

UNIEVANGÉLICA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

BRUNO DOS SANTOS FELIPE ARAÚJO

GLAUBER BARACHO DE LIMA

**DIMENSIONAMENTO E PROPOSTA DE INSTALAÇÃO DE
ENERGIA SOLAR POR MEIO DE UM SISTEMA
FOTOVOLTÁICO EM UMA RESIDENCIA UNIFAMILIAR
EM ANÁPOLIS – GO: UM ESTUDO DE CASO**

ANÁPOLIS / GO

2020

BRUNO DOS SANTOS FELIPE ARAÚJO

GLAUBER BARACHO DE LIMA

**DIMENSIONAMENTO E PROPOSTA DE INSTALAÇÃO DE
ENERGIA SOLAR POR MEIO DE UM SISTEMA
FOTOVOLTÁICO EM UMA RESIDENCIA UNIFAMILIAR
EM ANÁPOLIS – GO: UM ESTUDO DE CASO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

**ORIENTADOR: ESPECIALISTA AURÉLIO CAETANO
FELICIANO**

ANÁPOLIS / GO: 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

FELIPE, BRUNO DOS SANTOS / LIMA, GLAUBER BARACHO

Dimensionamento e proposta de instalação de energia solar por meio de um sistema fotovoltaico em uma residência unifamiliar - em Anápolis.

87 P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2020).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

- | | |
|-------------------------------|--------------------------|
| 1. Energia Solar | 2. Sistema Solar Térmico |
| 3. Sistema Solar Fotovoltaico | 4. Dimensionamento |
| I. ENC/UNI | II. Bacharel |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FELIPE, Bruno dos Santos / LIMA, Glauber Baracho. Dimensionamento e proposta de instalação de energia solar por meio de um sistema fotovoltaico em uma residência unifamiliar - em Anápolis. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA, Anápolis, GO, 87p. 2020.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Bruno dos Santos Felipe Araújo

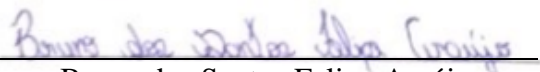
Glauber Baracho de Lima

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:

Dimensionamento e proposta de instalação de energia solar por meio de um sistema fotovoltaico em uma residência unifamiliar - em Anápolis

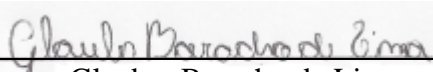
GRAU: Bacharel em Engenharia Civil ANO: 2020

É concedida à UniEVANGÉLICA a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Bruno dos Santos Felipe Araújo

E-mail: brunoaraujobr0712@gmail.com



Glauber Baracho de Lima

E-mail: glauberbaracho@outlook.com

BRUNO DOS SANTOS FELIPE ARAÚJO

GLAUBER BARACHO DE LIMA

**DIMENSIONAMENTO E PROPOSTA DE INSTALAÇÃO DE
ENERGIA SOLAR POR MEIO DE UM SISTEMA
FOTOVOLTÁICO EM UMA RESIDENCIA UNIFAMILIAR
EM ANÁPOLIS – GO: UM ESTUDO DE CASO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL**

APROVADO POR:

**AURÉLIO CAETANO FELICIANO, Especialista (UniEVANGÉLICA)
(ORIENTADOR)**

**WELINTON ROSA DA SILVA, Mestre (UniEVANGÉLICA)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**GLEDISTON NEPOMUCENO COSTA JÚNIOR, Mestre
(UniEVANGÉLICA)
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: ANÁPOLIS/GO, 03 de DEZEMBRO de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela oportunidade dada nessa vida, a minha família pelo apoio constante e fé em meu esforço, aos amigos e colegas pelos bons e maus momentos durante a formação e a faculdade e professores pelo ensino de qualidade, atenção e compromisso com nosso aprendizado.

Glauber Baracho de Lima

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por tudo que ele me ofereceu durante o meu percurso acadêmico. Aos meus pais Eduardo de Araújo e Marlene dos Santos Felipe Araújo pelo apoio e incentivo para a realização dos meus sonhos. Ao meu irmão Victor dos Santos Felipe Araújo por estar presente comigo durante essa minha caminhada. À minha namorada Julia Beatriz Soares Lima que sempre esteve ao meu lado durante o meu percurso acadêmico. Aos meus amigos Glauber Baracho de Lima e João Batista de Alvarenga pelas trocas de ideias e ajuda mútua. Juntos conseguimos avançar e ultrapassar todos os obstáculos. Ao meu professor orientador Aurelio Caetano pelas valiosas contribuições dadas durante todo o processo. À Associação Educativa UniEvangélica e todos os seus professores que sempre proporcionaram um ensino de alta qualidade.

Bruno dos Santos Felipe Araújo

RESUMO

Tendo em vista que o mercado está em crescimento exponencial, há grande potencial de irradiação no Brasil e a busca mundial pela sustentabilidade, pesquisa-se sobre energia solar, a fim de dimensionar e propor instalação de energia solar por meio de um sistema solar fotovoltaico e em uma residência unifamiliar em Anápolis. Para tanto, é necessário compreender a energia solar e suas características gerais como fonte de energia, conhecer as tecnologias mais utilizadas no mercado para conversão de energia solar em energia elétrica e térmica, entender o funcionamento e componentes dos sistemas solar térmico e fotovoltaico, e suas instalações ligada a rede ou autônomas, estudar a viabilidade econômica e de execução do uso da energia fotovoltaica e propor o dimensionamento do sistema fotovoltaico para uma residência domiciliar. Para esse estudo foi dimensionado um sistema fotovoltaico de 1440 kWp que reduziu o preço da fatura para a taxa mínima de uso, cerca de 15% do valor mensal pago, e com essa economia por meio de uma análise de custo o sistema poderá ser pago em 5 anos.

Palavras-chave:

Energia solar. Sistema solar térmico. Sistema solar fotovoltaico. Dimensionamento. Economia.

ABSTRACT

Bearing in mind that the market is growing exponentially, there is great potential for irradiation in Brazil and the worldwide search for sustainability, research on solar energy, in order to dimension and propose installation of solar energy through a solar photovoltaic system and in a single family home in Anápolis. Therefore, it is necessary to understand solar energy and its general characteristics as an energy source, to know the most used technologies in the market for converting solar energy into electrical and thermal energy, to understand the functioning and components of the solar thermal and photovoltaic systems, and their grid-connected or autonomous installations, study the economic feasibility and execution of the use of photovoltaic energy and propose the dimensioning of the photovoltaic system for a home residence. For this study, a 1440 kWp photovoltaic system was designed that reduced the invoice price to the minimum usage fee, about 15% of the monthly amount paid, and with this savings through a cost analysis the system can be paid in 5 years.

KEYWORDS:

Solar energy. Solar thermal system. Photovoltaic solar system. Sizing. Economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Equação da fotossíntese.	20
Figura 2 - Espectro visível da luz.	22
Figura 3 - Mudanças no trajeto sofridas pela radiação solar.	23
Figura 4 – Irradiância diária (Horário x W/m ²).	24
Figura 5 - Declinação solar.	26
Figura 6 - Ângulo horário solar.	27
Figura 7 - Solarimetria	28
Figura 8 - Mapas anuais de irradiação global horizontal, direta normal e inclinada no plano.	29
Figura 9 - Top 10 países de maior Mwth instalada.	30
Figura 10 - Top 10 países com maior quantidade de kWth a cada 1000 habitantes.	31
Figura 11 - Coletor solar aberto.	34
Figura 12 - Estrutura do coletor plano.	35
Figura 13 - Retenção de calor em diferentes revestimentos.	35
Figura 14 - Coletor parabólico composto.	38
Figura 15 - Coletores Solares à Vácuo.	39
Figura 16 - Tanque de armazenamento com sistema auxiliar de aquecimento.	41
Figura 17 - Controladores solares.	42
Figura 18 – Célula de silício monocristalino antirreflexo.	44
Figura 19 - Célula de silício policristalino antirreflexo.	44
Figura 20 - Células de filmes finos.	45
Figura 21 – Estrutura de um módulo fotovoltaico.	46
Figura 22- Etiqueta do INMETRO de um módulo solar.	48
Figura 23 - Ligação dos módulos fotovoltaicos em série.	51
Figura 24 - Ligação dos módulos fotovoltaicos em paralelo.	52
Figura 25 - Ligação dos módulos fotovoltaicos de forma mista.	53
Figura 26 – Ocorrência de hotspot.	54
Figura 27 - Sistema fotovoltaico isolado	55
Figura 28 - Sistema fotovoltaico conectado a rede elétrica.	56
Figura 29 – Tipos de onda produzida pelos inversores.	57
Figura 30 - Baterias estacionárias e automotivas.	59
Figura 31 - Residência do estudo de caso.	60

Figura 32 - Fatura de energia elétrica.	64
Figura 33 - Mapa de média diária irradiação global horizontal anual	65
Figura 34 - Mapa interativo.....	66
Figura 35 - Dados meteorológicos do banco de dados do Meteonorm.....	66
Figura 36 - Dados do Módulo fotovoltaico.....	68
Figura 37 - Bússola Digital.	69
Figura 38 - Planta de dimensões (ASG SOLAR, Acesso em 2020).....	70
Figura 39 - Parâmetros principais do Inversor.	71
Figura 40 - Modelagem 3D do sistema fotovoltaico.	72
Figura 41 - Diagrama do projeto.	73
Figura 42 - Relatório do balanço energético do sistema fotovoltaico.	74
Figura 43 - Perdas normalizadas (por kWp instalado).....	75
Figura 44 - Índice de performance (PR).	75
Figura 45 - Diagrama de perdas elétricas.....	76
Figura 46 - Gráfico da Eficiência x Irradiância Global do Módulo.....	77
Figura 47 - Gráfico Eficiência x Potência de entrada do inversor.....	77
Figura 48 - Gráfico Potência x Temperatura do inversor.....	78
Figura 49 - Limpeza do módulo fotovoltaico.....	79
Figura 50 - Gráfico Consumo x Geração (kWh).	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens do coletor solar aberto.....	34
Quadro 2 - Materiais de isolamento.....	36
Quadro 3 - Vantagens e desvantagens do coletor solar plano.....	37
Quadro 4 - Vantagens e desvantagens do coletor solar plano.....	38
Quadro 5 - Vantagens e desvantagens do coletor solar plano.....	39
Quadro 6 - Fatores técnicos que afetam o SFCR.....	61
Quadro 7 - Preço dos componentes	79

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLA

AGM	Absorbed Glass Mat
ALTENER	Alternative Renewable Energy
ANEEL	Agência Nacional De Energia Elétrica.
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CdTe	Telureto De Cádmio
CIGS	Cobre-Índio-Gálio-Selênio
ENEL	Autoridade Nacional De Eletricidade
EPE	Empresa De Pesquisa Energética
GB	Radiação Direta
GD	Radiação Difusa
GSC	Constante Solar
HSP	Hora Solar Pico
INPE	Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
INMET	Instituto Nacional De Meteorologia
J	Joules
LABREN	Laboratório De Modelagem E Estudo De Recursos Renováveis De Energia
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NiCd	Níquel-Cádmio
NiMH	Níquel-Metal-Hidreto
NOCT	Temperatura Nominal De Operação Da Célula
NREL	Laboratório Nacional De Energia Renovável
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado A Rede
SI	Sistema Internacional De Medidas.
STC	Condições Padrões De Teste
UFSC	Universidade Federal De Santa Catarina
W	Watts
a-Si	Silício Amorfo
μ -Si	Silício Microcristalinos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA.....	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
1.3 METODOLOGIA	18
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2 ENERGIA SOLAR	20
2.1 O SOL	21
2.2 RADIAÇÃO GLOBAL	22
2.3 IRRADIÂNCIA E IRRADIAÇÃO SOLAR	23
2.4 GEOMETRIA SOLAR.....	25
2.5 MAPAS DE IRRADIAÇÃO NO BRASIL.....	28
2.6 POTENCIAL FOTOVOLTAICO E SOLAR TÉRMICO	29
2.6.1 Potencial solar térmico	29
2.6.2 Potencial fotovoltaico.....	31
3 SISTEMA SOLAR TÉRMICO DE BAIXA TEMPERATURA.....	32
3.1 SISTEMA SOLAR TÉRMICO DE BAIXA TEMPERATURA	32
3.1.1 Coletores solares	33
3.1.1.1 <i>Coletor solar simples</i>	33
3.1.1.2 <i>Coletor Solar Plano</i>	34
3.1.1.3 <i>Coletores Solares Parabólicos Compostos (CPCs)</i>	37
3.1.1.4 <i>Coletores Solares à vácuo</i>	38
3.1.2 Tanques de armazenamento.....	40
3.1.3 Circuito Solar.....	42
3.1.4 Termostato	42
4 SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO	43
4.1 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....	43

4.2	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	46
4.2.1	Informações comerciais das características dos módulos.....	47
4.2.1.1	<i>Características elétricas</i>	48
4.2.1.2	<i>Características mecânicas</i>	49
4.2.1.3	<i>Características térmicas</i>	50
4.2.2	Tipos de associação dos módulos fotovoltaicos.....	50
4.2.2.1	<i>Associação em série</i>	50
4.2.2.2	<i>Associação em paralelo</i>	51
4.2.2.3	<i>Associação mista.....</i>	52
4.2.3	Sombreamento	53
4.3	SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO	54
4.4	SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE ELÉTRICA.....	55
4.5	INVERSOR	56
4.6	BATERIAS	57
4.7	CONTROLADOR DE CARGA	59
5	ESTUDO DE CASO: DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE (ONGRID).....	60
5.1	ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA.....	61
5.1.1	Energia de geração	63
5.1.2	Recurso Solar	64
5.1.3	Painéis fotovoltaicos.....	67
5.1.4	Posicionamento dos painéis	69
5.1.5	Inversor	70
5.1.6	Cabos e dispositivos de proteção	71
5.2	RESULTADOS E ANÁLISE DO RELÁTÓRIO	72
5.2.1	Modelagem 3D e diagrama simplificado.....	72
5.2.2	Balanco energético	73
5.2.3	Perdas do sistema.....	76
5.2.4	Vida útil e Manutenção.....	78
5.3	VIABILIDADE FINANCEIRA.....	79
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
	REFERÊNCIAS.....	82

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Associação Brasileira de Energia Fotovoltaica (ABSOLAR, 2020), de 2016 para 2020 houve um aumento de potência instalada no Brasil em mais de 7.000%, saindo de 93 MW para 6.727 MW, em apenas 4 anos. Comparando com o mesmo período de tempo, entre de 7 MW em 2012 para 93 MW em 2016, o crescimento nos últimos 4 anos é exponencial, gerando muita demanda de materiais, mão de obra especializada e investimentos para esse setor. A produção energética por meio do sol já ocupa mais de 3% da matriz energética elétrica no Brasil.

A China possui uma potência de geração de energia elétrica fotovoltaica instalada superior a toda matriz elétrica produzida no Brasil mesmo com as grandes hidroelétricas, mas a sua região geográfica possui incidência de irradiação solar em média 50% menor que o Brasil e mesmo assim produz 100 vezes mais energia por meio do Sol. O Brasil possui ótimas condições para geração não só de energia elétrica fotovoltaica mais como solar térmica (IEC, 2020).

Com a preocupação com o desenvolvimento sustentável, práticas e desenvolvimentos na área de energia “limpa”, como a solar ganham maiores incentivos, o que promove a atualização constante de tecnologias para melhor captação da energia solar. A cada 4,4 MWh de energia produzida seja pela tecnologia fotovoltaica ou heliotérmica, deixa de jogar na natureza 1 tonelada de CO₂ (ANEEL, 2008).

1.1 JUSTIFICATIVA

A constante busca pela sustentabilidade está promovendo a rápida ascensão da tecnologia de captação de energia solar e produção de energia elétrica. Anualmente de forma exponencial a quantidade de unidades de geração centralizada e descentralizada vem aumentando, e preço dos equipamentos diminuindo, expondo uma grande oportunidade para a autossuficiência energética, possibilitando ainda a venda dos excedentes (IEC, 2020).

No Brasil já há diversos produtos catalogados e testado pelo órgão regulador INMETRO, além de programas sociais de financiamento, redução de preço de importação e incentivos para produção nacional, aquecendo e fomentando um mercado que no Brasil tem grande potencial (ABSOLAR, 2020).

Com as inconstâncias climáticas, a principal matriz elétrica do Brasil se encontra muitas vezes insuficiente para atender a demanda nacional necessitando assim da importação de energia elétrica, somada a essa importação tem a ativação de usinas termoelétricas que gera grande poluição e aumento significativo na taxa de energia elétrica (PEREIRA, 2017).

Justifica-se por meio desse trabalho o estudo dessa energia para captação da energia solar, a fim de promover o conhecimento dos sistemas de geração de energia para produção elétrica ou aquecimento de água, e assim promover a descentralização e diminuir a saturação do consumo elétrico nacional, além de projetar um sistema que promova economia e rentabilidade.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Apresentar através de um estudo de caso o dimensionamento e processo de instalação de um sistema fotovoltaico em uma residência unifamiliar em Anápolis – GO e ressaltar sua viabilidade como fonte energética de consumo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Compreender a energia solar e suas características gerais como fonte de energia.
- Entender o funcionamento e componentes dos sistemas térmico solar e fotovoltaico e suas instalações isoladas ou conectadas a rede.
- Estudar a análise de custo do uso da energia fotovoltaica.
- Propor o dimensionamento do sistema fotovoltaico para uma residência domiciliar.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho será um estudo da energia solar, buscando compreender sua origem, características físicas e sua interação com o planeta Terra e assim desvendar e ressaltar sua importância no passado, presente e futuro da sociedade humana. Baseando-se em fontes de órgãos e instituições especializadas na área de energia solar como a Comissão Eletrotécnica Internacional-IEC e Associação Brasileira de Energia Solar - ABSOLAR.

Será estudado as tecnologias existentes atualmente para captação e conversão de energia solar em energia elétrica e os componentes do sistema para aquecimento de água que são utilizados no Brasil para fins de economia.

A partir dos *softwares* PVsyst e PV Sol, será projetado e dimensionado um sistema de geração de energia elétrica por meio da tecnologia de células fotovoltaicas, que conta com dados de irradiação solar, catálogo de equipamentos, projeções de interferências e perdas para um residência em Anápolis-Go afim de garantir a autossuficiência energética e reduzir assim os custos ao longo prazo.

Por fim será feita uma análise do custo do sistema, tão quanto suas vantagens e desvantagens, buscando no mercado preços e comparando com a economia gerada pelo sistema para se auto financiar.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho se iniciará com capítulo 1, que introduzirá o assunto sobre a energia solar, destacando brevemente suas principais características, usos, tecnologias, importância e cenário atual, seguindo com breve descrição do restante da monografia.

O capítulo 2 se desenvolverá sobre a energia solar, suas características, tipos, utilizações, ramificações, estudos e o cenário atual.

O capítulo 3 exemplificará o uso da energia solar térmica, baseado no sistema de captação de energia solar para aquecimento de água.

O capítulo 4 destinará sobre o uso da energia solar por meio das tecnologias de painéis fotovoltaicos conectados ou desconectados a rede elétrica de abastecimento brasileira.

O capítulo 5 dimensionará um sistema de captação de energia solar por meio da tecnologia fotovoltaica.

O capítulo 6 analisará o dimensionamento para exemplificar e justificar o uso da tecnologia.

2 ENERGIA SOLAR

A energia solar é a responsável por praticamente quase toda vida no planeta Terra, a partir de seres vivos que possuem células especializadas, chamadas de clorofilas, responsáveis por captar um pequeno trecho do espectro eletromagnético, conseguem transformar moléculas de água (H₂O) e dióxido de carbono (CO₂) em oxigênio (O₂) e glicose (C₆H₁₂O₆) por meio do processo chamado fotossíntese (Figura 1), sendo base da grande maioria das cadeias alimentares na biosfera (OPENSTAX, 2015).

Figura 1 - Equação da fotossíntese.



Fonte: (OPENSTAX, 2015) - modificado.

O sol irradia energia que é responsável pelo ciclo hidrológico da água (Figura 2), formação dos ventos e correntes marítimas, que gera o acúmulo energético das moléculas de água, passando do estado líquido para o estado gasoso, e devido a sua densidade, ela sobe para as camadas mais altas da atmosfera e condensa devido as baixas temperaturas, retornando ao estado líquido, graças a essa diferença de temperatura e pressão das camadas da atmosfera, provoca o movimento da massa de ar, movimentando também a água acima da superfície e nos mares, gerando associadamente com o movimento da terra, as correntes marítimas (BARRY e CHORLEY, 2013).

Também chamada de recurso solar a energia proveniente do sol é utilizada de diversas formas, mas desde a descoberta do efeito fotovoltaico em 1839 pelo físico francês, Alexandre Edmond Becquerel (NASCIMENTO, 2004), esta fonte vem ganhando muita importância no setor energético mundial, e com o desenvolvimento e aperfeiçoamento de novas tecnologias para a captação e conversão em energia elétrica a sua participação na matriz energética mundial de fontes energéticas cresce exponencialmente, devido as políticas de desenvolvimento sustentável que investe mais recursos a cada ano.

