



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA - FEE

DANIEL AVIZ GOMES

**ANÁLISE DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO COM BASE EM DADOS DE
ENTRADA E UTILIZAÇÃO DO *SOFTWARE PV_{syst}*®**

TUCURUÍ

2023

DANIEL AVIZ GOMES

**ANÁLISE DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO COM BASE EM DADOS DE
ENTRADA E UTILIZAÇÃO DO *SOFTWARE PVsyst*®**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia
Elétrica, do Campus Universitário de
Tucuruí, da Universidade Federal do
Pará, como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia
Elétrica.

Orientador(a): Dra. Andrécia Pereira da
Costa

Coorientador(a): Ma. Juliete da Silva
Souza

TUCURUÍ

2023

DANIEL AVIZ GOMES


**ANÁLISE DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO COM BASE EM DADOS DE
ENTRADA E UTILIZAÇÃO DO *SOFTWARE PV_{system}*®**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.


Data da aprovação: 20/07/2023

Conceito: Excelente


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 ANDRECIA PEREIRA DA COSTA
Data: 20/07/2023 12:48:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador (a)
Dra. Andrécia Pereira da Costa – UFPA

Documento assinado digitalmente
 JULIETE DA SILVA SOUZA
Data: 20/07/2023 15:12:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coorientador (a)
Me. Juliete da Silva Souza – UFCG

Documento assinado digitalmente
 WASHINGTON CESAR BRAGA DE SOUSA
Data: 02/08/2023 08:23:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador(a) interno
Dr. Washington César Braga de Sousa – UFPA

LUIS OTAVIO DE SOUSA Assinado de forma digital por LUIS
FURTADO:0114431329 OTAVIO DE SOUSA
5 FURTADO:01144313295
Dados: 2023.07.24 15:21:11 -03'00'

Examinador(a) externo
Eng. Luís Otávio de Sousa Furtado – Pará Solar Engenharia

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

A957a Aviz Gomes, Daniel.
ANÁLISE DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO COM BASE
EM DADOS DE ENTRADA E UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE
PVsyst® / Daniel Aviz Gomes. — 2023.
62 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^ª. Dra. Andrécia Pereira da Costa
Coorientador(a): Prof^ª. MSc. Juliete da Silva Souza
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de
Engenharia Elétrica, Tucuruí, 2023.

1. Simulação PVsyst. 2. Geração de Energia Fotovoltaica .
3. Sistema Fotovoltaico. I. Título.

CDD 621.31244

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de guiar-me nesta jornada de graduação em que os incentivos fizeram parte dos meus esforços para a conclusão do curso de Engenharia Elétrica. Gostaria de tecer um especial agradecimento aos meus pais que estiveram comigo nos momentos mais difíceis nas quais estive que me ausentar para manter o foco nos estudos.

À minha orientadora Andrécia da Costa, vice-diretora do curso de Engenharia Elétrica, esteve muito presente bem antes da finalização deste curso, apresentando uma forma de estudo que espelha a real forma de uma elaboração e apresentação de um trabalho de conclusão de curso. À minha coorientadora Juliete da Silva que mesmo distante, sempre esteve disponível a ajudá-lo. Ao Engenheiro Luís Otávio responsável pela empresa Pará Solar, me ajudou bastante na elaboração deste trabalho.

Ao meu filho Henry Miguel que mesmo distante incentivou-me para que eu pudesse manter o foco nos estudos. A ausência de poder abraçá-lo fez com que todos os dias eu me levantasse cedo para estudar.

Aos meus professores da faculdade que sempre estiveram disponíveis para que os alunos pudessem tirar suas dúvidas, sempre inspirando a comunidade acadêmica e repassando o ensino de boa qualidade que UFPA oferece.

Aos avaliadores da banca examinadora Dr. Washington César Braga de Souza e o Eng. Luís Otávio de Sousa Furtado que colaboraram com seus conhecimentos expondo seus pontos de vista e instigando o discente o aprofundamento no assunto.

Aos meus amigos do curso que estiveram comigo durante esses cinco anos, em que expressamos nossas alegrias, opiniões e momentos de lazer. Mateus gama, Alessandro, Francisco, Cáscio Batista, Davi Melo, Eduardo, Jaciane, Gilzi, Camila e todas as outras pessoas da minha turma como de outras faculdades, gratidão!! E a todos que estiveram comigo nesta caminhada árdua de desenvolvimento do conhecimento; familiares, amigos e professores.

RESUMO

Este trabalho propõe uma análise comparativa de um sistema fotovoltaico interligado à rede de distribuição pública, com o uso do *software PVsyst®*, programa utilizado por engenheiros para dimensionamentos de sistemas fotovoltaicos. O intuito é analisar a geração de energia estimada pelo *software* com os dados reais do projeto, isto é, a energia que realmente foi gerada. É feita uma comparação que destaca os principais parâmetros do projeto, como por exemplo, eficiência, geração e perdas. Este trabalho é dividido em duas etapas, a primeira etapa é feita a coleta de dados referente ao local do projeto, por exemplo, dados geográficos, irradiância, produção de energia e informações dos equipamentos utilizados. Para a segunda etapa é realizado a simulação através do programa *PVsyst®* de acordo com os dados de entrada. Neste programa, os principais módulos utilizados para alocação das informações foram: orientação e variantes do sistema. Após realizado a verificação, concluiu-se que os dois métodos, tanto do dimensionamento real quanto da simulação convergem para a mesma solução. A edificação na qual realizou-se o estudo possui a geração de energia anual de aproximadamente 28.850 kWh, toda a energia gerada não é destinada para o local e sim para alimentar quatro Unidades Consumidoras (UCs) remotamente. Portanto estas análises permitem inferir que é possível obter considerável retorno (*pay back*) como retorno financeiro e ecológico, além de colaborar com a preservação dos recursos naturais.

Palavras-Chave: Geração de Energia. Simulação *PVsyst®*. Sistema Fotovoltaico.

ABSTRACT

This work proposes a comparative analysis of a photovoltaic system interconnected to the public distribution network, using the PVsyst® software, a program used by engineers for sizing photovoltaic systems. The aim is to analyze the energy generation estimated by the software with the actual project data, that is, the energy that was actually generated. A comparison is made that highlights the main parameters of the project, such as efficiency, generation and losses. This work is divided into two stages, the first stage is the collection of data related to the project site, for example, geographic data, irradiance, energy production and information on the equipment used. For the second stage, the simulation is carried out using the PVsyst® program according to the input data. In this program, the main modules used to allocate information were: guidance and system variants. After carrying out the verification, it was concluded that the two methods, both the real dimensioning and the simulation converge to the same solution. The building in which the study was carried out has an annual energy generation of approximately 28,850 kWh, all the energy generated is not intended for the site, but to feed four Consumer Units (CUs) remotely. Therefore, these analyzes allow us to infer that it is possible to obtain a considerable return (pay back) as a financial and ecological return, in addition to collaborating with the preservation of natural resources.

Keywords: Power generation. PVsyst® simulation. Photovoltaic System.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 -	Matriz energética brasileira.....	18
Figura 2 -	Fontes de energia renovável da matriz elétrica brasileira.....	19
Figura 3 -	Ilustração de um sistema de aquecimento de água	20
Figura 4 -	Ilustração de usina de energia heliotérmica.....	21
Figura 5 -	Representação dos níveis de energia dos elétrons.....	22
Figura 6 -	Representação do efeito fotovoltaico.....	23
Figura 7 -	Célula fotovoltaica utilizada na fabricação de módulos.....	24
Figura 8 -	Avanço tecnológico das células fotovoltaicas.....	24
Figura 9 -	Módulo policristalino convencional.....	25
Figura 10 -	Módulo monocristalino convencional.....	26
Figura 11 -	Passagem de corrente elétrica no módulo <i>half cell</i>	27
Figura 12 -	Sequência de formação do arranjo fotovoltaico por células.....	28
Figura 13 -	Ligação dos módulos em série.....	28
Figura 14 -	Curva característica I×V com módulos em paralelo.....	29
Figura 15 -	Esquema de um sistema fotovoltaico <i>On-grid</i>	31
Figura 16 -	Sistema fotovoltaico autônomo com armazenamento.....	32
Figura 17 -	Diagrama de um sistema híbrido.....	33
Figura 18 -	Curva característica Tensão×Corrente com a variação da irradiância.....	34
Figura 19 -	Curva característica Tensão×Corrente com a variação de temperatura.....	35
Figura 20 -	Valores equivalentes de HSP em função do tempo meteorológico.....	36
Figura 21 -	Percentual de eficiência dos módulos.....	37
Figura 22 -	Vista lateral do local da instalação.....	39
Figura 23 -	Local da instalação vista superior.....	40

Figura 24 -	Disposição dos módulos fotovoltaicos.....	41
Figura 25 -	Irradiação no plano horizontal na região de Capanema-PA.....	43
Figura 26 -	Dados meteorológicos da cidade de Capanema-PA.....	44
Figura 27 -	Módulo policristalino <i>half-cell</i> da marca <i>BYD</i>	46
Figura 28 -	Inversor <i>Fronius Symo 15.0-3-M</i>	48
Figura 29 -	<i>Layout</i> do software <i>PVsyst®</i>	49
Figura 30 -	Bloco de informações dos dados do projeto.....	50
Figura 31 -	Bloco de informações das variantes do sistema.....	50
Figura 32 -	<i>Database</i> : dados meteorológicos e componentes do sistema.....	51
Figura 33 -	Informações da variante: orientação.....	52
Figura 34 -	Informações da variante: sistema em rede.....	53
Figura 35 -	Parâmetros de simulação.....	54
Figura 36 -	Resultados principais	55
Figura 37 -	Diagrama de perdas	56
Figura 38 -	Mapeamento da produção de energia em 2021.....	58
Figura 39 -	Comparação entre os dados medidos e simulados.....	58

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 -	Dados de irradiação solar diária média no mês (kWh/m ² .dia).....	40
Quadro 2 -	Dados geográficos de Capanema-PA.....	41
Quadro 3 -	Produção de energia elétrica mensal em 2021 (kWh).....	42
Quadro 4 -	Informações do módulo fotovoltaico.....	45
Quadro 5 -	Informações do Inversor utilizado.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
DPS	Dispositivos de Proteção contra Surtos
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EVA	<i>Ethylene Vinyl Acetate</i>
HSP	Horas de Sol Pico
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
MPPT	<i>Maximum power point tracking</i>
NOCT	<i>Normal Operation Cell Temperature</i>
PERC	<i>Passivated Emitter Rear Cell</i>
PR	<i>Performace Ratio</i>
STC	<i>Stardard Test Conditions</i>
I_{sc}	Corrente de curto-circuito
kWh	Kilo Watt Hora
KWp	Kilowatt Pico
MWh	Mega Watt Hora
$P_{m\acute{a}x}$	Potência máxima
P_{nom}	Potência nominal do módulo
PV	<i>Photovoltaic</i>
Wp	Watt Pico
η	Rendimento

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
®	Símbolo de marca registrada INPI

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
	1.1 Justificativa	14
	1.1.1 Objetivo geral	15
	1.1.2 Objetivos específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
	2.1 Fontes de geração de energia	16
	2.1.1 Fontes de geração convencional	16
	2.1.2 Fontes de geração renováveis	17
	2.2 Uso de fontes fósseis e renováveis: Cenário Brasileiro	17
	2.3 Energia Solar	19
	2.3.1 Energia Solar Térmica	19
	2.3.1.1 Coletores solares	20
	2.3.1.2 Concentradores solares	20
	2.4 Energia solar fotovoltaica	21
	2.5 Tecnologia das células	23
	2.6 Tecnologia dos módulos	24
	2.6.1 Módulos fotovoltaicos do tipo policristalino	25
	2.6.2 Módulos fotovoltaicos do tipo monocristalino	26
	2.6.3 Tipos de ligação elétrica dos módulos fotovoltaicos	27
	2.7 Sistema Fotovoltaico	30
	2.7.1 Sistemas fotovoltaicos On grid	30
	2.7.2 Sistemas fotovoltaicos Off grid	31
	2.7.2.1 Autônomos sem armazenamento	31
	2.7.2.2 Autônomos com armazenamento	32
	2.7.3 Sistemas híbridos	32

2.8 Características operacionais dos módulos fotovoltaicos	33
2.8.1 Temperatura	33
2.8.2 Eficiência	35
3 METODOLOGIA	38
4 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO INSTALADO	39
4.1 Local da instalação do sistema	39
4.2 Análise prática	41
4.3 Produção de energia	42
4.4 Descrição dos dispositivos do sistema fotovoltaico	44
4.4.1 Módulos	45
4.4.2 Inversor	46
4.5 Parâmetros elétricos	48
4.6 Análise do <i>Software PVSyst</i>®	48
5 RESULTADOS	54
5.1 Parâmetros de simulação	54
5.2 Resultados principais	55
5.3 Diagrama de perdas	56
5.4 Resultado da geração de energia em 2021	57
6 CONCLUSÃO	69
7 REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de se buscar fontes de energia altamente renováveis, tornou-se uma prioridade no mundo atual devido à grande aceleração de poluição mundial, o que fez com muitos cientistas buscassem soluções que amenizassem o uso de energia não renovável. O petróleo ainda continua sendo a principal fonte de energia mais utilizada no mundo e se perdurará até as próximas décadas. Para amenizar o uso desta energia não renovável, as fontes renováveis são introduzidas com o intuito de reduzir os efeitos provocados por fontes convencionais. A exemplo disso, tem-se as usinas de energia solar fotovoltaica, utilizadas em regiões expostas à irradiação solar em intensidades adequadas. Este sistema traz consigo um material semicondutor frequentemente usada na fabricação de módulos; o silício.

As buscas por fontes renováveis é um caminho para a sustentabilidade que precisa de responsabilidade da sociedade, nos últimos anos as pessoas buscaram formas de redução no uso de fontes de energia convencionais, porém estas fontes ainda continuam sendo muito utilizadas devido ao seu alto poder econômico, gerando muitos impactos ambientais. As energias renováveis vem sendo uma estratégia de diversificar a matriz energética e elétrica do mundo com o objetivo de mitigar o uso de fontes convencionais.

Atualmente a energia solar fotovoltaica é uma das fontes renováveis utilizada para várias finalidades, por exemplo, em projetos residenciais e industriais, usinas de geração centralizada, fornecimento de energia para localidades remotas para abatimento em contas de energia, dentre outras, promovendo sustentabilidade e equilíbrio dos recursos naturais.

1.1 Justificativa

Este trabalho propõe o incentivo no uso de uma ferramenta computacional para a realização de projetos fotovoltaicos. Dentre os mais variados *softwares* existentes, foi escolhido para a realização de simulações e análises deste trabalho, o *PVsyst®*. Este *software* apresenta resultados na forma de gráficos, tabelas, relatórios e até dados que podem ser extraídos para serem utilizados em outros *softwares*. Análises computacionais são de fundamental importância para dimensionamentos de equipamentos em sistemas solares, pois facilita as etapas de um bom projeto. Um futuro prosumidor, por exemplo, poderá analisar se aquele sistema, na qual deseja implementar, atenderá suas necessidades como economia, investimento inicial e geração de energia ao longo do ano.

1.1.1 Objetivo Geral

Análise real de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de distribuição utilizando o *software PVsyst*®.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Análise de perdas no sistema fotovoltaico;
- Verificação do índice de irradiância local;
- Comparação e validação dos resultados simulados e medidos;
- Demonstração das vantagens de um sistema de geração de energia fotovoltaica conectada à rede elétrica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fontes de Geração de Energia

Existem hoje diversos tipos de fontes de energia. Podem ser classificadas em dois tipos: renováveis (inesgotáveis) e convencionais (esgotáveis). Por exemplo, a energia hidráulica e a solar fotovoltaica fazem parte das fontes de energia que possuem uma rápida recuperação na natureza. A água e o sol, por exemplo, são fontes que têm durabilidade de milhões de anos e conta com recursos disponíveis a longo prazo. Por outro lado, os combustíveis fósseis (derivados do petróleo e do carvão mineral) possuem uma quantidade limitada no planeta, podendo acabar caso não haja um consumo racional (LAVEZZO, 2016).

