

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**LUCIANA TESSARO NIADA DE OLIVEIRA
LUCAS SOUZA DE OLIVEIRA**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE TELHA CIGS E MÓDULO FOTOVOLTAICO DE
SILÍCIO MONOCRISTALINO EM MESMA APLICAÇÃO**

CURITIBA

2022

**LUCIANA TESSARO NIADA DE OLIVEIRA
LUCAS SOUZA DE OLIVEIRA**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE TELHA CIGS E MÓDULO FOTOVOLTAICO DE
SILÍCIO MONOCRISTALINO EM MESMA APLICAÇÃO**

**COMPARATIVE BETWEEN CIGS TILE AND MONOCRYSTALLIN
PHOTOVOLTAIC MODULES IN THE SAME APLICATION**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Dr. Gerson Máximo Tiepolo

CURITIBA

2022



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

LUCIANA TESSARO NIADA DE OLIVEIRA

LUCAS SOUZA DE OLIVEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE TELHA CIGS E MÓDULO FOTOVOLTAICO DE
SILÍCIO MONOCRISTALINO EM MESMA APLICAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Dr. Gerson Máximo Tiepolo.

Data de aprovação: 02 de Agosto de 2022

Gerson Máximo Tiepolo
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Jair Urbanetz Junior
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Jorge Assade Leludak
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2022

Dedicamos esse trabalho a nossos familiares e amigos pelo auxílio e apoio nos momentos que precisamos, e a nossos professores por todo conhecimento compartilhado.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de nossa vida. Portanto, desde já pedimos desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do nosso pensamento e de nossa gratidão.

Ao nosso orientador Prof. Dr. Gerson Máximo Tiepolo, pela sabedoria com que nos guiou nesta trajetória.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

A empresa L8 Energy, que nos disponibilizou seu sistema para estudo.

Gostaríamos de deixar registrado também, o nosso reconhecimento à nossa família, pois acreditamos que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio. E aos amigos que estiveram conosco nessa caminhada, tornando o período mais leve e descontraído.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

Eu denomino meu campo de Gestão do Conhecimento, mas você não pode gerenciar conhecimento. Ninguém pode. O que você pode fazer, o que a empresa pode fazer é gerenciar o ambiente que otimize o conhecimento.
(DAVENPORT; PRUSAK, 2012).

RESUMO

Devido as questões ambientais e inevitável diminuição de oferta natural das fontes de energias não renováveis, tem despertado um aumento no interesse pela utilização de fontes alternativas de energias cada vez mais sustentáveis e harmônicas com o meio ambiente. Como opção para a solução de parte desse problema, a energia solar busca equilibrar geração elétrica, fonte inesgotável, sustentabilidade e descentralização. Entretanto, há pontos negativos a serem trabalhados para que essa tecnologia seja ainda mais difundida. Para contornar o desafio da construção civil de aliar aspectos funcionais, estéticos, sustentáveis e eficientes energeticamente, foram desenvolvidas telhas fotovoltaicas responsáveis pela geração elétrica através da luz solar, integradas a edificação. Neste contexto, realizou-se um estudo comparativo entre o desempenho de telhas fotovoltaicas de CIGS (Cobre - Índio - Gálio - Selênio) e módulo fotovoltaico de silício monocristalino, com instalações de seus carports situadas na empresa L8 Energy, em São José dos Pinhais, Paraná. Os resultados indicaram que, apesar das telhas fotovoltaicas apresentarem um melhor desempenho de produção de energia, sua relação de custo por kW produzido é maior comparado ao módulo fotovoltaico estudado, possuindo uma desvantagem econômica.

Essa pesquisa busca contribuir para o estudo das tecnologias fotovoltaicas como alternativa sustentável para geração de energia limpa e renovável, diversificando a matriz energética brasileira.

Palavras-chave: Telha Solar; Energia Solar Fotovoltaica; Sistema Fotovoltaico; Geração Distribuída.

ABSTRACT

Due to the environmental consequences and the inevitable decrease in the natural supply of non-renewable energy sources, there has been an increase in interest in the use of alternative energy sources that are increasingly sustainable and harmonic with the environment. As an option to solve part of this problem solar energy seeks to balance electric generation, inexhaustible source, sustainability and decentralization. However, there are negative points to be worked on for this technology to be even more widespread. To overcome the challenge of civil construction to combine functional, aesthetic, sustainable and energy efficient aspects, photovoltaic tiles were developed responsible for generating electricity through sunlight, integrated into the building. In this context, a comparative study was carried out between the performance of CIGS (Copper - Indium - Gallium - Selenide) photovoltaic tiles and monocrystalline silicon photovoltaic module, with installations of their carports located at the company L8 Energy, in São José dos Pinhais, Paraná. The results indicated that although the photovoltaic tiles present a better performance in energy production, their cost per KW produced is higher compared to the photovoltaic module studied, having an economic disadvantage.