2.1 O SOL

O Sol é uma estrela média dotada de aproximadamente $1,392 \times 10^9$ metros de diâmetro, 109 vezes maior que a Terra, e com uma massa aparente de $1,9891 \times 10^{30}$ quilogramas, sendo 332 mil vezes mais pesado que a Terra e constituído de 75% de hidrogênio e 25% hélio. A sua temperatura média na superfície beira os 5.500°C e no núcleo chega a atingir 15 milhões de graus Celsius, tudo isso devido ao seu processo de fusão nuclear dos átomos de hidrogênio para formar átomos de hélio, causada pela imensa quantidade de massa, liberando nesse processo gigantescas quantidades de energia e chegando assim até o nosso planeta. Apesar de estar a uma distância média de 149,6 milhões de quilômetros, que equivalente a 3.733 voltas seguindo a linha do equador, é a energia vinda do sol que é responsável por aquecer todo planeta, possibilitando assim a vida como se conhece hoje (GREGORY e ZEILIK, 1997).

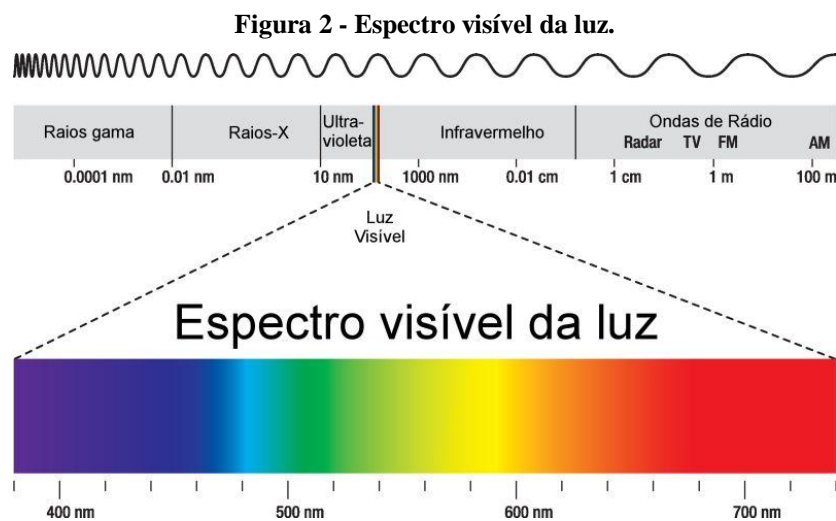
Estima-se que a idade do Sol é de cerca de 4,6 bilhões de anos, e que dentro de 7,5 bilhões de anos sua superfície se encontrará com a atmosfera da Terra. Dentro da escala de tempo humana, o sol sempre emitirá energia, o que a garante como fonte inesgotável de energia, cabendo a humanidade de beneficiar-se da melhor forma possível, com o desenvolvimento de tecnologias que utilizem todo seu potencial (HORVATH, 2008).

A energia proveniente do sol vem por meio da radiação, que é gerada pela constante fusão atômica, ela libera ondas eletromagnéticas que são emitidas por toda a matéria e não precisam de um meio material para se locomover. A radiação solar abrange uma grande parte do espectro eletromagnético (Figura 2), indo do infravermelho, passando por todo espectro visível (luz) até o ultravioleta, essa radiação carrega consigo certa quantidade de energia devido a dualidade partícula e onda, variando a quantidade de energia que está relacionada diretamente a suas características de onda (GREGORY e ZEILIK, 1997):

- Radiação visível: Esta radiação representa uma pequena fração do espectro eletromagnético situado entre 700nm a 400nm, é nesta faixa de onda que os seres humanos enxergam, chamada de luz. Esta onda quando interage com os materiais, ela é absorvida parcialmente, totalmente ou refletida, quando absorvida parcialmente, a fração de onda não absorvida identificamos como uma cor, na qual varia dependendo o comprimento de onda não absorvida; Quando absorvida totalmente identificamos como um corpo negro e se totalmente refletida identificamos como branco, que é a união de todas as ondas do espectro visível.

- **Radiação ultravioleta:** Diferente das demais apresentadas, essa radiação possui a característica de ser ionizante, ou seja, ela tem a propriedade de energizar elétrons de forma que eles saltam do campo eletrônico do átomo, possuindo o comprimento de onda menor variando de 400nm a 100nm. Sua característica ionizadora, já é amplamente utilizada na área da saúde, mas também pode ser prejudicial aos seres humanos, provocando patologias.

Toda radiação que chega e interage com a matéria, assim se diz que ela está sendo irradiada.



Fonte: Hewitt (2011).

2.2 RADIAÇÃO GLOBAL

De toda a radiação emitida pelo sol, apenas uma parte entra na atmosfera terrestre, devido a grande quantidade de matéria na atmosfera em comparação ao vácuo do espaço. As ondas eletromagnéticas que interagem com a matéria presente, passam por processos físicos e químicos que alteram a direção e sentido das ondas (Figura 3). Antes de entrar na atmosfera esta radiação chega com uma energia de aproximadamente 1370 W/m^2 , chamada de constante solar (GSC). Ao adentrar a atmosfera inicia-se o processo de irradiância, que nada mais seria do que os corpos da superfície recebendo a radiação solar, assim são chamados de radiação global (PEREIRA, 2020).

A radiação global é composta pela somatória das radiações difusa (GD) e direta (GB), mas fora da global tem ainda a radiação refletida:

- Radiação direta: É a fração da radiação que atravessa a atmosfera e não sofre nenhum tipo de alteração em sua trajetória, atinge diretamente a superfície.
- Radiação difusa: É a fração que atinge a superfície, mas antes a sua direção é modificada pela interação com a matéria da atmosfera (aerossóis).
- Radiação refletida: Também chamada de Albedo, é a radiação que muda seu sentido ao atingir a superfície ou a própria atmosfera.

Estas radiações podem ser medidas de forma horizontal, alinhada com a superfície ou inclinada de forma congruente ao sol, por diferentes instrumentos, que captam cada um dessas radiações e produz uma aproximação da energia irradiada (GREENPRO, 2004).

Figura 3 - Mudanças no trajeto sofridas pela radiação solar.



Fonte: (GREENPRO, 2004).

2.3 IRRADIÂNCIA E IRRADIAÇÃO SOLAR

De acordo com o Sistema Internacional de Medidas (SI, 2012), a energia é medida em Joules [J] e a potência é medida em watts [W] que também é definida pela quantidade de energia fluída em uma fração de tempo [J/s], logo a irradiância é caracterizada pela quantidade de energia irradiada em uma área [W/m^2], assim pode-se concluir que a irradiância é quantidade de energia que o sol emite por meio da radiação solar que transfere constantemente durante uma pequena fração de tempo em uma determinada área, podendo ser calculada pelas seguintes fórmulas:

$$P = \frac{E}{\Delta t} = [Js^{-1}] \quad (1)$$

$$Er = \frac{E}{\Delta t \times A} = [Js^{-1}m^{-2}] \quad (2)$$

Logo tem 2

$$Er = \frac{P}{A} = [W/m^2] \quad (3)$$

Er: Irradiância [$Js^{-1}m^{-2}$ ou Wm^{-2}].

E: Energia irradiada [J].

Δt : tempo de irradiação [s].

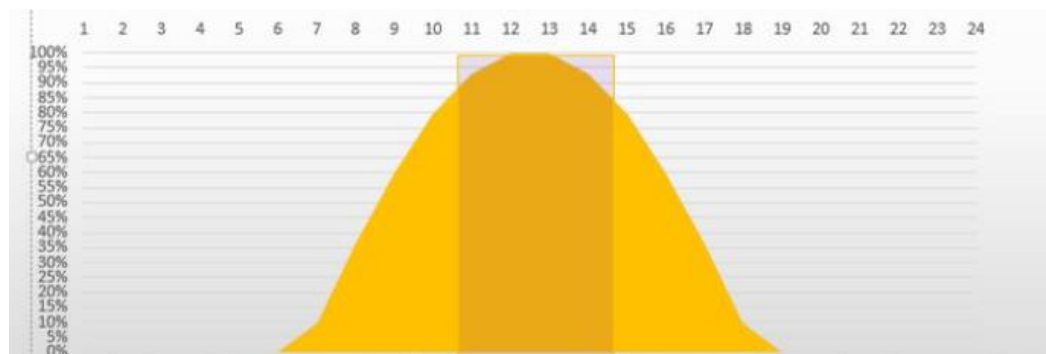
A: área [m^2].

P: Potência [W].

A irradiância é medida por equipamentos como o Pireliômetro que capta a radiação direta, piranômetro sombreado responsável pela captação da radiação difusa e o albedo capaz de captar a radiação refletida. Com os dados desses equipamentos é possível determinar a irradiância durante cada parte do dia em determinado local, para assim poder estimar a quantidade de energia que tal localidade recebe ao dia (HECKTHEUER, 2001).

A fim de padronizar e facilitar um pré-dimensionamento, é utilizado o termo “Hora Solar Pico” (HSP ou kWp), que a partir da irradiância incidente no local durante um dia, é feita uma média para determinar a quantidade de horas do dia que a irradiância ultrapassou $1000 W/m^2$. Na figura 4 é possível determinar a quantidade de HSP pelo retângulo delimitado sobre a curva de irradiação solar diária (PEREIRA, 2017).

Figura 4 – Irradiância diária (Horário x W/m^2).



Fonte: (PEREIRA, 2017).

Para fins de análise, dimensionamento e projeto é comumente utilizado os dados da irradiação, que é a somatória da irradiância em trechos de tempo como horas [Wh/m²], dias [Wd/m²], meses [Wmês/m²] e anos [Wano/m²] (SI, 2012). Determinado por

$$En = \frac{P}{A} * t = [Wh/m^{-2}] \quad (1)$$

Ou

$$En = Er * t = [Wh/m^{-2}] \quad (2)$$

Onde:

Er: Irradiância [Js⁻¹m⁻¹ ou Wm⁻¹].

En: Irradiação [Whm⁻¹].

t: período de tempo de um (a) hora/dia/ano [h/mês/a].

A: área [m²].

P: Potência [W].

2.4 GEOMETRIA SOLAR

Um fator técnico importante que possui grande influência para um sistema de captação de energia solar, principalmente para a tecnologia fotovoltaica, é o posicionamento dos painéis solares. O posicionamento dos painéis solares deve ser disposto de forma que a radiação solar incida com a maior concentração e durante o maior tempo possível durante o dia. A fim de determinar o melhor posicionamento é necessário levar em consideração o movimento do sol em relação ao local escolhido, para isso deve-se atentar a geometria dos raios solares, parametrizados por conceitos como a latitude, declinação solar, ângulo horário solar, ângulo zenital solar e ângulo azimutal solar. Assim conforme ATLAS (PEREIRA, 2017) os conceitos se definem como:

- Declinação solar (δ): Devido à inclinação axial da Terra em relação ao plano em que orbita em torno do Sol, os raios solares também incidem inclinados na superfície (exceto para regiões da linha do equador), essa inclinação varia de aproximadamente 23° 27' positivo para regiões acima da linha do Equador no

hemisfério Norte e negativo para regiões abaixo da linha do Equador no hemisfério Sul (Figura 5). Essa variação é chamada de declinação solar e pode ser calculada a partir da seguinte fórmula:

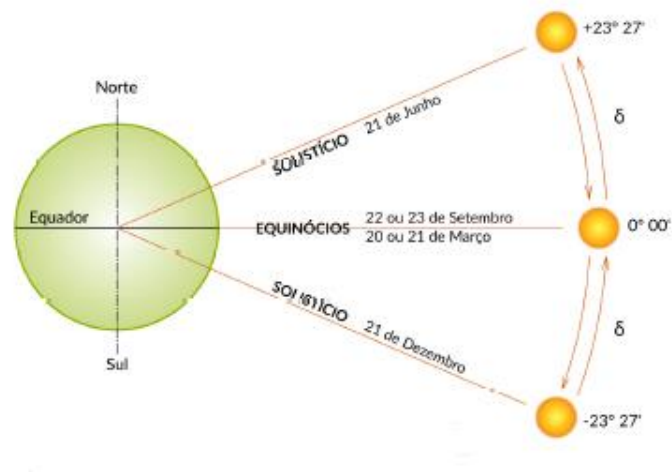
$$\delta = 23,45 * \text{sen} \left[\frac{360 * (Da - 80)}{365} \right] \quad (1)$$

Onde:

δ : Declinação solar (graus°)

Da: O número do dia no ano (1 a 365).

Figura 5 - Declinação solar.



Fonte: (PEREIRA, 2017).

- Ângulo horário solar (ω): Durante o movimento de rotação da Terra, os raios solares chegam à superfície com uma determinada angulação, esse ângulo varia conforme o passar do dia, sendo que ao meio dia (12:00) do horário local é considerado 0° e varia até 180° durante a manhã e -180° durante a tarde por convenção (Figura 6), logo utilizando a fórmula a seguir é possível chegar ao ângulo horário solar:

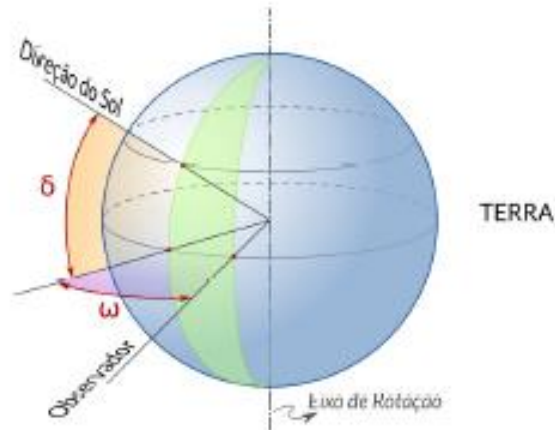
$$\omega = (Hl - 12) \cdot 15^\circ \quad (1)$$

Onde:

ω : Ângulo horário solar (graus^o)

HI: Horário local (horas)

Figura 6 - Ângulo horário solar.



Fonte: (PEREIRA, 2017).

- Ângulo zenital solar (θ_z): Diferente do Ângulo horário solar, o ângulo zenital solar é o ângulo formado pela linha do raio solar com o plano vertical que forma ângulo reto com o plano da superfície (Figura 7), logo é possível calcular o ângulo zenital solar utilizando a latitude do local, a declinação solar e o ângulo horário solar, partindo da convenção de 0° quando alinhado com plano vertical e 90° no pôr do sol ao horizonte:

$$\cos \theta_z = \text{sen} \phi \cdot \text{sen} \delta + \text{cos} \phi \cdot \text{cos} \delta \quad (1)$$

Onde:

θ_z : Ângulo zenital solar (graus)

δ : Declinação solar (graus)

ϕ : latitude local (graus)

ou

$$\theta_z = 90^\circ - \omega \quad (1)$$

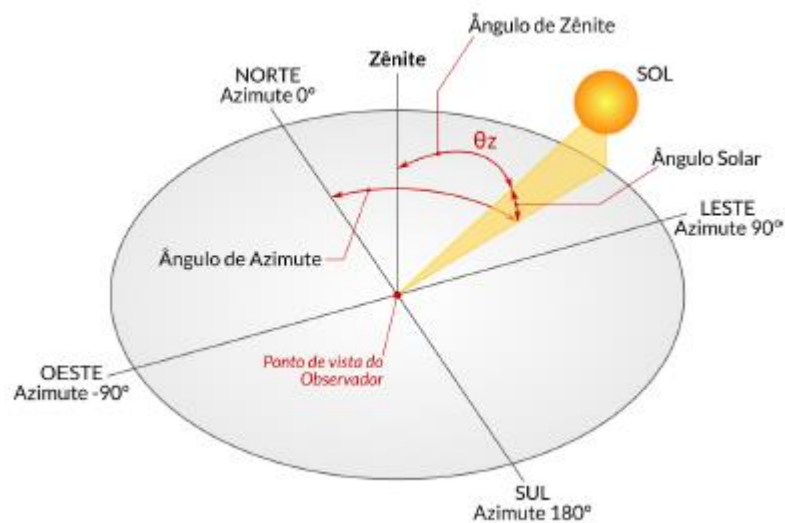
Onde:

θ_z : Ângulo zenital solar (graus)

ω : Ângulo horário solar (graus)

- Ângulo azimutal do Solar (θ_a): Ele é formado no plano da superfície da Terra, entre a linha do norte geográfico e a linha de incidência do raio solar, convenção como positivo no sentido horário partindo do norte geográfico em 0° até $+180^\circ$ no Sul geográfico e negativo no sentido anti-horário de 0° também do norte geográfico até -180° no Sul geográfico (Figura 7).

Figura 7 - Solarimetria



Fonte: (PEREIRA, 2017).

2.5 MAPAS DE IRRADIAÇÃO NO BRASIL

Partindo de um modelo alemão, o modelo BRASIL-SR (PEREIRA, 2017), foi adaptado e desenvolvido no laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN) em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Este é um modelo físico que consegue apresentar estimativas da densidade energética que incide na superfície brasileira, utilizando o método de “dois fluxos”, sendo basicamente uma análise do fluxo de radiação com a presença de nuvens e uma análise sem a presença de nuvens. Este método utiliza conjuntos de dados retirados de forma estatística de imagens de satélites, seguindo um fluxograma que pode ser dividido basicamente em três etapas, sendo:

- Análise de imagens de satélite e dados meteorológicos.
- Utilização de “dois fluxos” de transferência radiativa.

- Apuração dos dados obtidos a partir da irradiação global horizontal, irradiação direta normal, irradiação difusa horizontal e irradiação global no plano inclinado, que compõe a irradiação solar incidente na superfície terrestre.

O resultado da coleta, análise e compilação destes dados, foram elaborados mapas do Brasil com o total diário da média das irradiações solares mensais e anual das irradiações global horizontal, direta normal e no plano inclinado na latitude (Figura 8). A partir destas informações é possível determinar o potencial para produção de energia elétrica por meio da tecnologia fotovoltaica e potencial de geração de energia térmica com captação dos coletores solares.

Figura 8 - Mapas anuais de irradiação global horizontal, direta normal e inclinada no plano.



Fonte: (PEREIRA, 2017).

2.6 POTENCIAL FOTOVOLTAICO E SOLAR TÉRMICO

2.6.1 Potencial solar térmico

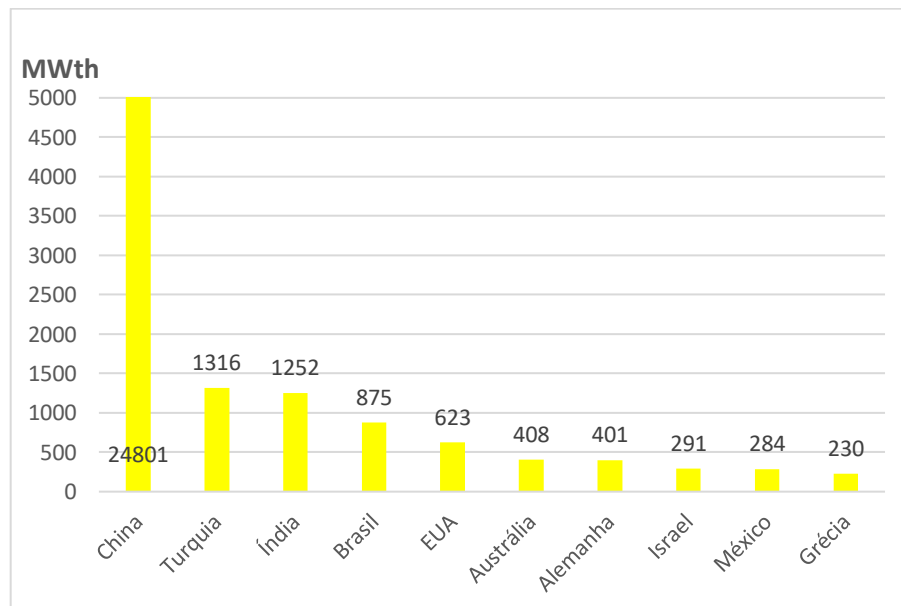
A energia solar térmica é amplamente utilizada no Brasil, por ser um país com alta disponibilidade de radiação solar, isso se deve em grande parte a programas de incentivo fiscal e programas sociais que incentivam a utilização de energias limpas e sustentáveis. No setor residencial cerca de 24% da conta de luz do brasileiro se deve a utilização da energia elétrica para o aquecimento de água, utilizada principalmente para banhos por meio de chuveiros elétricos (ELETROBRAS/PROCEL, 2005).

Em 2019 segundo a EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020), uma empresa pública vinculada ao Ministério de Minas e Energia, foram consumidos 141.930 GWh de energia no setor residencial, registrando um crescimento de 3,1% em relação ao ano de 2018. Desde 2001 até atualmente, com exceção de 2009 que teve um recuo de 1,1%, o

consumo total de energia elétrica apenas cresce, evidenciando uma necessidade de ampliação da produção energética no país.

Anualmente a IEA (IEC, 2020), publica em seus meios, relatórios sobre diversos dados de produção, consumo e outros assuntos relacionados a energia. Em 2020 no seu relatório “calor solar pelo mundo” (solar heat worldwide), disponibilizou dados sobre a capacidade total de potência solar térmica instalada [MWth] para aquecimento de água por meio de coletores solares cobertos e descobertos em diversos países em que realizou o levantamento, pelo gráfico a seguir (Figura 9) é possível ver que o Brasil está na quarta posição mundial em MWth.

Figura 9 - Top 10 países de maior Mwth instalada.