É consenso que, o desenvolvimento energético trouxe para o mundo atual um custo ambiental relativamente alto. Após séculos de emissão de gases tóxicos à atmosfera, como por exemplo os causadores do efeito estufa provocados pelas degradações de grandes extensões de terras e poluição de importantes mananciais de água; vê-se atualmente, um ainda tímido movimento de grupos de indivíduos preocupados com a questão ambiental. Na realidade, isto tem relação com a própria sobrevivência humana, tendo em vista a grande ameaça de esgotamento de recursos naturais importantes que podem colocar a vida humana em questão (LAVEZZO, 2016, p. 6).

As fontes renováveis, são aquelas em que a sua utilização e uso é inteiramente renovável e pode-se manter e ser aproveitado ao longo do tempo sem possibilidade de esgotamento dessa mesma fonte, exemplos deste tipo de fonte são a energia eólica e solar. Por outro lado, as fontes de energias não renováveis têm recursos teoricamente limitados, sendo que esse limite depende dos recursos existentes no planeta, como é o exemplo dos combustíveis fósseis. Diversos países estão investindo em projetos para a utilização de energia renovável (REIS, 2022).

2.1.1 Fontes de Geração Convencional

A energia convencional pode ser entendida como fontes de origem fóssil, isto é, são fontes que não se regeneram rapidamente na natureza. Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE) os combustíveis fósseis respondem por mais de 80% do fornecimento total de energia mundial. Porém, o uso dessas fontes não renováveis, como o petróleo que levou milhões

de anos até sua formação, ocasiona um desenfreado crescimento de emissões de gases do efeito estufa, desenvolvendo um itinerário insustentável e de crise energética.

O petróleo possui um rendimento energético elevado, apresenta poucas perdas de energia no processo de transformação, fazendo com que se torne o recurso mais utilizado no mundo. A energia não renovável conta com uma infraestrutura sólida para geração e distribuição como usinas, dutos, ferrovias e rodovias (EPE, 2021).

Algumas fontes não renováveis de energia, como o petróleo e o carvão mineral, são responsáveis por grande parte da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, visto que estas fontes são combustíveis (precisam ser queimadas para gerar energia) e liberam gases poluentes, que impactam a saúde e o meio ambiente (EPE, 2021).

2.1.2 Fontes de Geração Renováveis

As fontes de energia renováveis são consideradas inesgotáveis, porque utilizam recursos que, em escala de tempo geológica, é passiva de acabar. São exemplos de fontes renováveis: hidráulica, solar, biomassa, eólica, geotérmica, oceânica, dentre outras (LAVEZZO, 2016).

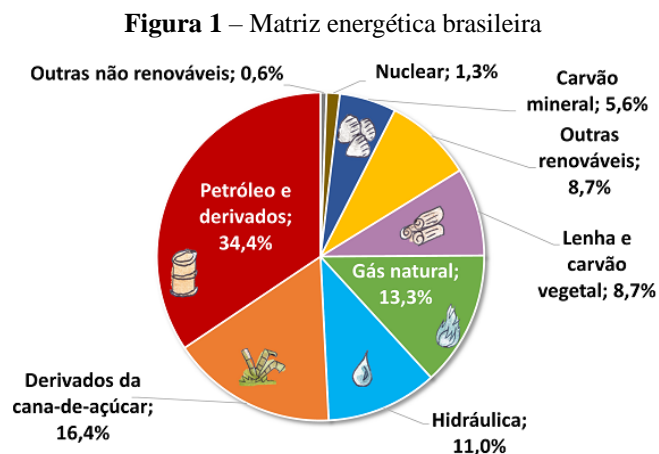
Algumas dessas fontes renováveis apresentam variações na geração de energia elétrica ao longo do tempo, No caso da eólica, quando não há ventos não se tem movimentos contínuos das grandes hélices. Outro exemplo é a solar fotovoltaica em que nos dias nublados interfere diretamente na irradiância incidente direta. Nas hidrelétricas, em períodos de seca, o potencial da água quando represada, diminui; Havendo a necessidade dos alertas. (EPE, 2021).

Segundo Silva (2022, p. 20), em virtude do considerável crescimento da demanda de energia elétrica e a busca pelo uso de fontes de energias substitutas às não renováveis para geração de energia elétrica, a geração fotovoltaica ganha destaque pela sua grande expansão mundial.

2.2 Uso de fontes fósseis e renováveis: Cenário Brasileiro

O uso de fontes fósseis e renováveis, explicado pela matriz energética, é o conjunto de fontes de geração de energia utilizadas para atender a diferentes localidades, segundo o Balanço Energético de 2022. Atualmente as fontes de energia renovável da matriz energética Brasileira apresenta discrepâncias em relação a mundial. Somando a lenha, carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana e outras renováveis, totalizam 44,8%. As fontes renováveis utilizadas no

mundo somam 15%, ou seja, quase o triplo de diferença (EPE, 2022). Pode ser visualizado na Figura 1 o atual cenário da matriz energética brasileira. Percebe-se que o petróleo e derivados constitui a principal fonte de energia mais utilizada com 34,4%. As fontes utilizadas para suprir a demanda Brasileira são representadas na matriz energética vistas na Figura 1.



Fonte: Balanço Energético (2022).

O conceito de matriz elétrica pode ser considerado como uma parte da matriz energética, que se refere especificamente às fontes de energia utilizadas para a produção de energia elétrica. No Brasil, essa matriz é dominada pela geração hidrelétrica, que é responsável por mais de 50% da capacidade instalada do país. Além disso, também há usinas termelétricas (movidas a carvão mineral, gás natural, óleo combustível, biomassa, entre outros) e usinas eólicas e solares (RAÍZEN, 2023).

As fontes renováveis foram responsáveis por um crescimento de mais de 3 gigawatts (GW) referentes a matriz elétrica brasileira até abril de 2023. Segundo dados divulgados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), nos quatro primeiros meses de 2023 a capacidade instalada foi de 3.343,1 megawatts (MW). Desse total, 49,15% vieram de usinas eólicas, responsáveis por 1.643 MW, e 37,19%, de solares fotovoltaicas, encarregadas por 1.243,4 MW (ANEEL, 2023).

As fontes renováveis da Matriz Elétrica Brasileira podem ser visualizadas na Figura 2. Pode-se perceber que mais da metade das informações fornecidas predomina a fonte de origem hidráulica. Das fontes não renováveis utilizadas para geração de eletricidade correspondem a 16,36%, como o carvão mineral, gás natural e petróleo (ANEEL, 2023).

Figura 2 – Fontes de energia renovável da matriz elétrica brasileira

Biomassa 	Quantidade	Potência (kW)	%
	629	16.627.221,05	8,58%
Hídrica 	Quantidade	Potência(kW)	%
	1.349	109.826.521,00	56,66%
Solar 	Quantidade	Potência(kW)	%
	18 Mil	9.637.505,27	4,97%
Eólica 	Quantidade	Potência(kW)	%
	935	26.038.023,86	13,43%
Undi-elétrica 	Quantidade	Potência(kW)	%
	(Em branco)	(Em branco)	(Em branco)

Fonte: Adaptado ANEEL (2023).

2.3 Energia Solar

2.3.1 Energia Solar Térmica

A energia solar térmica é um tipo de fonte de energia renovável que pode ser utilizada para várias finalidades. O aproveitamento da energia luminosa, permite o aquecimento de água, secagem de produtos e produção de energia através de processo termodinâmico. Neste caso, a produção de eletricidade a partir de energia solar também pode ser feita por conversão térmica (PEREIRA, 2010).

Nos processos de geração de energia térmica, são utilizados sistemas que concentram a radiação solar nos dispositivos absorvedores para que esse processo de transformação seja realizado. A utilização desta forma de energia implica saber captá-la e armazená-la. O nível de desenvolvimento dos equipamentos e componentes, tanto em relação aos coletores como os outros elementos que constituem o sistema, tem sido grandioso nos últimos anos (PEREIRA, 2010).

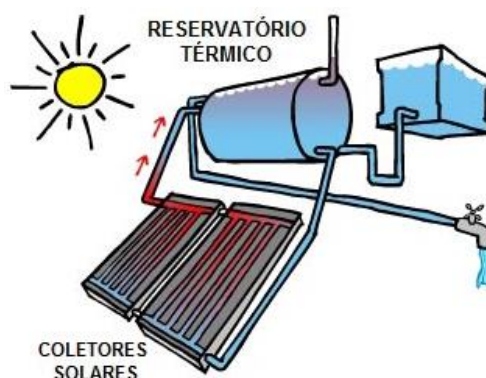
A conversão térmica da energia solar pode ser feita utilizando diversas escalas de temperatura, desde as temperaturas mais baixas até as temperaturas mais altas, sendo que essa captação e transformação de energia pode ser feita por coletores ou concentradores solares.

2.3.1.1 Coletores solares

A irradiação solar pode ser absorvida por coletores solares, principalmente para aquecimento de água, a temperaturas relativamente baixas (inferiores a 100°C). O uso dessa tecnologia ocorre predominantemente no setor residencial, mas há demanda significativa e aplicações em outros setores, como edifícios públicos e comerciais, hospitais, restaurantes, hotéis e similares (BELVAL, 2015).

Um exemplo de coletor solar utilizado no processo de aquecimento de água é mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Ilustração de um sistema de aquecimento de água

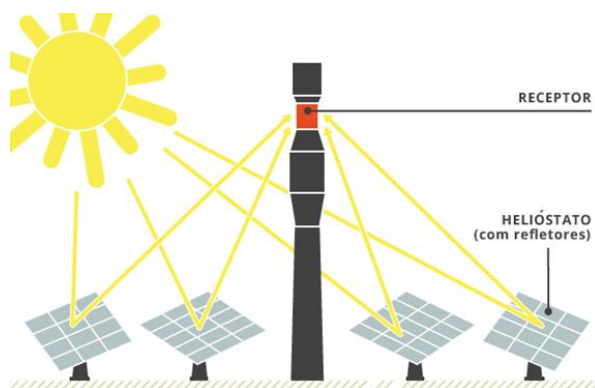


Fonte: Resize (2022) .

2.3.1.2 Concentradores solares

O aproveitamento da energia solar quando aplicado a sistemas que requerem temperaturas mais elevadas pode ocorrer por meio dos dispositivos chamados de concentradores solares. Os concentradores são capazes de captar a irradiância incidente em áreas de grandes dimensões de forma que essa energia seja concentrada em um único ponto através da reflexão dos dispositivos utilizados no sistema, os espelhos. A superfície refletora dos concentradores normalmente tem forma parabólica ou esférica, mas também pode ser encontrada em formatos planos (SILVA, dias, 2020). Um exemplo de uma usina heliotérmica com heliostatos do tipo plano, concentrando a energia no receptor é mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Ilustração de usina de energia héliotérmica



Fonte: Portal Solar (2022).

2.4 Energia Solar Fotovoltaica

A busca por uma alternativa energética sustentável a longo prazo vem despertando interesse em formas de energias limpas e renováveis, de modo a satisfazer as necessidades energéticas e sem ocasionar grandes mudanças para o planeta. Para a resolução dessa questão, é que se insere a energia fotovoltaica, a qual se trata da forma de energia gerada a partir da luz solar e pode ser vista com variadas vantagens sobre as formas de geração tradicional (BORGES, 2012 apud PASSOS, 2021).

Após se passar décadas, em 1873, Willoughby Smith, um engenheiro eletricista britânico, percebeu que propriedade fotocondutiva estava presente no selênio. Smith detectou que quando exposto a luz o selênio se tornava um condutor, seu entendimento foi feito ao colocar o selênio em caixas escuras de baixo da água, assim ele conseguiu provar que não era o calor do sol que fazia o material reagir, mas sim a luz. No ano de 1876 o primeiro dispositivo sólido de geração de eletricidade com exposição à luz foi criado. Os responsáveis pela criação desse dispositivo foram William Grylls Adams e Richard Evans Day, porém, tinha uma baixa eficiência de conversão (FERNANDES, 2014).

Uma representação da estrutura interna dos semicondutores é vista na Figura 5. Percebe-se que a estrutura é composta por uma banda de valência e uma de condução, separadas por uma banda de região proibida mais conhecida como “*gap*”. A banda de valência é cheia de elétrons semilivres e a de condução é parcialmente vazia. A região do “*gap*” entre eles é de aproximadamente 1 elétron-volt (eV) e quando essa rigidez é rompida, o efeito fotovoltaico acontece, isto é, os elétrons da banda de valência do semicondutor recebem fótons com energia suficiente para que consigam saltar o “*gap*” até a banda de condução (SOLAR, 2018).

Figura 5 - Representação dos níveis de energia dos elétrons

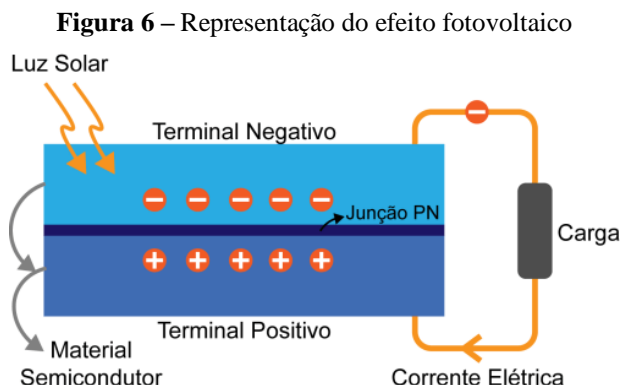


Fonte: Solar Eletromecan (2021).

Esse efeito foi observado pela primeira vez em 1839, pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel. Foi somente após mais de um século de sua descoberta que o fenômeno passou a ser usado para geração de energia a partir do sol, com as células fotovoltaicas. (SOLAR, 2018).

No caso dos semicondutores ao serem unidos, forma-se duas bandas de energia diferentes, uma região tipo P e outra região tipo N, neste interim forma-se um campo elétrico devido aos elétrons livres do silício tipo N que ocupam os vazios da estrutura do silício tipo P. Quando a luz solar incide sobre a célula fotovoltaica, os fótons chocam-se com outros elétrons da estrutura do silício fornecendo-lhes energia e transformando-se em corrente elétrica. Por causa do campo elétrico gerado pela junção P-N, os elétrons são orientados e fluem da camada “P” para a camada “N” (NASCIMENTO, 2004).

O efeito fotovoltaico advém de um processo físico-químico que resulta em uma corrente elétrica em um material semicondutor quando exposto a energia luminosa, seja ela do sol ou de qualquer outra fonte que possa emitir fótons em intensidades adequadas (SOLAR, 2018). E quando conectado uma carga nas extremidades dos semicondutores por meio de um condutor, gera-se um fluxo de elétrons (corrente elétrica). Enquanto a luz continuar incidindo na célula, a corrente elétrica se manterá. Destacando que a célula fotovoltaica não armazena energia e que a intensidade da corrente elétrica gerada variará na mesma proporção conforme a intensidade da luz incidente (NASCIMENTO, 2004). Uma representação da formação de corrente elétrica por meio do efeito fotovoltaico, pode ser visualizado na Figura 6.



Fonte: Eletrônica de Potência (2020).

2.5 Tecnologia das Células

Um gerador fotovoltaico utiliza como elemento básico principal para a geração de energia, a célula fotovoltaica. As primeiras unidades foram desenvolvidas em meados do século XX e posteriormente utilizadas em estações espaciais para suprimento energético. O rendimento de uma célula fotovoltaica na época chegava a 6% aproximadamente, sendo a busca maciça pelo desenvolvimento dos estudos nessa área, o que impulsionou a continuidade dos estudos nas décadas seguintes (KNABBEN, 2017).

Existem duas principais tecnologias de células fotovoltaicas usadas para a fabricação de módulos fotovoltaicos: células de silício cristalino e células de silício amorfo. Porém em processos de geração de energia elétrica pelos processos de transformação da energia solar fotovoltaica, a célula mais utilizada na prática é o silício cristalino.

