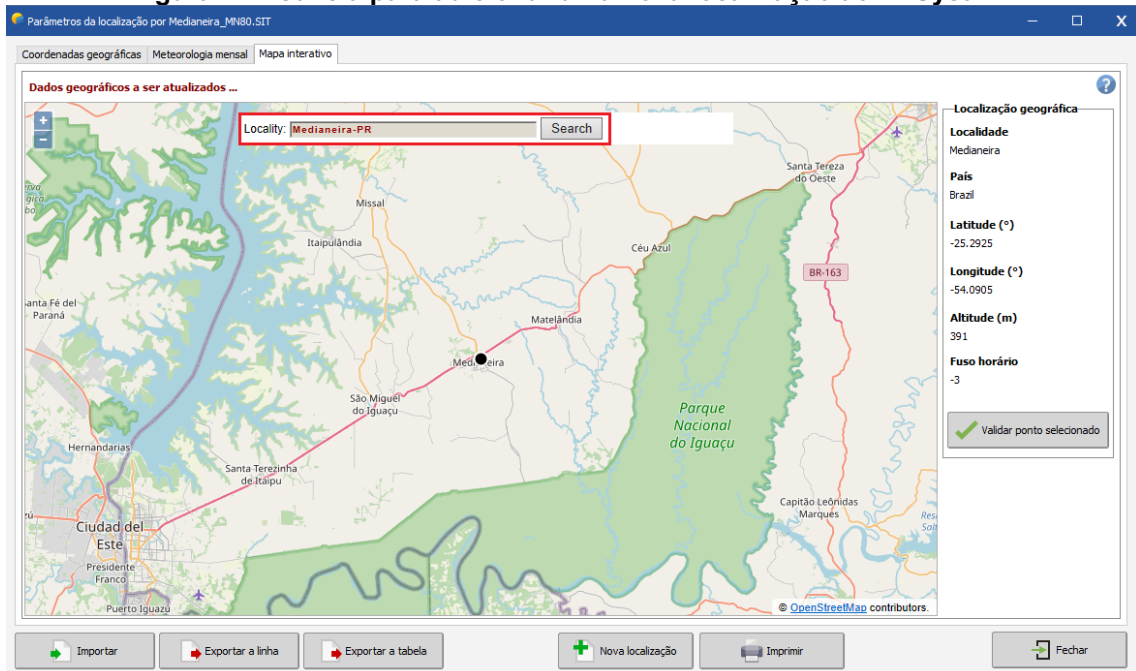
**Figura 16 – Interface da aba “Bases de dados”**



Fonte: Software PVsyst (2022)

Após selecionar a opção “Bases de dados” foi escolhido o ponto geográfico desejado, para que o software importe as informações meteorológicas. Por padrão o PVsyst não vem pré-definido com dados meteorológicos para o município de Medianeira-PR, sendo necessário sua adição, a mesma foi feita através da opção “Localizações geográficas”, sendo ela localizada na seção “Dados meteorológicos principais”, conforme ilustrado na Figura 16. Acessada a função “Localizações geográficas”, foi selecionada a opção “Nova localização”, abrindo uma nova janela denominada “Mapa interativo”, no campo *Locality* inseriu-se Medianeira-PR para a identificação do município no PVsyst, conforme demonstrado na Figura 17.

**Figura 17 – Janela para adicionar uma nova localização ao PVsyst 7.2**



Fonte: Autoria própria (2022)



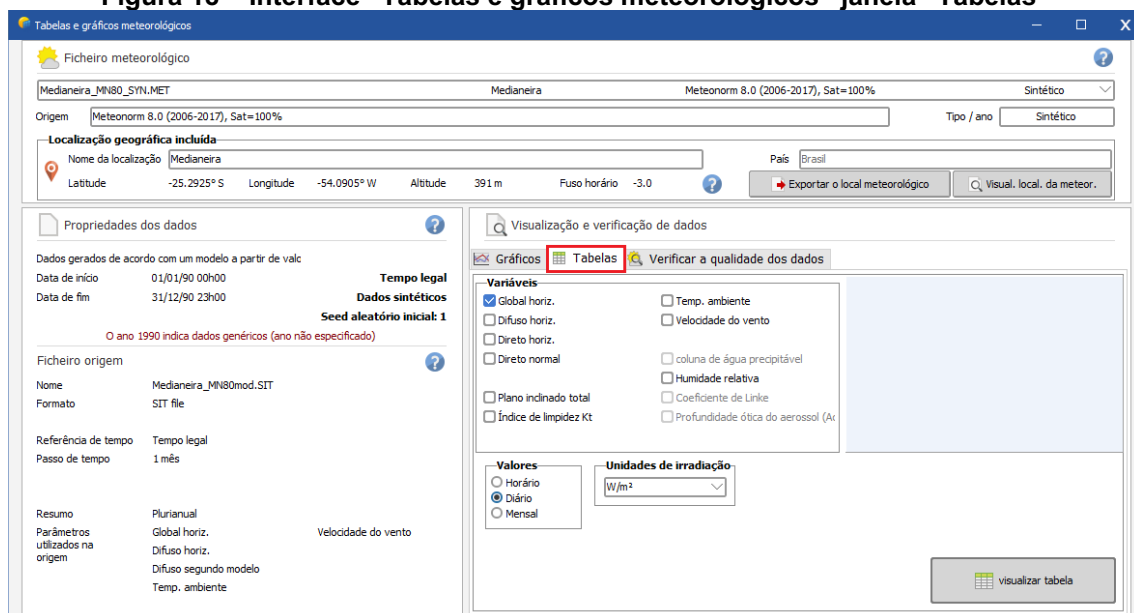
Na Figura 17 tem-se exatamente o local desejado, tanto no quadro que indica a posição geográfica no globo terrestre, quanto na própria ilustração de coordenadas (latitude e longitude), além de especificar informações como: altitude, fuso horário, cidade, país e continente.

Identificado o município pelo software, importou-se todas as informações do mesmo, através da base Meteororm 8.0, que dentre as opções de banco de dados disponível, foi escolhida por se tratar de uma das bases de dados mais completas para Medianeira-PR, através deste obteve-se variáveis utilizadas nas análises do inversor solar projeto.

Com os dados meteorológicos salvos, foi necessário voltar para a interface “Base de dados” demonstrada na Figura 16, sendo selecionada a função “Tabelas e gráficos meteorológicos”, função responsável por fornecer valores de irradiação e temperatura, por hora, diário e mensal.

Para a obtenção dos níveis de irradiação solar para a cidade de Medianeira-PR, o primeiro passo foi selecionar a janela tabelas e a configurar da seguinte maneira: na seção “Variáveis” foi selecionada a opção “Global horiz.”, sendo este tipo de irradiação solar (global horizontal) a de maior interesse para aproveitamento fotovoltaico, na seção “Valores” foi marcada a opção “Diário” e a unidade de irradiação escolhida foi  $W/m^2$ , exatamente como está demonstrado na Figura 18.

**Figura 18 – Interface “Tabelas e gráficos meteorológicos” janela “Tabelas”**



Fonte: Software PVsyst (2022)

Depois de configurada a janela foi executada a opção “visualizar tabela”, fornecendo os níveis de irradiação, cada um referente ao seu respectivo dia no ano. Para esses valores, o programa considera uma média dos mesmos dias em anos diferentes contemplando o período de 2006-2017.

Como os valores de irradiação diária fornecidos pelo PVsyst representam apenas a máxima irradiação do dia, foram escolhidos 2 dias de cada mês, o dia com maior e menor incidência de irradiação solar, para uma análise mais minuciosa dos mesmos. Os dias selecionados estão representados na Tabela 3.

**Tabela 3 – Dias do ano selecionados**

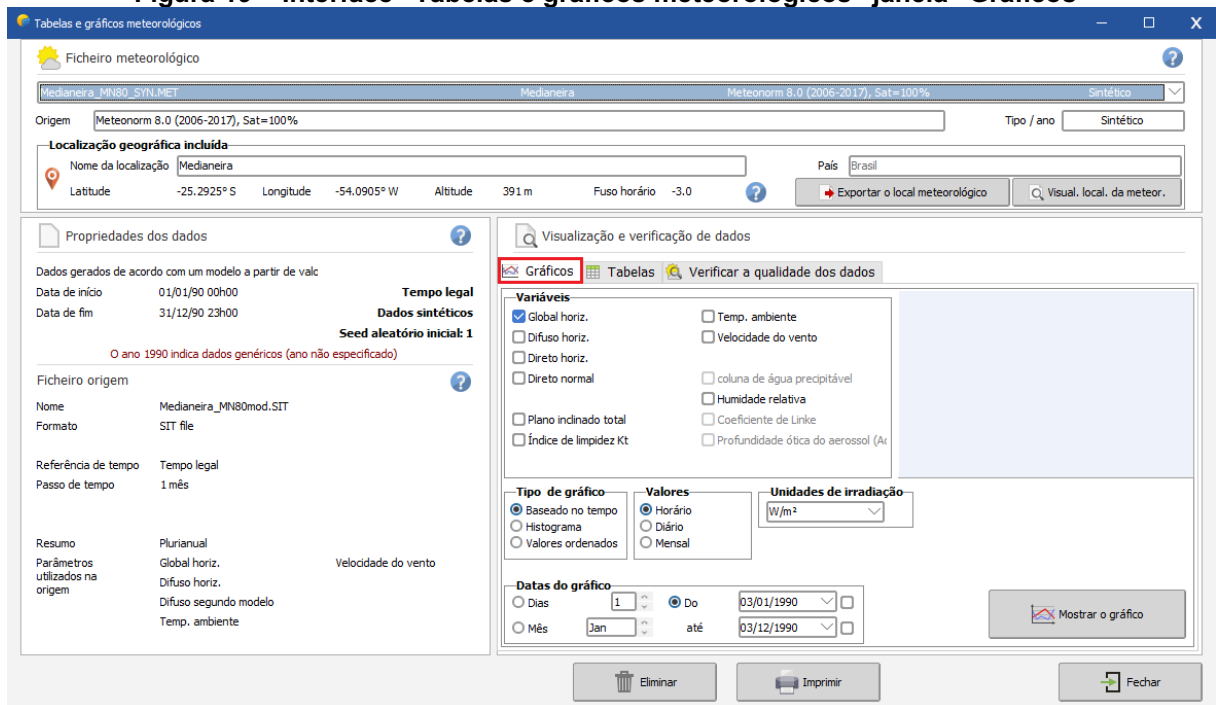
Mês	Dia do mês com maior irradiação solar	Dia do mês de com menor irradiação solar
Janeiro	3	6
Fevereiro	18	9
Março	4	31
Abril	5	22
Maio	3	28
Junho	5	27
Julho	6	12
Agosto	29	2
Setembro	19	29
Outubro	29	21
Novembro	11	30
Dezembro	30	3

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Definidos os dias a serem utilizados, ainda na janela da Figura 18, foi selecionada a opção “Gráficos”, sendo ela responsável por plotar gráficos de temperatura e irradiações em datas específicas.

Para a obtenção dos dados de irradiação por hora, a janela foi configurada da seguinte maneira: na seção “Variáveis” foi marcada apenas a opção “Global horiz.”, o tipo de gráfico utilizado foi baseado no tempo, em “Valores” foi marcada a opção “Horário”, o tipo de unidade de medida utilizado na seção “Unidades de irradiação” foi  $W/m^2$  e em “Datas do gráfico” foi marcada a opção “Do até”, sendo preenchidos ambos os campos com o mesmo dia, mês e ano, exatamente como na Figura 19.

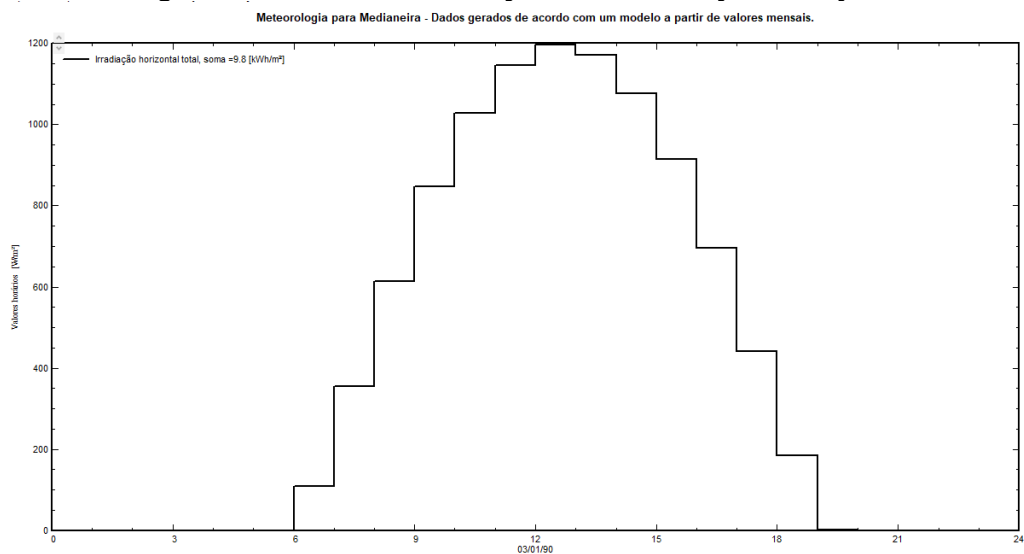
**Figura 19 – Interface “Tabelas e gráficos meteorológicos” janela “Gráficos”**



Fonte: Software PVsyst (2022)

Com a janela configurada, foi utilizada a função “Mostrar o gráfico” para plotar o gráfico de irradiação por hora da data desejada. A Figura 20 corresponde ao gráfico de irradiação por hora do dia 3 de janeiro, o mesmo processo foi feito para todas as datas mencionadas na Tabela 3.