This research seeks to contribute to the emancipation and consolidation of photovoltaic technologies as a sustainable alternative for the generation of clean and renewable energy, diversifying the Brazilian energy matrix

Keywords: Solar Tile; Photovoltaic Solar Energy; Photovoltaic System; Distributed Generation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Irradiação média anual no Brasil e na Europa.....	15
Figura 2 - Cronologia do desenvolvimento das células fotovoltaicas	21
Figura 3 - Percentual de instalações fotovoltaicas por classe de consumo	23
Figura 4 - Mapa da irradiação global horizontal em médias mensais.....	25
Figura 5 - Mapa de irradiação global horizontal média diária mensal no Paraná	26
Figura 6 - Sistemas fotovoltaicos.....	27
Figura 7 - Sistema fotovoltaico conectado à rede.....	29
Figura 8 - Esquemático sistema off-grid.....	30
Figura 9 - Estrutura de uma célula fotovoltaica	31
Figura 10 - Cristal de silício dopado em fósforo	31
Figura 11 - Efeito Fotovoltaico	32
Figura 12 - Gráfico de eficiência de célula fotovoltaica	33
Figura 13 - Inversor Fronius Primo 8.2-1	34
Figura 14 - Célula, Módulo e Arranjo Fotovoltaico.....	35
Figura 15 - Ligação em série de células fotovoltaicas	36
Figura 16 - Ligação em paralelo de células fotovoltaicas.....	36
Figura 17 - Curva característica de um painel fotovoltaico	37
Figura 18 - Módulo Monocristalino Amerisolar	37
Figura 19 - Módulo Policristalino Amerisolar	38
Figura 20 - Módulo Filme Fino com Tecnologia CIGS	39
Figura 21 - Instalação das estruturas de carport L8 Energy	44
Figura 22 - Instalação de inversores e stringboxes	45
Figura 23 - Dimensões do CARPORT	46
Figura 24 - Representação de conexão CC do sistema de módulos fotovoltaicos	46
Figura 25 - Representação de conexão CC do sistema de telhas fotovoltaicas	47
Figura 26 - Gráfico de geração da Telha e do Módulo	56
Figura 27 - Gráfico da energia de geração calculada da Telha e do Módulo.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características elétricas do módulo	48
Tabela 2 - Características elétricas da telha.....	48
Tabela 3 - Características elétricas inversor ABB UNO-DM-3.3-TL-PLUS-SB....	49
Tabela 4 - Características elétricas inversor ABB UNO-DM-5.0-TL-PLUS-SB....	50
Tabela 5 - Irradiação horizontal e inclinada da instalação	51
Tabela 6 - Performance Ratio mensais	53
Tabela 7 - Dias do mês dos sistemas funcionando.....	54
Tabela 8 - Fator de Capacidade.....	54
Tabela 9 - Geração de energia segundo dados do inversor.....	55
Tabela 10 - Geração de energia calculada para Telhas e Módulos	57
Tabela 11 - Produtividade dos sistemas com telhas e com módulos.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABENS	Associação Brasileira de Energia Solar
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CRESESB	Centro de Referências para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
CTA	Centro Tecnológico de Aeronáutica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GDFV	Geração Distribuída Fotovoltaica
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INT	Instituto Nacional de Tecnologia
NREL	Laboratório Nacional de Energias Renováveis
NCPV	Centro Nacional para Fotovoltaica
MPPT	Ponto Rastreador de Máxima Potência
REN	Resolução Normativa ANEEL