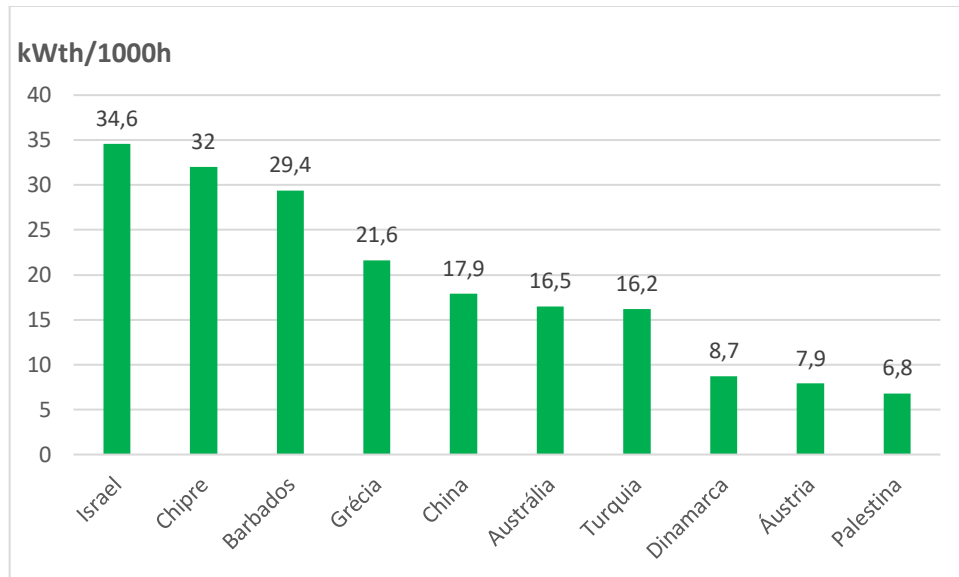
Fonte: (IEC, 2020)- Modificado.

O Brasil conforme retratado pelo modelo BRASIL-SR (PEREIRA, 2017), se encontra na região da linha do Equador que conta com grande densidade de incidência de raios solares comparado aos demais países no ranking de maiores MWth instaladas, apesar deste fato, a China que lidera o ranking possui mais de 30 vezes a capacidade do Brasil, evidenciando uma diferença significativa.

Outro dado importante para se analisar é quantidade de kWth instaladas no país pelo número de habitantes (Figura 10), a Turquia por exemplo, sétimo deste ranking, é um país com aproximadamente 82 milhões de pessoas, cerca de 2,5 vezes menos que o Brasil, 11 vezes menor em extensão territorial e é localizado acima do trópico de câncer, região com

menor média de incidência anual em relação a região tropical e mesmo assim tem mais que 3 vezes kWth para cada 1000 habitantes que o Brasil.

Figura 10 - Top 10 países com maior quantidade de kWth a cada 1000 habitantes.



Fonte: (IEC, 2020)- Modificado.

Com uma breve análise do consumo residencial em relação à utilização da energia elétrica para aquecimento de água, é possível deixar de consumir cerca de 34.000 GWh, 7% do consumo anual de energia elétrica apenas com um sistema simples de aquecimento de água solar. Fica evidente o grande potencial energético solar térmico disponível para o Brasil, apesar de o custo inicial ser elevado em comparação a um chuveiro elétrico comum, a longo prazo os benefícios atingem a economia, com a redução do preço das contas de energia, o meio ambiente com a dispensa de meios de produção poluentes e a maior disponibilização de energia para desenvolvimento industrial.

2.6.2 Potencial fotovoltaico

No panorama nacional de oferta interna de energia elétrica, as fontes são variadas, e dentre elas, a solar ocupava apenas 1% em 2019, mas fechou 2019 com um aumento de 37,6% em relação a 2018, sendo que em 2018 houve um aumento de aproximadamente 100% comparado com 2017, fato este que comprova o crescimento exponencial do cenário fotovoltaico, chegando a 1,7% na matriz elétrica brasileira (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020).

Comparando com os outros países do mundo assim como na própria matriz nacional, a capacidade instalada está baixa, ainda mais levando em consideração as condições favoráveis de radiação solar. Com 4,5 MW o Brasil se encontra na 16ª Posição no ranking mundial, atrás de países também emergentes como Índia e China, com menores potenciais fotovoltaicos e mesmo assim com mais de 40 vezes a sua capacidade (Tabela1).

Tabela 1 - Capacidade fotovoltaica instalada acumulada.

PAÍSES	GW
1° CHINA	204,7
2° EUA	75,9
3° JAPÃO	63,0
4° ALEMANHA	49,2
5° ÍNDIA	42,8
...	...
16° BRASIL	4,5

Fonte: IRENA/2020 – Modificado.

A produção elétrica fotovoltaica no Brasil se divide em centralizada e a distribuída, sendo a produção centralizada concentrada basicamente na região do nordeste com adendo a Minas Gerais, e a distribuída predominante na região sul e sudeste. Isso se deve principalmente ao alto custo inicial de instalação do sistema fotovoltaico, no qual as regiões sul e sudeste apresentam maior concentração de renda e, por conseguinte a maior capacidade instalada, enquanto no nordeste, região com maior irradiação do Brasil, as produções centralizadas se concentram por meio das usinas fotovoltaicas. Com a constante redução de preços dos componentes do sistema fotovoltaico, será mais acessível aos cidadãos a possibilidade de produzir sua própria energia e do governo aumentar a produção própria.

3 SISTEMA SOLAR TÉRMICO DE BAIXA TEMPERATURA

3.1 SISTEMA SOLAR TÉRMICO DE BAIXA TEMPERATURA

Dentre os sistemas para aproveitamento da energia solar para final térmico, a faixa de temperatura necessária para a atividade requerida, determina a composição e a tecnologia empregada, no qual para baixas temperaturas (até 90°C) utilizadas para aquecimento de água

residencial, comercial e industrial para finalidades sanitárias, higiênicas e conforto térmico de ambientes e piscinas.

Segundo o guia técnico promovido pela Comissão Europeia baseado no programa de energia renovável, o ALTENER (GREENPRO, 2004), o sistema solar térmico é uma tecnologia baseada na utilização da energia solar térmica para aquecimento de água, no qual para o sistema que será foco deste trabalho (baixas temperaturas) ele é composto por coletores solares, tanques de armazenamento, circuito solar e o controlador, no qual as variações destes componentes giram entorno da eficácia, preço, manutenção e necessidades.

3.1.1 Coletores solares

Os coletores solares são componentes responsáveis por captar a radiação solar e converter em calor, esses coletores são feitos de materiais capazes de interagir com as ondas eletromagnéticas solares de forma que seus átomos se agitem e aumente sua energia cinética provocando o aumento de sua temperatura, com essa característica, os coletores transferem o calor para a água ou fluído térmico de forma a evitar o máximo possível de perda de calor para o ambiente (SALGADO, 2008).

Dos diversos tipos de coletores disponíveis no mercado, será foco deste trabalho os mais comuns, acessíveis e utilizados atualmente.

3.1.1.1 Coletor solar simples

Os coletores solares simples ou coletores sem cobertura (Figura11), é composto basicamente pela placa de absorção ou absorSORA, nesse sistema a estrutura de captação não apresenta caixa, material de isolamento, vidro ou vedação, devido a essas ausências, o sistema apresenta significativa perda de calor para o ambiente, não conseguindo manter altas temperaturas e por longos períodos, sendo utilizado principalmente para aquecimento de piscinas. O sistema normalmente não ultrapassa a média de 40°C, sendo necessária para isso uma maior área de captação em relação aos demais, apesar das limitações, o preço destes coletores é bastante atraente, além de possuir facilidade de instalação, manutenção e adaptabilidade em comparação aos outros tipos de coletores (EKOS E VITAE , 2010).

Figura 11 - Coletor solar aberto.



Fonte: Solaruim (2020).

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens do coletor solar aberto.

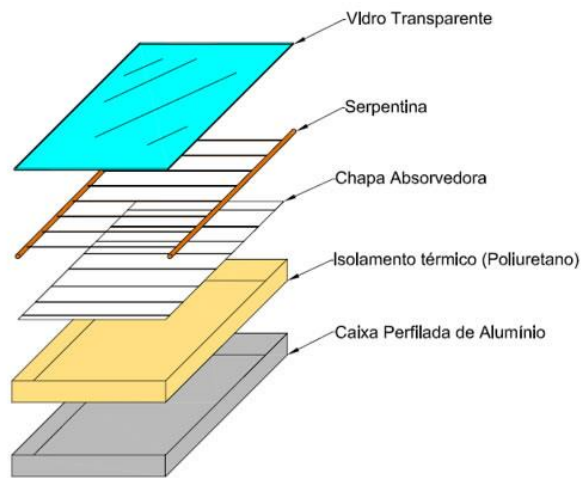
Vantagens	Desvantagens
Pode substituir a cobertura do telhado, quando utilizado com revestimento de zinco, economizando no custo do telhado	Baixa eficiência térmica
Adaptável a diferentes tipos de telhado	Necessária grande área de coleta da radiação solar
Custo de implementação e manutenção baixo	Baixa temperatura atingida

Fonte: (GREENPRO, 2004) – Modificado.

3.1.1.2 Coletor Solar Plano

Os coletores solares plano são encontrados no mercado com placas absorvedoras feitas de metal (alumínio ou cobre) dentro de caixas retangulares planas com isolamento térmico (Figura 12), apresenta também uma cobertura transparente com vedação na parte superior e tubulação de entrada e saída da água ou fluido de transferência térmica, posicionados junto às placas absorvedoras. A composição é variável dependendo da demanda, no qual a principal variação gira em torno da placa absorvedora, que será a fonte de captação solar e transferência térmica para o fluido, possuindo como auxílio os materiais de vedação para evitar perdas de calor e maximizar a eficiência do sistema (GREENPRO, 2004).

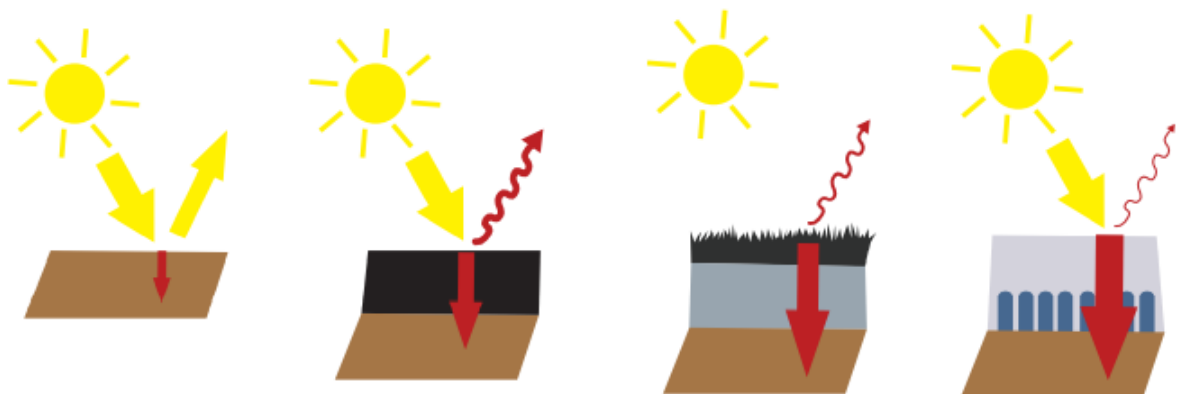
Figura 12 - Estrutura do coletor plano.



Fonte: Casa dos aquecedores (2020).

A placa absorvedora é o principal componente do coletor plano, ela é responsável pela conversão da irradiação solar em energia térmica, sua composição é geralmente metálica, pois o metal tem alta condutividade térmica, necessária para transferir rapidamente a energia para o fluido térmico antes que se perca para o ambiente. Com objetivo de garantir a máxima absorção da radiação solar e mínima emissão (reflexão), se utiliza revestimentos junto a placa absorvedora (Figura 14), podendo ser tinta preto-baço ou camadas de cromo-preto, níquel-preto ou TiNOx, podendo ainda ter sua superfície modificada para apresentar rugosidades e melhorar a eficiência (PEREIRA, 2020).

Figura 13 - Retenção de calor em diferentes revestimentos.






Fonte: (EKOS BRASIL E VITAE CIVILIS, 2010).

O isolamento térmico no coletor plano tem como função impedir que haja perda de calor de dentro da caixa para o ambiente (Quadro 2), ele fica localizado entre a caixa e os

demais componentes, fixado nas laterais e na parte inferior, em alguns casos quando possui características de transparência, é encontrado logo abaixo da cobertura do coletor. A composição do isolamento pode contar com um ou mais tipos de materiais com baixa condutividade térmica, devido as altas temperaturas atingidas ao longo do dia dentro do sistema, o material precisar ter resistência a variação de temperatura e durabilidade, pois caso ocorra a decomposição, deformação ou derretimento, pode provocar patologias no coletor (condensação, trincas e empenamentos) o que acarreta na redução da eficiência (PEREIRA, 2020). Os materiais mais comuns são feitos de fibra mineral, por ser mais barato e ter uma excelente condutividade térmica, dentre eles estão:

Quadro 2 - Materiais de isolamento.

Material	Imagem	Condutividade Térmica (W/mK)
Lã de vidro		0,038
Lã de rocha		0,040
Poliuretano		0,026

Fonte: (PEREIRA, 2020) – Modificado.

A caixa do coletor pode ser encontrada e alumínio, aço, plástico ou madeira envernizada, no qual o tipo do material é ligado diretamente ao peso, instalação, custo e durabilidade. Ela é associada à cobertura que é feita de vidro ou plástico, onde a principal característica desta cobertura é a transparência, pois assim os raios de luz atravessam a cobertura e provoca um efeito estufa no interior, para melhorar este efeito, a cobertura pode passar por tratamentos para adquirir característica antirreflexo, permitindo assim uma entrada

maior da quantidade de radiação de onda-curta ampliando o efeito estufa e mantendo a temperatura dentro do coletor. A saída e entrada de pó, corrente de ar, água e inseto é impedida pela vedação entre a cobertura e a caixa, sendo feita geralmente com borracha de silicone ou etileno-propileno (PEREIRA, 2020). O quadro 3 mostra as principais vantagens e desvantagens dos coletores solares plano.

Quadro 3 - Vantagens e desvantagens do coletor solar plano.

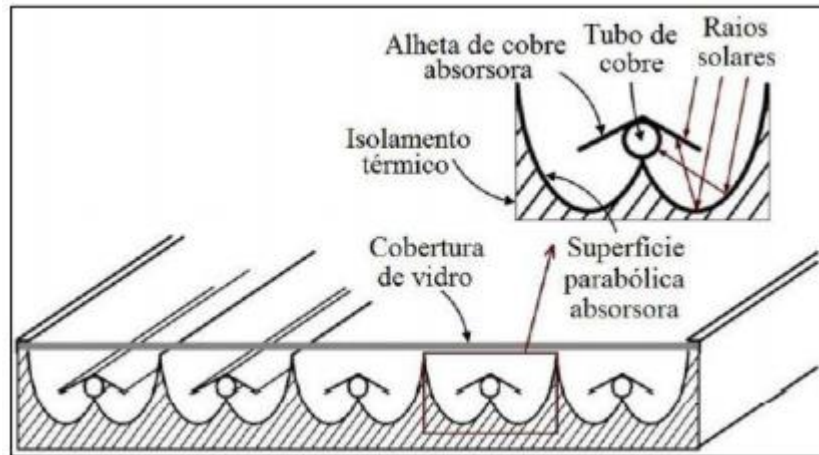
Vantagens	Desvantagens
Mais barato que um coletor de vácuo e parabólico composto	Apresenta menor eficiência em relação aos coletores de vácuo e coletores parabólicos compostos (CPCs) devido aos elevados valores de perdas térmicas globais
Oferece múltiplas opções de montagem (sobre o telhado, integrado no telhado, montado na fachada e de instalação livre)	Não serve para gerar altas temperaturas, para geração de vapor, fornecimento de calor para máquinas de refrigeração
Tem uma boa taxa de preço/performance	Exige mais espaço no telhado do que os coletores de vácuo
Permite montagem simples (kits de construção de coletor)	

Fonte: (GREENPRO, 2004) – Modificado.

3.1.1.3 Coletores Solares Parabólicos Compostos (CPCs)

Os coletores solares parabólicos compostos foram desenvolvidos com objetivo de melhorar a eficiência em comparação aos coletores solares planos, essa nova tecnologia é baseada na redução da área de absorção, mas mantendo a mesma área de captação, sendo assim semelhante na estrutura com os coletores planos, mesmo formato de caixa, vedação, isolamento e cobertura (Figura 14). A principal diferença está na forma de absorção da radiação solar, há uma estrutura em formato parabólico, com superfície refletora que concentra a radiação na placa absorvedora, possuindo a capacidade de captar a radiação direta e difusa (GREENPRO, 2004).

Figura 14 - Coletor parabólico composto.



Fonte: (LIZ, 2017).

Quadro 4- Vantagens e desvantagens do coletor solar plano.

Vantagens	Desvantagens
Tem elevada eficiência mesmo com elevadas diferenças de temperaturas entre o absorvedor e o meio envolvente (e.g. no verão);	Mais caro do que um coletor plano.
Tem uma elevada eficiência com baixa radiação (e.g. no inverno);	Necessita de equipamentos para controle de temperatura
Suporta aplicações de calor com mais eficiência do que os coletores planos;	Requer maior cuidado em relação as planas absorvedoras, devido ao sistema de concentração do raios solares
Funciona com elevadas temperaturas, e.g. para condicionamento do ar	

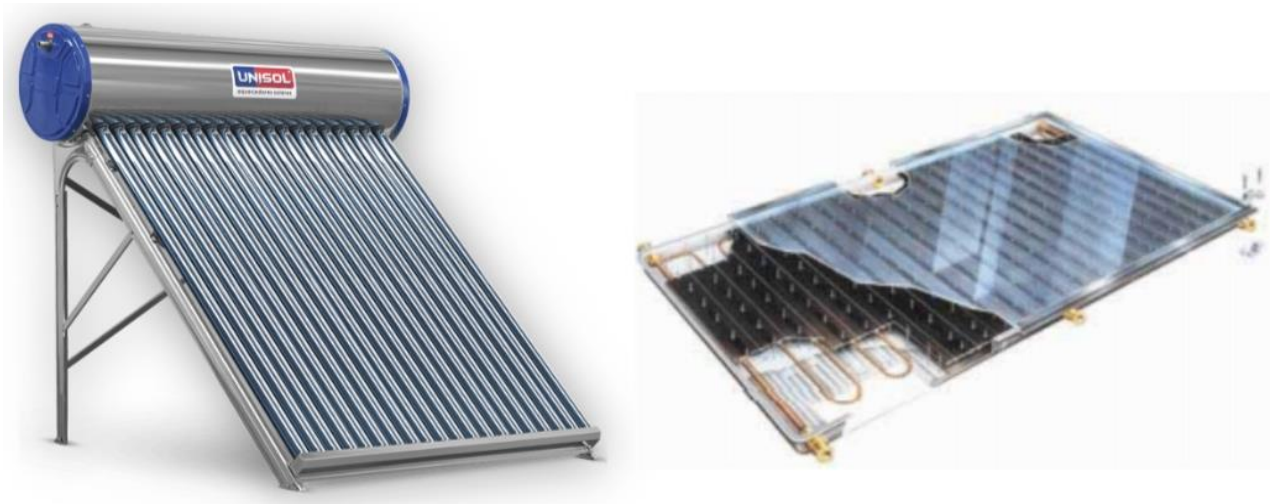
Fonte: (GREENPRO, 2004) – Modificado.

3.1.1.4 Coletores Solares à vácuo

Os coletores solares à vácuo, também chamados de evacuados, podem ser encontrados no mercado em duas formas: coletor à vácuo plano e o coletor com tubos evacuados (Figura 15). O princípio de funcionamento deste coletor é utilizar o vácuo, que seria a ausência de matéria, para poder reduzir a perda de calor por convecção, sendo uma forma de isolamento. Esta tecnologia é recomendada para regiões frias e com pouca irradiação solar, já que esse sistema consegue manter a temperatura do fluido e tem boa

absorção da energia solar. Os tubos à vácuo são feitos de um material transparente (geralmente vidro), para permitir a máxima entrada da luz e mínima reflexão, podendo suportar pressões internas na casa dos 0,1 Pa. O vácuo se encontra na região entre o tubo e a placa absorvedora, podendo a placa ser encontrada em diferentes formas, de acordo com o modelo do coletor, no mercado há tubos à vácuo com placas absorvedoras cilíndricas, planas ou côncavas. Geralmente o coletor com tubos à vácuo, tem os tubos conectados entre si por meio de uma base superior ou boiler de armazenamento, onde a água circula por meio da diferença de densidade devido a alteração de temperatura (EKOS BRASIL E VITAE CIVILIS, 2010).

Figura 15 - Coletores Solares à Vácuo.



Fonte: termoteckaquecedores (2020).

Quadro 5 - Vantagens e desvantagens do coletor solar plano.