As duas tecnologias de células mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos, o monocristalino (m-Si) e o policristalino (p-Si), possui cerca de 90% de participação no mercado de módulos solares. Seu crescimento a partir da 1ª geração, é perceptível. Essas células passam por um procedimento bem semelhantes, processos de fundição, depois de solidificação em blocos que são chamados de lingotes e através desses lingotes são obtidas as chamadas “bolachas”. Entretanto o monocristalino possui uma forma de organização molecular mais homogênea tendo sua cor característica bem conhecida, o azul escuro. Que dá um aspecto visual mais brilhante; já o policristalino, por ser formado por pequenos pedaços de cristais, com diferentes tamanhos e orientações, possui o aspecto visual rugoso (OGBOMO, 2017). Um modelo de uma célula fotovoltaica composto por dois filamentos metálicos e cantos arredondados é ilustrado na Figura 7.

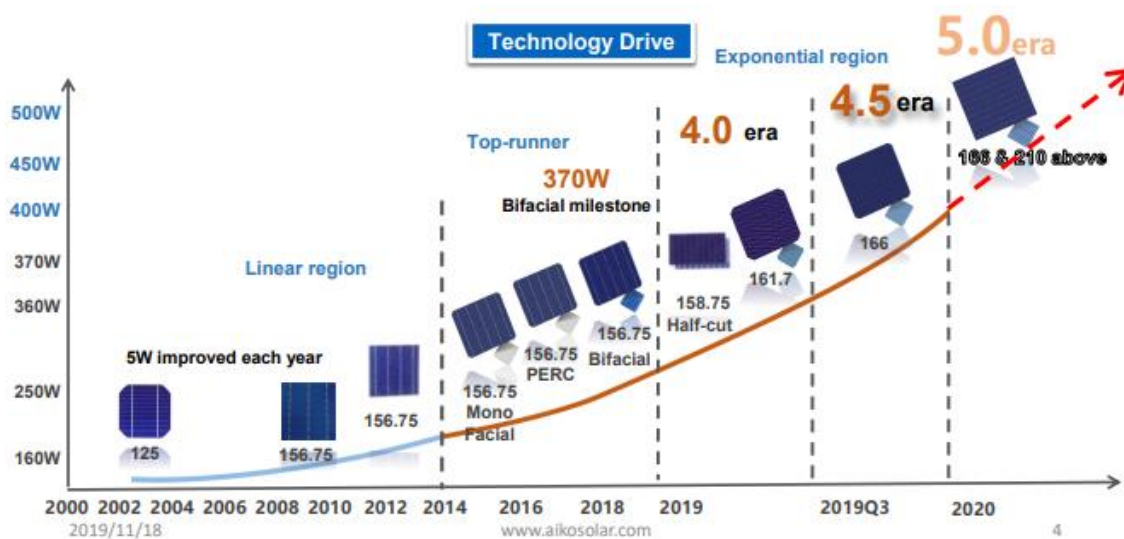
Figura 7 – Célula fotovoltaica utilizada na fabricação de módulos



Fonte: Blue Solar (2023).

Uma das razões para o domínio do silício como elemento mais utilizado na fabricação de células deve-se ao fato de a microeletrônica ter aperfeiçoado progressivamente, ao longo do século XX, a tecnologia do silício. Além disso, a abundância desse material fez o silício predominar no mercado de manufatura de células fotovoltaicas (ZILLES *et al*, 2012). Esse avanço é mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Avanço tecnológico das células fotovoltaicas



Fonte: Aikocells (2019).

2.6 Tecnologia dos Módulos

A palavra *Photovoltaics modules* vem do inglês em que o prefixo “*photo*” significa “produzido pela luz” e o sufixo “voltaico” refere-se à “eletricidade produzida por uma reação química”, ou seja, eles são os elementos básicos para a transformação de energia eletromagnética em energia elétrica e podem ser compreendidos como dispositivos

semicondutores que produzem uma corrente elétrica quando expostos à luz. Ressaltando que módulos fotovoltaicos não utilizam calor para produzir eletricidade e sim irradiação. (KRAUTER; MARQUES; LIMA, 2009).

Os semicondutores mais comuns são os formados por elementos do grupo IV da tabela periódica como o silício (Si). A principal característica deste grupo é a presença de 4 elétrons de valência, sendo possível, portanto, a existência de 4 ligações covalentes (KRAUTER; MARQUES; LIMA, 2009).

Os principais módulos encontrados no mercado possuem diferentes tecnologias de células entre elas estão: silício cristalino, filmes finos, PERC (*Passivated Emitter and Rear Cell*), *Half-cell*, HJT (*Heterojunction*) e diversos outros tipos que ainda estão em estudo.

2.6.1 Módulos fotovoltaicos do tipo policristalino

Os primeiros módulos à base de silício policristalino, que também são conhecidos como Polissilício(p-Si) e silício Multi-cristalino(mcSi), começaram a ser vendidos em meados de 1981. Os cristais de silício policristalino assim como os monocristalinos, pertencem à 1ª geração de módulos fotovoltaicos. Entretanto apresentam características diferentes de coloração entre elas é o método utilizado na fundição dos cristais. No policristalino, os cristais de silício são fundidos em um bloco, desta forma, preservando a formação de múltiplos cristais (daí o nome policristalino). Quando este bloco é cortado e fatiado, é possível observar esta formação múltipla de cristais. Uma vez fundido, eles são serrados em blocos quadrados e, em seguida, fatiados em células assim como no monocristalino, mas é um pouco mais fácil de produzir (MACHADO *et al*, 2022). Um módulo fotovoltaico com mesclagem de cores, caracterizando um módulo policristalino pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 - Módulo policristalino convencional



Fonte: Ubbersol (2019).

2.6.2 Módulos fotovoltaico do tipo monocristalino

Os módulos monocristalinos possuem eficiência mais elevada comparada aos módulos de múltiplos cristais, mais conhecido como policristalino. Possuem uma cor azul escuro e não apresenta mesclagem de cores, por isso são facilmente reconhecidos. Normalmente esses tipos de módulos são encontrados no mercado com geometria dos cantos tipicamente arredondados, mas também pode ser encontrado na forma quadrangular (MACHADO *et al*, 2022). Como pode ser visto na Figura 10.

Eles são feitos a partir de um único cristal de silício ultrapuro, este é fatiado como um "salame" fazendo assim, lâminas de silício individuais, que são então tratadas e transformadas em células fotovoltaicas. Cada célula fotovoltaica circular tem seus "4 lados" cortados fora para otimizar o espaço disponível no painel solar monocristalino e aproveitar melhor a área do painel (MACHADO *et al*, 2022, p. 14).

Figura 10 - Módulo monocristalino convencional



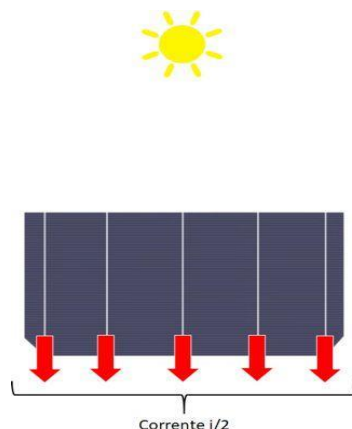
Fonte: Ubbersol (2019).

A tecnologia monocristalina também apresenta uma nova forma de organização das células dispostas no módulo, a tecnologia *half-cell*. Atualmente é utilizada como a principal tecnologia em sistemas fotovoltaicos. Formado por um bloco cristalino único essas células são cortadas ao meio, o que oferece muitas vantagens como: aumento da eficiência, já que produzem a metade da corrente elétrica de uma célula convencional possibilitando menores perdas ôhmicas; Tolerância a sombras, pois módulos *half-cell* apresentam maiores eficiências comparados a módulos *full-cell* quando submetidos a sombras parciais; e desempenho térmico, pois contém três caixas de junção na parte traseira. Isso é necessário para alojar os diodos de *by-pass*, que devem ficar nessas posições por serem compartilhados pelos circuitos das duas

metades dos módulos. Essa distribuição de caixas de junção tem um impacto positivo no comportamento térmico do módulo (VILLALVA, 2019).

As menores perdas ôhmicas ocorrem devido a corrente elétrica percorrer metade do módulo, e isso garante maiores tolerâncias a sombras, menores correntes elétricas e maior quantidade de células por módulo, isso pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Passagem de corrente elétrica no módulo *half cell*



Fonte: Canal Solar (2022).

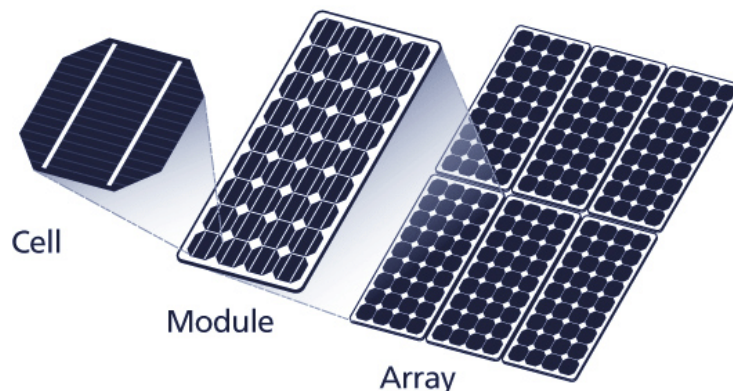
2.6.3 Tipos de ligação elétrica dos módulos fotovoltaicos

Segundo Carneiro (2010, p. 5) o agrupamento de módulos fotovoltaicos do mesmo tipo pode ser efetuado através do estabelecimento de ligações em série, paralelo ou mista, obtendo-se assim diferentes valores de tensão ou corrente.

Os equipamentos sejam eles módulos, banco de baterias e inversores, devem ser interligados de forma plausível, a fim de se obter a máxima potência desejada $P_{\text{máx}}$ de um arranjo fotovoltaico. Por isso existem duas possibilidades de realização da conexão dos módulos mais utilizadas na prática. Interligação em série e paralelo.

A sequência do agrupamento das células para a formação do arranjo fotovoltaico é ilustrada esquematicamente na Figura 12.

Figura 12 – Sequência de formação do arranjo fotovoltaico por células



Fonte: Researchgate (2020).

Em sistemas fotovoltaicos, os módulos podem ser ligados tanto em série quanto em paralelo, a ligação em série constitui o que corriqueiramente pode se designar por fileiras, em que os polos positivos são conectados diretamente nos polos negativos. Esses módulos são organizados em arranjos posto em uma determinada inclinação fixa sobre o telhado ou composto por seguidores solares. Os módulos devem ser do mesmo tipo para reduzir perdas de potência, pois o mal dimensionamento na associação provocaria aumento de resistência, variação de tensão e instabilidade no inversor (CARNEIRO, 2010).

Um esquemático dos módulos conectados em série é visualizado na Figura 13. Como pode-se observar, a associação segue o mesmo princípio das conexões de resistências série e paralelo, onde nos circuitos conectados em série, a corrente elétrica se mantém a, enquanto a tensão elétrica tem suas grandezas somadas.

Figura 13 – Ligação dos módulos em série



Fonte: Serrão (2010).

Pode-se observar a proporcionalidade por meio da curva característica $I-V$. Pois se os dispositivos são idênticos e apresentam a mesma característica, as correntes elétricas individuais são iguais. Já a variação de tensão aumenta à medida que os módulos são implementados no sistema (PINHO; GALDINO, 2014).

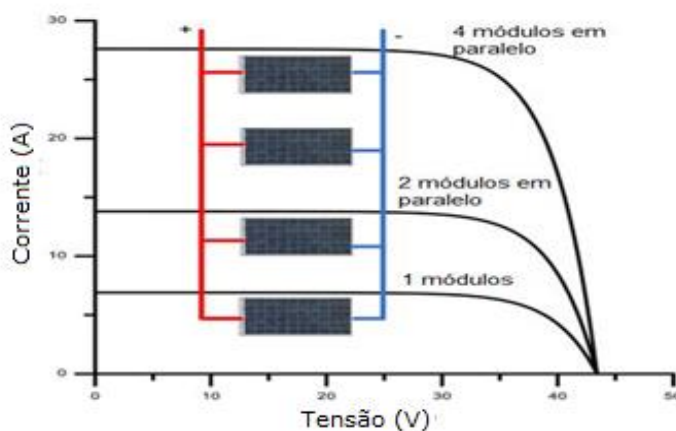
A representação das formas de resolução para circuitos correspondentes à ligação em série dos módulos, podem ser dadas pelas Equações (1) e (2).

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (1)$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (2)$$

Na ligação em paralelo, os terminais positivos dos dispositivos são interligados entre si, assim como os terminais negativos. O resultado da soma das correntes elétricas em células ideais conectadas em paralelo é ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Curva característica $I \times V$ com módulos em paralelos



Fonte: Herrero (2016).

Dependendo da aplicação, os módulos podem ser conectados tanto em série quanto em paralelo. Na imagem acima, ocorre a variação de corrente elétrica a medida em que mais módulos são implementados no sistema, permanecendo inalterada a tensão elétrica. As Equações (3) e (4) podem ser dadas abaixo.

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (3)$$

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (4)$$

2.7 Sistema Fotovoltaico

Um sistema fotovoltaico de energia pode ser entendido como um arranjo de módulos fotovoltaicos em conjunto com outros equipamentos conectados ao inversor como controladores de carga *maximum power point tracking* (MPPT), disjuntores, Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS), entre outros. Esses equipamentos podem ser dimensionados de formas variadas dependendo da aplicação. Os módulos são compostos de células solares, um material semicondutor que é capaz de converter energia luminosa em corrente contínua, tudo isso ocorre graças ao efeito fotovoltaico. Cada célula solar contém um material semicondutor, normalmente o silício; e quando essa energia solar incide sobre a célula é gerado uma tensão elétrica nos terminais do semicondutor. E conseqüentemente uma corrente elétrica circulará sobre as partes metálicas (PHILIPPI JR *et al*, 2016).

Para Câmara (2011, p. 28) um sistema fotovoltaico pode ser classificado em três categorias distintas: sistemas isolados, híbridos e conectados à rede. Os sistemas obedecem a uma configuração básica onde o sistema deverá ter uma unidade de controle de potência e uma unidade de armazenamento.

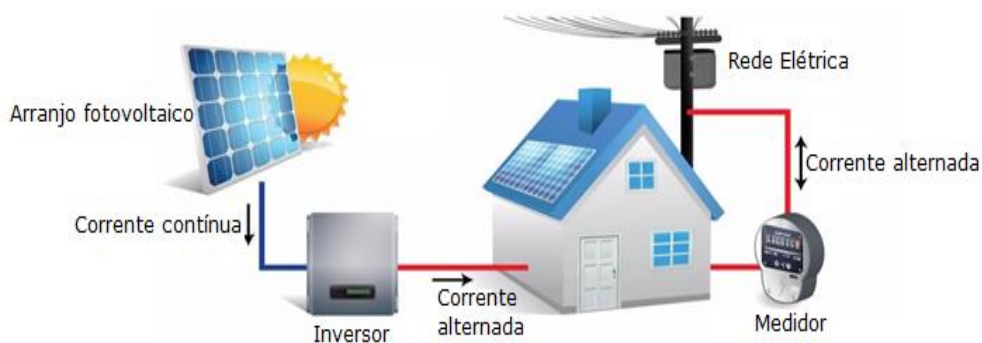
2.7.1 Sistemas fotovoltaicos *On Grid*

Os sistemas fotovoltaicos *on grid* são sistemas conectados à rede elétrica de distribuição. Esse tipo de sistema constituem a maior taxa de crescimento em aplicações nos sistemas elétricos. Os módulos que convertem energia solar em elétrica são conectados em *strings* no qual compõem o arranjo fotovoltaico. Este arranjo é conectado a inversores que pelos processos elétricos, transformam corrente contínua em corrente alternada. Desse modo, os inversores entregam a energia, que é gerada em excesso, à rede elétrica de distribuição (RAMPINELLI, 2010). Um sistema fotovoltaico conectado à rede é mostrado na Figura 15.

Sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica representam uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual estão conectados. Todo o arranjo é conectado em inversores e estes fazem a interface com a rede elétrica. Estes inversores devem satisfazer as exigências de qualidade e segurança para que a rede não seja afetada, como sistema anti-ilhamento, distorção harmônica em consonância

com as normas aplicáveis, saída CA com forma de onda senoidal pura, proteções contra sobretensões e sobrecorrente, dentre outras (CÂMARA, 2011, p. 31).

Figura 15 – Esquema de um sistema fotovoltaico *On grid*



Fonte: Bortoloto (2017).

2.7.2 Sistemas fotovoltaicos *Off Grid*

As instalações do tipo *off grid* produzem eletricidade durante o dia e ao mesmo tempo em que essa energia é produzida ela pode ser consumida ou armazenada em banco de baterias para suprir demandas quando a eletricidade gerada for reduzida. Instalações isoladas devem ser projetadas adequadamente a fim de que as necessidades do cliente sejam atendidas, otimizando o sistema fotovoltaico (DALMARCO, 2017).

Basicamente o sistema fotovoltaico isolado pode ser dividido em duas categorias: sistemas autônomos com armazenamento e sistemas autônomos sem armazenamento.

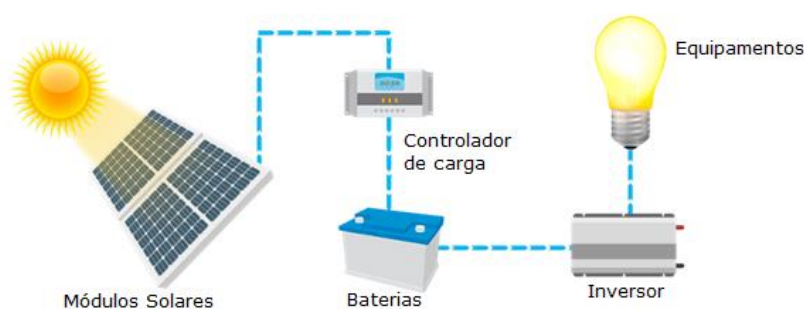
2.7.2.1 Autônomos sem armazenamento

Os sistemas fotovoltaicos sem armazenamentos são formados por arranjos de módulos que são conectados em controladores de carga e inversor. O controlador de carga, mais conhecido como MPPT, realiza a interligação entre os módulos e o inversor, sendo a principal função desse dispositivo entregar ao inversor energia de qualidade. Sistemas autônomos sem armazenamento utilizam a energia que é gerada instantaneamente, sem fins de armazenamento em baterias (MACHADO *et al*, 2022).

2.7.2.2 Autônomos com armazenamento

Os sistemas autônomos com armazenamento são semelhantes ao anterior. Possuem módulos, controladores de carga e inversor. Porém, a diferença surge pelo fato de que um banco de baterias é implementado no sistema, estes são responsáveis por realizar o acúmulo de carga da energia que é gerada durante o dia. Os sistemas autônomos com armazenamento são mais utilizados na prática pois possuem a capacidade de fornecer energia sem que haja geração. Este fornecimento perdura enquanto houver capacidade energética do banco de baterias. Em fontes de geração de eletricidade, qualquer sistema pode apresentar oscilações provocando instabilidade no sistema. Neste caso o controlador de carga deve ser implementado no sistema para que essa energia seja entregue ao inversor com a melhor qualidade e menos oscilações (MACHADO *et al*, 2022). Um diagrama de um sistema fotovoltaico *off grid*, podendo ser com armazenamento ou sem armazenamento pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 - Sistema fotovoltaico autônomo com armazenamento



Fonte: Greenovation (2021).

2.7.3 Sistemas Híbridos

Os sistemas híbridos são utilizados normalmente em sistemas autônomos que em conjunto com outras fontes de energias renováveis, como por exemplo a eólica, geotérmica, biomassa, solar formam o sistema híbrido. É necessário ter todo o controle dessas fontes de energia para se aproveitar o máximo a grande eficiência do sistema. Por isso, são tipos de sistemas mais equilibrados e estáveis. Os sistemas de geração têm alguma capacidade de armazenamento, entretanto, é necessário que haja um meio de produção de energia, podendo ser convencional, para que se possa servir de reserva. Os sistemas híbridos conseguem alimentar um sistema isolado com um índice de confiabilidade comparável as redes

convencionais (PEREIRA, 2010). Um diagrama de um sistema híbrido composto pelas principais fontes, eólica, gerador a diesel e solar é destacado na Figura 17.

Figura 17 – Diagrama de um sistema híbrido



Fonte: Tecnoveritas (2018).

2.8 Características Operacionais dos Módulos Fotovoltaicos

2.8.1 Temperatura

A temperatura do módulo é um parâmetro que tem grande influência no comportamento de um sistema fotovoltaico, pois altera a eficiência e conseqüentemente a energia gerada pela fonte. Os efeitos da temperatura são o resultado de uma característica natural principalmente de módulos baseados em células de silício cristalino. Quando se tem um aumento na temperatura ambiente, ocorre uma modificação na temperatura da célula, reduzindo consideravelmente a sua eficiência. Por isto, compreender os efeitos que a temperatura provoca nos sistemas fotovoltaicos é importante para elevar a potência de saída do gerador fotovoltaico mesmo em situações caóticas de tempos meteorológicos, como temperaturas fora da média (CHIKATE; SADAWARTE, 2015).

Considerando que os módulos fotovoltaicos são compostos por associações de células que estão encapsuladas em uma única moldura, pode-se afirmar que existe uma interferência não somente elétrica entre as células, mas em relação às temperaturas das mesmas, sendo que a temperatura é um fator determinante na geração de energia pela célula. Considerando o empecilho no acesso individual a cada célula do módulo, devido aos processos de fabricação, como o encapsulamento da película EVA *Ethylene Vinyl Acetate* (Etileno acetato de vinila), é

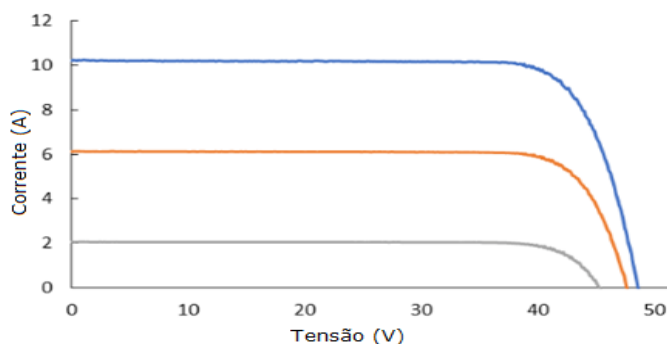
natural ser estudado o comportamento global do conjunto, ou seja, a influência conjunta das células associadas (ANDRADE, 2008).

Atualmente os módulos fotovoltaicos que são encontrados no mercado apresentam características pré-definida por especialistas para diferentes condições de operação encontradas em certas regiões do Brasil. Os módulos são devidamente testados em condições padrões de teste STC (*Standard Test Conditions*) e *Normal Operation Cell Temperature* (NOCT), tanto o STC, quanto o NOCT são regidas por normas da IEC (*International Electrotechnical Commission*). As STC são definidas na Norma IEC 60891 e a NOCT é definida na Norma IEC 60904-5 (REINDERS *et al*, 2017).

Nas condições padrão de teste (STC) as células fotovoltaicas em conjunto são submetidas à grandezas consideradas fixas como irradiância de 1000W/m^2 e temperatura de 25°C . Esta condição só é produzida em laboratório, dentro de câmaras climática que possui um sistema preciso de controle e medição, de iluminação e de temperatura. Diversos fabricantes de módulos devem realizar os testes nas mesmas condições, para que seja possível comparar módulos de outros fabricantes de acordo com os mesmos critérios (VILLAVA, 2012 apud SOUZA, 2019).

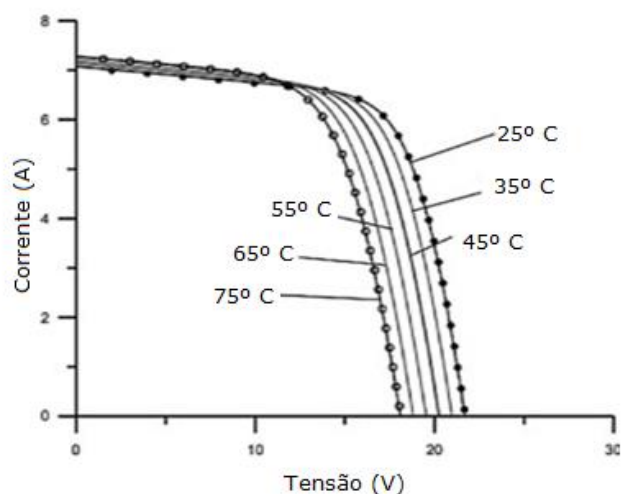
Pode-se perceber duas situações diferentes referentes às Figuras 18 e 19. A primeira mostra a variação da tensão em função da corrente elétrica quando um módulo é exposto a irradiação. Neste caso, pode-se inferir que quanto maior a irradiância, maior será a quantidade de corrente elétrica gerada. Na segunda, os valores de tensão e corrente sofrem alterações quando há mudanças de temperatura, mostrando claramente que quanto maior a temperatura, menor o valor da tensão de circuito aberto. Isso acontece, pois, temperaturas altas ocorre maiores perdas de potência, e como a corrente elétrica aumenta de forma imperceptível, a tensão reduz drasticamente.

Figura 18 – Curva característica TensãoxCorrente com a variação da irradiância



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

Figura 19 – Curva característica TensãoxCorrente com a variação de temperatura



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

A alteração da temperatura ambiente provoca o aumento da temperatura de operação da célula reduzindo consideravelmente a tensão de circuito aberto V_{oc} nos terminais do módulo. Enquanto a corrente de curto-circuito (I_{sc}) sofre um pequeno aumento podendo até ser desprezado em algumas ocasiões. O valor de I_{sc} aumenta cerca de 0,07% por grau Kelvin (TEIXEIRA, 2008).

O valor de tensão de circuito aberto (V_{oc}) diminui cerca de 0,4% para cada aumento de um grau Celsius, pois o valor da tensão de circuito aberto também está relacionado ao valor do gap do semicondutor. Como o valor de corrente e tensão dependem da temperatura, o valor da potência de saída também depende, e reduz cerca de 0,4% a 0,5% por grau Celsius (TEIXEIRA, 2008, p. 26).

2.8.2 Eficiência

Quando se deseja planejar e executar um projeto de energia solar, é necessário ter de forma clara, o rendimento médio que o sistema deverá ter. Para isso alguns dados são necessários como o consumo mensal em kWh/mês, Horas de Sol Pico (HSP) e o fator de rendimento. Essas bases serão cruciais para o desenvolvimento dos cálculos que serão utilizados na definição do projeto.

A energia gerada é um fator que depende diretamente do rendimento do gerador fotovoltaico, ela pode ser representada pela Equação (5). E após isolar o valor de η , o cálculo para o rendimento pode ser dado pela Equação (6).

$$\text{Energia} = P_{nom} \cdot HSP \cdot \eta \quad (5)$$

$$\eta = \frac{\text{Energia}}{P_{nom} \cdot HSP} \quad (6)$$

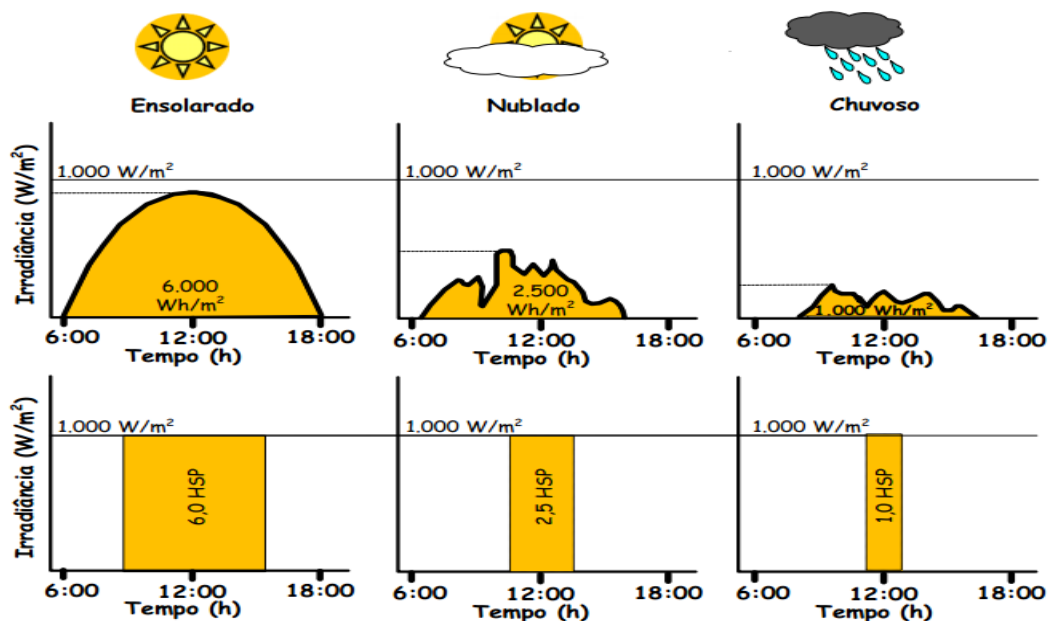
P_{nom} - Potência nominal do módulo (W)

η - Rendimento (%)

HSP – Horas de Sol Pico

Na Equação 6, percebe-se que o rendimento de um sistema fotovoltaico depende diretamente da quantidade de horas que os módulos estarão expostos, conhecido pela sigla (HSP). Normalmente esses valores ficam compreendidos entre 4 a 6 horas por dia. A potência da irradiação incidente em função das condições meteorológicas é ilustrada na Figura 20.

Figura 20 – Valores equivalentes de HSP em função do tempo meteorológico



Fonte: Pinho e Gaudino (2014).

A potência nominal do módulo também é um fator determinante para o cálculo do rendimento, pois quanto maior a potência da célula, maior é a capacidade de produção de energia. Qualquer discrepância nos valores resultará em perdas de rendimento.

Um sistema fotovoltaico terá perda de rendimento a partir do momento em que se for comprometida a capacidade de absorção de energia luminosa pela célula fotovoltaica, que pode ser caracterizado por vários fatores, como por exemplo, danos elétricos e mecânicos. Estando expostas às intempéries, os painéis solares sofrem desgastes naturais de sua operação assim como danos causados por elementos externos (ALMEIDA *et al*, 2022).

Porém um outro fator que poderá afetar consideravelmente para a redução da eficiência seria a deposição de sujeiras na superfície dos módulos ao longo do tempo. Na atmosfera existem muitas composições de resíduos como poeira, folhas, restos de organismos vivos etc. Além de ácaros, dejetos de pássaros e outros tipos de sujeira que pode comprometer o desempenho do módulo. Toda essa sujeira provoca um sombreamento nos semicondutores, ocasionando a falta de corrente pelas células e comprometendo a durabilidade do equipamento. Nesse contexto se faz necessário a limpeza frequente nos módulos para que essa eficiência não sofra uma drástica redução ao longo dos anos (ALMEIDA *et al*, 2022).

As eficiências dos módulos em termos de porcentagem, são representadas na Figura 21, sendo que os mais eficientes apresentam valores iguais ou superiores a 18%.

Figura 21 – Percentual de eficiência do módulo fotovoltaico

eficiência	percentual do total de painéis produzidos	de uma forma simples
>=18%	~ 10%	OS PAINÉIS MAIS EFICIENTES
17-17.9%	~ 30%	ACIMA DA MÉDIA DE EFICIÊNCIA
16-16.9%	~ 30%	EFICIÊNCIA OK
15-15.9%	~ 20%	ABAIXO DA MÉDIA DE EFICIÊNCIA
<15.0%	~ 10%	OS PAINÉIS MENOS EFICIENTES

Fonte: Sola Vista, 2023.