LISTA DE SÍMBOLOS

GW	Gigawatt
R\$	Reais
TW	Terawatt
W/m ²	Watt por metro quadrado
µm	Micrómetro
°C	Graus Celcius
Kw	Quilowatt
MW	Megawatt
W	Watt
kWh	Quilowatt-hora
kWp	Quilowatt-pico
R\$/kW	Reais por quilowatt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Tema	14
1.2	Delimitação do tema	16
1.1	Problemas e premissas	16
1.1	Objetivos	17
1.4.1	Objetivo geral	17
1.4.2	Objetivo específico	17
1.5	Justificativa	18
1.6	Metodologia	18
1.7	Estrutura	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Breve história da energia solar	20
2.1.1	Sistemas fotovoltaicos no Brasil	22
2.1.2	Radiação solar.....	24
2.1.3	Radiação solar no Paraná	25
2.2	Sistemas fotovoltaicos	26
2.2.1	Sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição.....	27
2.2.2	Sistemas fotovoltaicos off-grid	29
2.2.3	Efeito fotovoltaico	30
2.2.4	Inversores.....	33
2.2.5	Módulos fotovoltaicos	34
2.3	Tecnologias fotovoltaicas	37
2.3.1	Silício monocristalino	37
2.3.2	Silício policristalino.....	38
2.3.3	Tecnologia CIGS	39
2.3.4	Telureto de Cádmio	40
2.4	Telhas solares	40
3	METODOLOGIA	43
3.1	Instalação analisada	44
3.2	Orientação e inclinação	45
3.3	Arranjos e conexões dos sistemas	46
3.4	Características elétricas dos equipamentos utilizados	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51

4.1	Dados de irradiação no plano horizontal e plano inclinado	51
4.2	Índices de mérito	52
4.3	Geração fotovoltaica obtida pelo monitoramento online do sistema..	55
4.4	Determinação do potencial de geração fotovoltaica	56
4.5	Comparação da geração esperada pela real.....	58
4.6	Análise financeira	59
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema

A energia elétrica é um insumo de grande relevância para o desenvolvimento social e econômico de uma nação, e proporcional a esse desenvolvimento está a sua produção industrial e o poder de consumo da população (BANCO MUNDIAL, 2016). Conseqüentemente, a demanda por maior produção, confiabilidade e melhores preços de energia elétrica crescem, aumentando significativamente o setor elétrico mundial, que busca constantemente fontes sustentáveis para geração de energia elétrica (SILVA R. C., 2017).

A geração de energia elétrica está cada vez mais atrelada à preservação do meio ambiente, e fontes limpas e renováveis aparecem com frequência em discussões sobre o desenvolvimento sustentável. Vários fatores contribuem para a ascensão das fontes renováveis, como o aumento no preço internacional dos barris de petróleo, os gastos com projetos de exploração do pré-sal, os problemas ambientais causados pelo alagamento de áreas extensas em hidrelétricas, o aquecimento global, a diminuição no preço de instalação de sistemas fotovoltaicos etc (LEITE, 2013).

Comparada à matriz elétrica do restante do mundo, o Brasil tem lugar de destaque na utilização de fontes renováveis. Segundo o Balanço Energético Nacional (EPE, 2021) as fontes renováveis são responsáveis por 84,2% da demanda de eletricidade no Brasil. Porém, de acordo com as projeções de Demanda de Energia Elétrica 2014-2024 (MME/EPE, 2015), estima-se um aumento no consumo de energia elétrica no Brasil em cerca de 50% durante os períodos de 2014 a 2024. Dado esse cenário, um incentivo no aumento da geração e diversificação da matriz elétrica brasileira se torna necessária, correlacionando eficiência com sustentabilidade.

A Terra pode ser vista como um grande reservatório de energia, e suas fontes, pelo menos em maioria, é proveniente do sol. Tal potencial energético ainda não aproveitado se tornou um dos objetivos de estudo prioritários no ramo da energia elétrica, ganhando espaço na busca por alternativas de geração menos agressivas ao meio ambiente, sendo uma fonte renovável, não poluente e descentralizada (PALZ, 2002).

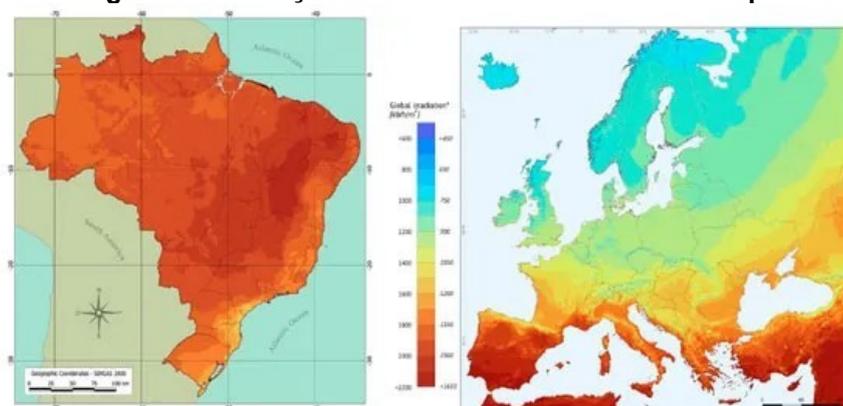
A fonte solar é altamente abundante, desde que se tem conhecimento da vida em si, mas nunca foi aproveitada de forma eficiente, comparado às outras formas de energia. Muito mais que uma fonte de vida, o Sol é considerado também como a