Vantagens	Desvantagens
Apresenta boa eficiência, mesmo com elevadas diferenças de temperatura entre o absorvedor e o meio envolvente	Mais caro do que um coletor plano;
Apresenta boa eficiência com baixa radiação	Não pode ser utilizado numa instalação no telhado;
Suporta cargas térmicas com mais eficiência do que os coletores planos	Não pode ser usado para instalações horizontais no caso dos sistemas de tubos de aquecimento (inclinação no mínimo 25°).
Atinge elevadas temperaturas, possibilitando a utilização em sistemas de ar condicionado e produção de vapor;	
Facilmente transportado para qualquer local	

(apresenta um baixo peso e pode ser montado no local da instalação);	
Através da afinação das placas absorvedoras (na montagem, na fábrica ou durante a instalação) estas podem ser alinhadas em direção ao sol (no caso de certos produtos);	
Coletores de tubos de fluxo-direto podem ser montados horizontalmente num telhado plano, providenciando menores perdas térmicas, devido ao vento e menores custos de instalação evitando-se a remoção de material do telhado e mantendo a sua estrutura intacta.	

Fonte: (GREENPRO, 2004) – Modificado.

3.1.2 Tanques de armazenamento

O sistema de aquecimento solar, mesmo com o isolamento dos coletores, só consegue aquecer a água enquanto está sendo irradiado pelo sol, além de armazenar quantidades de água relativamente pequenas. O tanque de armazenamento para sistemas de aquecimento solar no mercado hoje, possui diversas funções além de simplesmente armazenar a água, entre elas manter a água aquecida por longos períodos de tempo, auxiliar o aquecimento de água para manter na temperatura desejada, promover o ciclo da água ou fluido térmico, controlar a temperatura e pressão e até filtrar e tratar a água em tecnologias mais recentes (Figura 16). A composição do tanque de armazenamento é de materiais que resistem a altas temperaturas, pressão e intemperismos físicos e químicos (EKOS E VITAE, 2010).

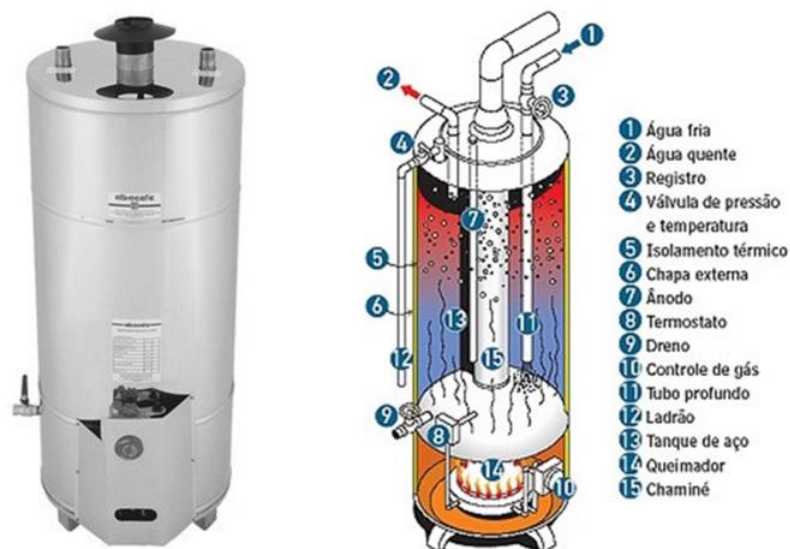
No mercado o aço e o cobre compõem quase todos os tanques, sendo os mais viáveis financeiramente, eles são utilizados como aço simples, aço inoxidável, aço esmaltado, aço revestido de plástico e cobre tratado. Apesar de haver tanques feitos simplesmente com plástico, ele não é recomendado pelo fato de que o plástico sofre bastante com os intemperismos, diminuindo bastante a vida útil do equipamento, além de não suportar pressões. Diferentes tamanhos e formas se encontram os tanques, mas esta característica tem fundamental importância para a eficiência do sistema de aquecimento, se recomenda utilizar tanques com dimensões na razão de 2,5:1 em relação à altura e diâmetro respectivamente,

pois quanto mais esbelto o tanque, mais eficiente tende ser o processo de estratificação da água (SOUZA, 2010).

O processo de estratificação é de suma importância, se baseado na diferença de densidade entre a água quente (mais leve) vinda dos coletores solares e a água fria (mais pesada) vinda do abastecimento, a água quente vai para a parte superior do tanque em quanto a água fria vai parte inferior do tanque, assim seguindo a lei da termodinâmica, o sistema buscará um equilíbrio térmico entre as diferentes temperaturas da água. Para melhor eficácia, os tanques podem ser equipados com isolantes térmicos (a maioria vem de fábrica), sensores de temperatura, misturador automático entre outras tecnologias (SOUZA, 2010).

O isolamento térmico nos tanques é essencial para aproveitar o máximo possível do aquecimento gerado nos coletores, um tanque sem isolamento ou com mau aproveitamento pode inviabilizar todo o sistema. O sensor de temperatura é um equipamento que pode ser utilizado para acionar muitas funções diferentes, de acordo com a temperatura configurada, ele pode acionar o bombeamento de água para coletor solar, esvaziamento do tanque, interrupção da alimentação de água fria ou água quente e acionar o misturador, que quando automático vem com sensor de temperatura embutido para diminuir a temperatura da água até a determinada (EKOS E VITAE , 2010).

Figura 16 - Tanque de armazenamento com sistema auxiliar de aquecimento.



Fonte: (EKOS E VITAE , 2010).

3.1.3 Circuito Solar

O circuito solar engloba todo o funcionamento do transporte energético dos fluídos do sistema de aquecimento solar. É composto pelas tubulações que conecta os coletores solares com o tanque de armazenamento, fluidos de transferência térmica, bomba de circulação, permutadores de calor, sistema de limpeza e segurança (GREENPRO, 2004).

3.1.4 Termostato

O termostato ou controlador, é um dispositivo que tem como objetivo principal manter a temperatura do sistema em equilíbrio conforme o configurado (Figura 9). No sistema de aquecimento solar, ele adquire mais funções e de grande importância para uma melhor eficiência de todo sistema, como determinar a melhor temperatura para circulação do fluido com o objetivo de abaixar a temperatura ou captar de forma eficiente o calor gerado nos coletores solares (PEREIRA, 2020).

Figura 17 - Controladores solares.



Fonte: (FULL GAUGE CONTROLS, 2020).

4 SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

4.1 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

As células fotovoltaicas recebem esse nome devido a um efeito físico chamado efeito fotovoltaico. Em 1839, Edmond Becquerel, observou que em um material semicondutor ao ser atingido pela luz gerava uma diferença de potencial em suas extremidades, assim ao criar um circuito, conseguiu observar uma corrente elétrica. Com o estudo deste efeito, passaram a produzir materiais semicondutores para produção de energia elétrica (NASCIMENTO, 2004).

Inicialmente para produção das células fotovoltaicas utilizaram silício, um dos materiais mais abundantes da Terra, com o acréscimo de outras substâncias, uma vez que o silício puro é um mau condutor elétrico. Por meio da Dopagem, processo de combinação do silício a outras substâncias, é possível alterar a característica elétrica da mistura. Com adição do fósforo o silício adquire elétrons livres, se tornando eletricamente negativo e com a adição de Boro o silício passa a requerer elétrons tornando-se eletricamente positivo. Unindo essas duas misturas em uma estrutura e criando um circuito, ao incidir luz, uma corrente é gerada pela movimentação dos elétrons entre os materiais (HECKTHEUER, 2001).

Atualmente existem diversas tecnologias de células fotovoltaicas, com diversas combinações de diferentes materiais, mas as comercialmente mais utilizadas são as de silício monocristalino, silício policristalino e de filmes finos (VILLALVA, 2012):

- Células de silício monocristalino (m-Si): São feitas utilizando silício purificado, por meio de um método chamado Czocharalski, que em altas temperaturas formam um cristal de silício, no qual seu arranjo molecular é uniforme. A partir de um único tubo de silício ultrapuro, são cortadas células de 0,4 a 0,5 mm de espessura. Este processo é relativamente caro comparado com o processo de produção das demais células pelo fator de pureza do silício, mas apresentam melhor eficiência variando de 14 a 20% dependendo das condições reais da instalação e 25% em laboratório. É encontrado na cor preta com propriedades antirreflexo e azul-acinzentado sem o antirreflexo (Figura 18).

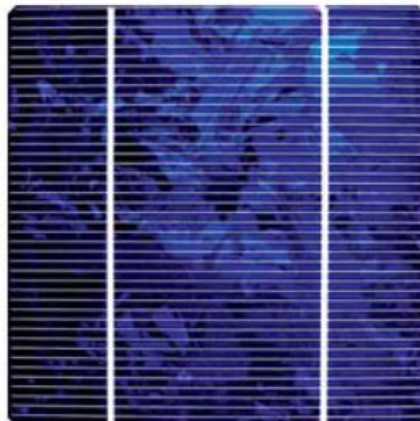
Figura 18 – Célula de silício monocristalino antirreflexo.



Fonte: (GROUP, Acesso em 2020).

- Células de silício policristalino (p-Si): É produzida a partir da fusão de cristais puros de silício em forma de cubo e depois cortado no formato das células, essa fusão resulta em diferentes conjuntos de arranjos moleculares uniformes desalinhados entre si, gerando uma célula “poli” e desuniforme como um todo. Este processo é mais simples que o de fabricação do monocristalino, sendo mais barato, mas perdendo em eficiência, que varia de 13 a 18% dependendo das condições reais da instalação e 20% em laboratório. Tem cor azulada com a propriedade antirreflexo e cinza prateado sem o antirreflexo, apresenta diferentes formas evidenciando a desuniformidade (Figura 19).

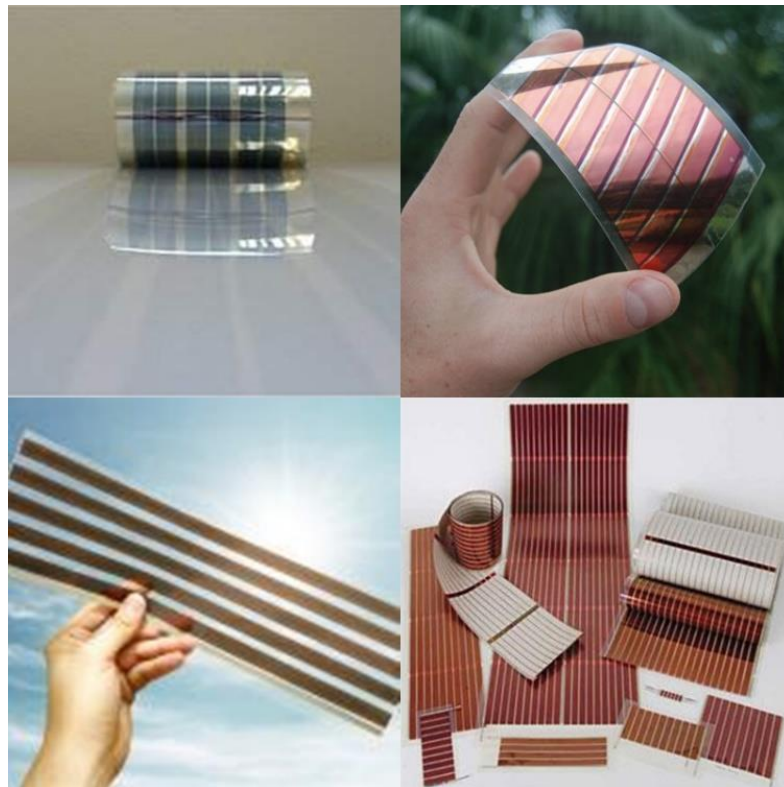
Figura 19 - Célula de silício policristalino antirreflexo.



Fonte: (GROUP, Acesso em 2020).

- Células de filmes finos: As células de filmes finos são feitas a partir de finas camadas de diferentes materiais depositadas sobre superfícies, podendo estas serem rígidas ou flexíveis. A tecnologia mais utilizada é baseada em finas camadas de silício amorfo (a-Si) anexadas em diferentes substratos, como vidro, metais e plásticos, podendo ser fabricada em grandes dimensões e bem mais resistente mecanicamente comparados as de tecnologia cristalina. No entanto sua eficiência é bem reduzida variando comercialmente de 5 a 8. Devido a suas características é utilizada em calculadoras e brinquedos já que consegue captar bem a radiação difusa e o seu processo de produção torna bem mais barata comparada as demais células cristalinas. Atualmente já existe células de filmes finos de silício microcristalinos (μ -Si), telureto de cádmio (CdTe), células híbridas e de cobre-índio-gálio-selênio (CIGS), apesar de serem tecnologias relativamente novas e sem lugar comercial, suas tecnologias tem grande potencial de usos com as pesquisas, desenvolvimento e redução de preços (Figura 20).

Figura 20 - Células de filmes finos.



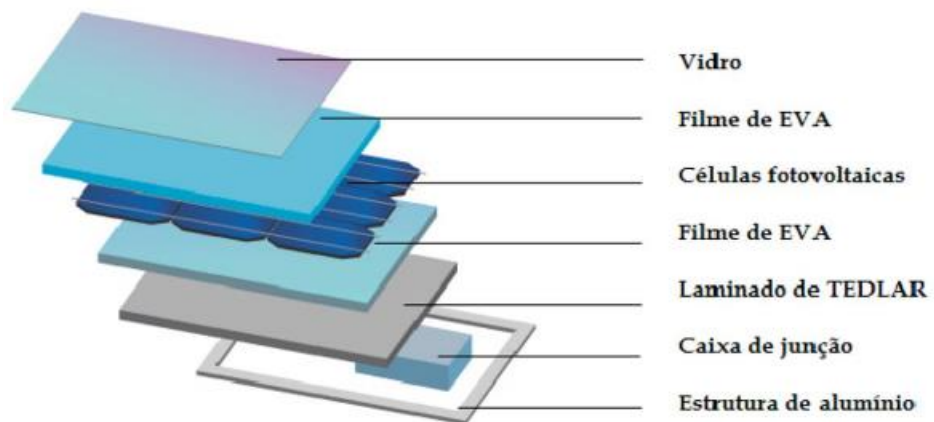
Fonte: (SUSTENTARQUI, 2014).

4.2 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Os módulos fotovoltaicos também chamados de placas ou painéis fotovoltaicos são estruturas que aglomeram um conjunto de células fotovoltaicas na tecnologia de silício cristalino e apenas uma célula para filmes finos, sendo caracterizado pelo tipo de célula empregada (Figura 21). Devido as tensões das células de silício cristalino, individualmente apresentarem pequenas tensões, elas são associadas em série, de forma que alcance uma tensão desejada pelo fabricante, delimitando assim as dimensões do módulo. Já a célula de filmes finos, apesar de ser uma única célula apresenta altos valores de tensão comparada a de silício cristalino, mas apresenta baixa corrente, limitando e alterando o seu uso e disposição (OVELHA, 2017).

A estrutura de um módulo fotovoltaico gira em torno das células fotovoltaicas, ela é envolta por películas plásticas, que evitam o contato direto com as demais partes do módulo, sendo a superior mais leve e a inferior mais rígida, dando maior sustentação. Acima da célula se encontra uma placa de vidro, que protegê-la-á das intempéries e permitirá a passagem da radiação solar. Abaixo da célula vem uma placa de material rígido mais leve, geralmente de aço ou alumínio, para que o módulo não fique muito pesado, protegendo-a também de intempéries. Para a circulação externa de energia está presente a caixa de junção, no qual os cabamentos externos se conectam além de conter também outros dispositivos elétricos, como os diodos (SENAI A, 2020).

Figura 21 – Estrutura de um módulo fotovoltaico.



Fonte: (SENAI A, 2020).

Existem outras configurações de módulos fotovoltaicos, como os módulos com concentradores, no qual há presença de espelhos que focaliza a radiação nas células, reduzindo assim quantidade de células no módulo, já que concentração da radiação solar compensa a falta delas que tem em seu lugar os espelhos concentradores. Essa troca reduz o preço do painel, mas ainda é pouco comercializado (VIANA, 2010).

4.2.1 Informações comerciais das características dos módulos

Os fabricantes de módulos fotovoltaicos fornecem uma folha de dados nos quais estarão presentes informações importantes sobre as características físicas, técnicas, elétricas e de funcionamento do módulo especificado, a partir destes dados é possível determinar como irá se comportar o painel no local de instalação.

No Brasil por meio do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), os módulos passam por testes de conformidade e segurança e informam dados como o nome do fornecedor, marca comercial, indicação do modelo, indicação da eficiência energética do equipamento, eficiência máxima, área externa do módulo, produção energética média e potência padrão (INMETRO, 2020). Apesar dos testes realizados pelo INMETRO é importante se atentar aos testes da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC - *International Electrotechnical Commission*), que por meio da normativa IEC 61215 (IEC, 2016), realiza testes mais aprofundados nos painéis que são comercializados no mundo inteiro, no qual sem o selo IEC, dificilmente são vendidos.

Por meio das normas e selos do IEC e do INMETRO (Figura 22), as informações da folha de dados são validadas, e garante ao consumidor o funcionamento previsto do equipamento, caso eventualmente ocorra problemas, é garantido a resolução do problema por parte destes órgãos, podendo ser acionados em caso de não cumprimento por parte do fabricante.

Figura 22- Etiqueta do INMETRO de um módulo solar.



Fonte: (INMETRO, 2020).

4.2.1.1 Características elétricas

Para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico é necessário conhecer as características dos equipamentos do sistema, que normalmente gira em torno dos módulos. As características elétricas dispõem das informações que se utiliza para a escolha dos módulos, e posteriormente a escolha dos demais componentes para que se adequem ao sistema.

Na folha de dados dos módulos fotovoltaicos as características elétricas são informadas baseadas em um sistema de teste universal, as “Condições Padrões de Teste” (STC – Standard Testing Condition). Este teste avalia o módulo em condições específicas para que todos os módulos produzidos possam ser avaliados de forma igualitária. Em um laboratório o painel a 25°C é irradiado com 1000 W/m², e com massa de ar de 1,5 AM, seus resultados são disponibilizados na folha de dados (SENAI A, 2020). Entre os dados disponibilizados alguns são de suma importância para o dimensionamento do sistema, sendo:

- Potência nominal máxima: Também chamada de potência de pico, baseado na STC, é maior quantidade de watts que o painel consegue atingir. Este valor serve de parâmetro para a venda dos módulos fotovoltaicos, ele geralmente é o dado estampado para diferenciar entre os demais. Quando atinge a potência

máxima significa que a corrente e a tensão do módulo também estão em seus valores máximos.

- Corrente nominal máxima: Seguindo o STC, é a quantidade de Ampères que o módulo vai produzir quando atingir a potência nominal máxima.
- Tensão nominal máxima: Seguindo o STC, é a quantidade de Volts que o módulo vai produzir quando atingir a potência nominal máxima.
- Corrente de curto circuito: É a maior corrente que o módulo gerará em STC ou em qualquer outro valor de irradiância, este dado é útil para dimensionar os circuitos elétricos.
- Tensão de circuito aberto: É a tensão gerada em STC, entre os terminais do painel, mas sem a presença de outros componentes, como circuitos que gerem corrente. Esta informação é utilizada para determinar a tensão máxima que esse a módulo gera, e assim escolher os equipamentos que suportem.
- Eficiência: A eficiência do módulo é quantidade de irradiação que ele consegue converter em energia elétrica. Essa eficiência é menor que as células, uma vez que há perdas devido aos componentes e perdas físicas naturais.

4.2.1.2 Características mecânicas

Como a grande maioria dos produtos comercializados pelo mundo, as informações físicas e mecânicas dos produtos, como peso, volume e dimensões são disponibilizadas ao consumidor. Para os módulos os seguintes itens devem estar presentes na folha de dados, já que a partir deles é que se define o que mais se adéqua para o projeto (VILLALVA, 2012):

- Dimensões (altura, largura e comprimento).
- Peso total.
- Tipo de célula fotovoltaica.
- Número de células.
- Tipo de revestimento.
- Dimensões dos conectores e cabos.
- Quantidade de diodos.

4.2.1.3 Características térmicas

Os módulos fotovoltaicos por funcionarem pela exposição direta do Sol, além de gerar energia elétrica eles acumulam energia térmica, e com o acúmulo a sua temperatura tende a subir e apesar de serem feitos para trabalhar diretamente em contato com o sol, eles sofrem decréscimos dos valores máximos da tensão e potência, mas não afetando a corrente elétrica, que tende a aumentar. Os órgãos regulamentadores realizam testes para determinar o coeficiente de decréscimo para cada elemento, e para facilitar a visualização disponibilizam junto com os coeficientes elétricos, a “Temperatura Nominal de Operação da Célula” (NOCT - *Nominal Operating Cell Temperature*), que seriam basicamente dados da potência, tensão e corrente elétrica a cerca de 45° C, por convenção dos normalizadores, supõem que o painel tende a trabalhar com 20° C a mais da temperatura ambiente, que no STC seria de 25° C (OVELHA, 2017).

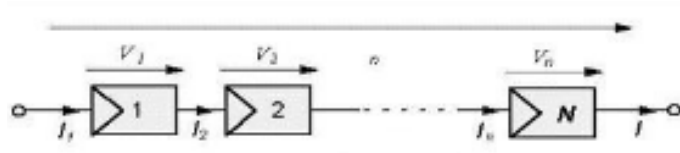
4.2.2 Tipos de associação dos módulos fotovoltaicos

A energia fornecida por um único módulo fotovoltaico não é suficiente para atender a demanda de uma residência, comércio ou indústria, eventualmente pode ser suficiente para um equipamento isolado, logo é necessário à utilização de vários módulos, de forma que a sua utilização definirá a associação entre eles, seja em série, paralelo ou misto (HECKTHEUER, 2001).