**Figura 20 – Gráfico de irradiação solar no PVsyst - 3 de janeiro**

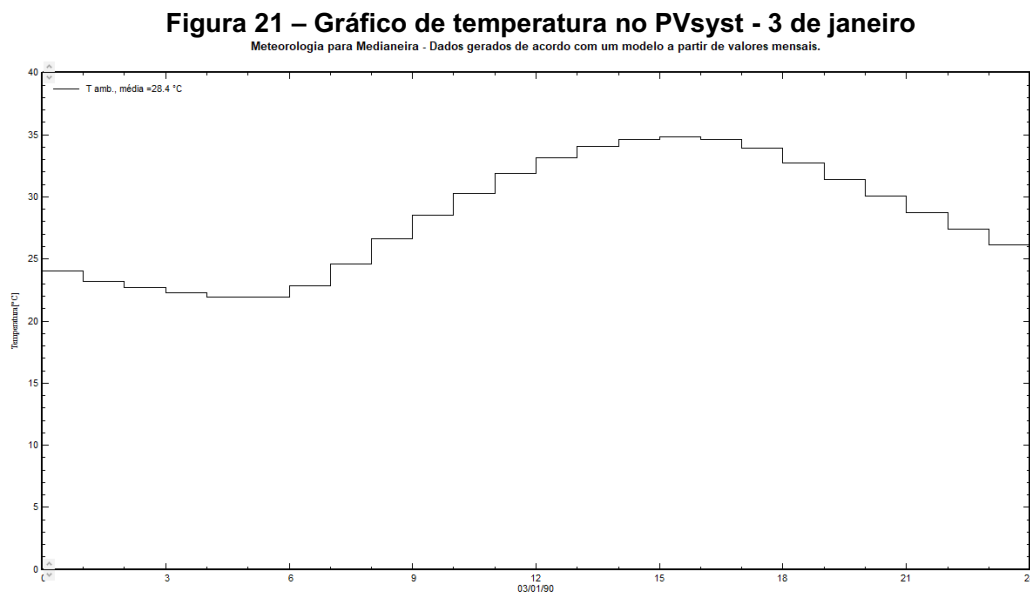


Fonte: Software PVsyst (2022)

Para obtenção das temperaturas foram realizados a maioria dos procedimentos utilizados para se determinar os valores de irradiação solar alterando

apenas a seção “Variáveis”, a qual foi selecionada a opção “Temp. ambiente” (o PVsyst não permite a marcação das opções “Global horiz” e “Temp. ambiente” juntas, para serem plotadas em um mesmo gráfico).

Novamente foi utilizada a função “Mostrar o gráfico”, agora para plotar o gráfico de temperatura por hora da data desejada. A Figura 21 corresponde ao gráfico de temperatura do dia 3 de janeiro, o mesmo processo foi feito para todas as datas mencionadas na Tabela 3.

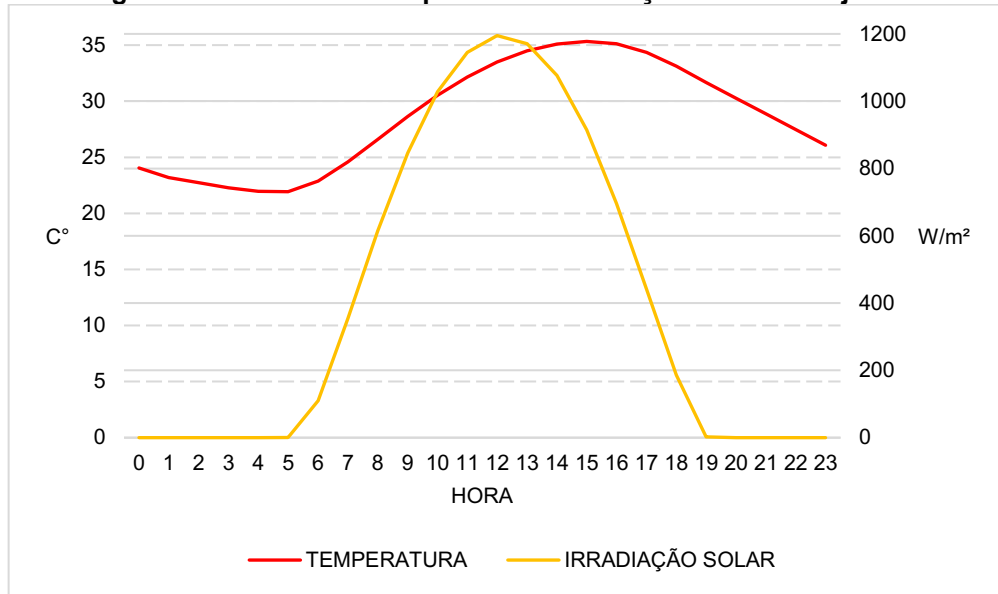


Fonte: Software PVsyst (2022)

## 4.2 Elaboração de gráficos meteorológicos

Plotado os gráficos de temperatura e irradiação no PVsyst, seus valores foram exportados ao Excel para elaboração de um gráfico com as duas variáveis em função do tempo, facilitando sua visualização. A Figura 22 corresponde ao gráfico de temperatura e irradiação solar do dia 3 de janeiro, esta data representa um período ensolarado, tendo o maior índice de irradiação solar registrado no mês de janeiro.

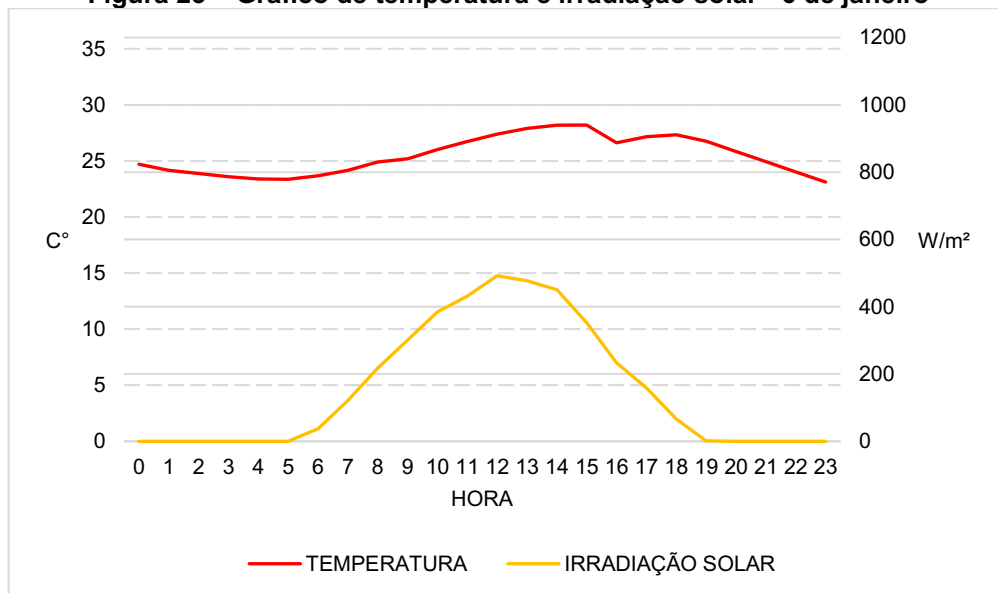
**Figura 22 – Gráfico de temperatura e irradiação solar - 3 de janeiro**



Fonte: Autoria própria (2022)

Já a Figura 23 corresponde ao gráfico de temperatura e irradiação solar do dia 6 de janeiro, esta data representa um período chuvoso ou nublado, tendo o menor índice de irradiação solar registrado no mês de janeiro.

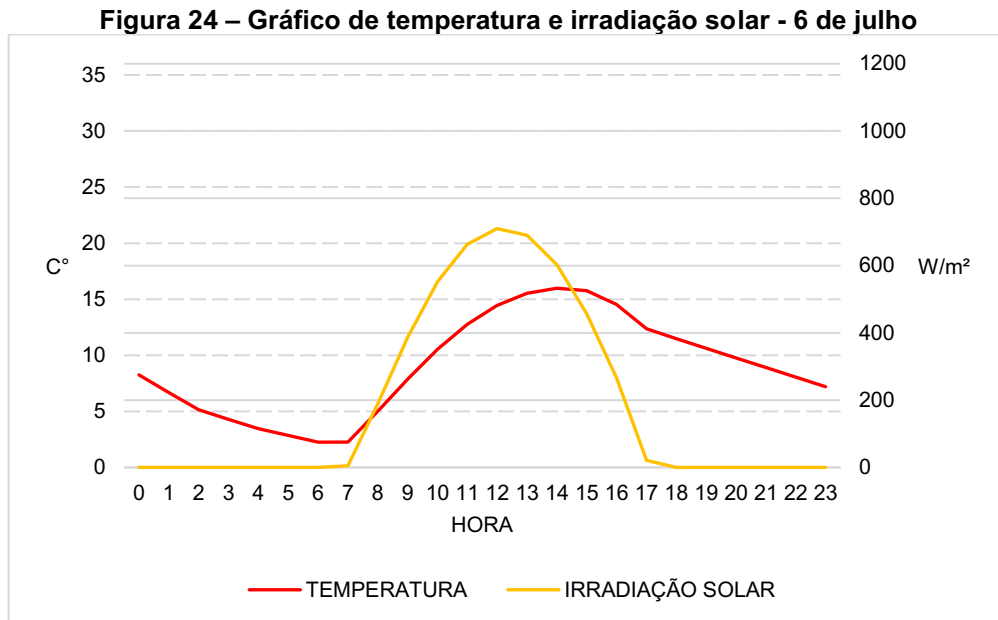
**Figura 23 – Gráfico de temperatura e irradiação solar - 6 de janeiro**



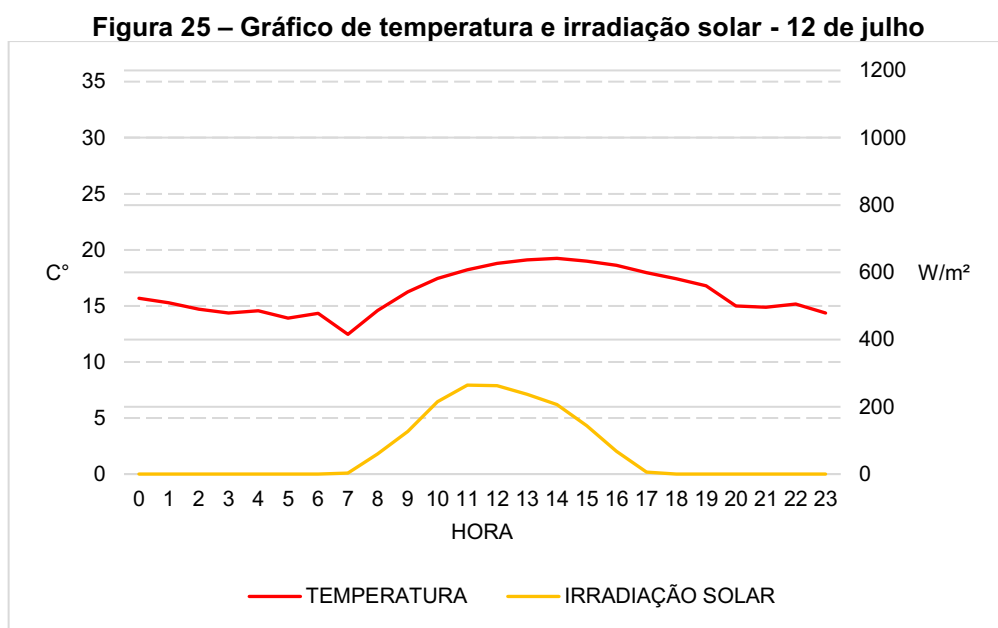
Fonte: Autoria própria (2022)

Vale ressaltar, que tanto o dia 3 quanto o dia 6 ambos no mês de janeiro, estão no período de verão.

Para uma melhor comparação, o gráfico da Figura 24 indica a temperatura e irradiação solar do dia 6 de julho, esta data representa um dia ensolarado de inverno, tendo o maior índice de irradiação solar registrado no mês de julho.



Na Figura 25 observa-se o gráfico de temperatura e irradiação solar do dia 12 de julho, data a qual representa um dia chuvoso ou nublado de inverno, tendo o menor índice de irradiação solar registrado no mês de julho.



Os gráficos das demais datas mencionadas na Tabela 3 encontram-se no Apêndice A.

### 4.3 Gráficos do painel

O painel escolhido para ser utilizado no presente trabalho é o CS3W-450MS da empresa Canadian Solar, por se tratar de um dos modelos de painéis solares mais vendidos da atualidade e comercializado por empresas localizadas no Oeste do Paraná.

Para a identificação do painel no PVsyst, na tela “Bases de dados” representada na Figura 16, foi escolhida a opção “Módulos FV” localizado na seção “Componentes principais”. Selecionada a opção, foi selecionado o módulo desejado e importado seus dados técnicos, a Figura 26 demonstra os dados do painel CS3W-450MS fornecidos pelo programa, os mesmos disponibilizados pelo fornecedor em seu datasheet (CANADIAN, 2022).