solução para o abastecimento de energia no futuro, de forma que a humanidade consiga desenvolver de maneira racional a luz que tal estrela lança sobre a Terra constantemente (PALZ, 2002). A quantidade de energia solar que atinge a superfície da Terra corresponde, aproximadamente, a dez mil vezes a demanda global de energia. Logo é necessário utilizar apenas 0,01% dessa energia para satisfazer a demanda total da humanidade (BARROS, 2011).

Além das condições atmosféricas locais (nebulosidade, umidade relativa do ar etc.), a disponibilidade de radiação solar, também denominada de energia total incidente sobre a superfície terrestre, depende da latitude local e da posição no tempo (hora do dia e dia do ano). Isso deve-se à inclinação do eixo imaginário que a Terra descreve ao redor do Sol (translação). Desse modo, a duração solar do dia - período de visibilidade do Sol ou de claridade - varia, em algumas regiões e períodos do ano (ANEEL, 2019).

Geologicamente, o Brasil está situado em uma região onde os raios solares infligem no sentido vertical. Essa condição faz com que haja elevados índices de irradiação em quase todo o território nacional. Há também a proximidade com a linha do Equador, que faz com que se tenha pouca variação na incidência solar ao longo do ano. Sendo assim, há bons níveis de irradiação mesmo no inverno, provando que o Brasil possui vantagens para o aproveitamento energético solar, conforme a Figura 1 (TOLMASQUIM, 2016).

Figura 1 - Irradiação média anual no Brasil e na Europa



Fonte: INPE (2016)

1.2 Delimitação do tema

A energia solar pode ser aproveitada de duas formas: Como energia fototérmica e como energia fotovoltaica. A primeira consiste na captação da irradiação solar com o objetivo de convertê-lo diretamente em calor, de forma natural. A segunda, capta e converte diretamente a luz solar em energia elétrica através de células fotovoltaicas, produzindo diferença de potencial e, assim, corrente elétrica. Uma vez gerada, a corrente pode ser armazenada em baterias, consumida instantaneamente ou ainda disponibilizada na rede elétrica de forma descentralizada ou distribuída (VILLALVA & GAZOLI, 2012).

As telhas foram pensadas e estudadas para que a sua forma atendessem todas as necessidades de um telhado sem danificar o empreendimento, através de anatomia, resistência, inclinação, material e forma de instalação. Para as telhas solares é preciso manter todos esses benefícios que a telha convencional fornece, com a adição de uma célula fotovoltaica capaz de gerar energia e ainda cobrir um telhado (NORTON, 2011).

A telha solar surgiu principalmente a fim de atender as necessidades arquitetônicas, que propõe construções visivelmente agradáveis. Os módulos fotovoltaicos, por serem sobrepostos ao telhado, muitas vezes causam desagredo, já que nem sempre é integrado à edificação, atrapalhando todo o design de arquitetos. Para amenizar este problema, foi pensada a junção do módulo fotovoltaico com as telhas, a fim de que a produção de energia limpa não atrapalhasse a estética (NORTON, 2011).

A presente pesquisa focou na análise comparativa do desempenho de telhas fotovoltaicas de CIGS com módulos de silício monocristalino.

1.3 Problemas e premissas

Segundo o Estudo Estratégico: Mercado Fotovoltaico de Geração Distribuída, feito pela GREENER, no primeiro semestre de 2021 o Brasil atingiu 532 mil unidades consumidoras com GDFV (Geração Distribuída Fotovoltaica), sendo a classe residencial destaque no volume de instalação, responsável por 50% das instalações no 1º semestre de 2021

Esse resultado pode ser um reflexo da nova bandeira tarifária criada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) chamada de “bandeira tarifária escassez

hídrica” que vigorou até abril de 2022, que aumentou o valor de cada 100 kW/h consumidos para R\$ 14,20, desconsiderando impostos (ANEEL,2019).