4.2.2.1 Associação em série

A associação em série liga consecutivamente os módulos de forma que a tensão gerada em cada um no final seja a somatória dos valores das tensões, mas os painéis devem possuir os mesmos valores de tensão, pois o sistema se nivelará pelo menos eficiente (Figura 23). No entanto o valor da corrente elétrica se mantém o mesmo ao longo da associação.

Figura 23 - Ligação dos módulos fotovoltaicos em série.



Fonte: (VILLALVA, 2012).

Logo é possível determinar a tensão e a corrente da associação dos módulos por:

$$\sum_{i=1}^n \bar{V}_i = V_f \quad (1)$$

$$I_f = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (2)$$

A potência do sistema então será o produto da tensão final pela corrente final.

$$P_f = V_f \times I_f \quad (3)$$

Onde:

V_i : Tensão do módulo i [V].

V_f : Tensão final da associação [V].

I_i : Corrente no módulo i [A].

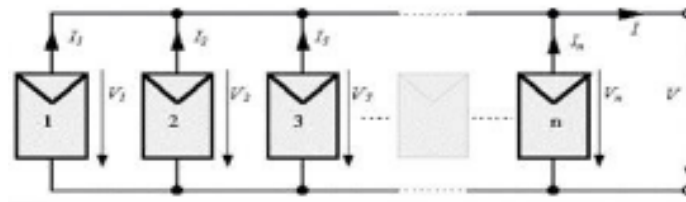
I_f : Corrente no final da associação [A].

P_f : Potência final [W].

4.2.2.2 Associação em paralelo

A associação em paralelo liga os módulos de forma que a tensão de entrada e saída em cada um seja a mesma, mas o valor da corrente elétrica será a somatória das correntes em cada. Os módulos devem ter as mesmas características, pois um módulo diferente pode em vez de gerar, consumir energia pela ligação (Figura 24).

Figura 24 - Ligação dos módulos fotovoltaicos em paralelo.



Fonte: (VILLALVA, 2012).

Logo é possível determinar a tensão e a corrente da associação dos módulos por:

$$\sum_{i=1}^n I_i = I_f \quad (1)$$

$$V_f = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (2)$$

A potência do sistema então será o produto da tensão final pela corrente final.

$$P_f = V_f \times I_f \quad (3)$$

Onde:

V_i : Tensão do painel i [V].

V_f : Tensão final da associação [V].

I_i : Corrente no painel i [A].

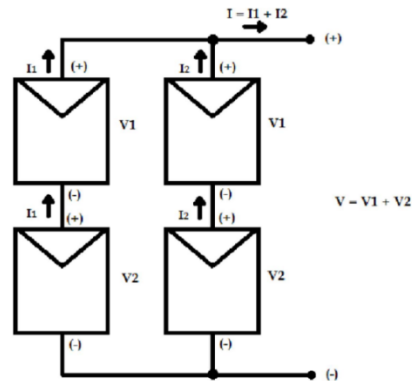
I_f : Corrente no final da associação [A].

P_f : Potência final [W].

4.2.2.3 Associação mista

Quando um sistema fotovoltaico possui tanto associações em série quanto em paralelo, é nomeado como associação mista. Essa configuração é amplamente utilizada, pois com ela é possível definir a quantidade de tensão e corrente totais necessários para atender a demanda elétrica (Figura 25). Para os cálculos, usam-se as mesmas condições de série e paralelo.

Figura 25 - Ligação dos módulos fotovoltaicos de forma mista.



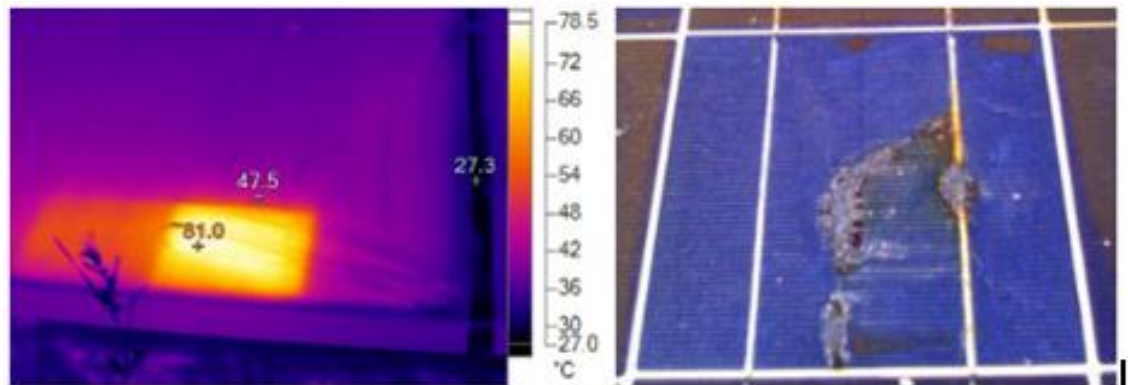
Fonte: (VILLALVA, 2012).

4.2.3 Sombreamento

Entre os fatores que influenciam a produção de energia dos painéis fotovoltaicos está o sombreamento. O sombreamento ele é dividido entre parcial ou total, quando há sombreamento total, significa que a grande maioria ou totalmente do sistema está sombreado, seja pela passagem de uma nuvem ou sombra de uma edificação distante. Já no sombreamento parcial, entre uma única célula fotovoltaica ou alguns módulos na associação estão sombreados, seja por uma folha, lixo, animal, equipamentos ou arvores, esse tipo de sombreamento quanto menos elementos ele atingir pior serão as consequências (ZILLES, MACÊDO, *et al.*, 2012).

Devido aos módulos mais comercializados utilizarem uma associação em série de células, quando uma ou algumas células do painel estiver sombreada, a produção delas será afetada, já que está diretamente relacionada a irradiação solar. Com a diminuição da irradiação, estas células localizadas passam a ter menos corrente que as demais, e pelo fato do seu tipo de ligação, toda a produção será afetada, tendendo a se nivelar pelas sombreadas. Em alguns casos as células sombreadas em vez de produzir, passam a consumir a energia produzida pelas demais, convertendo em energia térmica, gerando assim o efeito “hotspot” (ponto quente) (Figura 26), dependendo da quantidade de energia, a célula se superaquece e se danifica, inutilizando todo o módulo (SENAI, 2020b).

Figura 26 – Ocorrência de hotspot.



Fonte: (PV MAGAZINE, 2017).

Para evitar esse tipo de problema, alguns módulos vêm com diodos de passagem (ou bypass), que funcionam como uma rota alternativa para a corrente elétrica, evitando assim a célula sombreada e mantendo a produção padrão de energia, além de evitar corrente inversa, pois a corrente só flui em um sentido. Este dispositivo pode ser utilizado entre cada célula, mas como o preço se elevaria muito, os módulos comerciais vêm com diodos em um grupo de células, para que a produção do módulo inteiro não seja afetada (PV MAGAZINE, 2017).

4.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO

O sistema fotovoltaico isolado ou OFFGRID é um sistema de produção de energia elétrica autônomo no qual não está ligado à rede elétrica de distribuição, ou seja, a energia utilizada para alimentação é toda produzida pelos módulos fotovoltaicos (Figura 29). Esse sistema é bem amplo no sentido para utilização, pois parte de uma simples calculadora com uma célula de filme fino, passa por lâmpadas de iluminação, celulares, motores, radares, residências e até indústrias (VILLALVA, 2012).

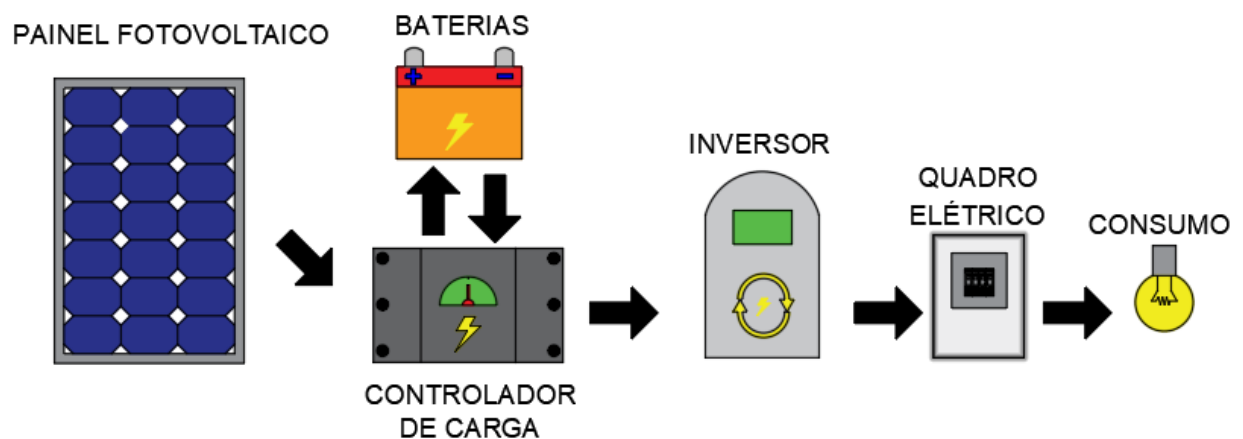
A geração isolada para residência é composta por uma série de equipamentos, a configuração mais comum é:

- Módulos fotovoltaicos: São responsáveis por toda energia que será utilizada na residência, caso não haja outra fonte de geração. A quantidade de módulos deve suprir a demanda baseado no consumo médio mensal, com uma margem extra que supere dias com elevado consumo.
- Baterias: As baterias vão ser responsáveis por armazenar a energia produzida para utilizar em períodos em que não há geração, a quantidade de baterias

deve ser definida para que toda energia produzida seja armazenada, mas de modo que a demanda não ultrapasse o nível crítico e assim comprometa sua vida útil

- Controlador de carga: Regula o abastecimento da residência e gerencia a carga e descarga das baterias, conforme a demanda sem comprometer as baterias e o circuito.
- Inversor: Responsável pela conversão da CC vinda do controlador para CA, utilizada na residência.
- Quadro elétrico: O quadro elétrico liga os pontos de utilização e protege os circuitos de eventuais incidentes.

Figura 27 - Sistema fotovoltaico isolado



Fonte: Próprios autores (2020).

4.4 SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE ELÉTRICA

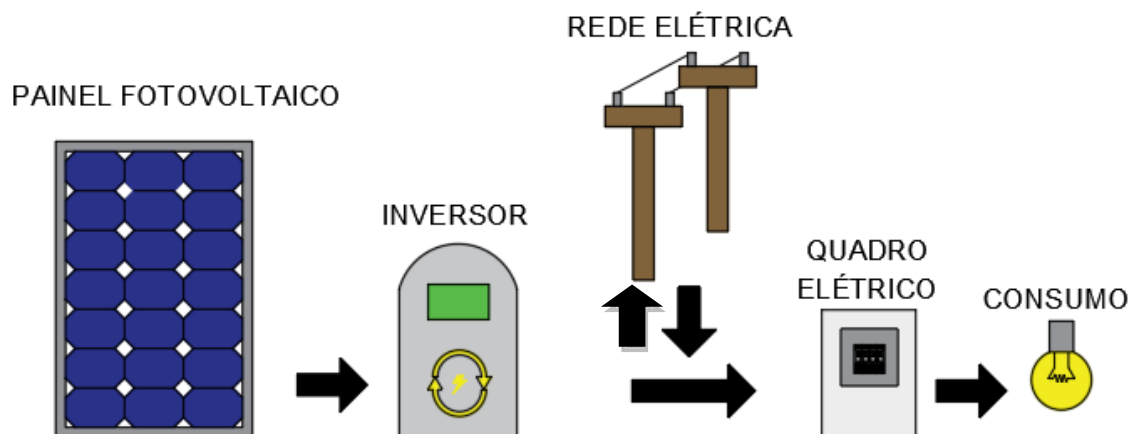
O sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica ou ON GRID é um tipo de geração distribuída no qual a energia produzida pelo sistema fotovoltaico que não é utilizada durante a captação é injetada na rede elétrica da concessionária, e durante a noite ou quando a produção é insuficiente para a demanda, se utiliza a energia vinda da rede (Figura 30).

Esse tipo de sistema é o mais utilizado no mundo, pois não necessita de um banco de baterias e controlador de carga, o que gera grande economia, além disso a energia produzida que não é utilizada vira créditos que abatem no final do mês a energia consumida da concessionária (ZILLES, MACÊDO, *et al.*, 2012).

A composição desse sistema se diferencia do isolado pela ausência das baterias e do controlador de carga, no entanto o inversor nesse sistema deve ser específico, pois como a energia excedente é injetada na rede, essa energia deve ter as mesmas características da distribuída pela concessionária, logo o tipo de onda deve ser senoidal pura a uma frequência de 60 Hz no Brasil (SENAI, 2020b).

A geração distribuída foi normatizada no Brasil em 2012 com a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 e revisada pela Resolução Normativa nº 687/2015, define como microgeração, gerações com potências de até 75 kW e minigeração de 75 kW a 5 MW. Essa geração pode gerar créditos quando fornecidas para rede de abastecimento, válidos por 60 (ANEEL, 2012).

Figura 28 - Sistema fotovoltaico conectado a rede elétrica.



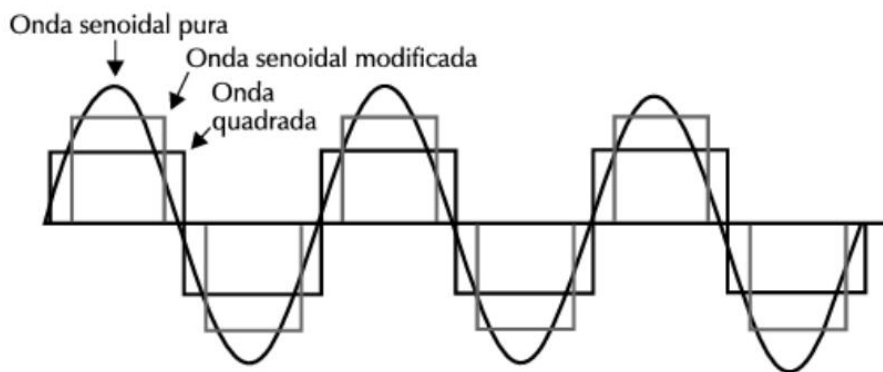
Fonte: Próprios autores (2020).

4.5 INVERSOR

O inversor ou alternador de corrente, é o dispositivo responsável por transformar a corrente contínua (CC) vinda os módulos fotovoltaicos em corrente alternada (CA), que é a corrente que os eletrodomésticos e eletrônicos comumente utilizam. Há três tipos de inversores no mercado, os inversores de onda quadrada, onda senoidal-modificada e o de onda senoidal pura, e eles podem ser utilizada de forma isolada (*OFF-GRID*), conectada a uma rede elétrica de abastecimento de uma concessionária (*ON-GRID*) ou na forma de micro inversores (OVELHA, 2017).

Durante o processo de conversão de corrente, por meio de transistores, indutores, capacitores e outros componentes do inversor, a CC, passa uma sequência de alterações entre esses componentes até se tornar uma CA, e para os inversores comercializados no Brasil, essa corrente tem frequência em torno de 60Hz. A diferença entre os tipos de ondas produzidas está na intensidade da variação harmônica, onde a que se aproxima mais a uma onda senoidal perfeita é a que produz menor variação de tensão, logo para equipamentos sensíveis, o inversor de onda senoidal pura é o mais recomendado (Figura 27), e devido a tecnologia empregada seu preço também se eleva (VILLALVA, 2012).

Figura 29 – Tipos de onda produzida pelos inversores.



Fonte: (VILLALVA, 2012).

Aspectos técnicos que se deve levar em consideração para compra dos inversores solares são os seguintes, a entrada de tensão fixa, que pode variar de 12V, 24V, 48V ultrapassando 100V para usinas de produção; Tensão de saída, que no Brasil é de 110 a 220V; A potência nominal de uso, que não pode ser excedida pois danifica o inversor, Potência Máxima, pico de potência que o inversor suporta por pequenos períodos sem danificar e a eficiência, pois há perdas de energia durante o processo de conversão, partindo de 0 e podendo chegar até a 10% em inversores de baixa qualidade (SENAI, 2020b).

4.6 BATERIAS

As baterias são dispositivos elétricos que armazenam energia elétrica para diversos usos, em que podem ser carregadas e descarregadas um número limitado de vezes, proporcionando quantidade de energia conforme sua tecnologia e materiais empregados (Figura 28). Nos sistemas fotovoltaicos, as baterias são utilizadas para armazenar a energia

produzida pelos painéis, pois em um sistema isolado onde não há outras fontes de energia elétrica, a bateria fornece a alimentação que foi produzida em excesso, já que durante a noite, não há produção elétrica por parte dos painéis (COPETTI e MACAGNAN, 2007).

Assim como os painéis fotovoltaicos, várias baterias podem ser conectadas de forma paralela ou em série, essa associação permite que as baterias forneçam tensões maiores quando ligadas em série e correntes maiores quando ligadas em paralelo. Outra função importante das baterias é manter a tensão e corrente constante para o abastecimento, já a tensão e a corrente vinda dos painéis sofrem oscilações devido à variação de produção durante o dia. A vida útil e a manutenção de uma bateria variam conforme a tecnologia empregada, comercialmente para sistemas fotovoltaicos as que são mais utilizadas são as de chumbo ácido, Níquel e AGM (VILLALVA, 2012), sendo:

- Chumbo ácido: As baterias de chumbo ácido são as mais utilizadas no mercado fotovoltaico, devido ao seu custo benefício. Ela pode ser encontrada em duas versões, a em ácido líquido e a em ácido gel, sendo a em gel mais cara e com maior vida útil, elas ainda vêm em cada uma das versões seladas ou abertas, sendo necessária a adição de água quando aberta para manutenção.
- Níquel: Composta de Níquel-Cádmio (NiCd) ou Níquel-Metal-Hidreto (NiMH), essas baterias são mais caras que as de chumbo ácido, mas possuem menor tamanho devido a sua densidade de carga, suportam grande variações de temperatura e podem ser descarregadas em até 90%, além de necessitarem de pouca manutenção. Devido ao seu preço é utilizada em lugares específicos que necessitam de suas vantagens.
- AGM: Sigla de “*Absorbed Glass Mat*”, esta bateria é superior em quase tudo relacionado as demais apresentadas, logo seu preço é o mais elevado. Esta bateria é utilizada em locais onde o espaço seja um recurso importante e que não necessite de manutenção.

Uma característica importante ao se compra uma bateria para um sistema fotovoltaico, é o fato que ela deve ser estacionária, pois existe o modelo automotivo. Enquanto no modelo automotivo, as baterias são feitas para gerar grandes correntes em pequenos períodos de tempo e serem descarregadas em no máximo 20%, a modelo estacionária foi feita para gerar correntes relativamente baixas em longos períodos de tempo, e possuem ciclo de descarregamento profundo. Este fato é evidenciado pelo seu nome,

estacionária, que permanece parada, enquanto a automotiva é destinada para automóveis (COPETTI e MACAGNAN, 2007).

Figura 30 - Baterias estacionárias e automotivas.



Fonte: (DMESG, Acesso em 2020).

4.7 CONTROLADOR DE CARGA

O controlador de carga é um dispositivo indispensável quando se utiliza baterias no em sistema de geração fotovoltaico, isso por que ele é responsável por regular a energia vinda dos painéis solares até as baterias ou a alimentação final. Ele é responsável por:

- Evitar a sobrecarga nas baterias, impedindo o desperdício de energia e o superaquecimento dos componentes.
- Evitar a descarga crítica das baterias para níveis que afetem a capacidade de armazenamento.
- Controlar a tensão e corrente adequadas para carga e descarga das baterias.
- Controlar a tensão e corrente adequadas para o inversor.
- Gerenciar os níveis de energia em cada bateria, para que trabalhem em harmonia.

Todas essas funções garantem que os sistema ligado as baterias se mantenha em bom funcionamento e maximiza a utilização e a vida útil das baterias (LUQUE e HEGEDUS, 2002).

5 ESTUDO DE CASO: DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE (ONGRID)

Para o estudo de caso, será feito um projeto e dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de distribuição para uma residência localizada na cidade de Anápolis, no estado de Goiás (Figura 31). Baseado na quantidade média de energia consumida mensalmente, o sistema de geração deverá produzir energia suficiente para que sobre apenas a taxa mínima de consumo da média mensal.

Para uma modelagem 3D e um dimensionamento mais técnico e preciso, serão utilizados os programas PV Sol e PVsyst, que são *softwares* especializados para sistemas fotovoltaicos, com um vasto banco de dados, e algoritmos que fornecem diversos relatórios sobre o sistema definido. Ele será abastecido com dados do local de geração para um resultado mais verossímil. A versão utilizada para este dimensionamento foi a 10.33 do PV Sol, e 6.8.1 do PVsyst, ambas com versões de acesso grátis para estudantes com limitações de tamanho de projetos.

Figura 31 - Residência do estudo de caso.