Figura 26 – Dados técnico do módulo CS3W-450MS

**Definição de um módulo FV**

Dados de base | Dimensões e tecnologia | Parâmetros modelo | Dados adicionais | Comercial | Gráficos

Modelo: CS3W-450MS | Fabricante: CSI Solar  
 Nome arquivo: Canadian\_CS3W-450MS.PAN | Fonte dados: Manufacturer 2020 TUV-SUD data  
 Base de dados original do PVsyst | Prod. desde 2020

Potência nom. (em STC): 450.0 Wp | Tol. -/+ 0.0 2.2 %  
 Tecnologia: Si-mono

**Especificações do fabricante ou outras medidas**

Condições de referência	GRef	1000	W/m <sup>2</sup>	TRef	25	°C
Corrente de curto-circuito	Isc	11.600	A	Circuito aberto Vco	49.10	V
Ponto de potência máx.	Imp	10.960	A	Vmpp	41.10	V
Coeficiente de temperatura	muIsc	5.8	mA/°C	N.º células	72 x 2	
	ou muIsc	0.050	%/°C			

**Resumo do modelo**

**Parâmetros principais**

R paral.	2500 Ω
Rparal(G=0)	10000 Ω
R série model	0.24 Ω
R série máx.	0.26 Ω
R série aparente	0.40 Ω

**Parâmetros modelo**

Gama	0.998
IoRef	0.03 nA
µVco	-143 mV/°C
muPMax fixo	-0.35 /°C

**Resultados do modelo interno**

Condições de funcionamento	GOper	1000	W/m <sup>2</sup>	TOper	25	°C
Ponto de potência máx.	Pmpp	450.7	W	Coef. de temperatura	-0.35	%/°C
Corrente	Imp	11.08	A	Tensão Vmpp	40.7	V
Corrente de curto-circuito	Isc	11.60	A	Circuito aberto Vco	49.1	V
Eficiência	/ Superf. células	N/D	%	/ Superf. módulo	20.40	%

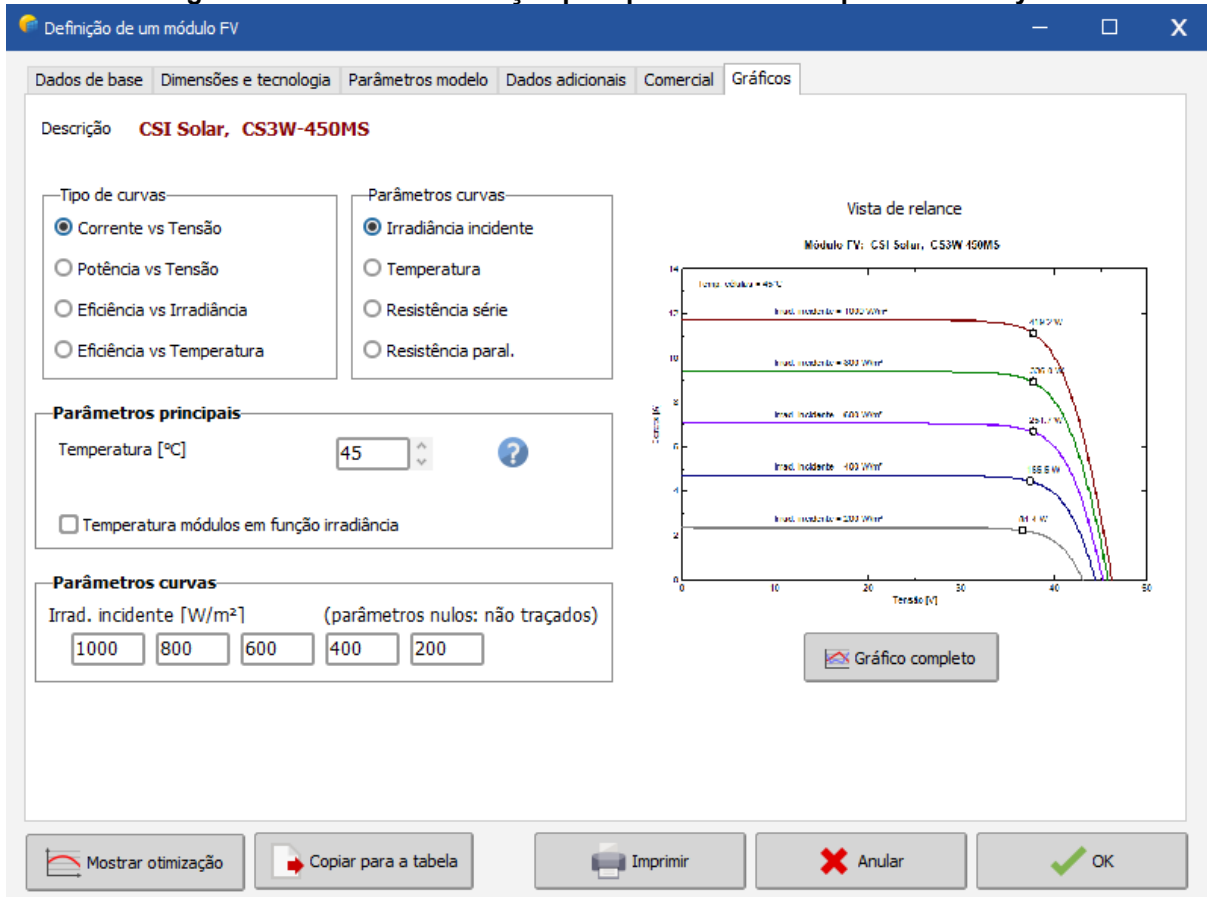
Mostrar otimização | Copiar para a tabela | Imprimir | Anular | OK

Fonte: Software PVsyst (2022)

Com os dados meteorológicos coletados e o modelo de painel definido, foram traçados os gráficos contendo as curvas  $I - V$  e  $P - V$  do painel.

A Figura 27 representa a janela “Gráficos” da interface “Definição de um módulo FV”, função responsável por plotar os gráficos com as curvas mencionadas inserindo as variáveis desejadas.

**Figura 27 – Interface da função para plotar curvas do painel no PVsyst**



Fonte: Software PVsyst (2022)

A função “Gráficos” foi configurada em duas partes: a- na primeira, para o tipo de curva foi escolhida a opção “Corrente vs Tensão” e para parâmetros da curva foi utilizada a “Irradiância incidente”, essa primeira parte se manteve a mesma para a obtenção de todos os gráficos  $I - V$ . b- Já na segunda parte foram inseridos os valores de temperatura e irradiação correspondentes (ambos na mesma data e hora) para todas as datas mencionadas na Tabela 3, sendo considerado apenas os horários que tiverem no mínimo  $1 \text{ W/m}^2$  de irradiação solar.

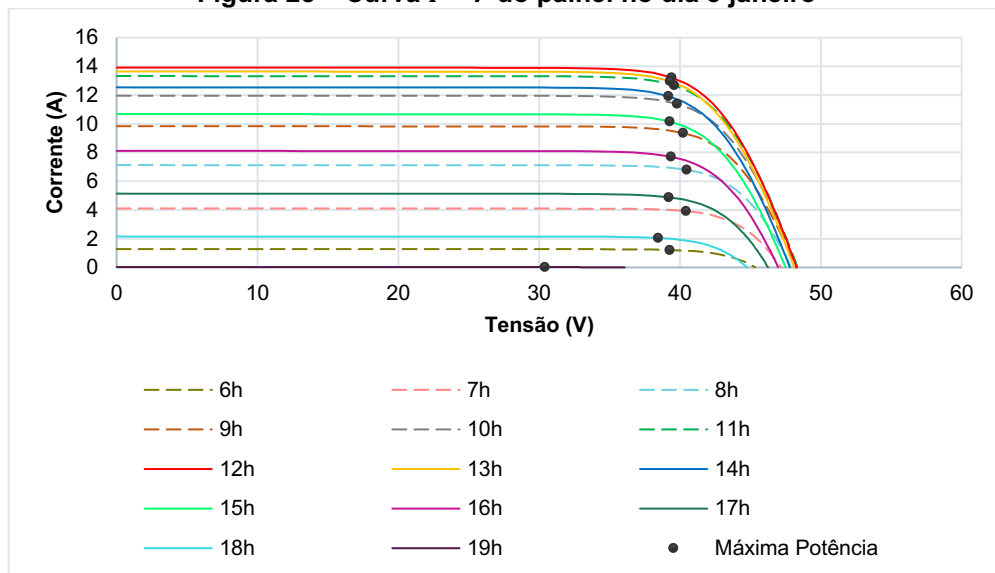
Como a temperatura varia no decorrer do dia e o PVsyst não permite variar e temperatura e irradiação na mesma função, foi plotado um gráfico para cada hora em



que teve algum nível de irradiação solar. Os dados de tensão, corrente e potência de cada hora gerados foram exportados para uma planilha no Excel, a qual todas as horas foram inseridas em um mesmo esquema, sendo plotado dois gráficos, o da curva  $I - V$  e da curva  $P - V$  correspondente, onde cada linha representa um horário do dia selecionado.

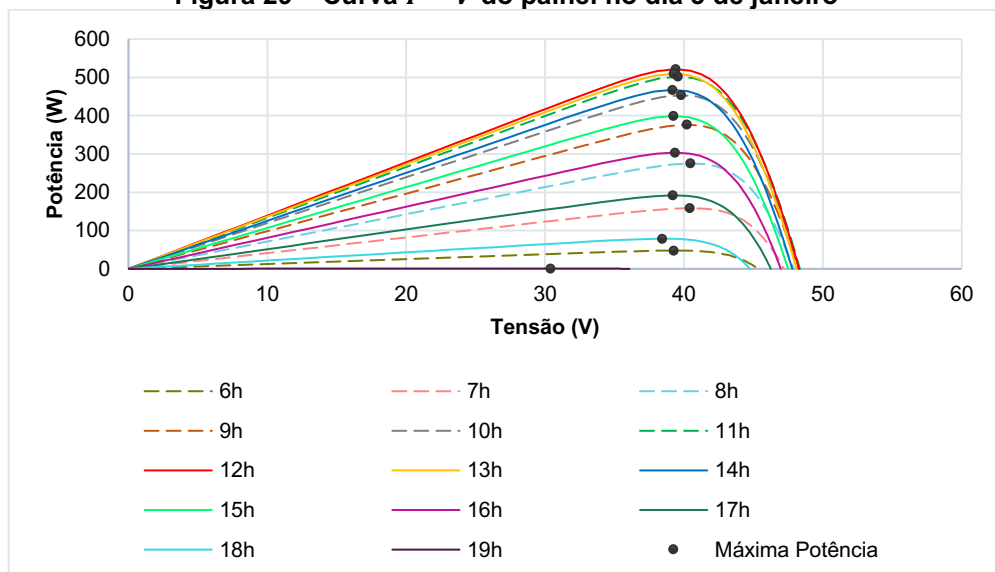
A Figura 28 corresponde a curva  $I - V$  do painel para o dia 3 de janeiro, sendo sua curva  $P - V$  correspondente representada pela Figura 29. Para plotar ambos os gráficos foram utilizados os dados obtidos na Figura 22.

**Figura 28 – Curva  $I - V$  do painel no dia 3 janeiro**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Figura 29 – Curva  $P - V$  do painel no dia 3 de janeiro**

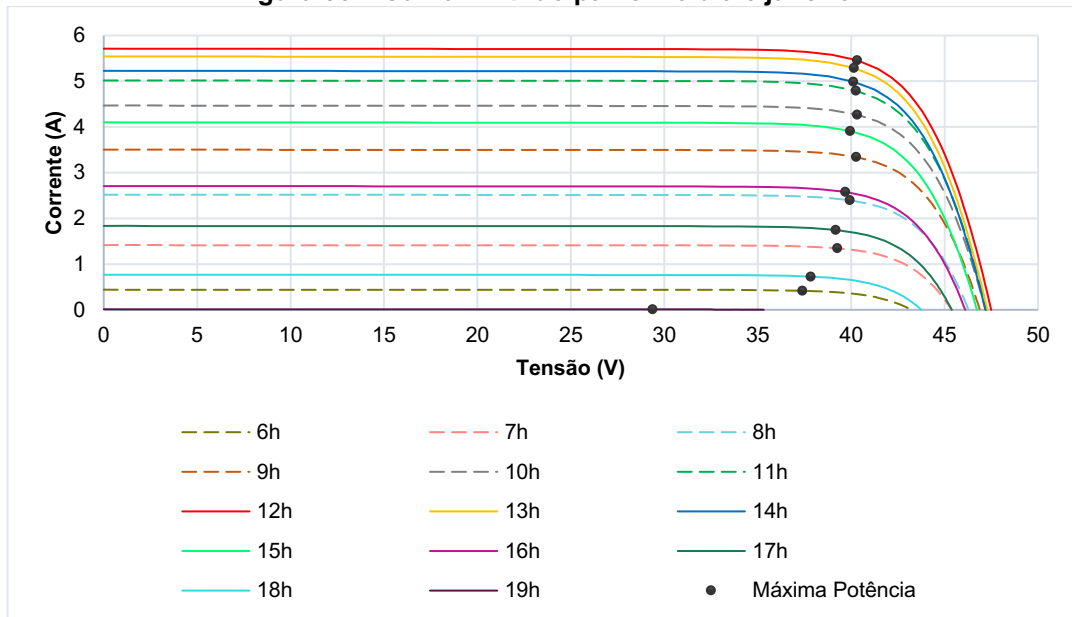


Fonte: Autoria própria (2022)

Na Figura 28 e na Figura 29, cada linha corresponde a um horário diferente do dia em que ocorreu ao menos  $1 \text{ W}/\text{m}^2$  de irradiação solar.

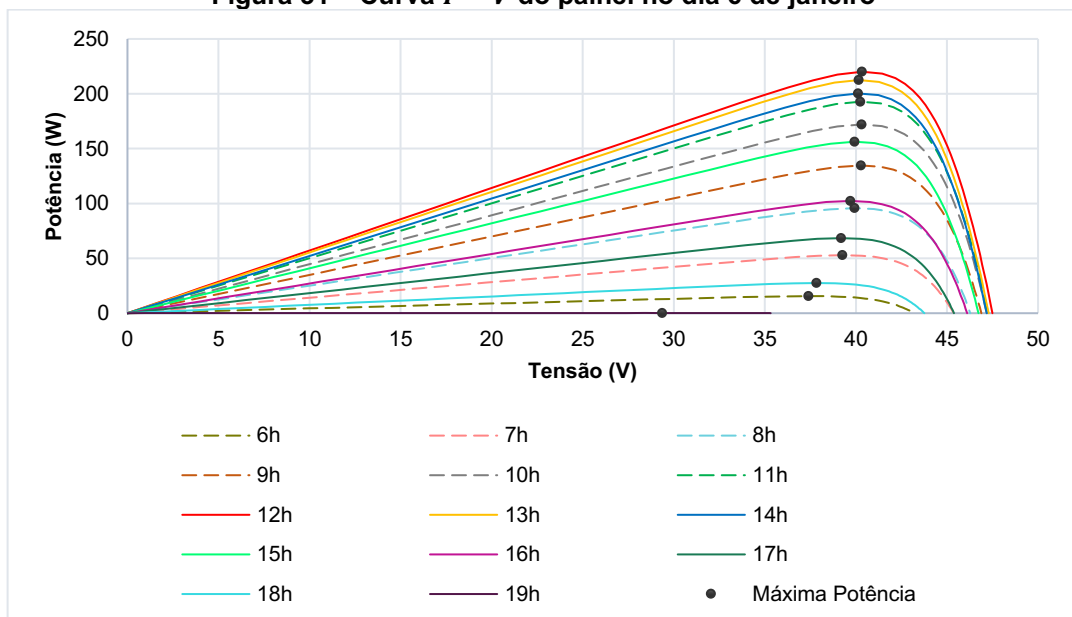
A Figura 30 corresponde a curva  $I - V$  do painel para o dia 6 de janeiro, sendo sua curva  $P - V$  correspondente representada pela Figura 31. Para plotar ambos os gráficos foram utilizados os dados obtidos na Figura 23.