Com o aumento do preço na energia elétrica do Brasil, e conseqüentemente o aumento pela busca de energia solar, o mercado está aquecido, e para suprir o mercado a indústria está buscando por novas tecnologias e formas de incorporar a energia solar no mercado, e torná-la mais próxima do dia-a-dia das pessoas. Através disso, uma das tecnologias desenvolvidas são as telhas solares, que formam a integração de telhas convencionais à diferentes tecnologias fotovoltaicas (VIAN, TAHAN, AGUILAR, GOUVEA, & GEMIGNANI, 2021).

1.4 Objetivos

Na sequência serão apresentados o objetivo geral e específicos que direcionam esse trabalho.

1.4.1 Objetivo geral

Comparar o desempenho de telhas fotovoltaicas de CIGS com um painel de módulos fotovoltaicos de silício monocristalino.

1.4.2 Objetivo específico

- a) Revisão bibliográfica ampla do tema;
- b) Simular parâmetro de teste ideal;
- c) Coletar e analisar dados de produção da energia diária para sistemas com telhas fotovoltaicas e painéis fotovoltaicos;
- d) Consultar dados de irradiação da cidade de São José dos Pinhais;
- e) Registrar e descrever método de comparação da geração com a irradiação analisada;
- f) Calcular e analisar os dados de desempenho;
- g) Comparação dos dados dos sistemas com telhas fotovoltaicas e painéis fotovoltaicos analisados;
- h) Verificação dos resultados analisados;
- i) Conclusão dos resultados.

1.5 Justificativa

Um dos grandes desafios sociais modernos relacionada a energia, refere-se à diversificação da sua matriz geradora. O aumento do consumo de fontes esgotáveis como petróleo, carvão e gás natural, evidencia a preocupação mundial com relação a sua dependência energética, tanto por parte econômica quanto de sustentabilidade com o meio ambiente devido as emissões de gases de efeito estufa, que contribuem para o aquecimento global e mudanças climáticas (AL GORE JUNIOR, 2006).

A energia gerada pelo sol é inesgotável e por isso não pode ser dispensada pelo uso na Terra, com isso o estudo para tal tecnologia vem se desenvolvendo e ganhando espaço. Uma grande vantagem destacada é que esse tipo de geração pode ser aplicado a espaços urbanos por não emitir gases poluentes ou ruídos sonoros, tendo o mínimo impacto ambiental dentre os métodos geradores de energia que tem-se disponível hoje em dia (PINHO & GALDINO, 2014).

As tecnologias mais recentes do âmbito da geração de energia solar apontam para o desenvolvimento de telhas fotovoltaicas. Esse produto propõe a substituição de pesados e espaçosos módulos fotovoltaicos, aprimorando o aspecto estético de uma edificação e unindo, a ele, uma geração de energia elétrica eficiente. Contudo, há uma carência de padronização técnica da eficiência energética de telhas fotovoltaicas presentes no mercado, dificultando uma análise mercadológica de aplicação prática e econômica dessa tecnologia (ECOD, 2014).

1.6 Metodologia

Primeiramente foi desenvolvido a revisão bibliográfica, onde foi levantado embasamento teórico sobre os sistemas fotovoltaicos, as tecnologias de células solares, e as telhas solares, através de livros, estudos científicos, estudos de mercado, entre outros meios, para que possam explicar o assunto abordado no estudo.

O próximo passo foi a definição do modelo de telha, módulo e inversores, e em seguida foi o levantamento dos dados, como a estação solarimétrica utilizada. Foram realizadas simulações por meio de softwares e cálculos, que determinam a geração ideal para os sistemas com telha fotovoltaica e painel fotovoltaico. Junto a isso foram necessárias observações de geração do sistema, que foi realizada por monitoramento disponível na plataforma Aurora Vision, e acompanhamento e

registros do clima durante o período amostral, além da análise da influência de alguns fatores externos que possam influenciar o desempenho da telha e do módulo, como a sujidade, conexões mal feitas e até sombreamento.

Por último, foram feitas análises e o tratamento dos dados obtidos, para concluir o estudo de desempenho entre o sistema com telha fotovoltaica de CIGS e o sistema de módulo fotovoltaico de silício monocristalino, tendo, portanto, uma conclusão de qual tecnologia teria uma melhor aplicação atualmente.

1.7 Estrutura

O presente trabalho terá a seguinte estrutura:

Capítulo 1 – Introdução, apresenta o tema que será abordado, o problema proposto, a delimitação do tema ao qual será abordado, os objetivos gerais e específicos e a metodologia utilizada.