Fonte: Próprios autores (2020)

5.1 ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA

A análise de viabilidade técnica é a avaliação das condições gerais que afetam o dimensionamento, instalação e produção energética, considerando os fatores técnicos do local e a necessidade requerida de consumo. O sistema fotovoltaico possui diversos elementos que atuam de maneiras distintas, mas com funções cruciais, de forma que uma pequena irregularidade pode afetar drasticamente a produção do sistema inteiro ou provocar a falha total. Para que o sistema funcione em sua máxima eficiência é necessária a escolha das melhores peças e equipamentos que se adéquem a necessidade do local, para assim dispor da funcionalidade máxima do sistema e definir se ela é viável para o proprietário.

Dentre os fatores técnicos que condicionam a viabilidade e dimensionamento do sistema, alguns possuem impactos maiores que outros no balanço final da análise, conforme a tabela seguinte:

Quadro 6 - Fatores técnicos que afetam o SFCR.

Fator Técnico	Descrição	Impacto
Recurso Solar	Impacta tecnicamente e comercialmente a instalação do sistema fotovoltaico. O recurso solar em última instância será o determinante para que um sistema seja considerado viável.	Alto
Tipos de Instalação	O tipo de instalação refere-se ao local da instalação: solo, telhado/ laje ou ainda ambos. Instalações em solo ou laje tipicamente ocupam maior área, principalmente em locais com latitude elevada, devido principalmente ao sombreamento mútuo causado entre as mesas dos módulos.	Baixo
Posicionamento	O posicionamento diz respeito aos ângulos de azimute e inclinação escolhidos para a instalação. Este ângulo altera o valor de energia incidente na superfície dos módulos. O posicionamento pode afetar sensivelmente a produção de energia de um sistema	Médio
Sombreamento	O sombreamento aliado ao posicionamento é um dos fatores que mais influenciam a produção energética de um sistema fotovoltaico. Sombreamentos parciais podem afetar severamente a produção e em alguns casos causar danos irreversíveis aos módulos fotovoltaicos (efeito de hot-spot)	Alto
Componentes de instalação	Esta avaliação diz respeito à qualidade dos componentes de uma instalação. Os principais equipamentos de uma instalação fotovoltaica são os módulos e o conversor de corrente contínua (inversor). O correto dimensionamento destes equipamentos também é vital para o desempenho energético	Médio
Tensão de ligação	O Brasil possui na distribuição dois padrões para tensão de fornecimento para consumidores do tipo B (Baixa Tensão), 220/127 e 380/220. O inversor por	Baixo

	ser um equipamento desenvolvido principalmente para redes europeias, mesmo os modelos tropicalizados possuem tensão de ligação 380 volts para o caso trifásico e 220 volts para o caso monofásico.	
Condições prévias do local	Em todo empreendimento, antes de se proceder ao projeto executivo da instalação, será necessário conhecer as condições do local. O projetista deverá identificar rotas de cabos, espaços em quadros, tipo de instalação elétrica existente entre outros fatores importantes para o melhor aproveitamento da instalação existente.	Médio
Condições elétricas do local da instalação	A rede elétrica do local de instalação pode se tornar um problema difícil de resolver. Tipicamente, sistemas que pretendem se conectar em redes fracas, finais de linha com alta taxa de distorção harmônica pode sofrer com problemas de sincronização. A intensidade do distúrbio presente na rede elétrica pode se tornar um fator determinante na viabilidade do sistema. O distúrbio não precisa ser proveniente necessariamente da rede elétrica, podendo ser causado pelas cargas do local de instalação.	Médio
Tipo de rede acessada	Em alguns casos, o sistema simplesmente não poderá ser conectado devido a restrições técnicas da rede da concessionária. Em casos de redes subterrâneas reticuladas, o sistema de geração torna a complexidade de proteção tão grande, que este tipo de rede não pode aceitar injeção de potência no fluxo reverso.	Alto
Condições Ambientais	As condições ambientais dizem respeito ao local de instalação. Ambientes urbanos tendem a possuir altos níveis de poluição e particulados suspensos. Existe uma perda associada à sujidade dos módulos fotovoltaicos. Outros fatores como presença ou não de animais silvestres podem impactar no tipo de instalação elétrica escolhida.	Baixo
Condições de Segurança	Os empreendimentos fotovoltaicos são uma novidade, no entanto, quando estes se tornarem de conhecimento público, os módulos e demais equipamentos podem se tornar propensos a furtos e vandalismo. Em projetos que envolvem áreas públicas este problema pode se intensificar,	Baixo
Condições de operação e manutenção	Localidades muito afastadas podem se tornar um problema de manutenção. Hoje a utilização de energia solar em meio rural ainda não ganhou força regulatória ou comercial, mas pode se tornar uma realidade com a implementação de políticas mais agressivas que o modelo atual. Em instalações urbanas, locais com difícil acesso pode ser problemáticos, como grandes telhados industriais com grande altura. A manutenção nesses casos tende a ser necessariamente realizada por empresas especializadas. Por fim, é importante citar a necessidade de monitoramento dos sistemas, de acordo com a potência instalada podem requerer sistemas de automação mais complexos.	Médio

Fonte: (SENAI, 2020b)

5.1.1 Energia de geração

O primeiro passo para o dimensionamento de um sistema de geração fotovoltaico é determinar a quantidade de energia que deverá ser gerada. A energia de geração será então a energia que o sistema precisará produzir, para suprir a demanda requerida. Para essa residência, este valor será baseado na quantidade de kWh consumida no mês, de forma que atinja pelo menos a diferença entre a média de consumo mensal e a taxa mínima de consumo, de acordo com a classe em que a residência se enquadra. O consumo mensal é variável, e para chegar a ao melhor valor de geração, o correto é fazer uma média dos últimos 6 até 12 meses, para que assim o sistema não produza energia em excesso devido há meses extraordinários e perca parte da sua produção.

O consumo médio mensal será baseado nos últimos 7 meses seguindo esse registro de consumo da concessionária ENEL-GO (Figura 32) calculado por:

$$C = \frac{\sum kW_i}{N} \quad (1)$$

$$C = \frac{216 + 174 + 167 + 192 + 206 + 187 + 205}{7} \quad (2)$$

$$C = 192,42 \quad (3)$$

Onde:

C: Consumo médio mensal [kWh/mês].

kWi: Quantidade de kWh consumida no mês i [kWh].

N: Número total de meses [mês].

Logo a energia de geração do sistema deverá produzir ao menos a diferença entre 192,42 kWh e a taxa mínima de uso da rede definido pelo tipo de fornecimento da residência. Segundo a fatura mensal (Figura 32), a unidade consumidora pertence ao tipo B, subgrupo B1 até 10 kW, monofásico, logo pela Resolução nº 414 de 2010, esta unidade consumidora deverá pagar a taxa mínima de uso da rede de 30 kWh. Assim o sistema deverá gerar ao menos 162,42 kWh por mês, 5,414 kWh por dia.

Figura 32 - Fatura de energia elétrica.

enel Celg Distribuição S.A. - CELG D
 CNPJ: 01.543.032/0001-04 IE: 100.549.420
 R. 2, Gd. A-07, N 505 Jd. Goiás CEP 74805-180 Goiânia Goiás
 NOTA FISCAL/FATURA DE ENERGIA ELETRICA

Dados do Cliente/Unidade Consumidora

Nº DA INSTALAÇÃO [REDACTED] Nº DO CLIENTE [REDACTED]

Classificação da Unidade Consumidora

Grupo B Subgrupo B1
 Classe RESIDENCIAL
 Subclasse RESIDENCIAL NORMAL
 Tipo de Fornecedor MONO
 Modalidade tarifária CONVENCIONAL

Dados da Conta

VENCIMENTO 03/11/2020 TOTAL A PAGAR (R\$) 175,49
 CONTA REFERENTE A 10/2020
 Use este código para cadastro em Débito Automático: 0283600823

Dados de Medição

Nº do medidor 115277331
 Leitura anterior 6577 18/09/2020
 Leitura atual 6582 20/10/2020
 Próxima leitura 19/11/2020
 Fator multiplicador 1,0000
 Consumo do mês (kWh) 205,00
 Número de dias 32 DIAS

Histórico de Faturamento

Mês/Ano	kWh	Dias
10/19 LID	128	32
11/19 LID	131	30
12/19 LID	122	29
01/20 LID	87	32
02/20 MIN	7	29
03/20 LID	114	30
04/20 LID	216	32
05/20 LID	174	30
06/20 LID	167	30
07/20 LID	192	31
08/20 LID	206	30
09/20 LID	187	30
10/20 LID	205	32

Legenda: LID - Leitura; MIN - Mínimo; MED - Média de consumo; NIN - Mínimo faturável

Reservado ao Fisco

Data de emissão	Nº Nota fiscal	Série	Base de cálculo	Alíquota	ICMS
20/10/20	1981444	4	166,47	29,00%	48,27

Pis: 166,47 | 0,9421% | 1,56, Cofins: 166,47 | 4,3392% | 7,22
 6390-1D03-F615-45F6-12F8-EE6C-D567-785F

VERDE
 Mais informações em www.aneel.gov.br

Descrição de Faturamento

ITEM	QTD	VALOR UNIT.	TOTAL
CONTRIB. CUSTEIO DA ILUMIN.PUBLI		0,000000	9,02
CONSUMO KWH + ICMS/PIS/COFINS	205,00	0,812060	166,47

Pag. 1 / 1
 Mensagens: PERÍODO DE REFERÊNCIA DA APURAÇÃO DOS INDICADORES DE CONTINUIDADE = 0/2020 - EUSD = R\$ 57,64910

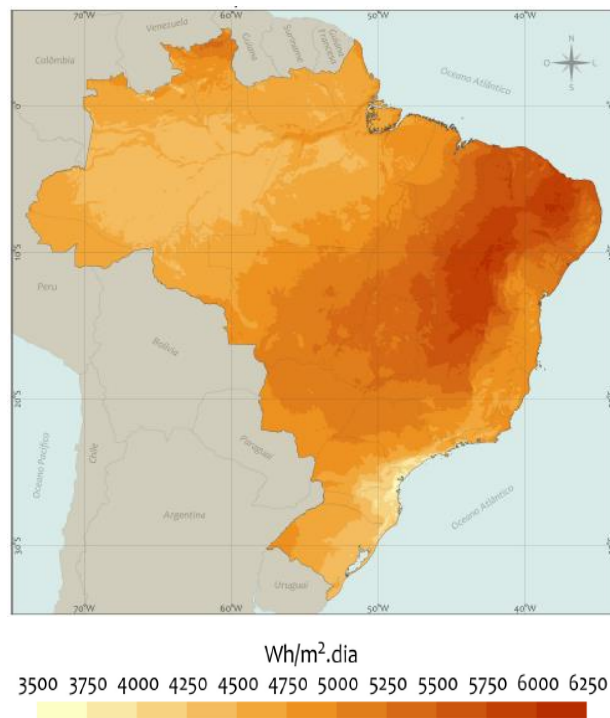
Fonte: Próprios autores (2020).

5.1.2 Recurso Solar

O recurso solar é a disponibilidade de energia que cada local recebe durante o dia, no ano inteiro, este fator é de alto impacto no SFCR, pois influenciará os demais fatores técnicos e a viabilidade da instalação. A irradiância varia durante o dia, influenciado por diversos

fatores como clima, estação e local. Utilizando um mapa de irradiação global horizontal de média anual (Figura 33) baseado no modelo BRASIL-SR, é possível determinar uma estimativa da irradiância em Anápolis, que varia em torno de 5,0 a 5,5 kWh/m². dia. Com o valor de 5,25 kWh/m² para o dia, 157,5 kWh/m² para mês e 1916,25 kWh/m² para o ano, é possível perceber que Anápolis conta com valores muito bons de irradiação, um ótimo fator positivo para a instalação.

Figura 33 - Mapa de média diária irradiação global horizontal anual

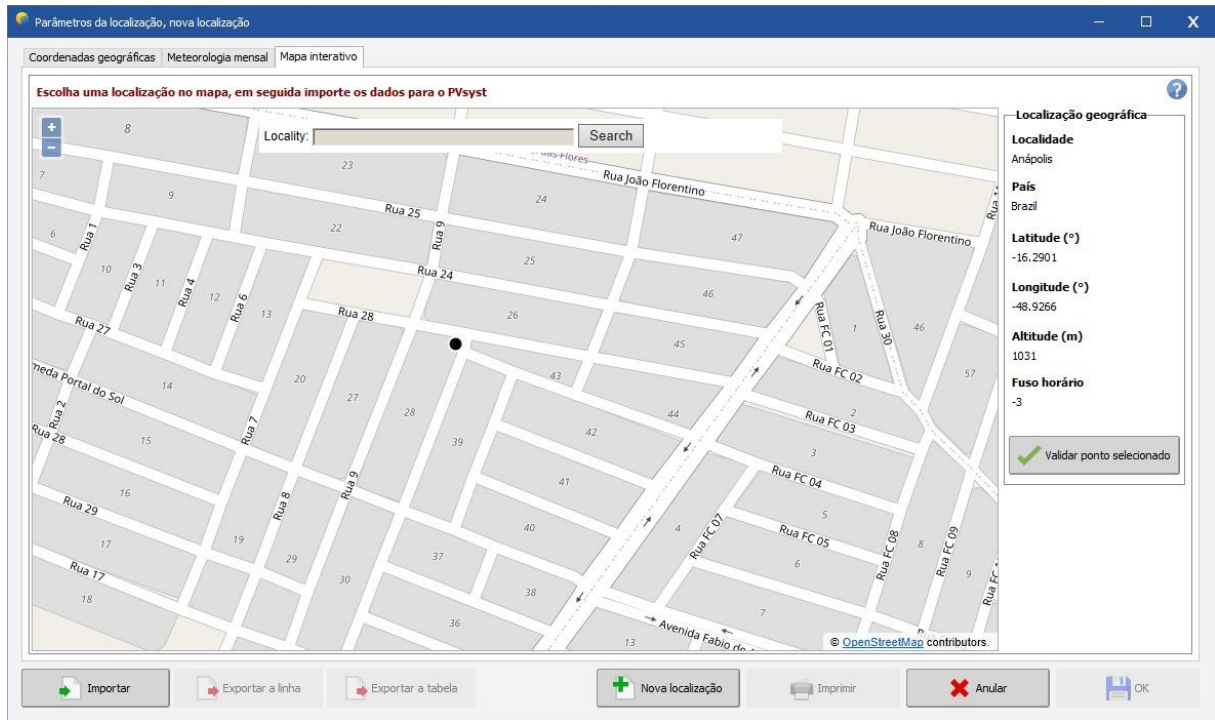


Fonte: (PEREIRA, 2017).

5.1.2.1 Os PV Sol e PVsyst contam com um banco de dados de irradiância e irradiação baseado no Meteonorm, que reúne e permite o acesso a séries históricas de irradiação, temperatura, umidade, precipitação e vento. Oferece ainda acesso a todas as informações meteorológicas relevantes necessárias para o planejamento de aplicações solares através da mesma plataforma de *software*: anos típicos, médias mensais, séries temporais horárias.

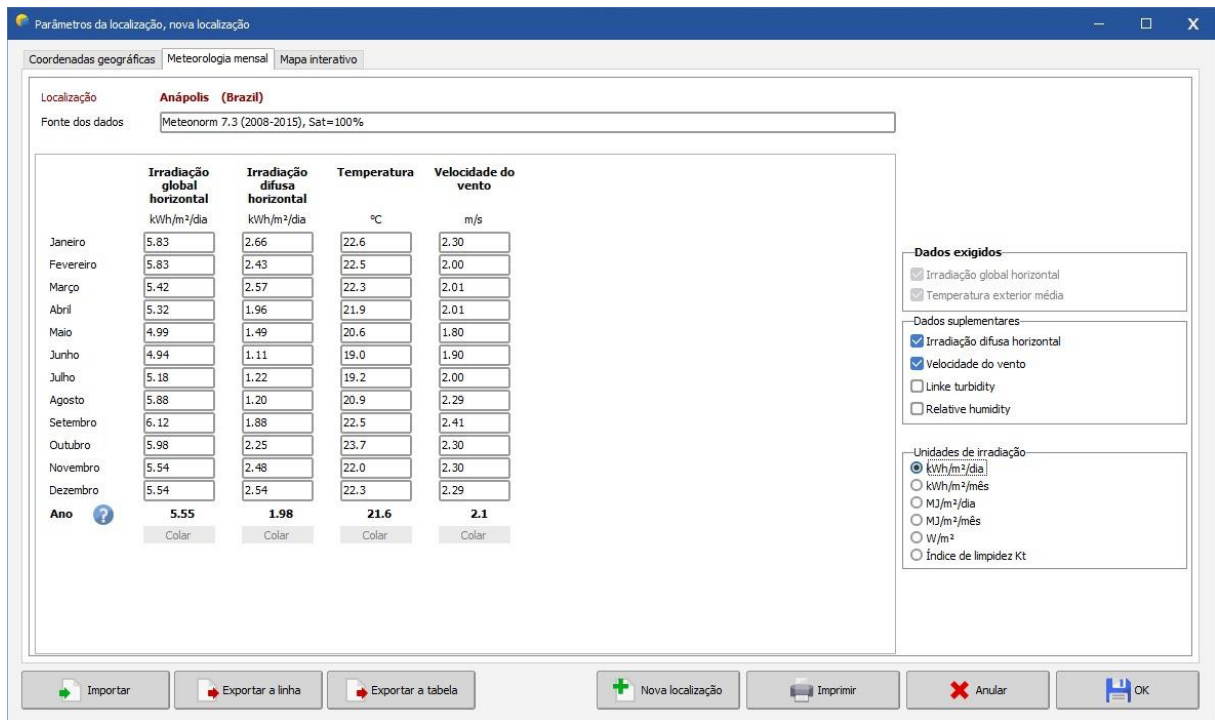
Por meio da função de mapa é possível determinar o local exato da instalação (Figura 34) e assim determinar os dados meteorológicos e geográficos para definir a quantidade específica de radiação solar incidente (Figura 35).

Figura 34 - Mapa interativo.



Fonte: PVsyst 2020.

Figura 35 - Dados meteorológicos do banco de dados do Meteonorm.



Fonte: PVsyst 2020.

5.1.3 Painéis fotovoltaicos

A quantidade de módulos fotovoltaicos dependerá diretamente da potência que o sistema deve atingir para produzir a quantidade de energia necessária, essa potência pode ser encontrada pela razão entre a energia demandada diariamente, mensalmente ou anualmente e quantidade de irradiação que o local recebe durante o mesmo período. Mas como o sistema conta com diversos fatores técnicos que causam perdas na produção, é necessário utilizar um coeficiente de majoração, que há primeiro momento será um valor acima do real, mas posteriormente pelos relatórios dos *softwares* será corrigido.

Para o cálculo será utilizado o consumo diário da fatura da unidade consumidora, a média anual da irradiação solar diária informada pelo PVsyst e a taxa de desempenho que será o coeficiente de majoração superestimado de 25%. Logo calcula-se a potência de geração que os painéis devem atingir pela seguinte fórmula:

$$Pg = \frac{C}{Ir * Td} \quad (1)$$

$$Pg = \frac{5,414}{5,55 * 0,75} \quad (2)$$

$$Pg = 1,30 \text{ kWp} \quad (3)$$

Onde:

Pg: Potência de geração [kWp].

C: Consumo médio diário [kWh . dia].

Ir: Irradiação média diário [kWh/m². dia].

Td: Taxa de desempenho [%].

Com a quantidade de potência definida, agora basta escolher um módulo fotovoltaico de acordo com sua potência nominal. No mercado há módulos de diversos níveis de potência, e neste projeto será utilizado um módulo da fabricante CANADIAN SOLAR de 360 W de potência nominal. Os dados da “*data sheet*” estão na figura 36.

Figura 36 - Dados do Módulo fotovoltaico.

Definição de um módulo FV

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

Modelo: CS3U-360P-AG 1500V P4 Fabricante: Canadian Solar Inc.
Nome ficheiro: Canadian_CS3U_360P_AG_1500.PAN Fonte dados: Manufacturer 2018 TUV-SUD data
Original PVsyst database Prod. Since 2018

Potência nom. (em STC): 360.0 Wp Tol. -/+ 0.0 1.4 %
Tecnologia: Si-poly

Especificações do fabricante ou outras medidas

Condições de referência	GRef	1000	W/m ²	TRef	25	°C
Corrente de curto-circuito	Isc	9.670	A	Circuito aberto Vco	47.00	V
Ponto de potência máx.	Imp	9.100	A	Vmpp	39.60	V
Coeficiente de temperatura	muIsc	4.8	mA/°C	N.º células 72 x 2		
	ou muIsc	0.050	%/°C			

Resumo do modelo

Parâmetros principais

R paral.	350 Ω
Rparal(G=0)	5000 Ω
R série model	0.20 Ω
R série máx.	0.25 Ω
R série aparente	0.39 Ω

Parâmetros modelo

Gamma	1.001
IoRef	0.09 nA
μVco	-148 mV/°C
muPMax fixo	-0.37 /°C

Resultados do modelo interno

Condições de funcionamento	GOper	1000	W/m ²	TOper	25	°C
Ponto de potência máx.	Pmpp	360.4	W	Coef. de temperatura	-0.36	%/°C
	Corrente Imp	9.13	A	Tensão Vmpp	39.5	V
Corrente de curto-circuito	Isc	9.67	A	Circuito aberto Vco	47.0	V
Eficiência	/ Superf. células	20.38	%	/ Superf. módulo	18.16	%

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

Fonte: PVsyst 2020.