3 METODOLOGIA

Um dos métodos utilizados é a revisão teórica, que consiste em estudos fundamentados, onde foram utilizadas técnicas de coleta de dados de parâmetros elétricos, variação de radiação solar, e que de acordo com a pesquisa a mesma fundamenta o desenvolvimento deste trabalho.

O primeiro passo nas análises utilizadas foi o estudo de caso, é caracterizado pela realização de estudos locais com o intuito de obtenção de dados referentes ao evento estudado. Portanto, a partir deste primeiro método foi possível obter informações do local de estudo para a elaboração do projeto de energia solar fotovoltaica (SOUSA; OLIVEIRA; ALVES, 2021).

O segundo método foi com base na utilização do *software PVsyst*® no qual apresenta uma simulação dos dados reais fornecidos do sistema já instalado e verificação dos resultados. Este trabalho foi dividido em partes como se pode ver abaixo:

- Local onde o sistema fotovoltaico foi instalado;
- Análise prática do sistema durante o período;
- Verificação dos dados pelo *software PVsyst*® do sistema estudado;
- Comparativo entre os resultados do sistema fotovoltaico através dos dados reais com o *software PVsyst*®.

4 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO INSTALADO

4.1 Local da instalação do sistema fotovoltaico

O local em que o sistema foi instalado foi um prédio de dois andares, o mesmo possui quatro estabelecimentos e está situado na cidade de Capanema-PA. O Edifício apresenta um telhado de uma queda com inclinação de aproximadamente 8° e está localizado no centro da cidade na esquina da avenida Barão de Capanema com a Travessa Justo Chermont. A geração de energia do sistema instalado não é utilizada para consumo local, e sim para alimentar quatro unidades consumidoras remotamente, isto é, a geração de energia é destinada para autoconsumo remoto. Segundo a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 o consumidor pode gerar sua própria energia a partir de fontes renováveis, podendo fornecer o excedente para a rede pública para posterior compensação do consumo de energia (ANEEL, 2022).

Uma foto do local com uma vista lateral é mostrada na Figura 22, obtida pelo *Google Maps*.

Figura 22 - Vista lateral do local da instalação



Fonte: *Google Maps* (2023).

Também foi possível obter uma imagem da vista superior (vista de cima do telhado), Figura 23, em que se pode perceber através da marcação em vermelho, as quatro organizações dos arranjos de módulos com inclinação fixa. Neste caso os módulos não possuem seguidores solares.

Figura 23 - Vista superior do local

Fonte: adaptado do *Google Earth* (2023).

Antes da instalação do sistema solar na edificação, foi realizado um estudo prévio para mapear as reais condições de adequação do projeto. A cidade possui bons índices de irradiação solar durante quase todo ano, principalmente em estações de verão que abrange os meses de julho a dezembro. A irradiação solar média que chega até o local é de aproximadamente 4,75 kWh/m².dia no plano horizontal, sendo que os mais altos índices de irradiância poderão ocorrer nos meses de setembro e outubro, como retrata o Quadro 1. A média de irradiação solar diária no plano horizontal no local estudado apresenta intensidades adequadas e propícias à geração de energia, pois nos sistemas fotovoltaicos é exigido que se tenha no mínimo 3 kWh/m².dia para uma boa geração de eletricidade.

Quadro 1 – Dados de irradiação solar diária média no mês (kWh/m².dia)

Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]													
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
Plano horizontal	0° N	4,41	4,21	4,16	4,26	4,52	4,76	4,88	5,22	5,50	5,29	5,07	4,71	4,75	1,34
Ângulo igual a latitude	1° N	4,38	4,20	4,16	4,28	4,54	4,79	4,92	5,24	5,51	5,28	5,04	4,68	4,75	1,35
Maior média anual	2° N	4,36	4,18	4,15	4,29	4,57	4,83	4,95	5,26	5,51	5,26	5,01	4,65	4,75	1,36
Maior mínimo mensal	2° S	4,46	4,28	4,16	4,24	4,46	4,68	4,81	5,17	5,49	5,32	5,12	4,77	4,74	1,33

Fonte: CRESESB (2023).

O edifício possui dimensões retangulares e apresenta uma área para disposição dos módulos de aproximadamente 150 m². Os módulos que foram instalados sobre o telhado ocupam uma área de aproximadamente 125 m². Composta por 4 *strings*, os módulos foram organizados em fileiras compostas de 16 unidades cada, totalizando 64 módulos no telhado. As disposições dos módulos instalados sobre o telhado podem ser visualizadas na Figura 24.

Figura 24 - Disposição dos módulos fotovoltaicos



Fonte: Autor (2023).

O local apresenta localização geográfica dada pelas seguintes coordenadas como pode-se visualizar no Quadro 2.

Quadro 2 - Dados geográficos de Capanema-Pa

Dados Geográficos	
Latitude	1,1914° S
Longitude	47,1761° W
Altitude	39 Metros
Fuso Horário	- 3.0 h

Fonte: CRESESB (2023).

4.2 Análise Prática

Para buscar a eficiência do sistema fotovoltaico em questão, foi extraído informações do local dos 12 meses referente ao ano de 2021, essas informações contêm dados importantes para que as mesmas pudessem ser comparadas pelo *software PVsyst*®, que é um programa utilizado por engenheiros para a realização de dimensionamentos de sistemas solares. O *software* foi de

fundamental importância para que o projetista chegasse à conclusão de que a eficiência do sistema utilizado corresponde as necessidades exigidas pelo projeto.

4.3 Produção

A produção de energia elétrica pelo sistema fotovoltaico seja ela de uma residência, estabelecimento comercial ou qualquer outro local, varia ao longo dos meses, isso acontece devido a diversos fatores, entre eles está a variação da irradiação, já que em períodos de inverno ou verão esses valores apresentam discrepâncias. No inverno, por exemplo, o sistema pode apresentar baixa produção de energia devido as intensas variações de energia solar que chega nos módulos. No verão essa irradiação é maior gerando quantidade de energia superior à média estabelecida.

Em alguns períodos do ano o inversor pode se encontrar desligado por diversos motivos sendo até por um desligamento manual, entretanto os problemas mais recorrentes pode ser uma falha ocasionado por uma sobrecarga e desligamento por variação de tensão na rede. Instabilidades na rede elétrica ocorre frequentemente e estes problemas podem ser acentuadas com instalações mal dimensionadas. Portanto, torna-se difícil uma análise completa da produção de energia, alguns sistemas fotovoltaicos estão sujeitos a este tipo de situação.

Outra análise deve ser levada em consideração na variação de produção seria a temperatura, pois as temperaturas elevadas ocasionam maiores perdas de potência, fazendo com que o gerador fotovoltaico entregue na sua tensão de saída, um valor reduzido. Entretanto, a eficiência de um módulo não é o principal fator a ser levado em consideração em um projeto.

A média de produção de energia pode ser obtida com base na produção mensal dos 12 meses de 2021, como é detalhado no Quadro 3. Neste caso, soma-se todos os valores correspondentes a cada mês e divide-se pela quantidade de meses. A Produção total aproximada no ano de 2021 foi de 28.850 kWh contando com a menor produção no mês de fevereiro e a maior produção no mês de agosto.

Quadro 3 – Produção de energia elétrica mensal em 2021 (kWh)

Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
2.000	1.900	2.250	2.290	2.350	2.400	2.550	2.650	2.600	2.575	2.500	2.400

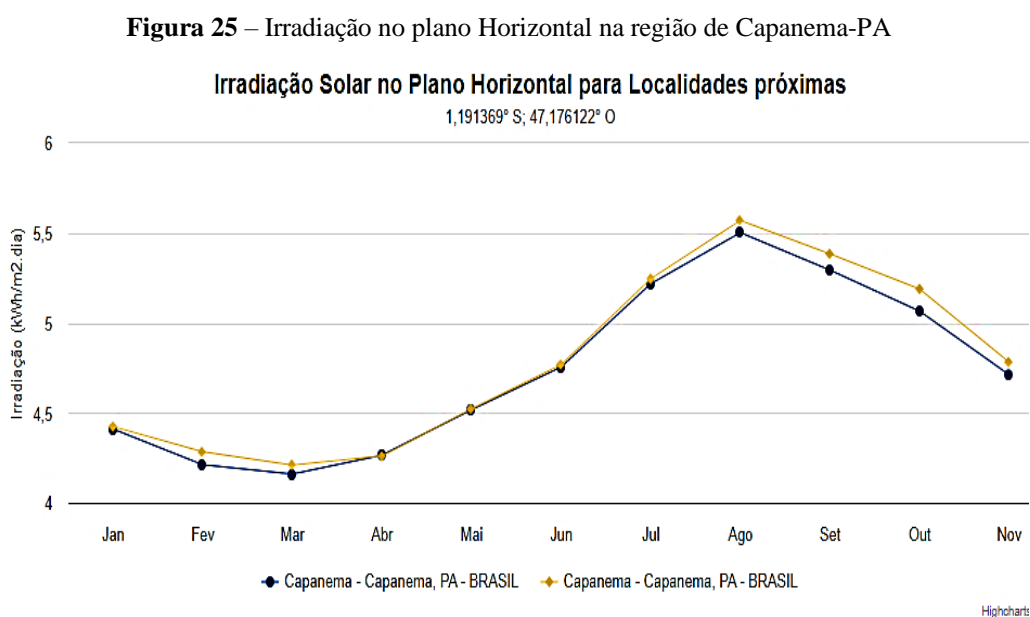
Fonte: Autor (2023).

Tendo conhecimento da demanda de energia, foi determinado a potência de pico do sistema fotovoltaico, ou seja, todas as placas que foram instaladas no telhado tiveram suas potências somadas, relacionando com outros parâmetros como rendimento, quantidade de dias no mês que os módulos ficaram expostos e a irradiância local.

No entanto, o rendimento do painel fotovoltaico como se sabe dificilmente atingirá 100%, pois existem diversos fatores que podem influenciar diretamente na produção de energia elétrica, como por exemplo, o sombreamento que afeta diretamente a eficiência do sistema. Quando se tem uma região sombreada no módulo, os diodos de desvio (*by-pass*) evitam a ocorrência dos chamados pontos quentes protegendo as células fotovoltaicas, porém sombreamentos parciais geram perdas de eficiência.

Alguns módulos utilizados em sistemas antigos fazem uso de módulos do tipo *full-cell*, em que a corrente que circula pelas partes metálicas abrange todo o módulo. Isso significa que uma pequena região sombreada no módulo resultará em perdas. Dessa forma, foram escolhidos módulos fotovoltaicos do tipo *half-cell*. Este tipo de módulo reduz as perdas por eficiência quando se tem uma região de sombreamento parcial.

Os dados da irradiação local, na cidade de Capanema-PA, foram retirados do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), juntamente com o Centro de Pesquisa em Engenharia Elétrica (CEPEL), como mostra a Figura 25.

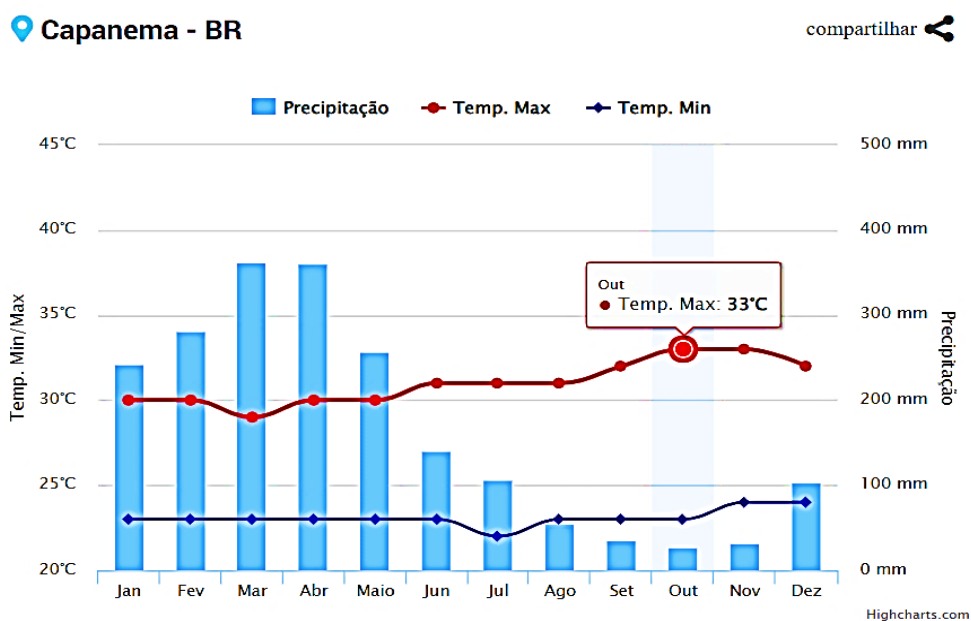


Fonte: CRESESB (2023).

Sabe-se que a precipitação durante a época do ano na região de Capanema-PA costuma a apresentar índices elevados entre os meses de janeiro a junho, provocando uma diminuição na produção de energia solar fotovoltaica. Isto acontece devido o tempo apresentar céu encoberto com nuvens carregadas, dificultando a irradiação incidente direta. Entretanto nos meses de julho a dezembro ocorre uma redução na precipitação, ocasionando bons índices de irradiação solar como também no aumento do índice de temperatura local. Fisicamente os dados de precipitação e irradiação solar são inversamente proporcionais, enquanto os índices de precipitação estiverem altos, a irradiação incidente direta estará baixa, e vice-versa.

Percebe-se que no mês de outubro a temperatura máx. poderá atingir 33°C, como é ilustrado na Figura 26, referenciando que nos períodos que compreende as menores precipitações, há bons índices de produção de energia elétrica.

Figura 26 - Dados meteorológicos da cidade de Capanema-PA



Fonte: Clima Tempo (2023).

4.4 Descrição dos dispositivos do Sistema Fotovoltaico

O sistema fotovoltaico do edifício se encontra em funcionamento há 3 anos, passando por manutenções sempre em períodos estabelecidos como limpeza dos módulos, trocas de terminais pré-isolados dos bornes de conexão e trocas de equipamentos desgastados. Todos os dispositivos como disjuntores, Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS) dentre outros,

foram devidamente dimensionados para que o sistema pudesse operar de forma adequada, não comprometendo assim o bom funcionamento do sistema. Os módulos ocupam uma área de 125 m² totalizando 64 unidades com dimensões de 1.962 mm x 992 mm cada. A potência do gerador fotovoltaico é de aproximadamente 21,44 kWp.

4.4.1 Módulos

No sistema foi utilizado módulos da fabricante BYD modelo 335-PHK-36, tecnologia Si-poly do tipo *half-cell*. Essa nova tecnologia permite que as células sejam dispostas em espaços divididos ao meio aumentando assim a eficiência do sistema. Como pode ser visto na Figura 27.

As informações do *datasheet* do equipamento utilizado no projeto encontram-se destacadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Informações do módulo fotovoltaico

Datasheet do Módulo	
Dados Elétricos (STC)	
Potência Máxima (0~+3%)	335 W
Tensão Máxima de Operação	37,55 V _{cc}
Corrente Máxima de Operação	8,970 A
Tensão de Circuito Aberto	47,3 V _{cc}
Corrente de Curto-Circuito	9,390 A
Eficiência Relativa do módulo	17,28 %
** Sob Condições Padrão de Teste (STC): irradiância de 1000 W/m ² , AM de 1,5 e temperatura do módulo de 25°C.	
Dados Mecânicos	
Célula	
Conexões em série	72
Conexões em paralelo	1
Size W x H	156.7mm x 156.7mm
Superfície da célula	245,5 cm ²
Módulo	
Comprimento	1962 mm
Largura	992 mm
Espessura	35 mm
Superfície	1,946 m ²
Massa	22,10 kg
Diodos By-pass	3
Coeficientes de Temperatura	
Coeficiente de temperatura máxima (P _{max})	-0,39%/°C

Coeficiente de temperatura (Voc)	-0,31%/°C
Coeficiente de temperatura (Isc)	0,07%/°C
Temperatura nominal da célula (NOCT)	45 ± 2 °C

Fonte: Autor, 2023

Figura 27 - Módulo policristalino *half-cell* da marca *BYD*



Fonte: Opus solar (2023).