**Figura 30 – Curva  $I - V$  do painel no dia 6 janeiro**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Figura 31 – Curva  $P - V$  do painel no dia 6 de janeiro**

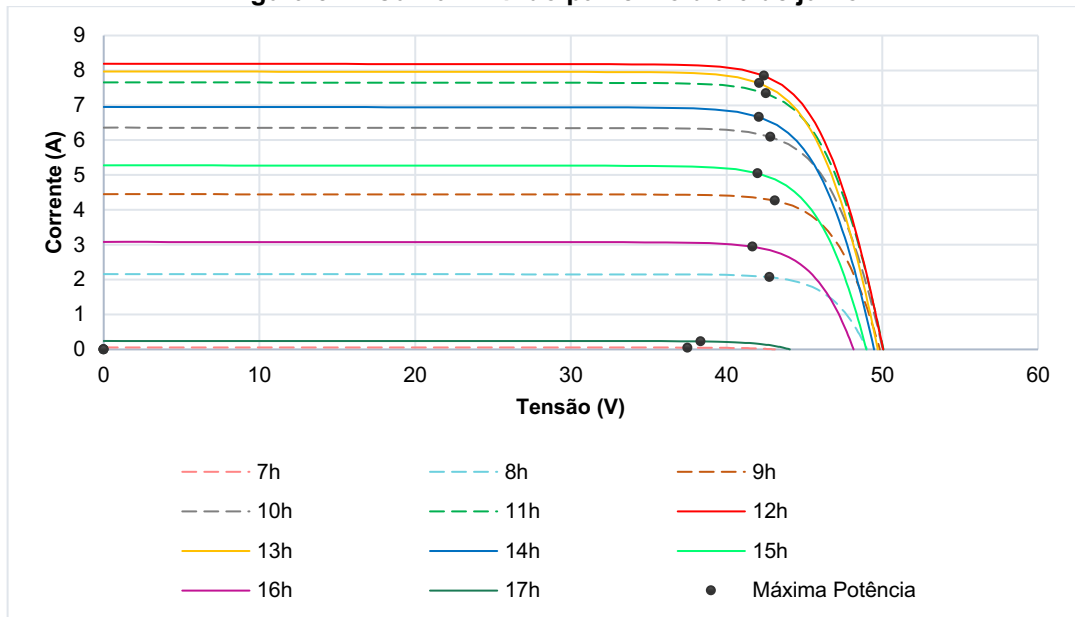


Fonte: Autoria própria (2022)

Na Figura 30 e na Figura 31, cada linha corresponde a um horário diferente do dia em que ocorreu ao menos  $1 \text{ W}/\text{m}^2$  de irradiação solar.

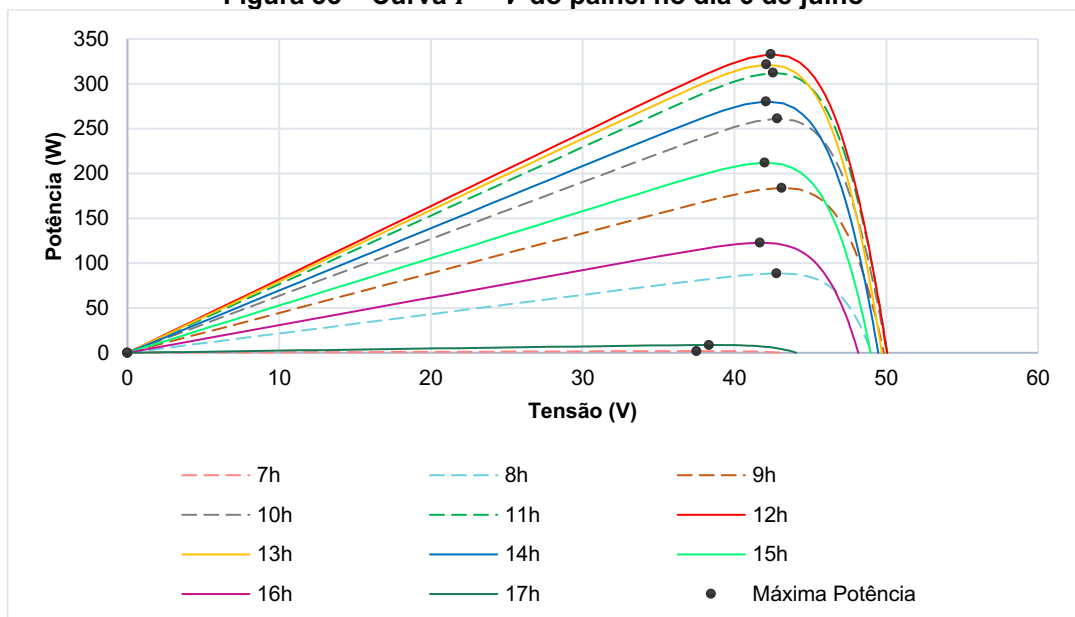
A Figura 32 corresponde a curva  $I - V$  do painel para o dia 6 de julho, sendo sua curva  $P - V$  correspondente representada pela Figura 33. Para plotar ambos os gráficos foram utilizados os dados obtidos na Figura 24.

**Figura 32 – Curva  $I - V$  do painel no dia 6 de julho**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Figura 33 – Curva  $P - V$  do painel no dia 6 de julho**

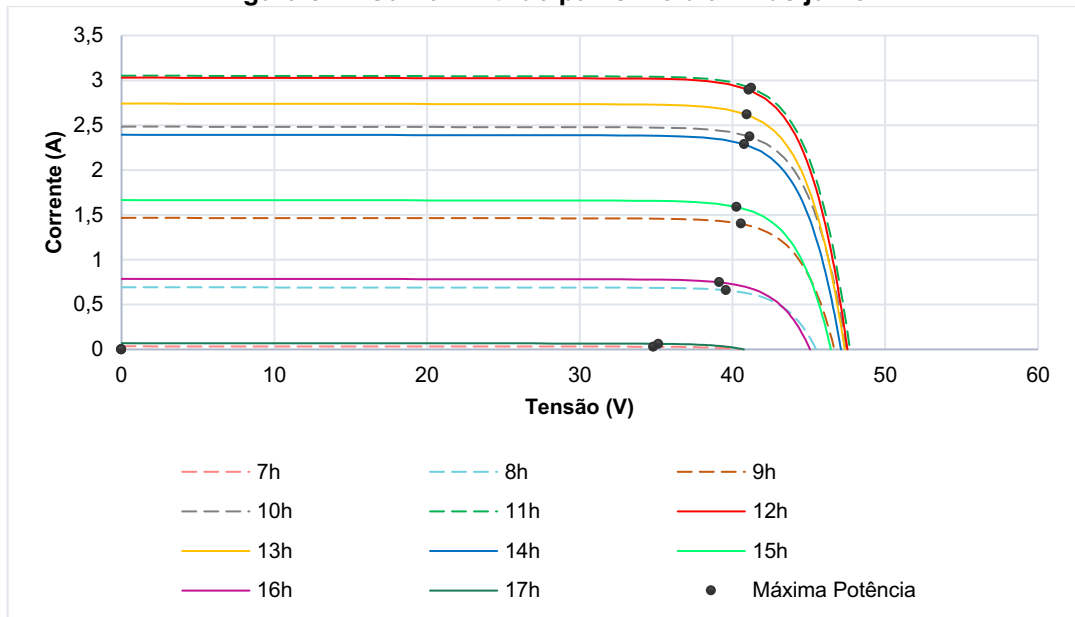


Fonte: Autoria própria (2022)

Na Figura 32 e na Figura 33, cada linha corresponde a um horário diferente do dia em que ocorreu ao menos  $1 \text{ W}/\text{m}^2$  de irradiação solar.

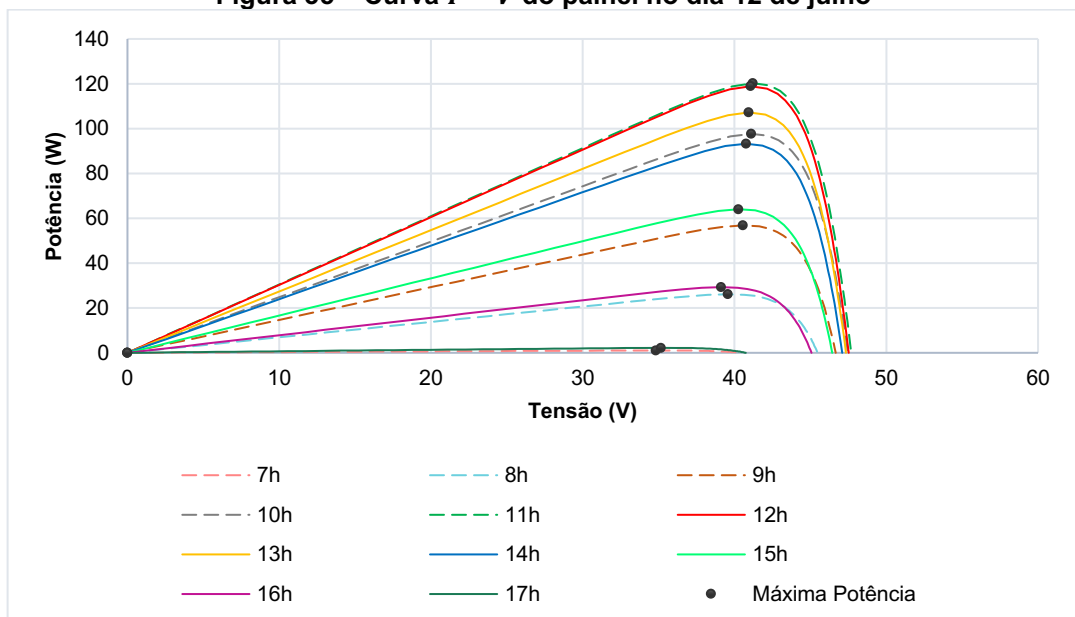
A Figura 34 corresponde a curva  $I - V$  do painel para o dia 12 de julho, sendo sua curva  $P - V$  correspondente representada pela Figura 35. Para plotar ambos os gráficos foram utilizados os dados obtidos na Figura 25.

**Figura 34 – Curva  $I - V$  do painel no dia 12 de julho**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Figura 35 – Curva  $P - V$  do painel no dia 12 de julho**

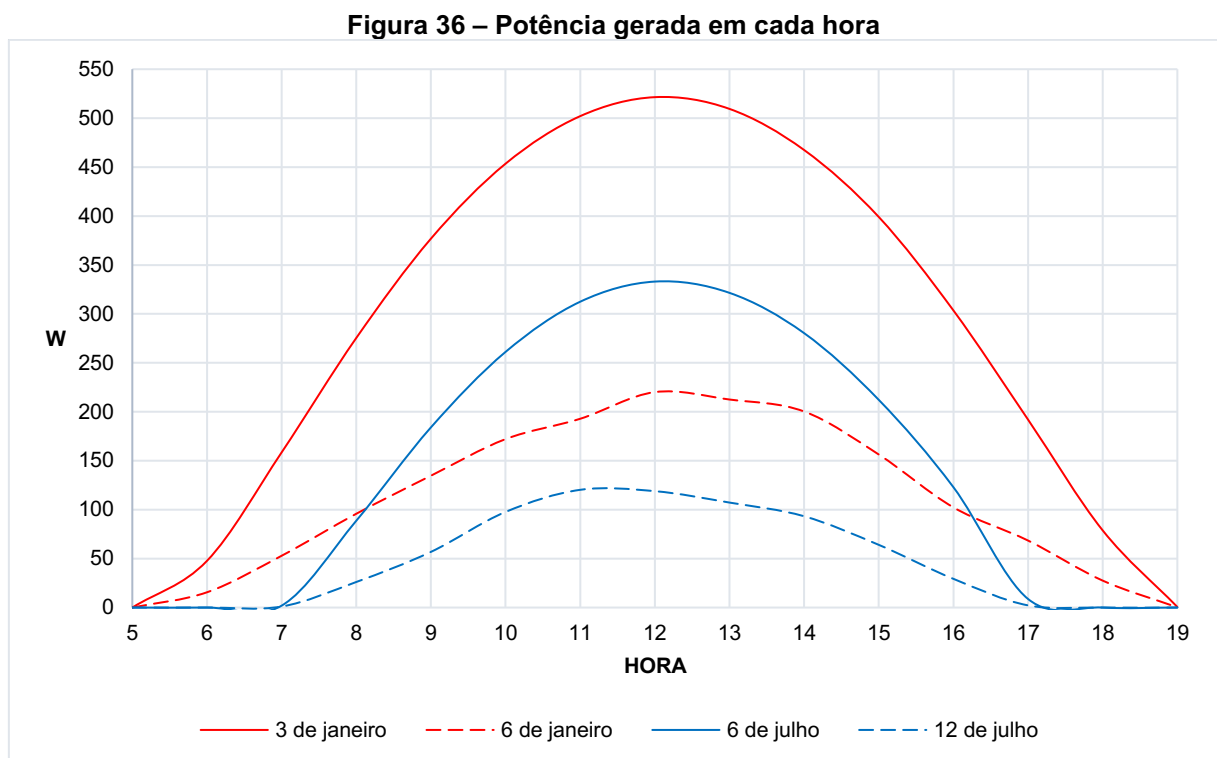


Fonte: Autoria própria (2022)

Na Figura 34 e na Figura 35, cada linha corresponde a um horário diferente do dia em que ocorreu ao menos  $1 W/m^2$  de irradiação solar.

Os gráficos contendo as curvas do painel das demais datas mencionadas na Tabela 3 encontram-se no Apêndice B.

Para efeito comparativo, foram traçadas as curvas de potência por hora em um mesmo gráfico para os dias 3 e 6 de janeiro (verão – linhas em vermelho), e 6 e 12 de julho (inverno – linhas em azul), conforme demonstrado na Figura 36.



**Fonte: Autoria própria (2022).**

Com a análise da Figura 36, percebe-se que no verão o período de geração de energia, até mesmo para um dia nublado, será maior do que o período de geração de energia para um dia ensolarado de inverno, isso ocorre pois no verão os dias são mais longos quando comparados as outras estações do ano. Apesar de no dia 6 de julho ter um período de geração de potência menor do que no dia 6 de janeiro, ele terá maiores potências geradas em um mesmo intervalo de tempo por ter um maior nível de irradiação solar no decorrer do seu dia.

#### **4.4 Dados do inversor e quantidade de painéis fotovoltaicos**

Para a realização das análises com a variação da potência do arranjo fotovoltaico foi considerado o inversor projetado no trabalho de Marangoni (2012). Para o correto funcionamento do inversor o arranjo fotovoltaico precisa ser capaz de fornecer, no mínimo, a tensão de 190 V e a corrente de 1 A.