Para o cálculo da quantidade de módulos pela fórmula:

$$Np = \frac{Pg}{\frac{Pp}{1000}} \quad (1)$$

$$Np = \frac{1,30}{0,360} \quad (2)$$

$$Np = 3,61 \rightarrow 4 \quad (3)$$

Onde:

Pg: Potência de geração [kWp]

Pp: Potência nominal do painel [kW]

Np: Número de módulos.

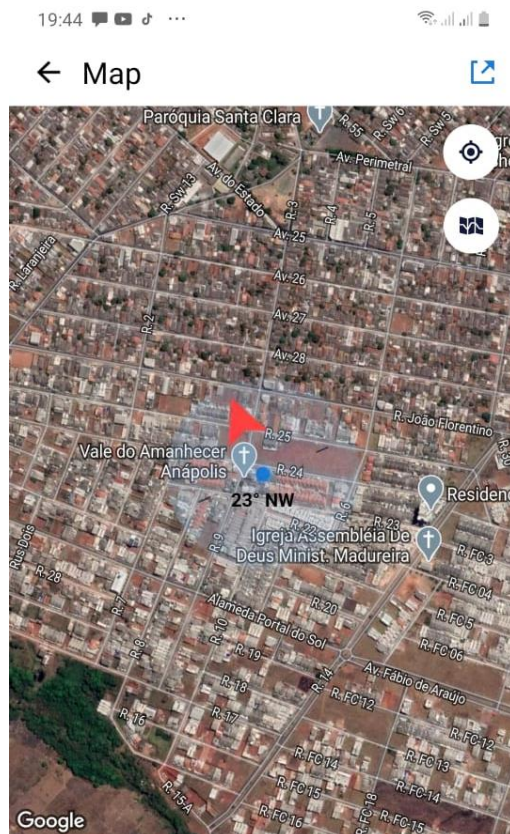
Como o número de módulos deu um valor fracionado, deve se utilizar o próximo valor inteiro, que servirá como uma reserva de energia para futuros acréscimos de uso e perdas de desempenho com o tempo de utilização.

5.1.4 Posicionamento dos painéis

O posicionamento dos módulos é um fator de alta importância no sistema, no qual o tipo de instalação, inclinação e desvio azimutal são dados necessários para os *softwares* que dimensionem a produção e as perdas energéticas.

Utilizando uma bússola digital em um celular com tal recurso, é possível determinar o desvio azimutal do telhado em relação ao norte geográfico. Logo o desvio encontrado no celular foi de 23° para Leste (Figura 37).

Figura 37 - Bússola Digital.



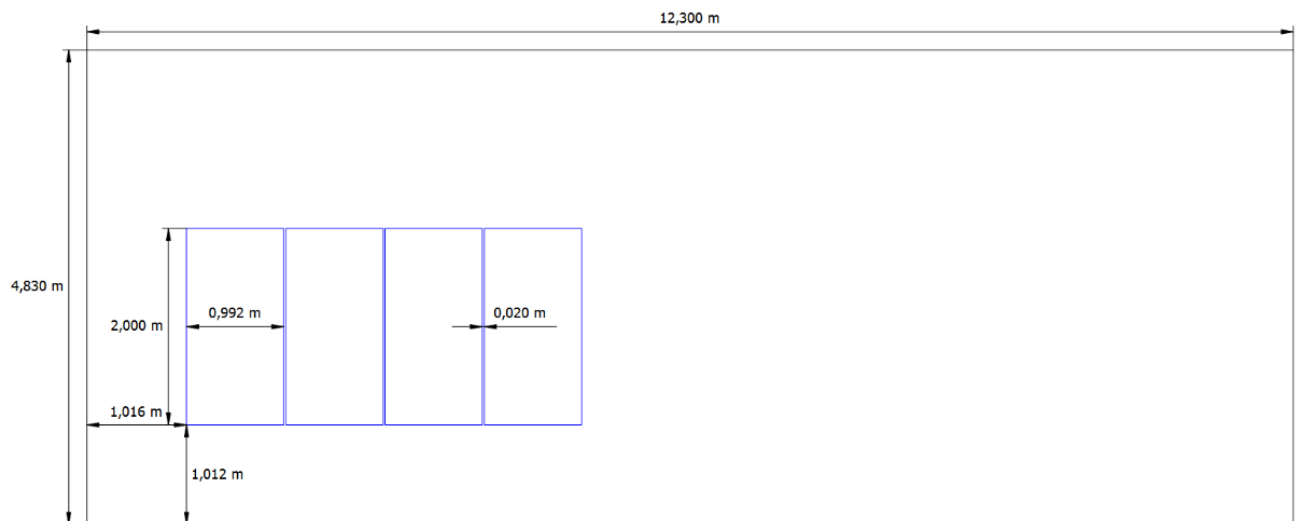
Fonte: Bússola Digital apk.

A inclinação dos módulos fotovoltaicos acompanhará a inclinação do telhado que é de 30° devido as telhas de concreto, de forma paralela, pois a tentativa de instalação na melhor

inclinação, poderá gerar custos extras tanto na montagem quanto posteriormente devido as condições estáticas, que influenciará no desgaste ou ruptura dos painéis fixados precocemente.

Estes dados serão incluídos no PVsyst e PV Sol para determinar a produção próxima da realidade com base em seus bancos de dados e algoritmos de cálculo, levando em conta perdas pelos demais fatores técnicos e para a modelagem 3D (Figura 38).

Figura 38 - Planta de dimensões (ASG SOLAR, Acesso em 2020)



Fonte: PV Sol 2020.

5.1.5 Inversor

Para a escolha do inversor é necessário a potência máxima de geração da associação dos módulos que serão ligados a ele, logo 4 módulos de tensão nominal máxima de 360W resultará em uma potência pico de 1440W. Com essa potência definida, os inversores que estarão aptos a se enquadrar nesse sistema devem ter em sua entrada, a potência nominal de no máximo 20% para mais ou menos desse valor.

Foi selecionado um inversor da fabricante ABB, modelo UNO-DM-1.2TL-PLUS, com os seguintes parâmetros principais (Figura 39):

Figura 39 - Parâmetros principais do Inversor.

The screenshot shows the 'Definição de um inversor para a rede' window in PVsyst. The interface is divided into several sections:

- Parâmetros principais:**
 - Modelo: UNO-DM-1.2-TL-PLUS
 - Fabricante: ABB
 - Nome ficheiro: ABB_UNO_DM_1_2_TL_PLUS.OND
 - Fonte dos dados: Manufacturer 2017
 - Original PVsyst database
 - Prod. Since 2017
- Entrada (DC, Grupo FV):**
 - Tensão MPP mínima: 90 V
 - Tensão min. para Pnom: 100 V
 - Corrente de entrada maxi: 12,9 A
 - Tensão MPP nominal: 185 V
 - Tensão MPP máxima: 580 V
 - Tensão FV máxima absoluta: 600 V
 - Limiar potência: 8,00 W (Pré-definido)
 - Especificações contratuais sem significado físico real: Obrigatório
 - Potência FV nominal: 1,50 kW
 - Potência máxima FV: 1,50 kW
 - Corrente máxima FV: N/A A
- Saída (Rede AC):**
 - Configuração: Monofásica
 - Frequência: 60 Hz
 - Tensão da rede: 230 V
 - Potência AC nominal: 1,20 kVA
 - Potência AC máxima: 1,20 kVA
 - Corrente nominal AC: 5,50 A
 - Corrente máxima AC: 5,50 A
- Eficiência:**
 - Eficiência máxima: 94,80%
 - Eficiência EURO: 92,00%
 - Opção: Eficiência definida para 3 tensões

At the bottom, there are buttons for 'Copiar para a tabela', 'Imprimir', 'Anular', and 'OK'.

Fonte: PVsyst 2020.

A potência nominal do inversor é de 1500W, superior a potência de pico dos módulos e dentro da faixa dos 20%, não sendo superdimensionado. Outro parâmetro que se deve atentar é a tensão mínima e máxima desse inversor, segundo a folha de dados do módulo, ele possui uma tensão de corrente aberta de 47 V e 39,6 V em máxima potência, como a associação dos módulos são em série, a tensão final será de 186 V para corrente aberta e 158,4 V para máxima potência. Estes valores então dentro dos valores recomendados pela fabricante para entrada no inversor.

5.1.6 Cabos e dispositivos de proteção

Segundo a NBR 16690 (NBR-16690, 2019) de Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos, associada com a NBR 5410 (NBR-5410, 2005) de Instalações elétricas de baixa tensão, determina que o sistema fotovoltaico deve possuir dispositivos de proteção, para evitar surtos de tensão, corrente e demais surtos elétricos tanto para corrente contínua como para

corrente alternada. O inversor do sistema projetado possui proteção contra surto de corrente, tensão, corrente inversa e a chave seccionadora, que permite a interrupção com segurança do circuito. Logo para a corrente contínua vinda dos módulos fotovoltaicos, a “string box” ou caixa de distribuição não é necessária, mas para a corrente alternada que alimentará a residência e a rede elétrica, deverá possuir um disjuntor para impedir surtos de correntes e um DPS para surtos de tensão. Este circuito será ligado no barramento de entrada do quadro de distribuição onde chega à energia da concessionária ou poderá ser ligado diretamente no medidor elétrico da concessionária.

O inversor trabalha uma corrente nominal máxima de 5,5 A AC, assim o disjuntor de 6 A atenderá bem esse circuito assim com um DPS de 40 kA.

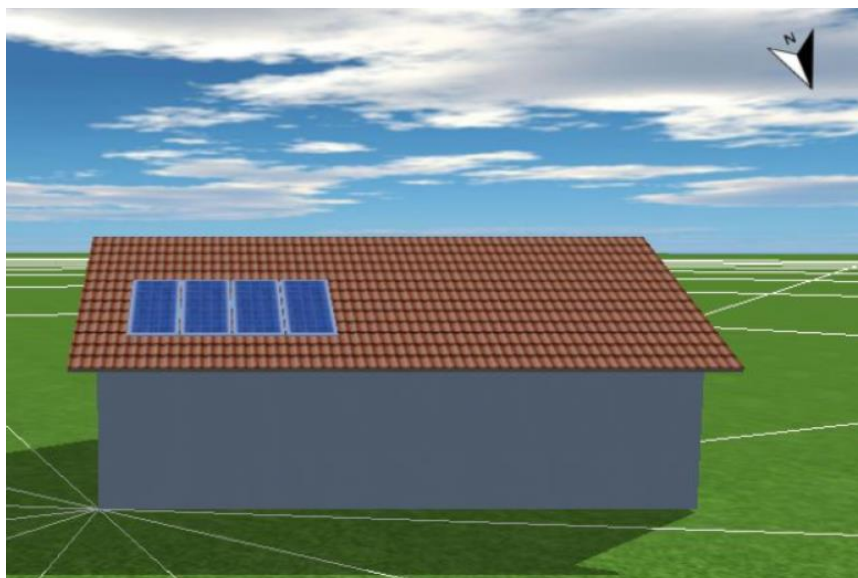
5.2 RESULTADOS E ANÁLISE DO RELÁTORIO

5.2.1 Modelagem 3D e diagrama simplificado

Por meio do PV Sol foi feita uma modelagem 3D do telhado com características próximas da residência:

- Inclinação de 30°
- Desvio azimutal de 23°
- Área de telhado de aproximadamente 60 m²
- Instalação dos módulos para norte e com ocupação de 8 m²

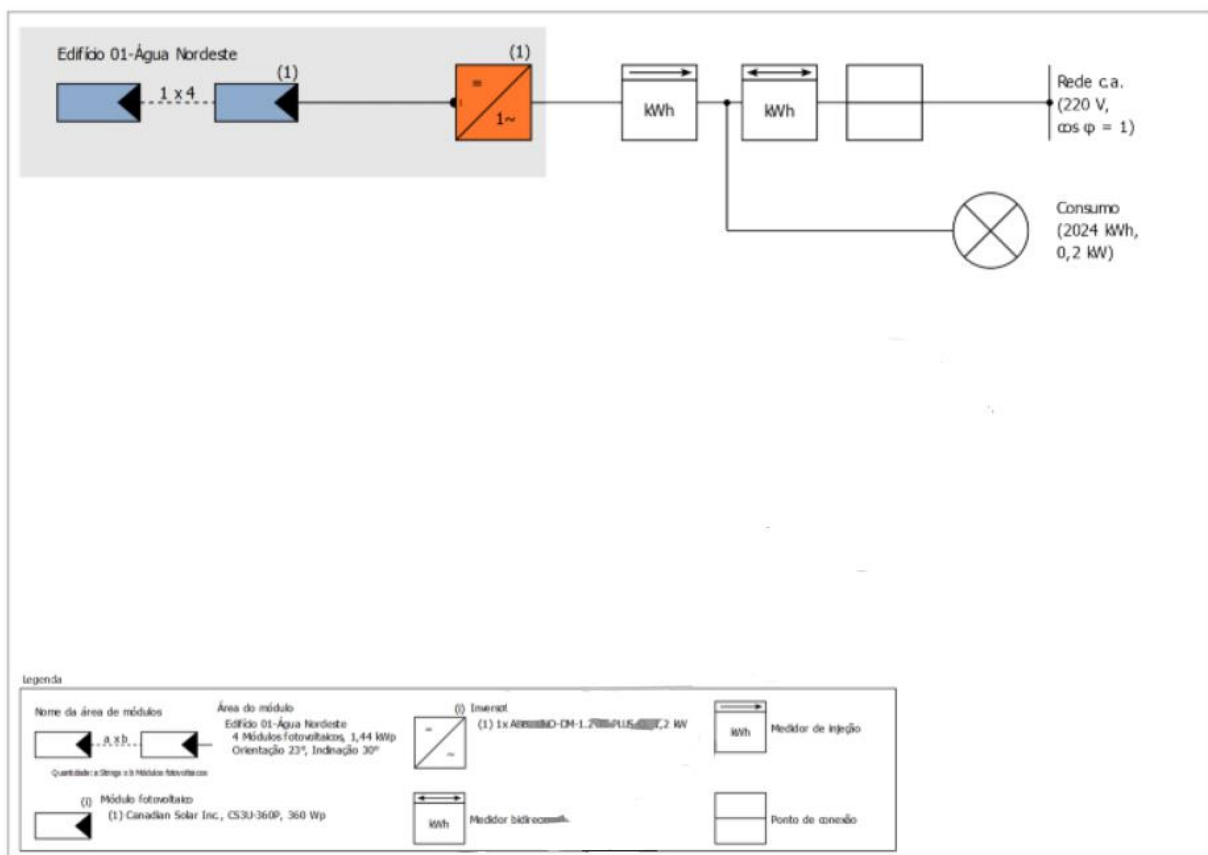
Figura 40 - Modelagem 3D do sistema fotovoltaico.



Fonte: PV Sol (2020).

O sistema dimensionado conta com 4 módulos CS3U-360P-AG da Canadian Solar, ligados diretamente ao inversor ABB UNO-DM-1. 2TL-PLUS, que será ligado ao quadro de distribuição da residência, diretamente ao barramento de alimentação, possuindo seus próprios dispositivos de proteção. O quadro de distribuição abastecerá a residência e estará conectado ao medidor da concessionária, sendo este medidor do modelo bidirecional ou dois medidores unidirecionais, um para registrar o consumo e outro o excedente. A configuração do projeto está representado pelo diagrama na figura 41.

Figura 41 - Diagrama do projeto.



Fonte: PV Sol (2020).

5.2.2 Balanço energético

A produção anual do sistema dimensionado foi detalhada pela figura 42, por meio dela é possível perceber que há grande diferença entre a energia irradiada e a energia convertida, pois o módulo selecionado no projeto possui eficiência de conversão de 18,16%.

Figura 42 - Relatório do balanço energético do sistema fotovoltaico.

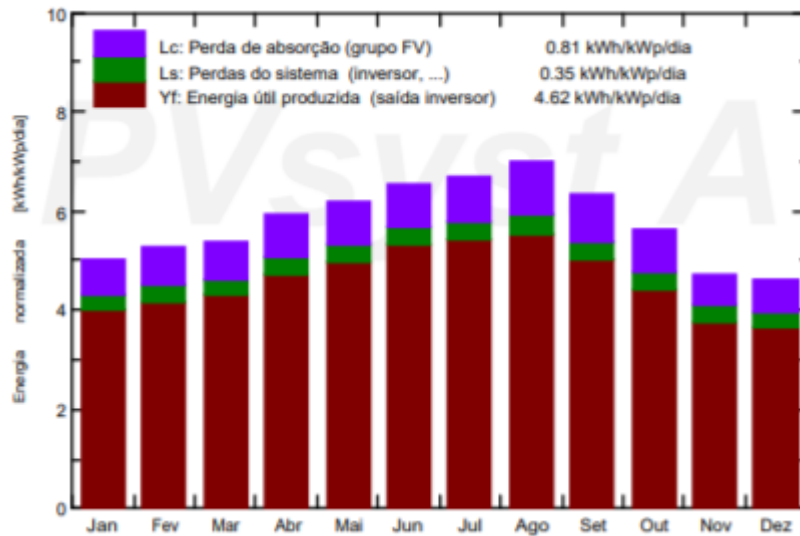
Irradiação global - horizontal	1946,25 kWh/m²	
Desvio em relação ao espectro padrão	-19,46 kWh/m ²	-1,00%
Reflexão do solo (albedo)	25,81 kWh/m ²	1,34%
Orientação e inclinação do plano dos módulos	45,21 kWh/m ²	2,32%
Sombreamento independente do módulo	0 kWh/m ²	0,00%
Reflexão na superfície de módulo	-16,51 kWh/m ²	-0,83%
Irradiação global no plano dos módulos	1981,3 kWh/m²	
	1.981,30 kWh/m ²	
	x 7,936 m ²	
	= kWh	
Irradiação global fotovoltaica	15723,59 kWh	
Sujeira	0 kWh	0,00%
Conversão de STC (eficiência nominal do módulo 18,16%)	-12.867,67 kWh	-81,84%
Energia fotovoltaica nominal	2855,92 kWh	
Sombra parcial, específica do módulo	0 kWh	0,00%
Comportamento sob baixa irradiação	-61,61 kWh	-2,16%
Desvio em relação a temperatura nominal do módulo	-190,29 kWh	-6,81%
Diodos	0 kWh	0,00%
Mismatch (indicações do fabricante)	-52,08 kWh	-2,00%
Mismatch (conexão/sombra)	0 kWh	0,00%
Cabo do string	-3,61 kWh	-0,14%
Energia fotovoltaica (c.c.) sem redução pelo inversor	2548,34 kWh	
Potência CC mínima não atingida	-0,47 kWh	-0,02%
Redução devido à faixa de tensão PMP	0 kWh	0,00%
Redução devido à corrente c.c. máx.	0 kWh	0,00%
Redução devido à potência c.c. máx.	0 kWh	0,00%
Redução devido à potência c.a. máx./cos phi	-21,14 kWh	-0,83%
Perda no seguidor PMP	-13,23 kWh	-0,52%
Energia fotovoltaica (c.c.)	2513,51 kWh	
Energia na entrada do inversor	2513,51 kWh	
Divergência entre tensão de entrada e tensão	-2,08 kWh	-0,08%
Conversão c.c./c.a.	-146,62 kWh	-5,84%
Consumo em espera (Inversor)	-6,27 kWh	-0,27%
Cabo c.a.	-0,35 kWh	-0,01%
Energia fotovoltaica (c.a.) menos consumo em esper	2358,18 kWh	
Energia do gerador fotovoltaico (rede c.a.)	2363,71 kWh	

Fonte: PV Sol (2020).

Em cima da eficiência dos módulos, há ainda a eficiência dos demais componentes do sistema que diminui mais a produção energética, apesar disso estes equipamentos estão ganhando cada vez mais eficiência, o que em breve irá se tornar uma grande fonte de geração. A figura 43 mostra a taxa constante de perdas que o sistema tem, essa taxa pode ser encontrada na folha de dados dos equipamentos. O rendimento total de todo o sistema (Figura

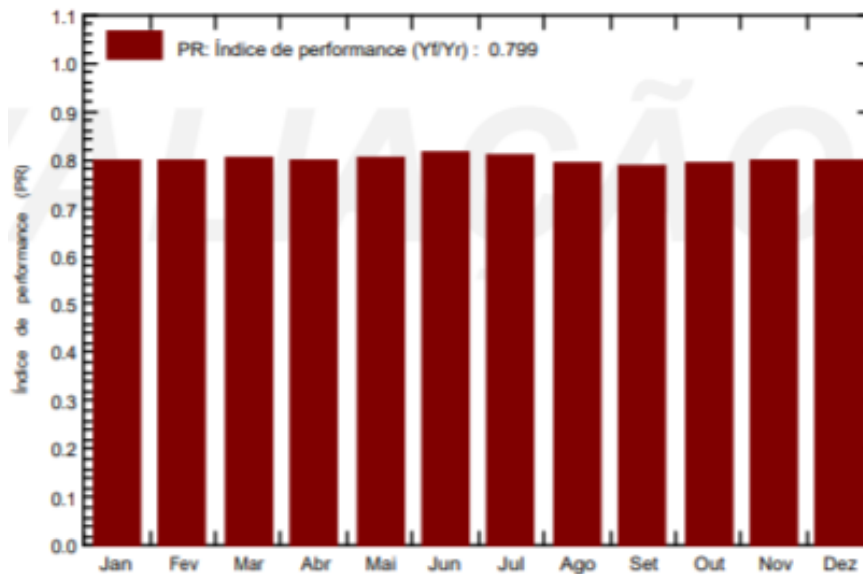
44) geralmente é nivelado por baixo, seja por 1 módulo com sombreamento, cabo com fugas ou inversor com defeito de fábrica. Geralmente o valor de rendimento global é encontrado pelo produto das eficiências de cada componente, assim é possível determinar se algum está apresentando defeito se não alcançar tal rendimento.