Capítulo 2 – Referencial teórico, responsável por todo embasamento científico das tecnologias apresentadas, assim como sistemas e variáveis consideradas.

Capítulo 3 – Metodologia, apresenta o sistema analisado a coleta de dados.

Capítulo 4 - Resultados e discussões, apresenta os resultados propostos na metodologia, através de pesquisas e testes e/ou simulações que poderem ser realizados.

Capítulo 5 – Conclusão, apresenta a resposta sucinta da problematização que foi levantada no Capítulo 1 deste estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica inicia com um breve histórico da energia solar e da irradiação no Brasil e no Paraná, em seguida trata-se da energia fotovoltaica ongrid e offgrid assim como dos módulos e inversores, para, por fim, tratar das diferentes tecnologias fotovoltaicas e então abordar as telhas solares.

2.1 Breve história da energia solar

A primeira observação do efeito fotovoltaico ocorreu em 1839 por Henri Becquerel, mas devido à falta de descobertas tecnológicas da época, não puderam ir muito adiante com as pesquisas. Foi só em 1954 que Darryl Chapin conseguiu avançar as pesquisas e obter células fotovoltaicas de silício com eficiência de 6%, que rapidamente avançou para 10%, os cálculos mostravam que a eficiência poderia chegar em até 23%. Porém, ainda eram aplicadas apenas em projetos espaciais devido ao alto custo (GOETZBERGER & HOFFMANN, 2005).

Em 1973, pesquisadores da Exxon anunciaram o desenvolvimento de células fotovoltaicas feitas de silício rejeitado e não com silício puro como eram produzidas até então. O novo método de fabricação tornou então o preço atrativo, permitindo que ele entrasse no mercado terrestre novamente, mas com aplicações voltadas à sistemas isolados da rede elétrica (JOFRA, 2008).

Mas pesquisas realizadas na época apontavam a necessidade de reduzir esse custo em até 100 vezes, para que pudesse entrar no mercado comercial e doméstico. Segundo pesquisa realizada em 2003 o preço foi reduzido e o silício policristalino foi o principal responsável, sendo o silício monocristalino o segundo nessa linha de redução (JHA, 2009). Em 2003, a Ásia ainda não era o maior fabricante e nem ficava entre os 10 maiores do mundo, mas em 2009 a China se tornou a líder em fabricação de módulos fotovoltaicos, e permanece até hoje (PINHO & GALDINO, 2014).

A maior fonte de energia ainda são as fontes não renováveis, que se dão por meio de combustíveis fósseis e nucleares. E apesar de ser a maioria, comparados à nível mundial, a fonte de energias renováveis no Brasil é a mais alta do mundo, chegando a 48,3%. Nesses 48,3% de energias renováveis presentes no Brasil, apenas 1,47% são representados pela energia solar fotovoltaica (EPE, 2021).

A Figura 2 ilustra os principais acontecimentos para a história da energia solar.

Figura 2 - Representação dos eventos chaves no desenvolvimento das células fotovoltaicas



Fonte: Pinho e Galdino (2014)

2.1.1 Sistemas fotovoltaicos no Brasil

No Brasil, o desenvolvimento de módulos fotovoltaicos teve início apenas em 1958, com o primeiro Simpósio Brasileiro de Energia Solar realizado por pesquisadores do Instituto Nacional de Tecnologia (INT) e Centro Tecnológico de Aeronáutica (CTA). Na década de 70 ocorreu a crise do petróleo e, com isso, o mundo pesquisava tecnologias fotovoltaicas. Foi uma época em que o Brasil estava com as pesquisas tão desenvolvidas quanto países desenvolvidos, e haviam duas fábricas de módulos fotovoltaicos. Entretanto, na década de 80, as fábricas tiveram que ser fechadas ou mudar seu nicho de pesquisa devido às dificuldades pela falta de incentivo (PINHO & GALDINO, 2014).

Em 1978 foi criada a Associação Brasileira de Energia Solar (ABENS), mas que também sofreu perdas na crise da década de 80, e com isso acabou sendo desfeita. No ano de 2004 houve a manifestação da necessidade da ABENS voltar a movimentação efetiva de pesquisadores que se uniram para retomar. Foi só em 2005, que obtiveram sucesso que é mantido até os dias de hoje (ABENS, 2021).

A Declaração de Belo Horizonte, descrita em 1994 no Encontro para Definição das Diretrizes para o Desenvolvimento das Energias Solar e Eólica no Brasil, por diversos pesquisadores da área, trata sobre a necessidade que o Brasil havia de um órgão que pudesse dar diretrizes para a área Solar e Eólica, com o intuito de ser referência na área e difundir informação e conhecimento (CRESESB, 2021).