4.4.2 Inversor

Os inversores são dispositivos com circuitos estáticos, ou seja, não contém partes móveis. Estes dispositivos são capazes de controlar toda a energia entre uma fonte de tensão com potência DC para uma carga de corrente alternada AC, seja ela monofásica ou trifásica, isso irá depender da aplicação. Inversores de tensão são frequentemente utilizados em sistemas fotovoltaicos. Sua eficiência pode chegar a 99% dependendo do tipo de inversor e da aplicação (AHMED, 2008).

O equipamento utilizado no sistema é o *Fronius Symo* de 15 kW, possui grau de eficiência máxima de 98,1% e fator de dimensionamento de 0,699. O inversor possui comunicação integrada de dados onde as interfaces abertas podem ser operadas de forma completamente integrada utilizando internet cabeada. O tipo de inversor utilizado neste trabalho é mostrado na Figura 28.

As informações do *datasheet* do inversor utilizado no projeto encontram-se destacadas no Quadro 5.

Quadro 5 – Informações do inversor utilizado

Datasheet do inversor	
Especificações Elétricas	
Dados de Entrada	
Quantidade de MPP Tracker	2
Corrente máx. de entrada ($I_{dc\ máx}$)	33,0/27,0 A
Corrente máx. de curto-circuito do campo do módulo	49,5/40,5 A
Faixa de tensão de entrada CC ($U_{cc\ mín} - U_{cc\ máx}$)	200/1000 V
Alimentação de tensão inicial ($U_{cc\ inicial}$)	200 V
Tensão nominal de entrada ($U_{cc,r}$)	600 V
Faixa de tensão MPP ($U_{mpp\ mín} - U_{mpp\ máx}$)	320-800 V
Faixa de tensão MPP utilizável	200-800 V
Potência máxima do gerador fotovoltaico ($P_{cc\ máx}$)	22,5 kWp
Dados de saída	
Potência Nominal CA ($P_{ca\ r}$)	15 kW
Potência máx. de saída ($P_{ca\ máx}$)	15 kVA
Corrente máx. de saída ($I_{ca\ nom}$)	21,7 A
Acoplamento à rede ($U_{ca, r}$)	3~ NPE 400/230, 3~ NPE 380/220 V
Faixa de tensão CA ($U_{mín} - U_{máx}$)	150 – 280 V
Frequência (f_r)	50 – 60 Hz
Faixa de frequência ($f_{mín} - f_{máx}$)	45 – 65 Hz
Fator de distorção	1,5 %
Dados Gerais	
Largura	510 mm
Altura	725 mm
Profundidade	225 mm
Massa	43,4 kg
Faixa da temperatura ambiente	-40°C - +60°C
Tecnologia de conexão CC	6x bornes aparafusados CC+ e 6x bornes aparafusados CC – 2,5 – 16 mm ²
Tecnologia de conexão CA	Bornes aparafusados CA de 5 polos 2,5 - 16 mm ²

Fonte: Autor (2023).

Figura 28 - Inversor *Fronius Symo 15.0-3-M*



Fonte: Fronius solar energy (2022).

4.5 Parâmetros Elétricos

Em dimensionamentos de sistemas fotovoltaicos é sempre aconselhável que os equipamentos escolhidos pelo projetista estejam dentro de uma margem de segurança visando a minimização das iminências que poderão ocorrer ao longo dos anos, pois existe a possibilidade de menores temperaturas em algumas épocas do ano que estejam fora da média, assim como altas temperaturas. Também se tem os efeitos de desgaste excessivo nas molduras de alumínio dos módulos ocasionando estresse mecânico e microfissuras nas células.

Os módulos fotovoltaicos são equipamentos que tem durabilidade de 25 a 30 anos dependendo das especificações da fabricante. Nesse interim, o dimensionamento do sistema fotovoltaico deve-se adequar às situações reais do local, pois as condições meteorológicas possibilitam valores de irradiância que estejam fora da média. Portanto é necessário um bom dimensionamento para que não ocorra elevada instabilidade no sistema por um curto período.

4.6 Análise do *Software PVsyst*®

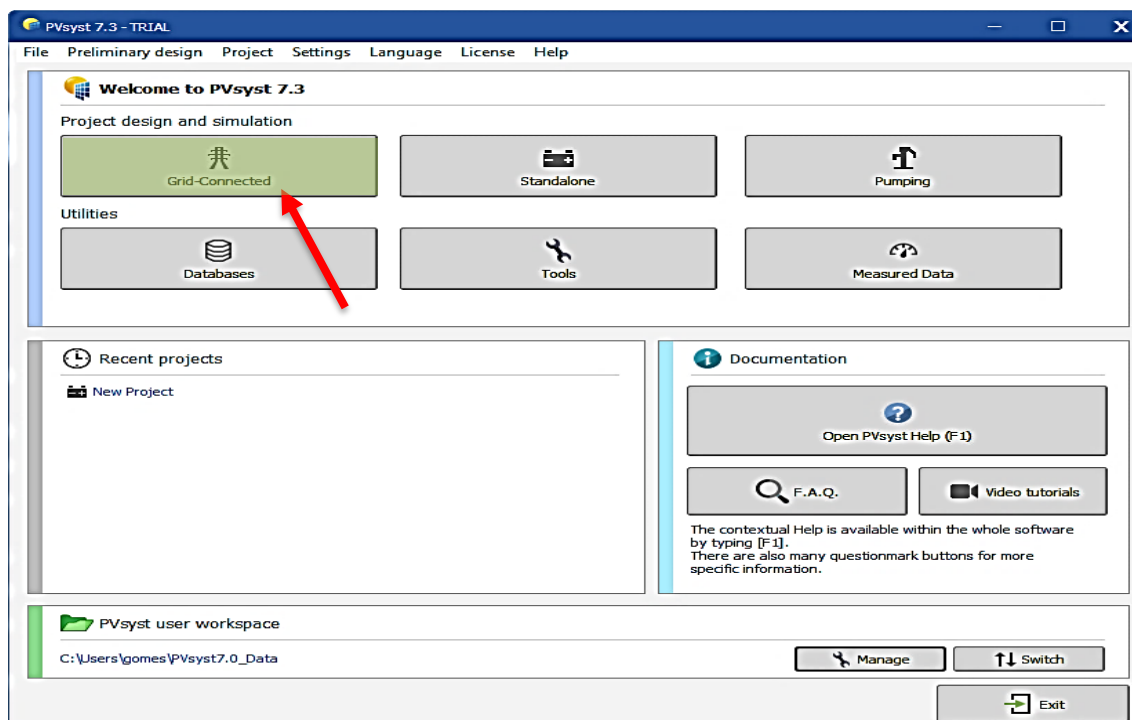
O *PVsyst*® pode ser entendido como “sistema fotovoltaico”. A palavra *syst* vem do inglês que significa (sistema) e da sigla *PV* que significa (fotovoltaico). É um *software* que foi desenvolvido em Genebra na Suíça, usado para dimensionamentos de sistemas fotovoltaicos. Apresenta diversas funcionalidades dos mais diversos detalhamentos de gráficos até a precisão de cálculos. Atualmente o *PVsyst*® é um dos *softwares* mais empregados por engenheiros eletricitistas e arquitetos nos mais diversos lugares do mundo.

A ferramenta computacional possui um banco de dados climáticos que permite importar informações meteorológicas de diversos sites como *Nasa-SSE*, *Solcast TMY*, *Meteonorm*, assim

como possui dados técnicos bem completos como inversores, baterias, placas, MPPTs entre outros, o que permite fazer o dimensionamento de forma correta.

Uma representação do programa que será utilizado para comparação de dados reais do sistema instalado é mostrada na Figura 29.

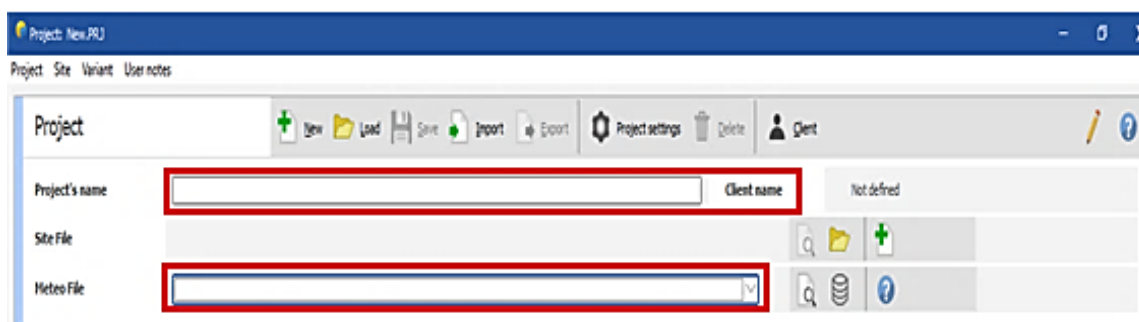
Figura 29 – Layout do software PVsyst®



Fonte: Autor (2023).

Na tela inicial na figura 29 observar-se vários ícones que podem ser escolhidos. Entre elas foi escolhido o *Grid-Connected* que possibilita trabalhar um novo projeto conectado à rede elétrica mais conhecida como *On-Grid*. Ao clicar no módulo *Grid-Connected*, o projetista precisará colocar dados nos dois blocos de informações disponíveis. No primeiro bloco, será necessário o preenchimento do nome do projeto e o ficheiro meteorológico. Esses dados são necessários para dar prosseguimento no bloco seguinte que são as variantes do sistema. As informações do primeiro bloco de informações são mostradas na Figura 30.

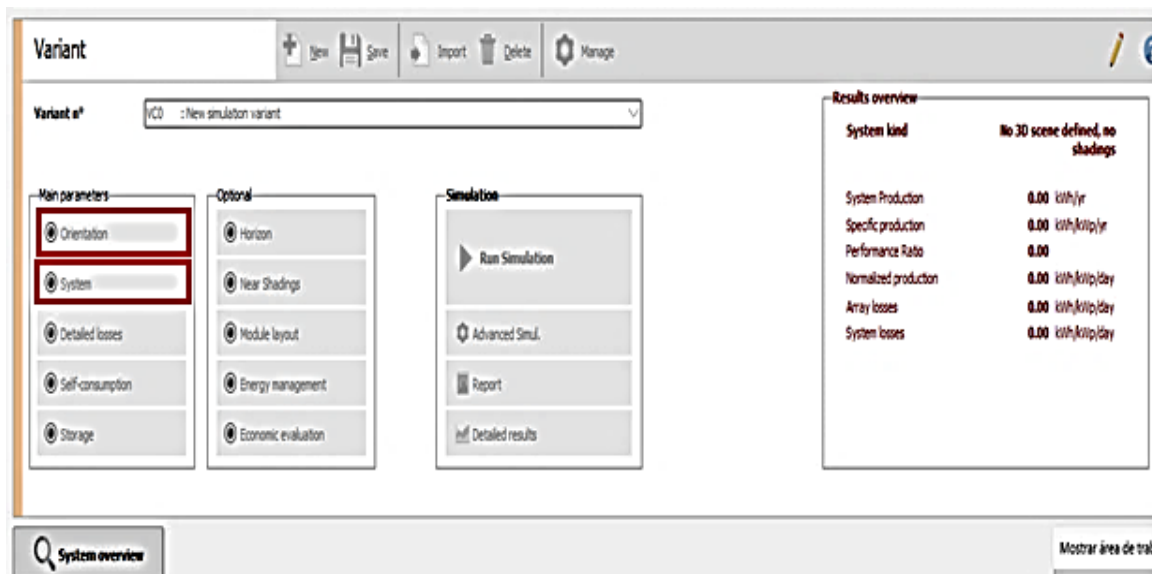
Figura 30 – Bloco de informações dos dados do projeto



Fonte: Autor (2023).

Após preencher os dados do projeto, visto na Figura 30, existem variantes que precisam ser preenchidas, tanto nos parâmetros principais quanto nos parâmetros opcionais como ilustra a Figura 31. Elas são importantes para a geração do relatório que será dado no final da simulação. As principais variantes utilizadas neste trabalho foram: orientação e sistema.

Figura 31 – Bloco de informações das variantes do sistema

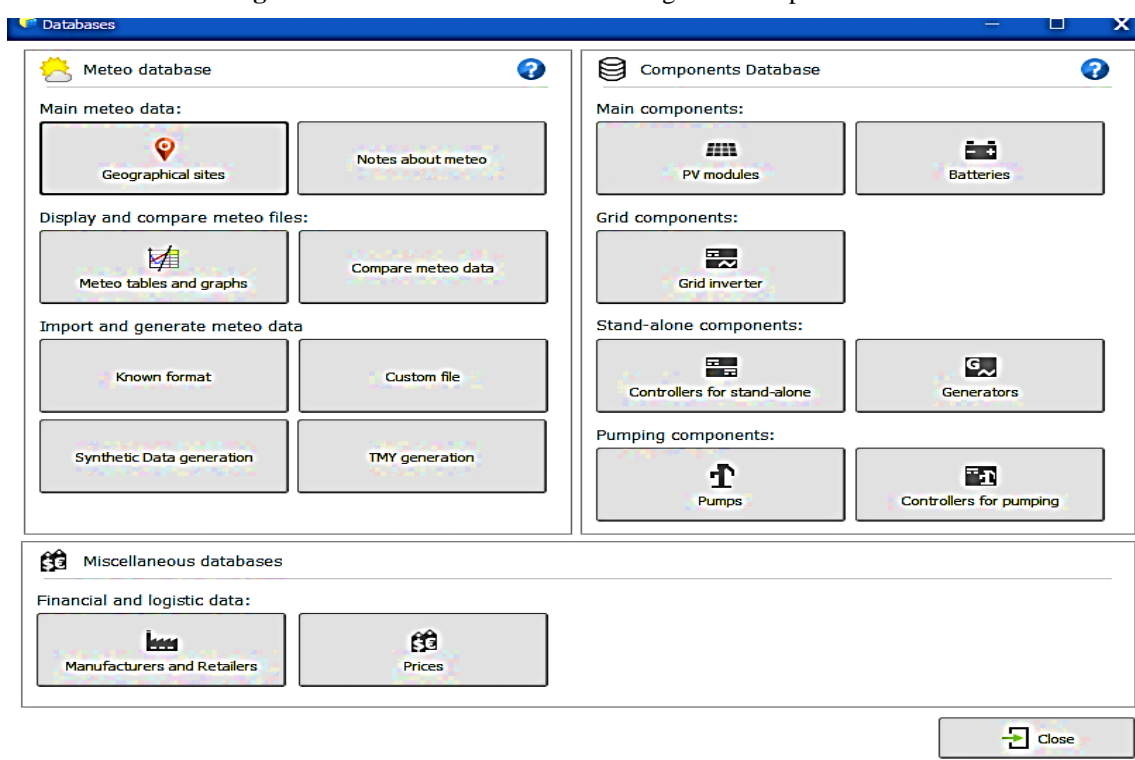


Fonte: Autor (2023).

Assim como no *Grid-Connected* também tem a aba do *Standalone* que é uma opção de projeto não conectado à rede, ou também como pode ser chamado de sistema independente. Porém, o sistema estudado não faz parte dos requisitos de um projeto não conectado à rede, já que se trata de instalação do tipo *on grid*.

Nos *databases* têm-se todas as informações dos dados climáticos que o projetista precisa para a definição do projeto, como ilustra a Figura 32. Esta base de dados pode ser dividida em duas partes, a primeira parte é a base de dados meteorológicos que consiste em localizações, tabelas e gráficos meteorológicos. A outra parte é a base de dados de componentes em que são inseridos os dados principais do sistema como módulo fotovoltaico, baterias, inversores, controladores de carga dentre outros.