Desta forma, precisam ser utilizados no mínimo 5 painéis fotovoltaicos do modelo escolhido ligados em série. Escolha feita por ser a menor quantidade de painéis necessária para que ocorra geração de energia, mesmo no pior dia de irradiação solar do ano, em Medianeira-PR.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

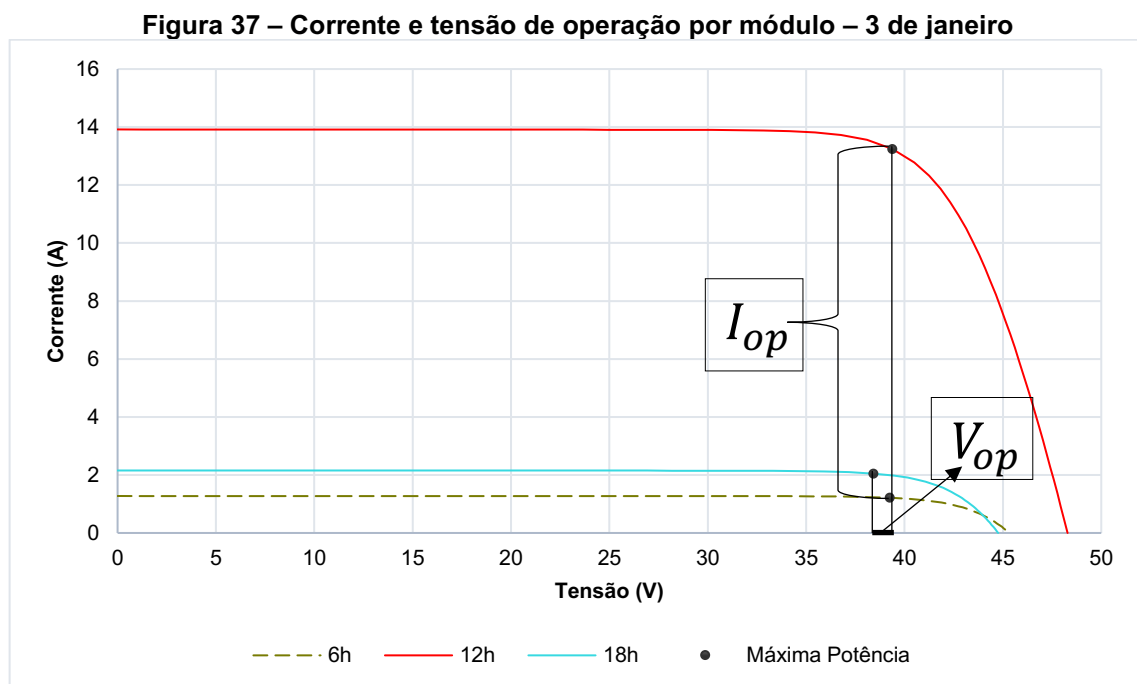
A energia gerada pelos painéis fotovoltaicos é na forma de corrente contínua, para que possa ser entregue à rede como corrente alternada é preciso passar pelo inversor fotovoltaico.

Neste capítulo serão abordados os resultados de operação obtidos para dois períodos do ano em destaque, o verão e o inverno (extremos de funcionamento do sistema fotovoltaico). Para as demais datas mencionadas na Tabela 3, por serem dias medianos, com valores parecidos, será feita uma abordagem mais resumida.

### 5.1 Valores de operação no verão

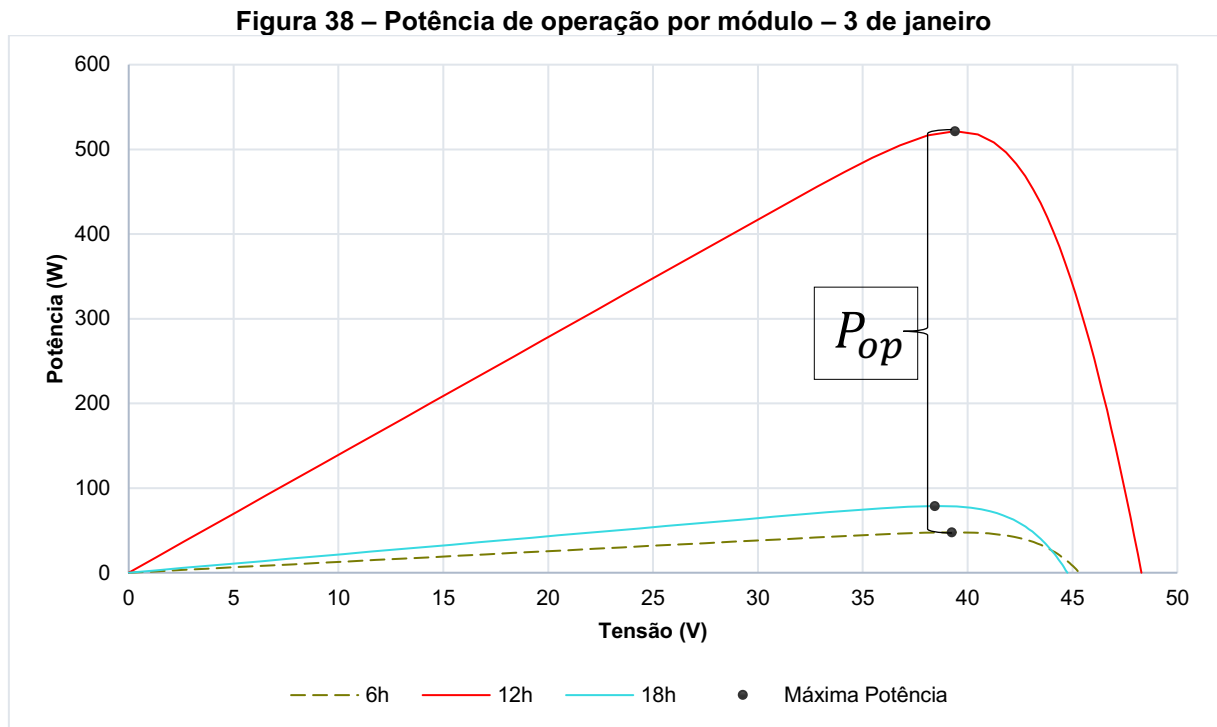
Considerando os parâmetros de funcionamento do inversor e a quantidade de painéis fotovoltaicos ligados em série, abordados no Item 4.4 do presente trabalho, foram plotados gráficos para os dias 3 e 6 de janeiro, sendo eles, os dias com maior e menor incidência de irradiação solar do mês, a fim de demonstrar os valores de operação do sistema fotovoltaico e o seu tempo de funcionamento em dias do verão.

No dia 3 janeiro, data com maior incidência de irradiação solar do mês, seus dados de operação por módulo de acordo com três horários podem ser observados na Figura 37 e na Figura 38.



Fonte: Autoria própria (2022)

Na Figura 37 é possível verificar a variação da corrente ( $I_{op}$ ) e da tensão ( $V_{op}$ ) estão operando em cada módulo fotovoltaico no decorrer do dia. Já para ilustrar a variação da potência de operação ( $P_{op}$ ) do mesmo, fez-se necessário plotar o gráfico da curva  $P - V$ , conforme a Figura 38.



Para a identificação do horário de funcionamento do sistema fotovoltaico, foi considerado a primeira e a última hora do dia em que os painéis fotovoltaicos ligados em série forneceram ao menos  $1 A$  e  $190 V$  ao inversor, além disso, utilizou-se o horário de maior geração de energia do dia para se determinar os valores de operação por módulo. A Tabela 4 demonstra os dados exatos da Figura 37 e da Figura 38.

**Tabela 4 – Valores de operação por módulo – 3 de janeiro**

Horário (h)	Temperatura	Irradiação solar ( $W/m^2$ )	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
6	23°C	110	39,26	1,21	47,68
12	33°C	1195	39,40	13,23	521,45
18	33°C	186	38,44	2,05	78,78

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Como o sistema completo é formado por 5 painéis fotovoltaicos ligados em série, a corrente de operação do inversor será a mesma que a corrente de operação



por módulo; porém, a tensão e a potência de operação do inversor serão 5 vezes maiores que os valores obtidos por módulo, conforme demonstrado na Tabela 5.

**Tabela 5 – Valores de operação do inversor fotovoltaico – 3 de janeiro**

Horário (h)	Temperatura	Irradiação solar ( $W/m^2$ )	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
6	23°C	110	196,30	1,21	238,43
12	33°C	1195	196,99	13,23	2607,27
18	33°C	186	192,20	2,05	393,89

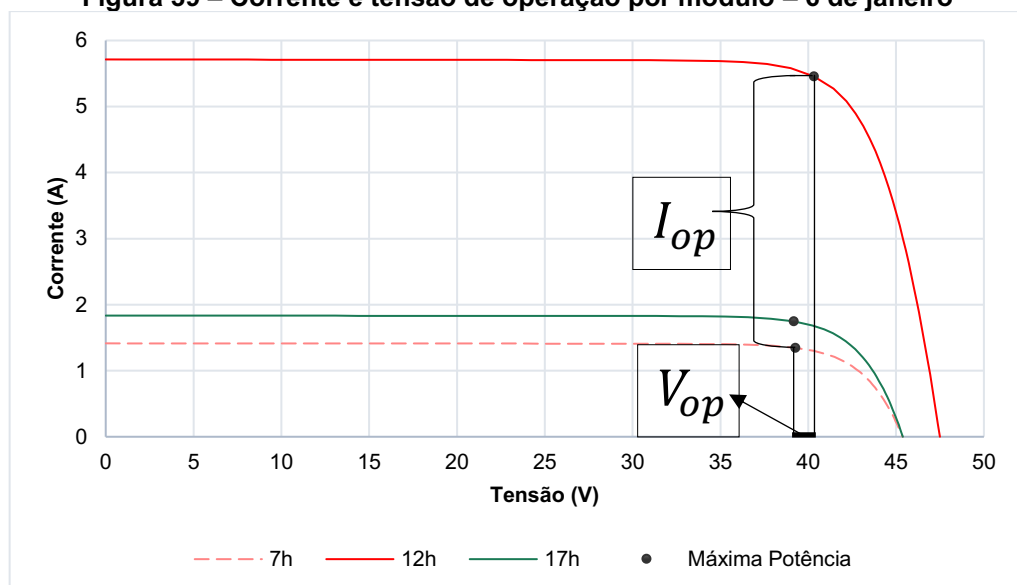
Fonte: Autoria própria (2022)

Como a análise dos valores de operação do inversor, nota-se que no dia 3 de janeiro seu funcionamento durou 12 horas seguidas (6h-18h), tendo uma tensão de operação que variou de 192,20V a 196,99 V, uma corrente de operação que variou de 1,21 A a 13,23 A e uma potência de operação que variou de 238,43 W a 2607,27 W.

Nessa mesma data se fossem utilizados apenas 4 painéis fotovoltaicos ligados em série, o sistema não iria funcionar em nenhum horário do dia, pois os requisitos mínimos de funcionamento do inversor não seriam atingidos, apesar da corrente fornecida pelos painéis atingirem os valores mínimos, a tensão gerada pelos mesmos é inferior a mínima necessária para o funcionamento do inversor.

Para o dia 6 janeiro, data de menor incidência de irradiação solar do mês, ocorreu valores de operação e tempo de funcionamento inferiores quando comparados ao dia 3 do mesmo mês.

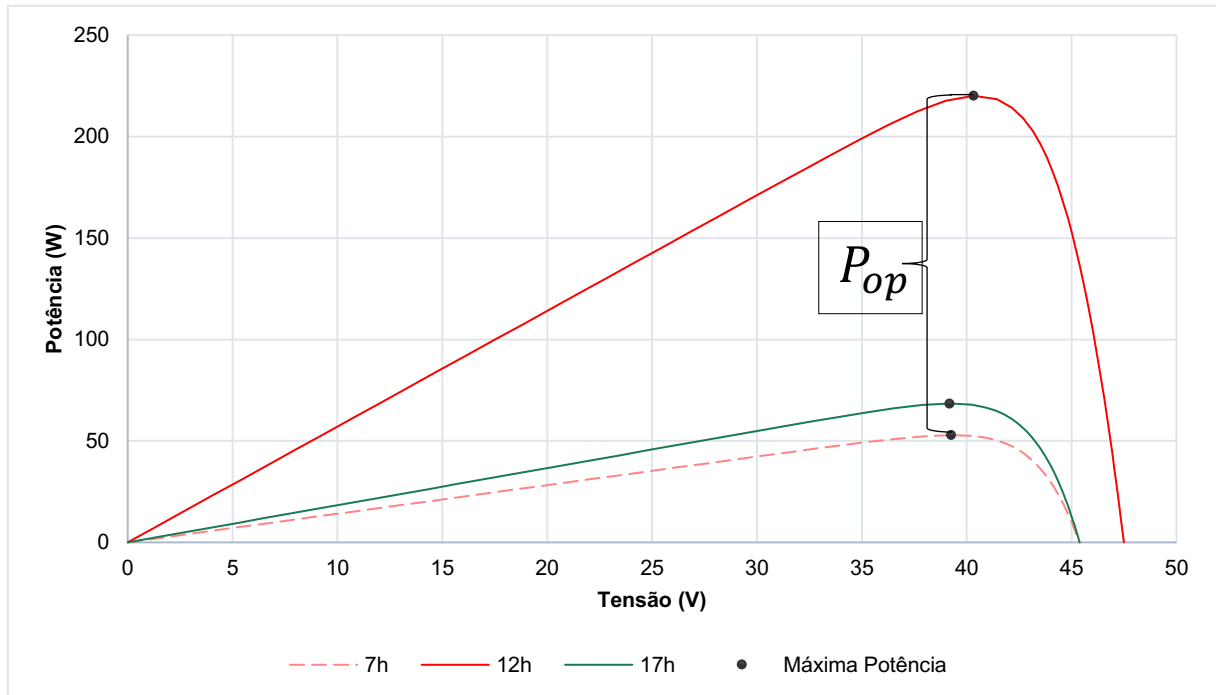
**Figura 39 – Corrente e tensão de operação por módulo – 6 de janeiro**



Fonte: Autoria própria (2022)

Na Figura 39 é possível verificar a variação que a corrente ( $I_{op}$ ) e a tensão ( $V_{op}$ ) estão operando em cada módulo fotovoltaico no decorrer do dia. Já para ilustrar a variação da potência de operação ( $P_{op}$ ) do mesmo, fez-se necessário plotar o gráfico da curva  $P - V$ , conforme a Figura 40.