Figura 43 - Perdas normalizadas (por kWp instalado).



Fonte: PVsyst 2020.

Figura 44 - Índice de performance (PR).

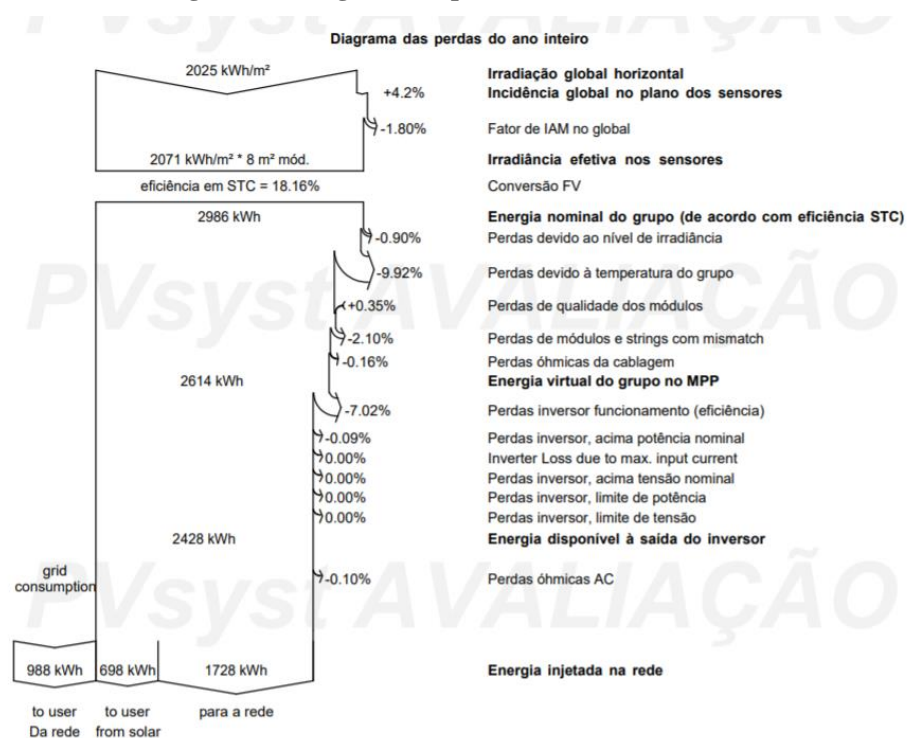


Fonte: PVsyst 2020.

5.2.3 Perdas do sistema

O sistema fotovoltaico conta com uma série de equipamento desde a captação até a utilização da energia. A quantidade de energia irradiada nos módulos será diferente da registrada pelo medidor após o circuito fotovoltaico, isso por que diversos fatores “atrapalham” a conversão e o transporte da energia. Conforme o diagrama da figura 45 é possível ver os diversos fatores que minam a produção de energia.

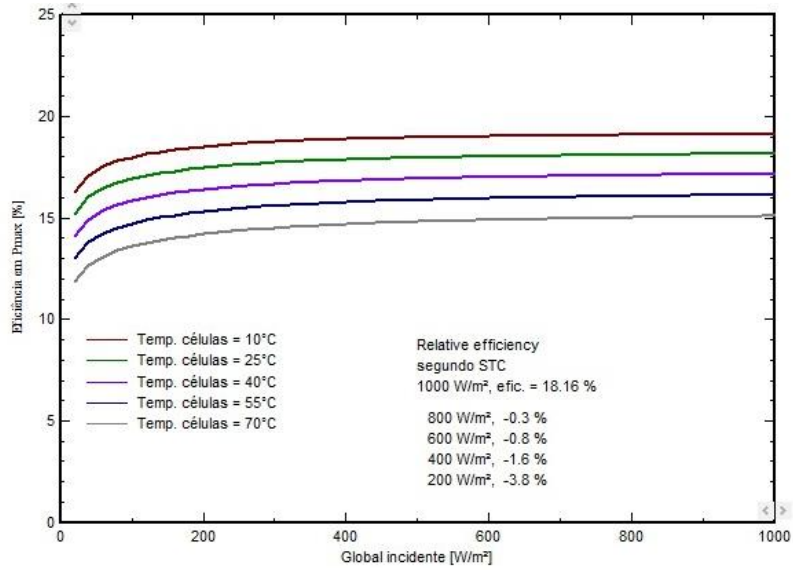
Figura 45 - Diagrama de perdas elétricas.



Fonte: PVsyst 2020.

A perda devido à temperatura é a maior dentre as perdas, isso se deve ao equipamentos que perdem eficiência quando operam a temperaturas altas. Mesmo os módulos fotovoltaicos projetados para terem contato direto com o sol, tem perdas significativas na casa dos 25% (Figura 46) a temperaturas na casa dos 70° C.

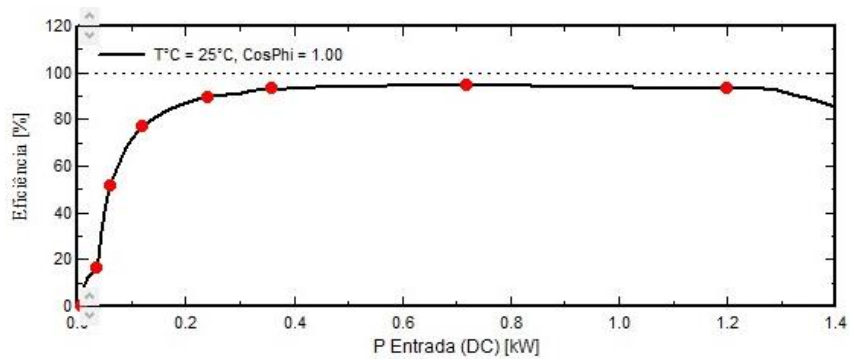
Figura 46 - Gráfico da Eficiência x Irradiância Global do Módulo.



Fonte: PVsyst 2020.

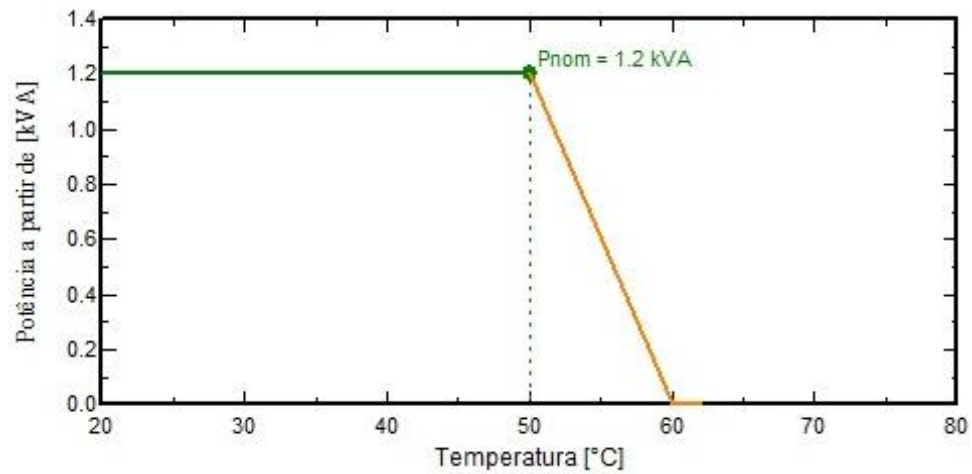
Os inversores de forma geral, além de sua própria eficiência de conversão de corrente (Figura 47), que perde e consome energia durante o processo, quando opera a temperaturas altas, podem simplesmente parar de funcionar, conforme a figura 48 retrata a temperatura a qual o inversor utilizado para de funcionar.

Figura 47 - Gráfico Eficiência x Potência de entrada do inversor



Fonte: PVsyst 2020.

Figura 48 - Gráfico Potência x Temperatura do inversor.



Fonte: PVsyst 2020.

5.2.4 Vida útil e Manutenção

A vida útil dos componentes do SFCR é relativamente alta, comercialmente os módulos fotovoltaicos possuem em torno de 10 anos de garantia contra problemas de fabricação e 25 anos de garantia para eficiência de captação, inversores possuem de 5 a 10 de garantia e os demais componentes quando de qualidade comprovada e certificado pelo INMETRO duram bastante tempo. Como os produtos tendem a durar além do tempo de garantia, esse sistema possui grande estimativa de vida útil o que garante a longo prazo retorno financeiro.

Para prolongar a vida útil é necessário a realização de manutenções periódicas no sistema. Os módulos necessitam de pouca manutenção além de ser bastante simples, basta a limpeza regular seja bimestral ou trimestral, necessitando apenas retirar a poeira e outros objetos que estiver sobre os módulos (Figura 49). Os demais componentes deverão ser acompanhados baseado na produtividade média do sistema, uma vez que são elétricos, como os cabos. A instalação de um recurso digital que permita acompanhar o funcionamento dos componentes do sistema, garante a identificação e a possibilidade de manutenção antes que ocorra danos irreversíveis e prejuízos financeiros.

Figura 49 - Limpeza do módulo fotovoltaico.



Fonte: (ASG SOLAR, Acesso em 2020).

5.3 VIABILIDADE FINANCEIRA

Este sistema composto por 4 módulos de 360W Policristalino da Canadian, 1 Inversor CC/CA Monofásico ABB, 20m de cabemento, dispositivos de proteção e kit de instalação para telhado de concreto, pode ser encontrado atualmente pelo seguintes valores (Quadro 7) :

Quadro 7 - Preço dos componentes

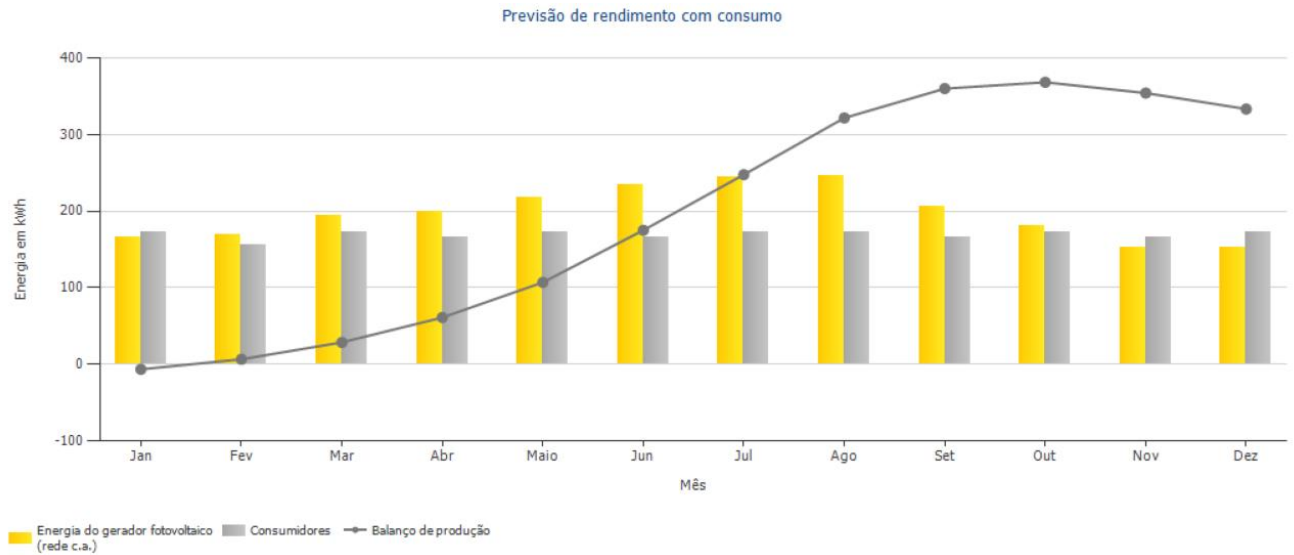
Componente	Quantidade	Loja	Preço (R\$)
INVERSOR 1,2 kWp ABB (UNO-DM-1.2-TL-PLUS-SB) Monofásico	1 und	VESA Energia Solar	1.910,40
Modulo SOLAR FOTOVOLTAICO CANADIAN 360W	4 und	Energy Shop	3.221,76
Condutor 4 mm ² Cobre	20 m	Mercado Livre	130,00
Protetor Surto Dps Clamper Anti Raio Vcl 275v 40ka	1 und	Mercado Livre	48,70
Disjuntor Steck 220V Bipolar 6A SD C6	1 und	Cetti Materiais elétricos	46,14

Kit Suporte 4 Painéis Solares Telha Cerâmica Cimento	1 und	Mercado Livre	489,00
SOMA			5896,00

Fonte: Próprios Autores (2020)

Desconsiderando o preço da mão de obra, o sistema fotovoltaico sairá por volta de R\$ 5896,00. Pela Figura 50, é possível perceber que o sistema fotovoltaico, produzirá durante o ano mais energia do que a residência consumirá, caso mantenha a média, logo esta unidade consumidora só pagará a concessionária a taxa mínima de 30 kWh.mês.

Figura 50 - Gráfico Consumo x Geração (kWh).



Fonte: PV Sol (2020)

Está residência paga mensalmente uma média de 192 kWh, com a instalação do sistema passará a pagar somente 30 kWh, economizando 162 kWh por mês que a um valor unitário de R\$ 0,812060 segundo a tarifa da concessionaria, deixará de pagar mensalmente R\$ 131,55. A razão dessa economia pelo custo do sistema resultará em 44,82 meses, aproximadamente 3 anos e 9 meses, logo em menos de 4 anos esse sistema se paga.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o crescimento exponencial da tecnologia de captação de energia solar no mundo, a busca por fontes limpas e sustentáveis e a demanda por profissionais na área, o conhecimento dos sistemas é fundamental para quando tornar-se usualmente comum.

O dimensionamento do sistema fotovoltaico associado ao conhecimento dos sistemas de captação solar, permitiu um melhor esclarecimento acerca do mercado já estabelecido no mundo, mas que chegou recentemente no Brasil. Devido a isso é importante o conhecimento, uma vez que a quantidade de estudos, análises e a localização das tecnologias desenvolvidas em outros locais se adequem aqui.

Por meio do banco de dados dos *softwares* foi possível realizar um dimensionamento do sistema mais próximo do real funcionamento, alimentando o com dados específicos para o local do estudo de caso, fornecidos pelo atlas de energia solar brasileiro, CRESCER, INMETRO e INPE, seguindo ainda as normas brasileiras e internacionais, resoluções governamentais e recomendações dos fabricantes para seleção dos componentes de forma que funcionem bem e por muito tempo.

Com o resultado obtido no dimensionamento, é possível perceber que apesar do alto custo inicial de R\$ 5896,00, é bem vantajoso a instalação de um sistema de geração, pois o sistema se pagará em aproximadamente 45 meses, caso o consumo se mantenha na média, enquanto seus equipamentos tem garantias que variam de 120 a 300 meses, podendo se pagar várias vezes e permitindo a atualização por equipamentos mais eficientes, gerando menos dano ao ambiente e reduzindo a sobrecarga da rede de abastecimento. Estes fatores ainda incentivam a organizações bancárias ou revendedoras, a fornecer financiamentos para o sistema.

Alguns fatores ficaram ausentes nesse estudo, como o detalhamento da rede de financiamento fornecidas pelas empresas e bancos, avaliação estrutural da edificação e a interação do sistema fotovoltaico com um sistema de aquecimento de água. Estes fatores necessitariam de uma aprofundada e detalhada análise, o que não seria o foco deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. INFOGRÁFICO ABSOLAR. **ABSOLAR**, 2020. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar.html>>.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2008.

ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482**. [S.l.]. 2012.

ASG SOLAR. Porque devemos limpar os painéis solares. **ASG Tecnologia da Informação**, Acesso em 2020. Disponível em: <<https://www.asg.com.br/single-post/porque-devemos-limpar-os-pain%C3%A9is-solares>>.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, Tempo e Clima**. São Paulo: Bookman, 2013.
COPETTI, J. B.; MACAGNAN, M. H. **BATERIAS EM SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS**. Conversão fotovoltaica da energia solar. Fortaleza: ABENS. 2007. p. 10.

DMESG. Baterias automotivas vs. estacionárias em nobreaks. **Dmesg**, Acesso em 2020. Disponível em: <<https://www.dmesg.com.br/uso-de-baterias-automotivas-vs-estacionarias-em-no-breaks/>>.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. New York: John Willey & Sons, 1991.

EKOS BRASIL E VITAE CIVILIS. **Introdução ao Sistema de Aquecimento Solar**. São Paulo: [s.n.], 2010.

EKOS E VITAE. **Introdução ao Sistema de Aquecimento Solar**. São Paulo: [s.n.], 2010.
ELETROBRAS/PROCEL. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso**. Classe Residencial. 2005.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2020**. Rio de Janeiro. 2020.

ESTANQUEIRO, A. **Fórum Energias Renováveis em Portugal: Uma Contribuição para os Objectivos de Política Energética e Ambiental**. Lisboa: ADENE, 2002.

FINOTTI, A. R. et al. **Monitoramento de recursos hídricos em áreas urbanas**. Caixias do Sul: EDUCS, 2009.

FULL GAUGE CONTROLS. **Catálogo de produtos**. Canoas. 2020.

GREENPRO. **Energia Solar Térmica: manual sobre tecnologias, projeto e instalação**. Comissão Europeia: [s.n.], 2004.

GREGORY, S. A.; ZEILIK, M. **Introductory Astronomy and Astrophysics**. 4ª Edição. ed. Boston: Cengage Learning, 1997.

GROUP, P. M. PAINÉIS SOLARES POLICRISTALINOS VS MONOCRISTALINOS. **solarquotes**, Acesso em 2020. Disponível em: <<https://www.solarquotes.com.au/panels/photovoltaic/monocrystalline-vs-polycrystalline/>>.

HECKTHEUER, A. **Análise de associações de módulos fotovoltaicos**. Tese de Doutorado (UFRGS). Porto Alegre, p. 138. 2001.

HORVATH, J. E. **ABCD da Astronomia e Astrofísica**. [S.l.]: Livraria da Física, 2008.

IEC, C. E. I.-. **IEC 61215 - Módulos fotovoltaicos terrestres (PV)**. [S.l.]. 2016.

INMETRO. Etiqueta de eficiência energética. **Programa Brasileiro de Etiquetagem**, 2020. Disponível em: <https://www2.inmetro.gov.br/pbe/a_etiqueta.php>.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. **Solar Heat Worldwide – Global market data and trends**. [S.l.]. 2020.

LIZ, G. M. Estudo Teórico de um Dispositivo de Captação de Energia das Ondas. **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**, 2017. 12.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of photovoltaic science and engineering**. Chichester: John Wiley & Sons, 2002.

NASCIMENTO, C. A. **Principio de funcionamento da célula fotovoltaica**. Monografia de Especialização (UFL). Lavras, p. 21. 2004.

NBR-16690. **Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos — Requisitos de projeto**. [S.l.]. 2019.

NBR-5410. **Instalações elétricas de baixa tensão**. [S.l.]. 2005.

OPENSTAX. **Biology**. OpenStax College. Houston, p. 231 a 234. 2015.

OVELHA, R. M. **Projeto, Dimensionamento e Instalação de Solução Fotovoltaica**. Dissertação de Mestrado (ULisboa). Lisboa, p. 102. 2017.

PEREIRA, E. B. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2017.

PEREIRA, E. M. E. A. **Curso de Capacitação em aquecimento solar**. Belo Horizonte: Projeto SolBrasil, 2020.

PV MAGAZINE. Hot spots: Causes and effects. **PV MAGAZINE**, 22 agosto 2017. Disponível em: <<https://pv-magazine-usa.com/2017/08/22/hot-spots-causes-and-effects/>>.

SALGADO, J. M. F. **Guía Completa De La Energía Solar Térmica y**. [S.l.]: A. Madrid Vicente, 2008.

SENAI B. **Sistemas fotovoltaicos - Instalador e Projetista**. [S.l.]: [s.n.], 2020b.

SENAI A. **Sistemas fotovoltaicos - Montador**. [S.l.]: [s.n.], 2020.

SI. **Sistema Internacional de Medidas**. Duque de Caxias: INMETRO/CICMAN/SEPIN, 2012.

SOUZA, P. T. **Energia Solar Térmica: Perspectvas do Presente e do Futuro**. Universidade do Porto. Porto. 2010.

SUSTENTARQUI. Brasil “come” etapas e produz células solares orgânicas. **sustentarqui**, 02 jul. 2014. Disponível em: <<https://sustentarqui.com.br/brasil-come-etapas-e-produz-celulas-solares-organicas/>>.

VIANA, T. S. POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM. **Tese de Doutorado - UFSC**, 09 abr. 2010.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica: Sistemas Isolados e Conectados à rede**. São Paulo: Érica, 2012.

ZILLES, R. et al. **Sistemas Fotovoltaicos conectados a rede elétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.