Figura 32 – Database: dados meteorológicos e componentes do sistema



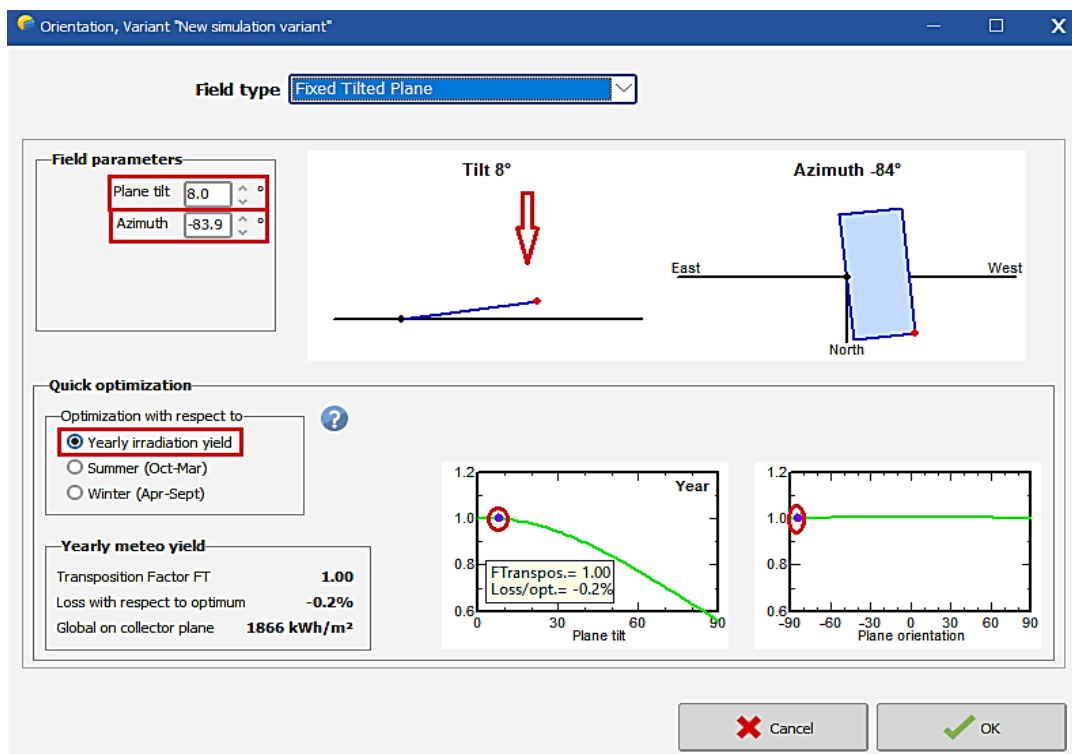
Fonte: Autor (2023).

A partir das informações que foram extraídas dos dados reais do projeto, foi definida a localização geográfica no *PVsystem*®. Na simulação foi considerado que os módulos fotovoltaicos instalados sobre o telhado do edifício estão voltados para o sul geográfico com uma inclinação de aproximadamente 8° e azimute -83,9°.

Essa inclinação é essencial, pois é proporcional à otimização do sistema. Se a inclinação dos módulos fosse consideravelmente elevada as perdas em relação ao ótimo também seria elevada. Isso pode acontecer por diversos fatores como redução das horas que o módulo estará exposto à irradiação e maiores áreas de sombreamento nos módulos posteriores. Os dispositivos

situados à frente provocariam projeções das arestas nos módulos subsequentes. Por outro lado, módulos menos inclinados tendem a acumular mais sujeiras advindas de resíduos da atmosfera que em consonância com fezes de animais e folhas, essas perdas em relação ao ótimo tenderiam a aumentar. Portanto é necessária manutenção em períodos pré-estabelecidos. A angulação dos módulos sobre o telhado e a angulação de azimute podem ser visualizados na Figura 33.

Figura 33 – Informações da variante: orientação



Fonte: Autor (2023).

Os dados coletados do edifício foram todos colocados no *PVsyst*® para simulação, percebe-se que na placa de *design* do programa todas as informações dos equipamentos são necessárias como número de módulos, inversores e *strings*.

Nas informações da variante do sistema em rede, como ilustra a Figura 34, pode ser levado em consideração três fatores principais. A primeira, destacada em azul é a seleção do tipo de módulo que será utilizada no sistema. A segunda região destacada em verde é referente a seleção do inversor, onde pode ser manuseado os dados de tensão de entrada, tensão de saída, variação de múltiplos MPPTs, entre outros. E a terceira região destacada em vermelha seria o dimensionamento do grupo onde se pode obter informações da quantidade de módulos, *strings*, condições de funcionamento e informações do sistema em condições padrão de teste (STC).

Figura 34 – Informações da variante: sistema em rede

Grid system definition, Variant VC0: "New simulation variant"

Sub-array

Sub-array name and Orientation
 Name: PV Array
 Orient.: Fixed Tilted Plane
 Tilt: 8°
 Azimuth: -84°

Pre-sizing Help
 No sizing
 Enter planned power: 21.4 kWp
 ... or available area(modules): 125 m²
 Resize

Select the PV module

Available Now: [v] Filter: All PV modules [v] Approx. needed modules: 64
 BYD [v] 335 Wp 31V Si-poly BYD-335-P6K-36 Since 2020 Datasheets 2020 [v] [Open]
 Use optimizer
 Sizing voltages : Vmpp (60°C) 33.1 V
 Voc (-10°C) 52.1 V

Select the inverter

Available Now: [v] Output voltage 220 V Tri 50Hz [v] 50 Hz [x] 60 Hz [x]
 Fronius International [v] 15 kW 200 - 800 V TL 50/60Hz Symo 15.0-3-M Since 2013 [v] [Open]
 Nb. of inverters: 1 [v] [x] Operating voltage: 200-800 V Global Inverter's power: 15.0 kWac
 Input maximum voltage: 1000 V

Design the array

Number of modules and strings
 Mod. in series: 16 [v] [x] between 7 and 19 [v]
 Nb. strings: 4 [v] [x] between 3 and 4 [x]
 Overload loss: 1.9 %
 Pnom ratio: 1.43 [v] Sizing [v]
 Nb. modules: 64 Area: 125 m²

Operating conditions
 Vmpp (60°C): 529 V
 Vmpp (20°C): 622 V
 Voc (-10°C): 834 V

Plane irradiance: 1000 W/m²
 Imp (STC): 35.9 A
 Isc (STC): 37.6 A
 Isc (at STC): 37.6 A

The inverter power is slightly undersized.
 Max. in data
 STC
 Max. operating power: 20.9 kW
 (at 1072 W/m² and 50°C)
 Array nom. Power (STC): 21.4 kWp

Fonte: Autor (2023).

5 RESULTADOS

Após o programa realizar a simulação, foi gerado um relatório completo com as informações do sistema que foi instalado. No relatório, as informações podem ser divididas em três partes referente ao *Grid-Connected System*. A primeira parte são os parâmetros da simulação onde contém informações gerais do sistema, a segunda parte são os resultados principais (*main results*), onde mostra os resultados principais da simulação que são os gráficos e tabelas. E por último o diagrama de perdas (*loss diagram*) que mostra as principais perdas sistema fotovoltaico.

5.1 – Parâmetros de simulação

Na primeira parte da simulação, nos parâmetros gerais (*general parameters*), contém informações do ângulo de inclinação e azimute. Nas características do arranjo fotovoltaico são informados os dados gerais do tipo de módulo, inversor e potência total, e por último as perdas no arranjo, como pode ser verificado na Figura 35.

Figura 35 – Parâmetros de simulação

General parameters			
Grid-Connected System		No 3D scene defined, no shadings	
PV Field Orientation			
Orientation		Sheds configuration	
Fixed plane		No 3D scene defined	
Tilt/Azimuth	8 / -83.9 °	Models used	
Horizon		Transposition Perez	
Free Horizon		Diffuse Perez, Meteonorm	
		Circumsolar separate	
		User's needs	
		Unlimited load (grid)	

PV Array Characteristics			
PV module		Inverter	
Manufacturer	Generic	Manufacturer	Generic
Model	BYD-335-P6K-36	Model	Symo 15.0-3-M
(Original PVsyst database)		(Custom parameters definition)	
Unit Nom. Power	335 Wp	Unit Nom. Power	15.0 kWac
Number of PV modules	64 units	Number of Inverters	1 unit
Nominal (STC)	21.44 kWp	Total power	15.0 kWac
Modules	4 Strings x 16 In series	Operating voltage	200-800 V
At operating cond. (50°C)		Pnom ratio (DC:AC)	1.43
Pmpp	19.53 kWp		
U mpp	552 V		
I mpp	35 A		
Total PV power		Total inverter power	
Nominal (STC)	21 kWp	Total power	15 kWac
Total	64 modules	Number of Inverters	1 unit
Module area	125 m ²	Pnom ratio	1.43
Cell area	112 m ²		

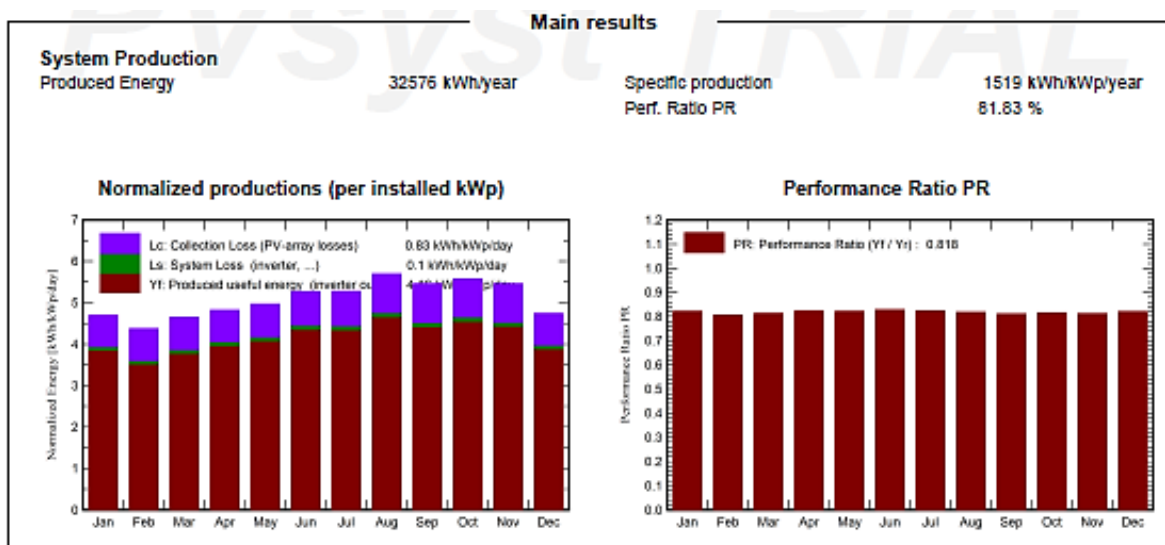
Array losses								
Thermal Loss factor			DC wiring losses			Module Quality Loss		
Module temperature according to Irradiance			Global array res. 259 mΩ			Loss Fraction -0.8 %		
Uc (const) 20.0 W/m²K			Loss Fraction 1.5 % at STC					
Uv (wind) 0.0 W/m²K/m/s								
Module mismatch losses			Strings Mismatch loss					
Loss Fraction 2.0 % at MPP			Loss Fraction 0.2 %					
IAM loss factor								
Incidence effect (IAM): Fresnel, AR coating, n(glass)=1.526, n(AR)=1.290								
0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.999	0.987	0.962	0.892	0.816	0.681	0.440	0.000

Fonte: Autor (2023).

5.3 – Resultados principais

Nos resultados principais (*main results*) contém dois gráficos com informações do projeto: produção normalizada (kWp) e uma relação de eficiência *Performace Ratio* (PR), seguido por uma tabela com informações gerais de irradiação solar, temperatura ambiente, energia gerada, eficiência global, dentre outros. Essas informações são vistas na Figura 36.

Figura 36 – Resultados principais



	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	146.5	79.11	26.51	145.5	141.6	2625	2565	0.822
February	123.0	60.46	26.08	122.4	119.5	2166	2116	0.806
March	145.0	80.87	26.24	144.2	140.6	2574	2515	0.814
April	146.0	76.24	26.04	144.9	141.5	2615	2555	0.823
May	154.5	69.59	26.89	154.0	150.4	2779	2716	0.822
June	158.3	66.46	26.75	158.1	154.4	2872	2807	0.828
July	164.4	67.89	27.03	163.6	159.7	2956	2890	0.824
August	177.6	73.31	27.36	176.6	172.9	3170	3099	0.818
September	164.9	75.00	26.96	163.8	160.5	2913	2847	0.811
October	173.2	87.08	27.46	172.9	169.0	3098	3028	0.817
November	164.9	74.91	27.28	163.8	160.0	2918	2852	0.812
December	148.0	75.44	27.07	147.0	143.4	2648	2587	0.821
Year	1866.2	886.35	26.81	1856.8	1813.4	33335	32576	0.818

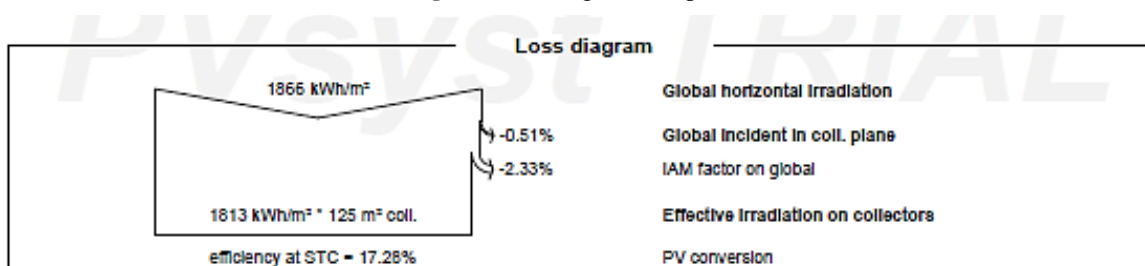
Legends	
GlobHor	Global horizontal irradiation
DiffHor	Horizontal diffuse Irradiation
T_Amb	Ambient Temperature
GlobInc	Global Incident In coll. plane
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings
EArray	Effective energy at the output of the array
E_Grid	Energy Injected Into grid
PR	Performance Ratio

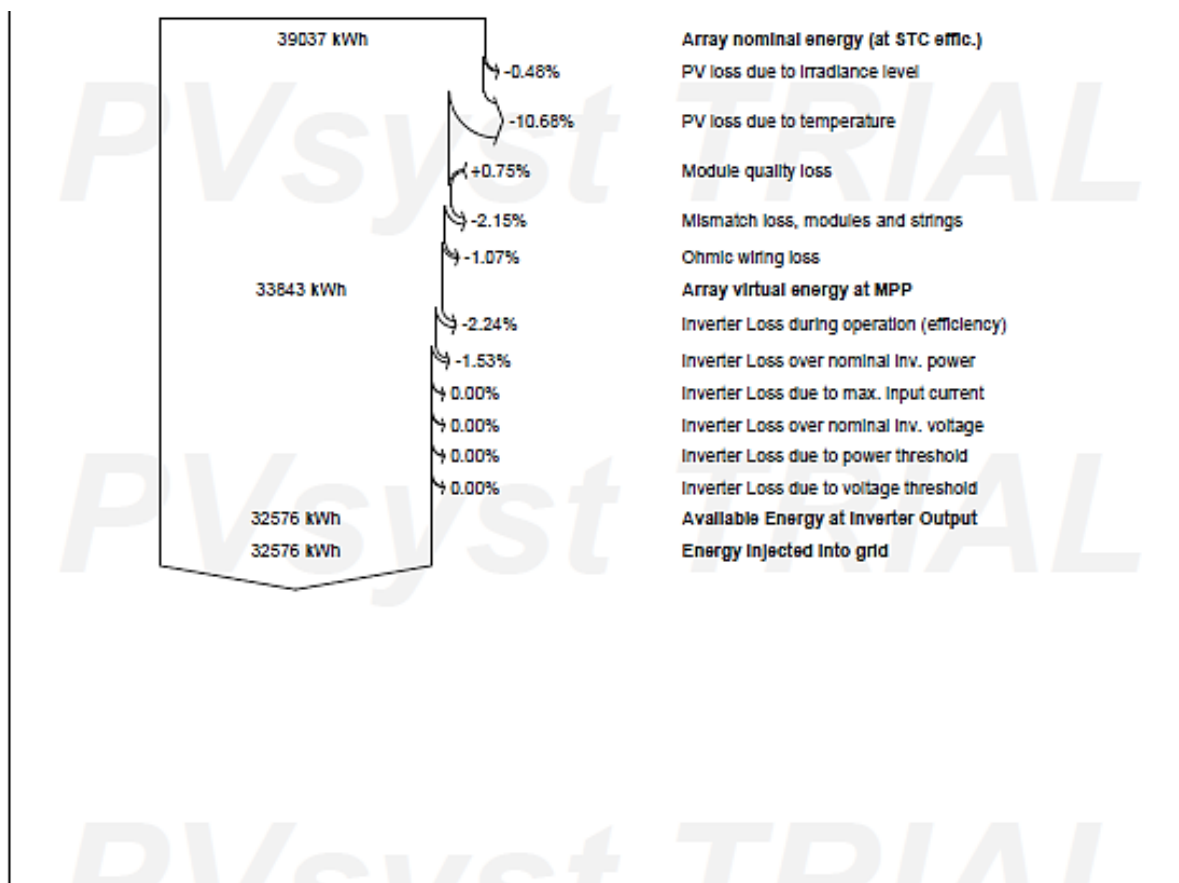
Fonte: Autor (2023).