Apesar do avanço de pesquisas dentro do Brasil, ainda não foi possível chegar à um nível de produção equiparado ao da China, uma vez que o país não conseguiu acompanhar o avanço tecnológico rápido da tecnologia. Por isso as tecnologias presentes no país hoje são em sua maioria importadas, e grande parte proveniente da China (PINHO & GALDINO, 2014).

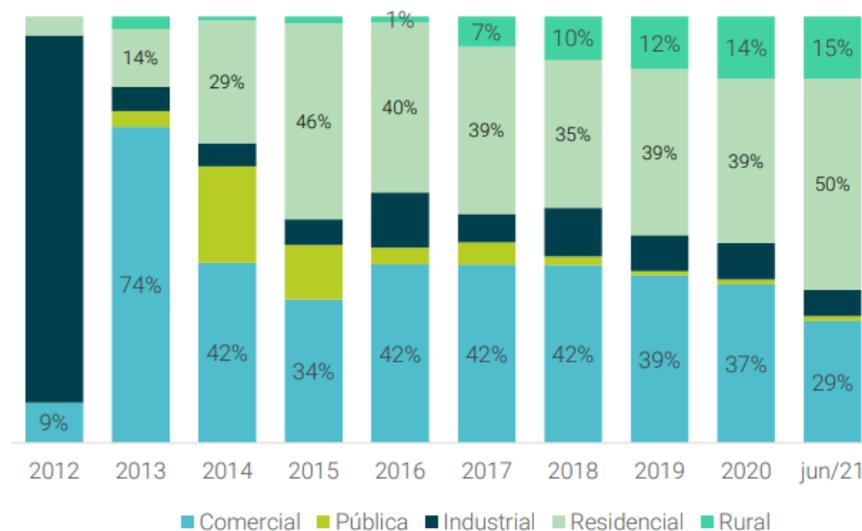
Com o avanço do setor elétrico no país, surgiu a necessidade de criação de um órgão que pudesse cuidar de todos os assuntos que envolvem a geração de energia no país. E assim, a Agência Nacional de Energia Elétrica teve seu início em 1997, que atua juntamente com o Ministério de Minas e Energia para fazer a Regulamentação, Fiscalização e Implementação de políticas e diretrizes quanto ao cenário de setor elétrico no Brasil (ANEEL, 2019).

A ANEEL, em 2012, desenvolveu a Resolução Normativa REN 482/2012, que é a Revisão das regras aplicáveis à micro e mini geração distribuída. A intenção com

a criação dessa resolução era de viabilizar sistemas de pequeno porte. Além disso a resolução determina como se dá a compensação de energia, já que instalações de sistemas fotovoltaicos seriam feitas e conectadas à rede elétrica da concessionária, e o consumidor usaria tanto sua produção própria quanto as instalações da concessionária (ANEEL, 2019).

Segundo a GREENER, em 2021 o Brasil atingiu o marco de 532 mil unidades consumidoras (UC) com sistemas fotovoltaicos instalados resultando em 6GW instalados no país até Junho do mesmo ano. Destaca-se as instalações residências, que atingiram o marco de 50% das instalações. Pode-se observar ainda a queda de instalações comerciais, que representavam 37% em 2020, mas caiu para 29% até Junho do ano seguinte, como mostra a Figura 3.

Figura 3 - Percentual de instalações fotovoltaicas por classe de consumo



Fonte: GREENER (2021)

Outra observação que o estudo realizado pela GREENER referente ao primeiro semestre de 2021 mostrou, foi a grande concentração de instalações fotovoltaicas na região sudeste, ocasionada pela capacidade instalada no estado de Minas Gerais, que representa 1.098 MW. Isso influencia ainda no tempo estimado de *payback* de sistemas instalados no estado, que é o menor do país.

A energia solar poderá ter um crescimento nos próximos anos, e atingirá lugar de destaque de geração, devido seu potencial de receber muita irradiação e ter uma topografia privilegiada. Para o país é um avanço positivo, uma vez que poderá atingir

lugares remotos, que não foi possível alcançar com as linhas de transmissão, e isso levará energia a mais lugares (OLIVEIRA, MARIO, & PACHECO, 2020).