**Figura 40 – Potência de operação por módulo – 6 de janeiro**



Assim como feito anteriormente, para a identificação do horário de funcionamento do sistema fotovoltaico, foi considerando a primeira e a última hora do dia em que os painéis fotovoltaicos ligados em série forneceram ao menos 1 A e 190 V ao inversor, além disso, também se utilizou o horário de maior geração de energia do dia para se determinar os valores de operação por módulo. A Tabela 6 demonstra os dados exatos da Figura 39 e da Figura 40.

**Tabela 6 – Valores de operação por módulo – 6 de janeiro**

Horário (h)	Temperatura	Irradiação solar ( $W/m^2$ )	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
7	24°C	122	39,26	1,35	52,91
12	27°C	492	40,33	5,46	220,11
17	27°C	158	39,19	1,75	68,44

Fonte: Autoria própria (2022)

Como o sistema completo é formado por 5 painéis fotovoltaicos ligados em série, a corrente de operação do inversor será a mesma que a corrente de operação por módulo, porém a tensão e a potência de operação do inversor serão 5 vezes maiores que os valores obtidos por módulo, conforme demonstrado na Tabela 7.

**Tabela 7 – Valores de operação do inversor fotovoltaico – 6 de janeiro**

Horário (h)	Temperatura	Irradiação solar ( $W/m^2$ )	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
7	24°C	122	196,31	1,35	264,55
12	27°C	492	201,67	5,46	1100,56
17	27°C	158	195,94	1,75	342,22

**Fonte: Autoria própria (2022)**

No dia 6 de janeiro o mesmo funcionou em um período de 10 horas seguidas (7h-17h), tendo uma tensão que variou de 195,94 V a 201,67 V, uma corrente de operação que variou de 1,35 A a 5,46 A e uma potência de 264,55 W a 1100,56 W.

Como o dia 6 de janeiro foi mais frio que o dia 3 do mesmo mês, suas tensões geradas foram maiores, mas por ter um índice de irradiação solar bem abaixo, sua corrente gerada é menor, diminuindo assim o seu tempo de funcionamento no decorrer do dia.

Para se obter o mesmo tempo de funcionamento do dia 3 de janeiro, a solução seria aumentar a corrente fornecida ao inversor solar, esse aumento de corrente pode ser feito adicionando uma ou mais fileiras de painéis solares, a qual, essas fileiras devem estar ligadas em paralelo umas com as outras.

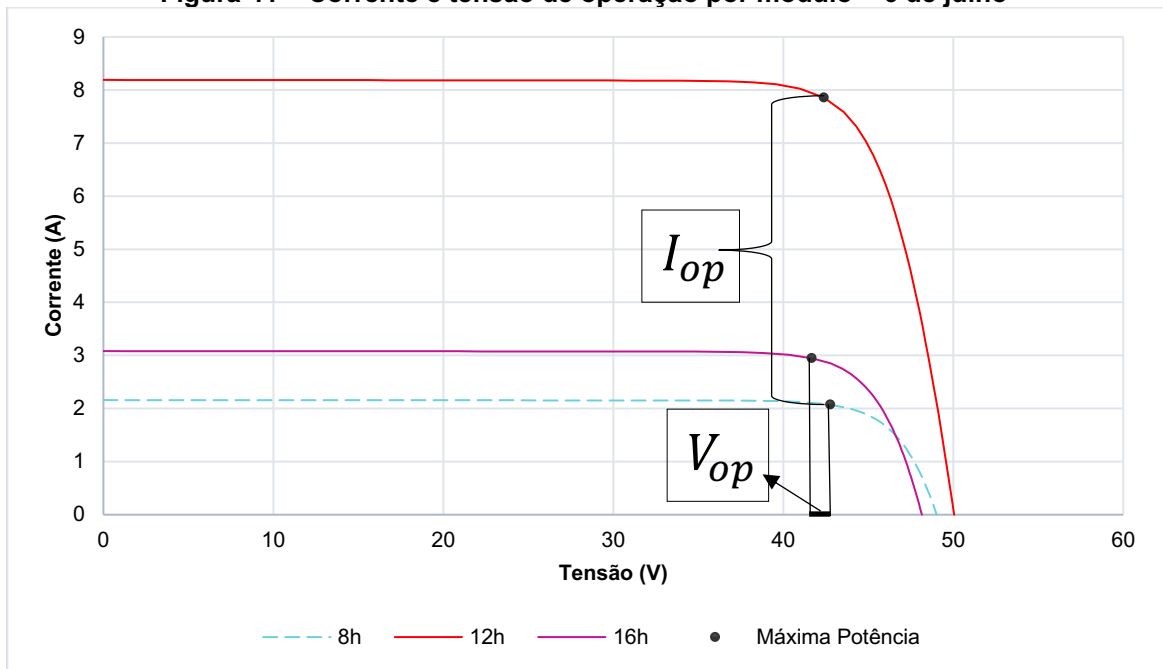
## 5.2 Valores de operação no inverno

Nesta etapa do trabalho foram mantidos os mesmos dados do inversor fotovoltaico e quantidade de painéis ligados em série utilizados para análise no verão.

Foram plotados gráficos para os dias 6 e 12 de julho, sendo eles, os dias com maior e com menor incidência de irradiação solar do mês, a fim de demonstrar os valores de operação do sistema fotovoltaico e o seu tempo de funcionamento em um período de inverno.

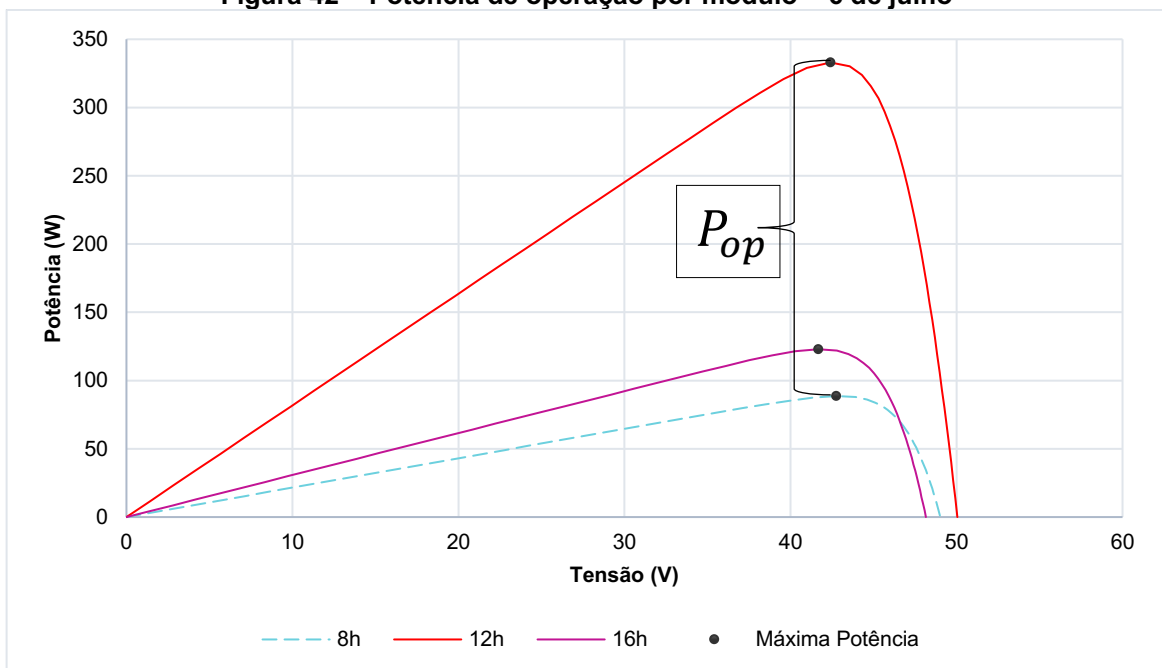
No dia 6 julho, data com maior índice de irradiação solar do mês, com condições meteorológicas favoráveis a geração de energia através de sistemas solares, seus dados de operação por módulo e tempo de funcionamento podem ser observados na Figura 41 e na Figura 42.

**Figura 41 – Corrente e tensão de operação por módulo – 6 de julho**



Na Figura 41 é possível verificar a variação que a corrente ( $I_{op}$ ) e a tensão ( $V_{op}$ ) estão operando em cada módulo fotovoltaico no decorrer do dia. Já para ilustrar a variação da potência de operação ( $P_{op}$ ) do mesmo, fez-se necessário plotar o gráfico da curva  $P - V$ , conforme a Figura 42.

**Figura 42 – Potência de operação por módulo – 6 de julho**



A identificação do horário de funcionamento do sistema fotovoltaico, foi feita considerando a primeira e a última hora do dia em que os painéis fotovoltaicos ligados em série forneceram ao menos 1 A e 190 V ao inversor, além disso, utilizou-se o horário de maior geração de energia do dia para se determinar os valores de operação por módulo. A Tabela 8 demonstra os dados exatos da Figura 41 e da Figura 42.

**Tabela 8 – Valores de operação por módulo – 6 de julho**

Horário (h)	Temperatura	Irradiação solar ( $W/m^2$ )	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8	5°C	188	42,77	2,073	88,66
12	14°C	710	42,40	7,85	333,02
16	15°C	267	41,68	2,95	122,94

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Como o sistema possui 5 painéis em série, a corrente do inversor será a mesma que a corrente de operação por módulo, já a tensão e a potência de operação do inversor serão 5 vezes maiores, conforme demonstrado na Tabela 9.

**Tabela 9 – Valores de operação do inversor fotovoltaico – 6 de julho**

Horário (h)	Temperatura	Irradiação solar ( $W/m^2$ )	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8	5°C	188	213,83	2,07	443,29
12	14°C	710	212,01	7,85	1665,08
16	15°C	267	208,40	2,95	614,71

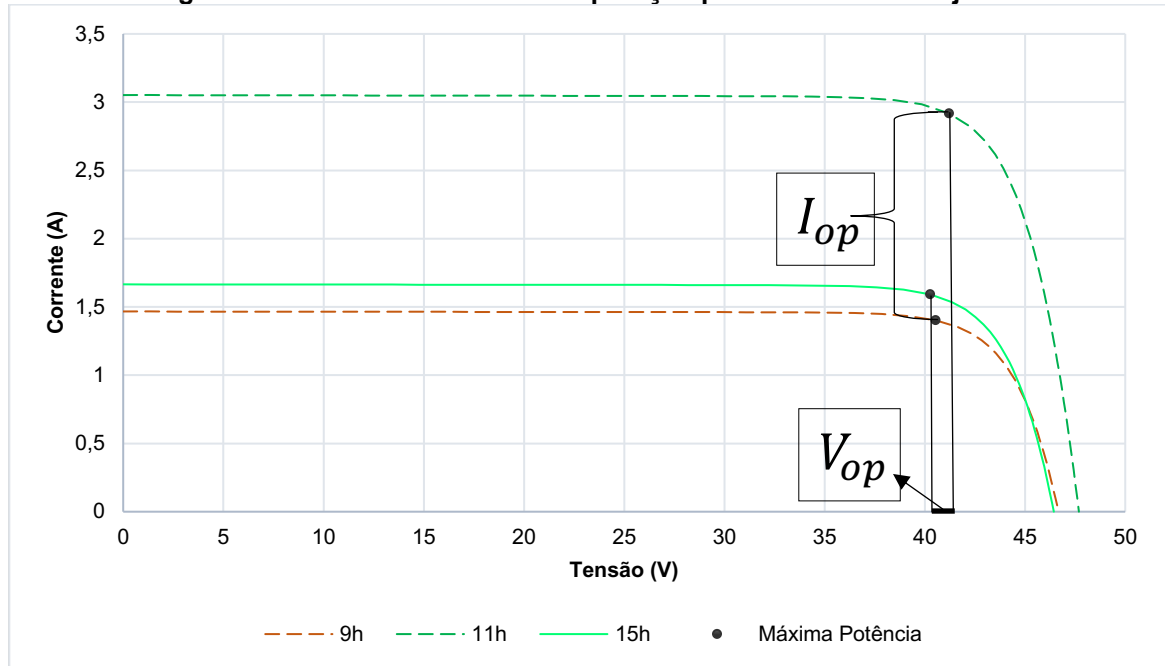
**Fonte: Autoria própria (2022)**

Analisando os valores de operação obtidos do inversor, percebe-se que no dia 6 de julho seu funcionamento durou 8 horas seguidas (8h-16h), tendo uma tensão de operação que variou de 208,40 V a 213,83 V, uma corrente de operação que variou de 2,07 A a 7,85 A e uma potência de operação que variou de 443,29 W a 1665,08 W.

Se comparados os valores de operação do inversor desta data com os dados dos dias 3 e 6 de janeiro (Tabela 5 e Tabela 7), fica claro que a tensão de operação no inverno é superior a do verão, porém com um intervalo de funcionamento menor, este intervalo de funcionamento pode ser aumentado, mas não chegará ao tempo de duração de um dia de verão, pois no inverno os dias são mais curtos.

Para o dia 12 de julho, data de menor incidência de irradiação solar do mês (condições meteorológicas desfavoráveis), obteve-se valores de operação e tempo de funcionamento inferiores se comparados ao dia 6 do mesmo mês.