5.4 – Diagrama de perdas

A geração de energia estimada pelo *software* foi de 39.037 kWh, porém devido as perdas no sistema este valor é reduzido para 32.576 kWh, isto é, de acordo com as condições do local, o *software* conseguiu calcular uma perda de 6,461 MWh. Como pode ser visto na Figura 37.

Figura 37 – Diagrama de perdas

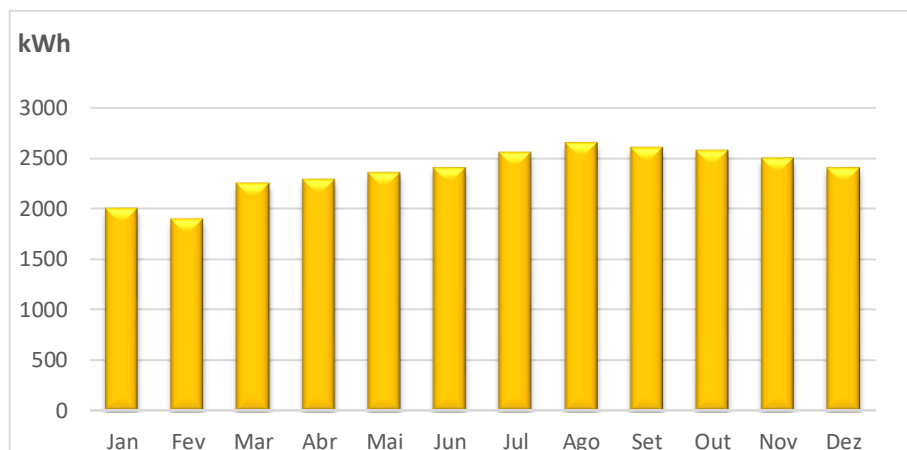




Fonte: Autor (2023).

5.4 Resultado da geração de energia em 2021

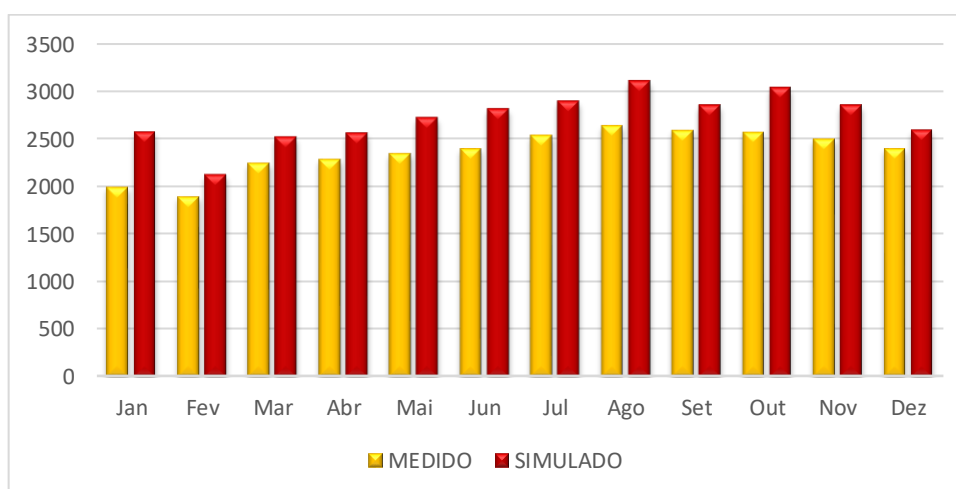
O resultado da geração real em 2021 no edifício no qual foi realizado o estudo pode ser visualizado na Figura 38. O comportamento do gráfico é como uma oscilação ao longo do tempo. Nos meses que compreende o inverno amazônico, de dezembro até maio, percebe-se uma redução da geração de energia elétrica devido a irradiação solar direta que acaba sendo afeta pelo clima.

Figura 38 - Mapeamento da produção de energia em 2021

Fonte: Autor (2023).

A Figura 38 na qual contém os dados reais de entrada do sistema fotovoltaico, foi comparado com os dados da simulação, e o resultado pode ser dado na Figura 39. A maior diferença entre os dados reais de geração e a energia que seria produzida estipulada pelo *software* é verificada no mês de janeiro. Porém, a oscilação do gráfico dos dados reais segue o mesmo comportamento dos dados simulados. Essa diferença se dar pelas variações de perdas entre os dados de entrada e os dados simulados.

Toda máquina elétrica em funcionamento é dificilmente consegue entregar 100% de eficiência. Existe sempre perdas por efeito joule, desgastes mecânicos ao longo do tempo e diversos outros fatores que influenciam diretamente na produção energia. Essa diferença pode ser dada nos dados simulados.

Figura 39 – Comparação entre os dados medidos e simulados

Fonte: Autor (2023).

6 CONCLUSÃO

A geração real no ano de 2021 no edifício foi de 28.850 kWh. Após a simulação do *software PVsyst®*, o resultado foi de 32.576 kWh, ou seja, a diferença entre os resultados foi de 3,736 MWh. Tirando a média da diferença das perdas no sistema durante um ano de geração, chegou-se à conclusão de que as perdas reais foram de 311,3 kWh acima que o disponibilizado pelo *software*.

Esta diferença é acarretada por diversos fatores. Primeiro, as perdas que o programa considera não corresponde exatamente as perdas que acontece na realidade. O *software* considera uma perda de 10,68% por temperatura durante a conversão, na realidade este valor pode ser mais alto. Pois sabe-se que nas condições padrão de teste (STC) a temperatura da célula considerada é de 25° C, ou seja, o resultado esperado tende a ser diferente. E além dos fatores de perdas, devem ser levados em consideração os fatores como o clima.

O indicador do potencial do sistema leva em consideração diversos fatores como a questão da irradiância. O gráfico pode apresentar diferenças ao longo do ano, não correspondendo ao mesmo comportamento do gráfico da irradiação solar no plano horizontal. As condições meteorológicas também é um fator que pode acarretar a variação da comparação dos dois gráficos. Oscilações na rede elétrica, tensões que podem ocasionar mudanças nos terminais do inversor, o que faz com que o inversor deixe de operar por alguns instantes.

Portanto, este trabalho proporcionou uma análise computacional detalhada de um sistema fotovoltaico utilizando o *software PVsyst®*. Demonstrou eficiência e utilidade para o dimensionamento e simulação de sistemas fotovoltaicos. Além disso, o programa forneceu dados precisos e confiáveis para a tomada de decisões relacionadas ao projeto. Recomenda-se que estudos adicionais sejam realizados para uma avaliação mais completa e precisa do sistema fotovoltaico em diferentes condições e cenários.

7 REFERÊNCIAS

- AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de potência**. Pearson Education do Brasil, 2008.
- ALMEIDA, Fábio Pires de et al. **Eficiência energética em painéis fotovoltaicos**. 2022.
- ANDRADE, Airtton Cabral de. **Análise e simulação da distribuição de temperaturas em módulos fotovoltaicos**. 2008.
- ANEEL. Ministério de Minas e Energia. **Matriz elétrica brasileira cresce 3,3 GW até abril de 2023**. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/matriz-eletrica-brasileira-cresce-3-3-gw-ate-abril-de-2023>> Acesso em: 22/07/2023.
- ANEEL. Ministério de Minas e Energia. **Micro e Minigeração Distribuída**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida> Acesso em: 24/07/2023.
- BELVAL, Jucal et al. **Energia renovável: Biodiesel e coletor solar**. 2015.
- BORTOLOTO, Valter A. et al. Geração de energia solar on grid e off grid. In: **VI JORNACITEC-Jornada Científica e Tecnológica**. 2017.
- CÂMARA, Carlos F. **Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. Universidade Federal de Lavras, UFLA, MG, 2011.
- CARNEIRO, Joaquim AO. **Módulos fotovoltaicos: Características e associações**. 2010.
- CHIKATE, Bhalachandra V.; SADAWARTE, Y.; SEWAGRAM, BDCOE. **Os fatores que afetam o desempenho da célula solar**. *Jornal internacional de aplicações de computador*, v. 1, n. 1, pág. 0975-8887, 2015.
- DALMARCO, Arthur Rodrigues et al. **Regulação energética: sustentabilidade e inovação nos ambientes regulatórios brasileiro e estadunidense**. 2017.
- DE PESQUISA ENERGÉTICA, Empresa. **Fontes de Energia**. Recuperado em, v. 14, 2021. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/fontes-de-energia/>
- DO NASCIMENTO, C. A. **PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA CÉLULA**. Monografia, Universidade Federal de Lavras, Departamento de Engenharia, Lavras-MG, 2004.
- ELETROMECHAN, solar. **Nível de energia dos elétrons**. Disponível em: <http://solar.eletromecan.com.br/> Acesso em: 13/03/2023.
- ENERGY, resize solar. **Sistema de energia solar térmica**. Disponível em: <https://www.resizesolar.com/single-post/2015/11/09/entenda-a-diferença-entre-energia-fotovoltaica-e-fototérmica>. Acesso em: 05/02/2023.
- FERNANDES, Antônio de Almeida. **Desenvolvimento de um rastreador de baixo custo para sistemas de energia fotovoltaicos**. 2019.
- GN, greenovation. **Sistema fotovoltaico autônomo com armazenamento**, 2021. Disponível em: <https://greenovation.com.br/energia-solar-off-grid/> Acesso em: 12/07/2023.

- KNABBEN, Gustavo Carlos et al. **Microinversor fotovoltaico não isolado de dois estágios**. 2017.
- LAVEZZO, César Augusto Lotti. Fontes de energia. **Revista Eletrônica Gestão em Foco, Amparo**. 2016.
- MACHADO, Letícia da Silva; DANIEL, Gil; NEVES, Rawan Luttierhy Cardoso. **Estudo e implantação de um sistema fotovoltaico conectado à rede em uma residência**. 2022.
- MARQUES, Rubéria Caminha; KRAUTER, Stefan CW; DE LIMA, Lutero C. **Energia solar fotovoltaica e perspectivas de autonomia energética para o nordeste brasileiro**. Revista Tecnologia, v. 30, n. 2, 2009.
- NACIONAL, balanço energético. **Matriz elétrica e energética Brasileira**. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 02/02/2023.
- OGBOMO, Osarumen O. et al. **Uma revisão das tecnologias de módulos fotovoltaicos para maior desempenho em clima tropical**. Revisões sobre Energia Renovável e Sustentável, v. 75, p. 1225-1238, 2017.
- PASSOS, Alanna de Santana. **O uso do sistema fotovoltaico como alternativa energética em residências de médio padrão na cidade de Lagarto (SE)**. 2021.
- PEREIRA, Pedro Tiago Sousa et al. **Energia solar térmica: perspectivas do presente e do futuro**. 2010.
- PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Grupo de trabalho de energia solar–GTES**. CEPEL–DTE–CRESESB, 2014.
- PHILIPPI JÚNIOR, Arlindo; REIS, Lineu Belico dos. **A questão energética e sua relação com a sustentabilidade: à guisa de introdução**. Energia e sustentabilidade, 2016.
- PORTAL SOLAR. **Efeito Fotoelétrico x Efeito Fotovoltaico: quais as diferenças?** São Paulo - SP, 2018. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/efeito-fotovoltaico-x-efeito-fotoeletrico-o-que-sao-quais-diferencas>. Acesso em: 02/06/2023.
- POTÊNCIA, eletrônica de. **Representação do efeito fotovoltaico**. 2020. Disponível em: <https://eletronicadepotencia.com/celula-fotovoltaica/> Acesso em: 17/03/2023.
- RAÍZEN, empresa integrada. **Matriz energética brasileira**. 2023. . Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/matriz-energetica-brasileira> Acesso em: 15/06/2023.
- RAMPINELLI, Giuliano Arns. **Estudo de características elétricas e térmicas de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. 2010.
- REBOLLAR Paola Beatriz May; RODRIGUES Paulo Roberto. **Energia solar**. 2011.
- REINDERS, Angèle et al. **Energia solar fotovoltaica: dos fundamentos às aplicações** . John Wiley & Filhos, 2017.

REIS, Pedro. **Fontes de energia-Tudo sobre energias renováveis**. 2022. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/fontes-de-energia/>

SERRÃO, Marcos Antônio dos Santos. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico para uma casa de veraneio em Pouso da Caixaíba-Paraty**. 2010.

SILVA, Wenderson Rebouças da. **Análise de performance através do software PVsyst de gerações solares fotovoltaicas com potência de até 10 kWp conectados à rede na cidade de Fortaleza/Ceará no ano de 2021**. 2022.

SILVA, Mateus Dias; MINCHIO, Janio Lobo. **SOLAR BACKPACK**. 2020.

SOLAR, canal. **Módulo half cell**. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/modulos-fotovoltaicos-half-cell/> Acesso em: 30/04/2023.

SOLAR, blue sol energia. **Célula fotovoltaica**. 2022. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/> Acesso em: 22/03/2023.

SOLAR, portal. **Sistema de concentrador solar**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-heliotermica-entenda-como-funciona> Acesso em: 21/02/2023.

SOUZA, Calil Nunes et al. **Análise do comportamento da temperatura de um módulo fotovoltaico de silício policristalino operando sob as condições meteorológicas de Fortaleza-CE**. 2019.

DE SOUSA, Angélica Silva; DE OLIVEIRA, Guilherme Saramago; ALVES, Laís Hilário. **A pesquisa bibliográfica: princípios e fundamentos**. Cadernos da FUCAMP, v. 20, n. 43, 2021.

TECNOVERITAS, dedicated. **Sistema Híbrido de energia**. 2018. Disponível em: <https://www.tecnoveritas.net/pt/multimedia/newsletters-pt/industria/sistemas-hibridos-industria/> Acesso em: 07/05/2023.

TEIXEIRA, Thiago Barçante. **Influência da temperatura em aglomerados auto-reconfiguráveis de células solares fotovoltaicas**. MSc em Universidade Federal de Minas Gerais-Instituto de Ciências Exatas, 2008.

UBBER, Sol. **Módulo policristalino e monocristalino**. Disponível em: <http://ubbersol.com.br/blog/energia-solar-fotovoltaica/> Acesso em: 20/04/2023.

VILLALVA, Marcelo. **Característica dos módulos fotovoltaicos half-cell**. 2019

VISTA, solar. **Tabela de eficiência de arranjos fotovoltaicos**. Disponível em: <https://www.solavistaenergy.com.br/entenda-a-eficiencia-do-painel-solar> Acesso em: 14/06/2023.

ZILLES, Roberto et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. Oficina de textos, 2016.