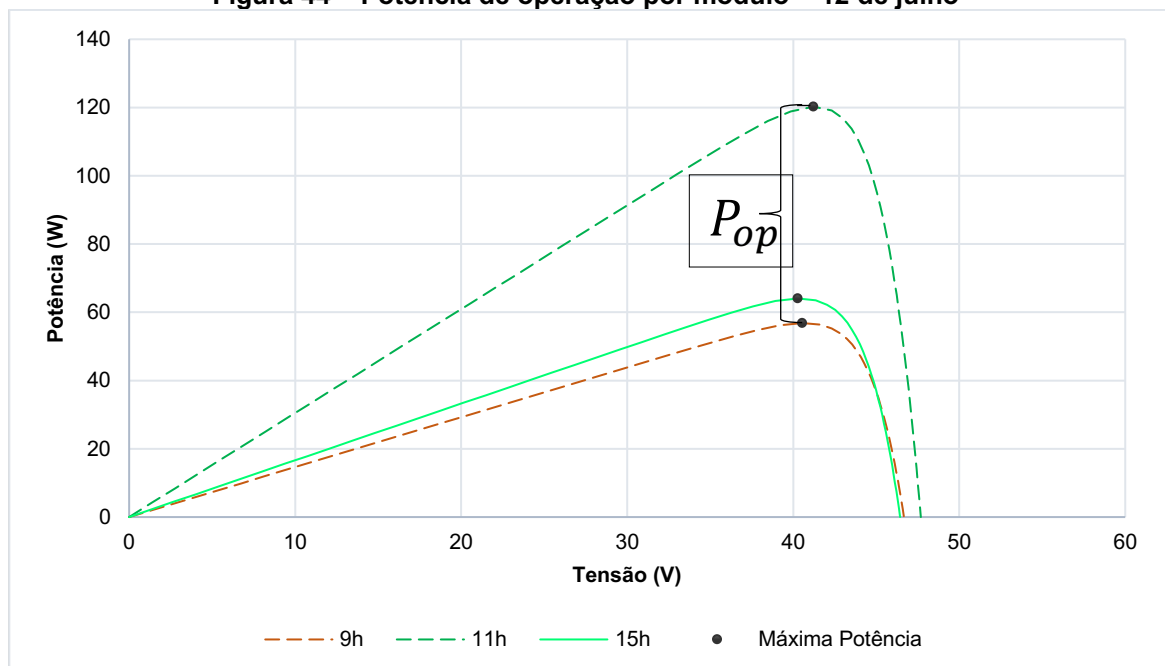
Figura 43 – Corrente e tensão de operação por módulo – 12 de julho



Fonte: Autoria própria (2022)

Na Figura 43 é possível observar a variação que a corrente ( $I_{op}$ ) e a tensão ( $V_{op}$ ) estão operando em cada módulo fotovoltaico no decorrer do dia. Já para ilustrar a variação da potência de operação ( $P_{op}$ ) do mesmo, fez-se necessário plotar o gráfico da curva  $P - V$ , conforme a Figura 44.

Figura 44 – Potência de operação por módulo – 12 de julho



Fonte: Autoria própria (2022)

Assim como feito anteriormente, para a identificação do horário de funcionamento do sistema fotovoltaico, foi considerando a primeira e a última hora do dia em que os painéis fotovoltaicos ligados em série forneceram ao menos 1 A e 190 V ao inversor, além disso, também se utilizou o horário de maior geração de energia do dia para se determinar os valores de operação por módulo. A Tabela 10 demonstra os dados exatos da Figura 43 e da Figura 44.

**Tabela 10 – Valores de operação por módulo – 12 de julho**

Horário (h)	Temperatura	Irradiação solar ( $W/m^2$ )	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
9	16°C	127	40,55	1,40	56,85
11	18°C	264	41,22	2,92	120,26
15	19°C	144	40,27	1,60	64,05

**Fonte: A autoria própria (2022)**

Já que o sistema completo é formado por 5 painéis fotovoltaicos ligados em série, a tensão e a potência de operação do inversor serão 5 vezes maiores que as valores obtidos por módulo, já a corrente do inversor será a mesma que a corrente de operação por painel, conforme demonstrado na Tabela 11.

**Tabela 11 – Valores de operação do inversor fotovoltaico – 12 de julho**

Horário (h)	Temperatura	Irradiação solar ( $W/m^2$ )	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
9	16°C	127	202,75	1,40	284,24
11	18°C	264	206,11	2,92	601,29
15	19°C	144	201,35	1,59	320,26

**Fonte: A autoria própria (2022)**

Analisando os valores de operação do inversor, nota-se que no dia 12 de julho o mesmo funcionou em um período de 6 horas seguidas (9h-15h), tendo uma tensão de operação que variou de 201,35V a 206,11 V, uma corrente de operação que variou de 1,40 A a 2,92 A e uma potência de operação que variou de 284,24 W a 601,29 W.

Se comparados os valores de operação do inversor desta data com os de verão, não é possível manter o mesmo tempo de duração, mas se comparado com o dia 6 de julho (inverno) é possível obter o mesmo tempo de funcionamento, basta aumentar a corrente fornecida ao inversor, esse aumento de corrente pode ser feito adicionando uma ou mais fileiras de módulos fotovoltaicos, a qual, essas fileiras devem estar ligadas em paralelo umas com as outras.

### 5.3 Tempo de funcionamento do inversor nas datas selecionadas

Utilizando os gráficos apresentados nos Apêndices A e B, as configurações do inversor solar e a quantidade de painéis ligados em série, ambos abordados no Item 4.4 do presente trabalho, foi identificado o tempo de funcionamento do inversor para cada data mencionada na Tabela 3, conforme apresentado na Tabela 12.

**Tabela 12 – Tempo de funcionamento do inversor Solar**

Estação do ano	Data (dia/mês)	Temperatura média no período de luz do Sol	Irradiação solar média no período de luz do Sol ( $W/m^2$ )	Intervalo de funcionamento	Tempo de funcionamento
Verão	03/01	33°C	771	6h – 18h	12 horas
	06/01	27°C	267	7h – 17h	10 horas
	18/02	28°C	717	7h – 18h	11 horas
	09/02	24°C	81	10h – 15h	5 horas
	04/03	27°C	637	7h – 17h	10 horas
	31/03	28°C	222	8h – 16h	8 horas
Outono	05/04	31°C	610	7h – 17h	10 horas
	22/04	21°C	193	9h – 17h	8 horas
	03/05	25°C	502	8h – 17h	9 horas
	28/05	22°C	58	13h – 16h	3 horas
	05/06	18°C	423	8h – 16h	8 horas
	27/06	20°C	236	9h – 15h	6 horas
Inverno	06/07	13°C	457	8h – 16h	8 horas
	12/07	18°C	144	9h – 15h	6 horas
	29/08	25°C	450	8h – 17h	9 horas
	02/08	17°C	262	9h – 16h	7 horas
	19/09	22°C	627	7h – 17h	10 horas
Primavera	29/09	25°C	70	13h – 16h	3 horas
	29/10	25°C	700	6h – 17h	11 horas
	21/10	25°C	164	10h – 17h	7 horas
	11/11	33°C	746	6h -17h	11 horas
	30/11	23°C	204	9h – 17h	8 horas
	30/12	30°C	719	6h – 18h	12 horas
	03/12	28°C	172	8h – 16h	8 horas

**Fonte: Autoria própria (2022)**

De acordo com a Tabela 12, percebe-se que as datas pertencentes ao verão e primavera tendem a ter um maior tempo de funcionamento do inversor, devido ao clima presente nestas estações do ano e durações dos seus dias. Em geral, nas datas selecionadas, o inversor apresenta um bom tempo de funcionamento, com exceção dos dias 28 de abril (outono) e 29 de setembro (inverno), que mesmo não tendo uma temperatura muito baixa, apresentaram apenas 3 horas de funcionamento do inversor solar no dia, devido à baixa irradiação solar registrada. Vale destacar, que geralmente, um dia de verão ou primavera com condições meteorológicas não favoráveis, o inversor apresentará um tempo de funcionamento maior que um dia de outono ou inverno com condições meteorológicas favoráveis, com uma ou outra exceção.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho analisou a influência das condições meteorológicas da cidade de Medianeira-PR sobre o arranjo fotovoltaico que alimenta um inversor projetado. Foi levado em consideração um sistema composto por cinco painéis fotovoltaicos ligados em série.

Foram utilizados dados de irradiação e temperatura para dois dias de cada mês, o dia com maior e menor incidência de irradiação solar registrado no mesmo mês. A partir desses dados foi possível analisar e verificar a influência da temperatura e irradiação solar sobre os valores de operação do inversor.

Para se obter os valores de operação do inversor, foi preciso traçar as curvas características do painel fotovoltaico modelo CS3W-450MS da Canadian utilizando os dados meteorológicos de acordo com o software PVsyst.

Através dos valores de operações obtidos foi possível determinar o tempo de funcionamento do inversor solar para todas as datas citadas na Tabela 3.

Notou-se que a irradiação solar é a condição meteorológica de maior influência para o funcionamento do inversor, pois independente da temperatura, sempre ocorrerá uma boa operação do inversor se houver bastante irradiação.

Vale ressaltar que os valores de operação obtidos e analisados, são para o inversor solar projetado, para a quantidade de painéis fotovoltaicos utilizados, a forma como estão ligados e para a região de Medianeira-PR. A alteração em qualquer um desses itens acarretará em valores diferentes aos apresentados no trabalho.

### 6.1 Sugestões para trabalhos futuros

A partir deste trabalho podem ser realizados outros estudos, havendo de se considerar como propostas:

- Testar outras topologias de inversores;
- Fazer a análise para outras localidades no Brasil;
- Considerar mais *strings* ou tipo de ligação diferente entre os módulos;
- Utilizar outros modelos de painéis, com potência de operação diferente.

## REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. **Infográfico ABSOLAR. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica**. 2021. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687, DE 24 DE NOVEMBRO DE 2015. Agência Nacional de Energia Elétrica**. 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2021.
- ARAÚJO, S. V.; ZACHARIAS, P.; MALLWITZ, R. Highly efficient single-phase transformerless inverters for grid-connected photovoltaic systems. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 57, n. 9, p. 3118–3128, 2009.
- BÜHLER, A. J. **Determinação de parâmetros fotovoltaicos a partir de ensaios de curvas características sem iluminação**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.
- CANADIAN. **Canadian Solar - Brazil**, 2022. Disponível em: <https://www.canadiansolar.com/br/>. Acesso em: 10 set. 2022
- CASTRO, R. M. Introdução à energia fotovoltaica. **DEEC/Seção de Energia Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico**, 2002.
- CRESESB. **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica**. 2018. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>. Acesso em: 17 nov. 2021.
- EPE, NOTA TÉCNICA. Análise da inserção da geração solar na matriz elétrica brasileira. **Nota Técnica da EPE, Rio de Janeiro**, p. 25, 2012.
- FERNANDES, J. T. d. C. T. **Problemas de controlo e exploração de grandes unidades de produção solar e fotovoltaica**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- FREITAS, S. S. A. **Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos**. Tese (Doutorado) - Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, 2008.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Grupo de trabalho de energia solar-GTES. CEPEL-DTE-CRESESB, 2014.
- GASPARIN, F. P. **Desenvolvimento de um traçador de curvas características de Módulos Fotovoltaicos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.
- GRAY, J. L. The Physics of the Solar Cell. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. p. 61-112, 2003.
- HEGEDUS, S. S.; LUQUE, A. Status, Trends, Challenges and the Bright Future of Solar Electricity from Photovoltaics. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. p. 1-43, 2003.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M. **Energia e meio ambiente**. Cengage Learning Editores, 2003.

IRENA. **International Renewable Energy Agency**. 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Country-Rankings>. Acesso em: 23 nov. 2021.

MARANGONI, F. **Inversores monofásicos para conexão de sistemas fotovoltaicos à rede**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.

MARTIN, E. C.; AGUILERA, M.Á. E. **Edifícios fotovoltaicos conectados a la red eléctrica: características y posibilidades energéticas**. Dissertação (Mestrado) - Universidad Politécnica de Madrid, 2005.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 1. ed. São José dos Campos: INPE, 2006. Disponível em: <http://labren.ccst.inpe.br/atlas2006.html>. Acesso em: 23 out. 2021.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: <http://labren.ccst.inpe.br/atlas2017.html>. Acesso em: 29 set. 2021.

PEREIRA, F.; OLIVEIRA, M. **Curso Técnico Instalador de Energia Solar Fotovoltaica**. Porto: Publindústria, 2015.

PEREIRA, O. L.; GONÇALVES, F. F. Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: Estudo de caso do sistema de Tubarão-SC. **Revista Brasileira de Energia**, v. 14, n. 1, p. 25-45, 2008.

PESTANA, L. I. A. **Estudo do recurso solar fotovoltaico: Previsão e dimensionamento de um parque fotovoltaico de média potência**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2017.

PVSYST. **PVsyst - Logiciel Photovoltaïque**, 2022. Disponível em: <https://www.pvsyst.com/>. Acesso em: 28 ago. 2022

RAUSCHENBACH, H. S. **Solar Cell Array Design Handbook: The Principles and Technology of Photovoltaic Energy Conversion**. Springer Science & Business Media, 2012.

REIS, P. **Como saber a inclinação do painel solar fotovoltaico?** 2018. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/como-saber-inclinacao-painel-solar-fotovoltaico/>. Acesso em: 29 out. 2021.

RUTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Editora UFSC, 2004.

SEVERINO, M. M. **Avaliação Técnico-Econômica de um Sistema Híbrido de Geração Distribuída Para Atendimento a Comunidades Isoladas da Amazônia, PPGENE. TD 027/08**. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, 2008.

SHAYANI, R. A. **Método para determinação do limite de penetração da geração distribuída fotovoltaica em redes radiais de distribuição**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, 2010.

SIQUEIRA, N. **Como Funciona a Energia Solar?** 2019. Disponível em: <https://fotonengenharia.com/como-funciona-a-energia-solar/>. Acesso em: 03 nov. de 2021.

VALENTE, M. Â. S. **Caracterização automática de um painel fotovoltaico**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Nova de Lisboa, 2011.

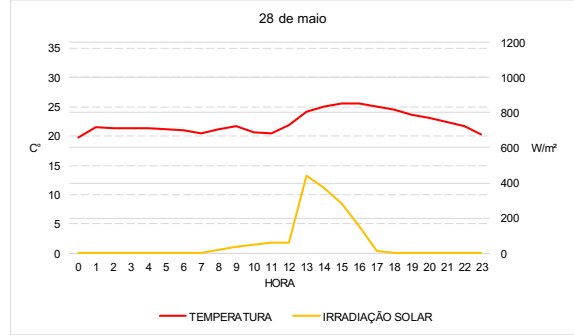
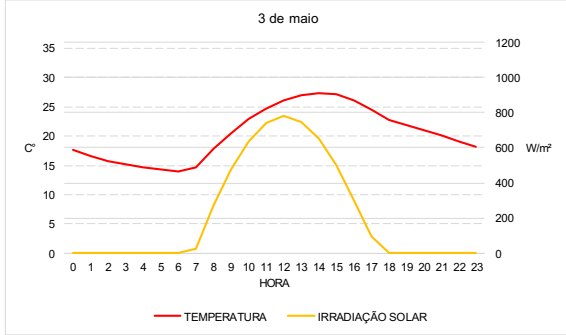
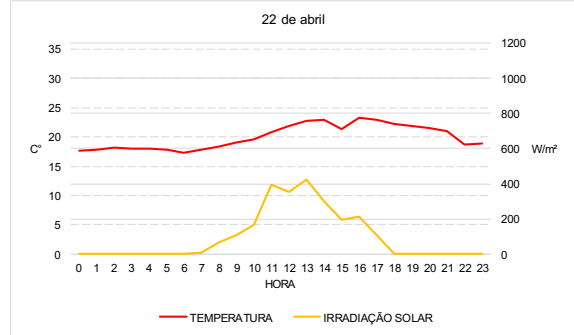
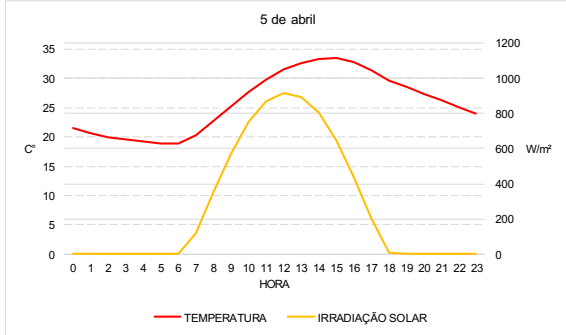
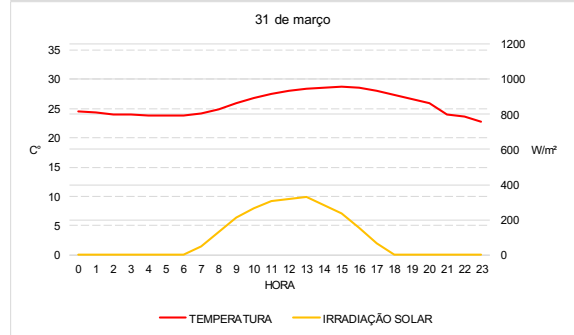
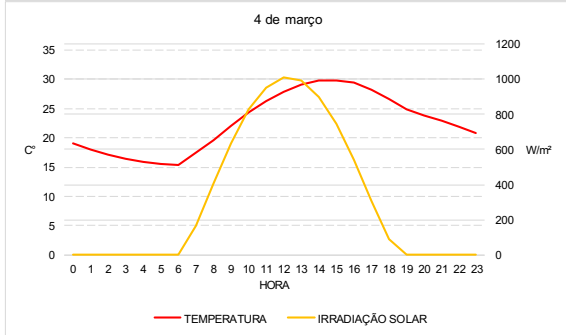
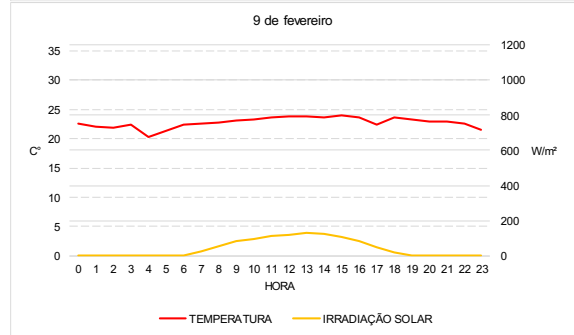
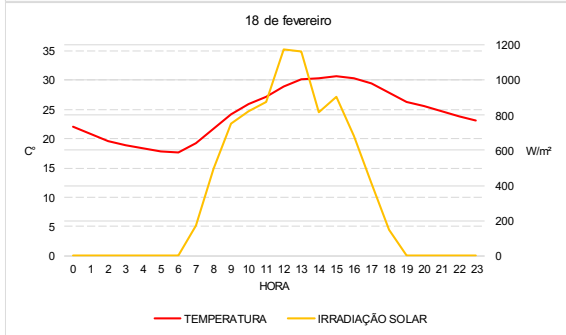
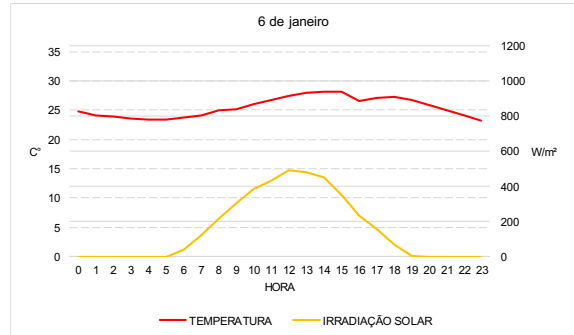
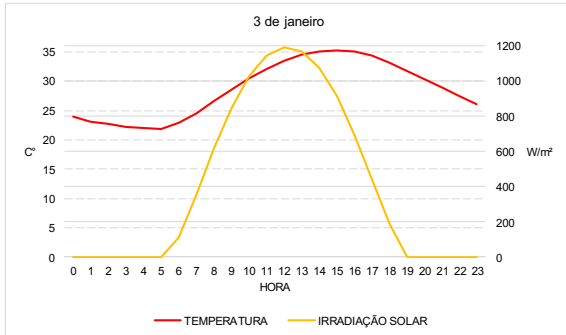
VIAN, et al. **Energia Solar: Fundamentos Tecnologia e Aplicações**. Editora Blucher, 2021.

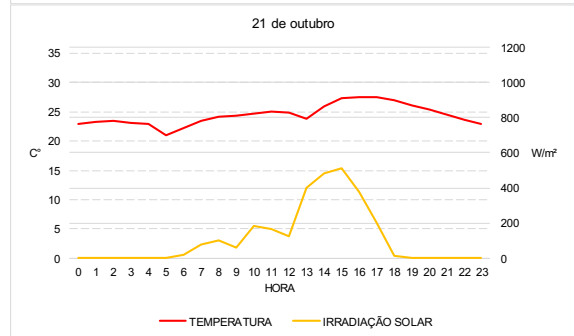
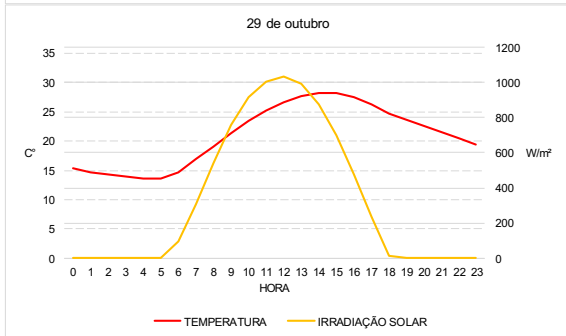
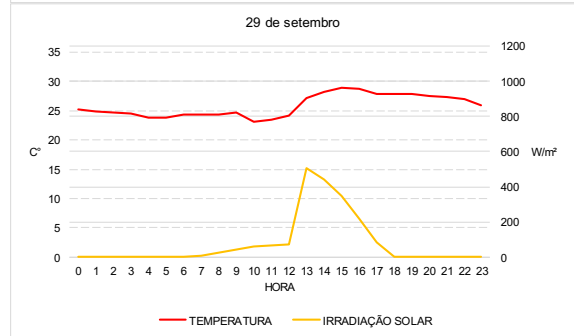
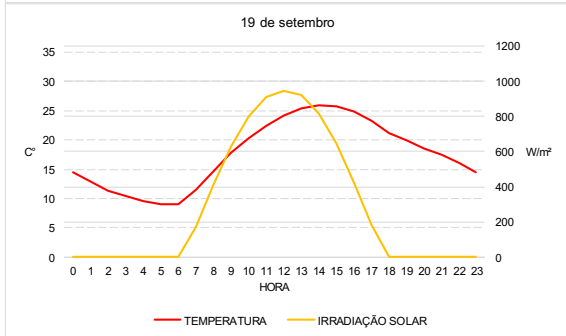
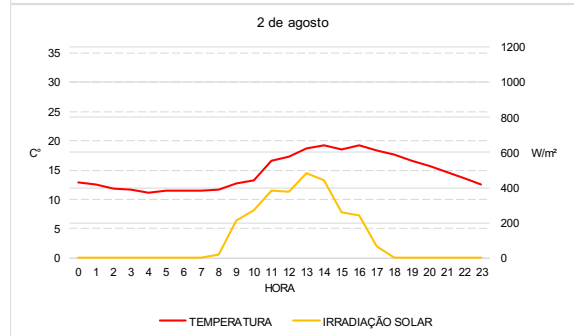
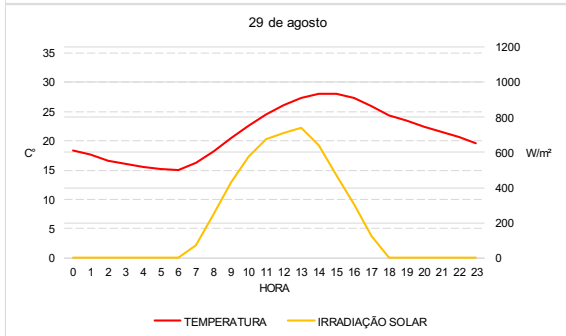
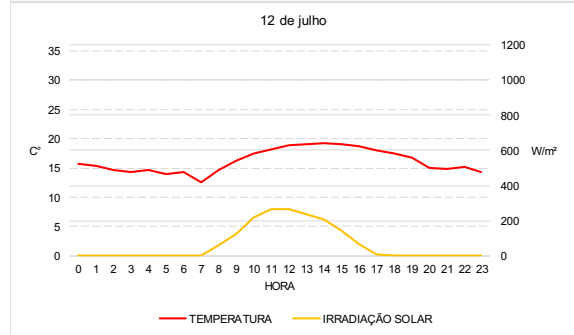
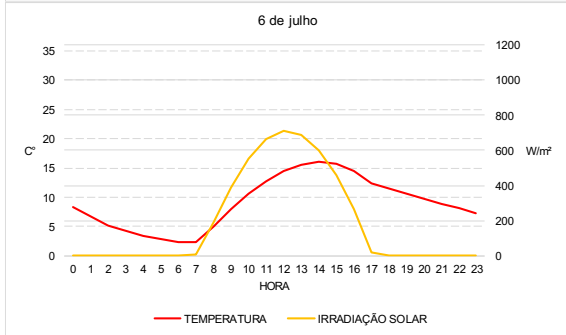
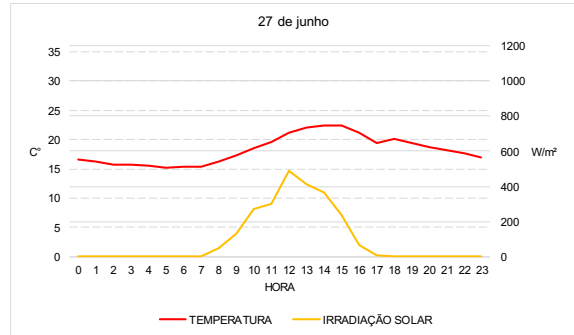
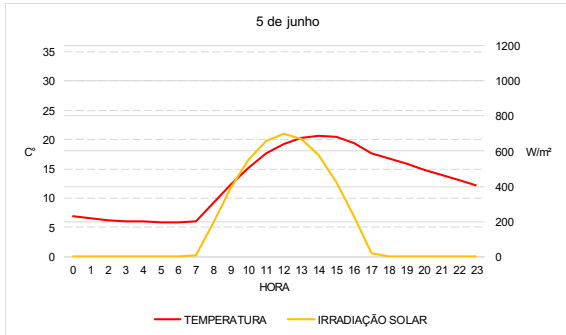
VILLALVA, M. G. **Energia solar fotovoltaica: Conceitos e aplicações**. São Paulo: Érica, v. 2, 2012.

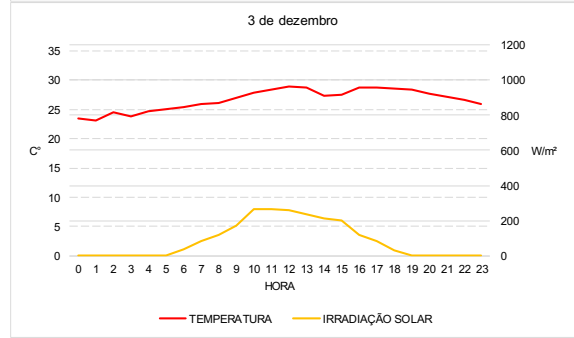
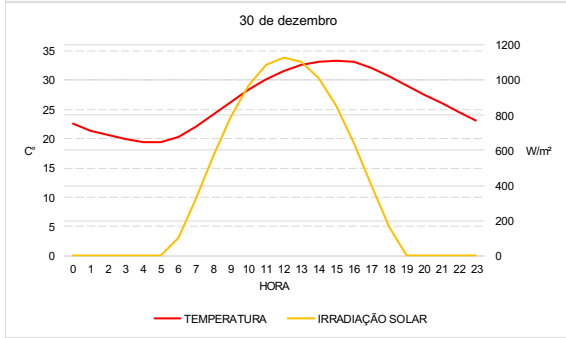
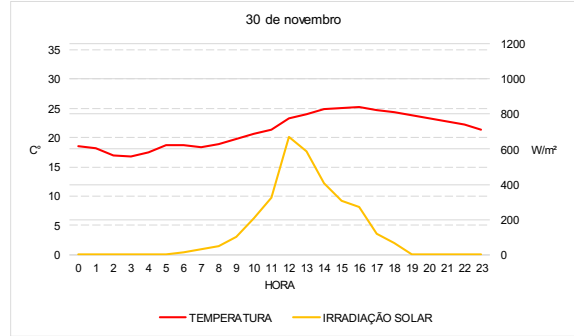
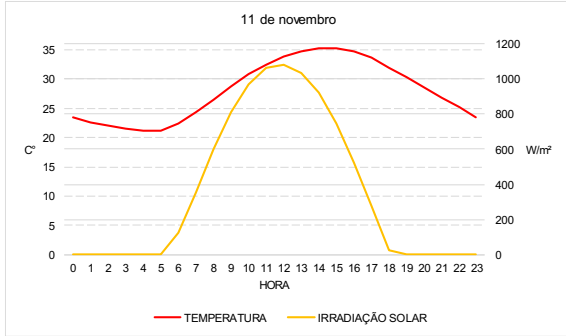
VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. **IEEE Transactions on power electronics**, IEEE, v. 24, n. 5, p. 1198–1208, 2009.

ZILLES, R. et al. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. 1ª edição. ed. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2012.

## **APÊNDICE A - Gráficos de temperatura e irradiação por hora**









**APÊNDICE B - Curvas características do painel ( $I - V$  e  $P - V$ )**