2.1.2 Radiação solar

O sol é um corpo negro que possui reações nucleares em seu núcleo e uma temperatura superficial de 5780K, devido às reações nucleares no núcleo do sol há emissões do que chama-se de energia solar, que é transmitida por meio de radiação eletromagnética, que são ondas eletromagnéticas que possuem um comprimento de onda de 0,22 a 3 μ m (VIAN, TAHAN, AGUILAR, GOUVEA, & GEMIGNANI, 2021).

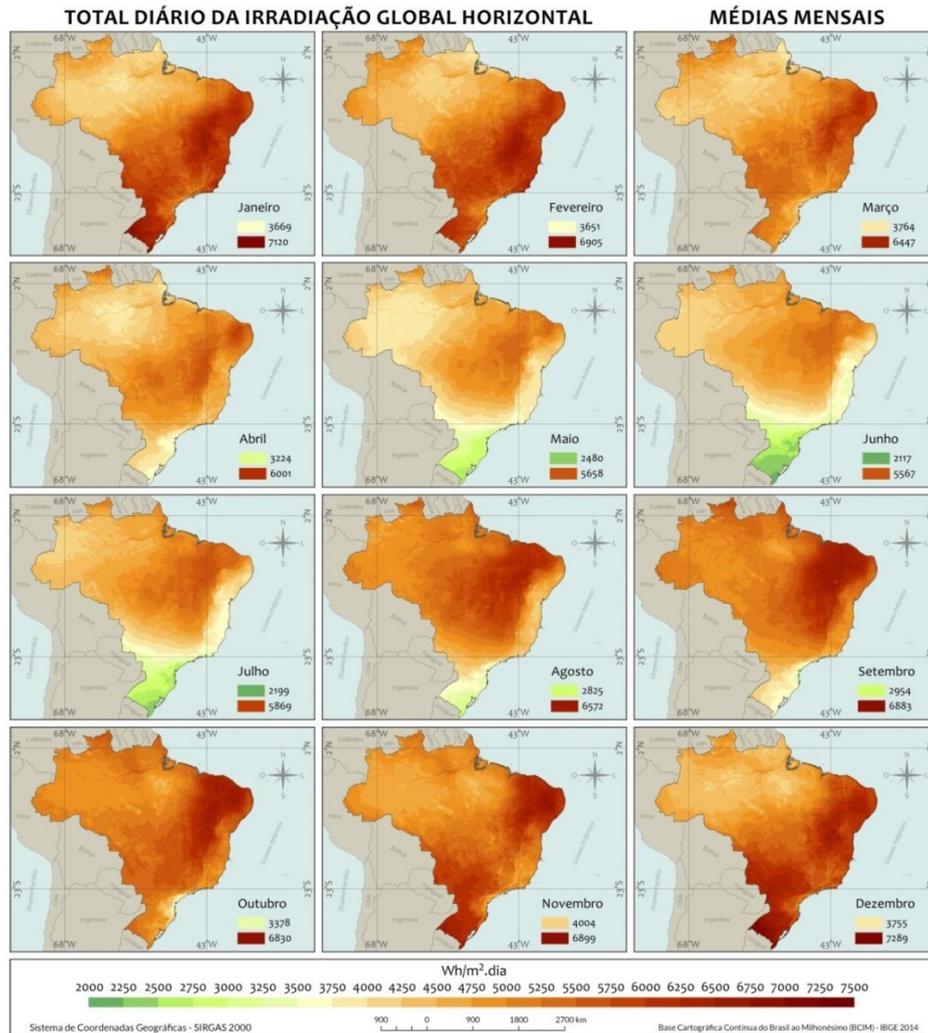
A irradiância solar é medida através de potência por área, ou seja, watt por metro quadrado. Podem ser medidos através de equipamentos como os piranômetros, pireliômetro ou sensores, os sensores por sua vez não são capazes de distinguir a radiação direta da difusa, mas são suficientes para a maior parte dos casos. A irradiância padrão de teste adotada para os sistemas fotovoltaicos é de 1000 W/m² (VILLALVA & GAZOLI, 2012).

O Brasil é destacado principalmente pelo seu tamanho, devido ao fato de ter uma grande extensão territorial e possuir uma diversidade muito grande de relevos, que influenciam diretamente a radiação em diferentes pontos. “A dinâmica atmosférica é de suma importância porque atua diretamente tanto na temperatura quanto na precipitação, provocando as diferenças climáticas regionais” (INPE, 2017).

A temperatura média anual no Brasil fica entre 18°C e 29°C, sendo que em dezembro as temperaturas podem ser vistas acima de 33°C, e em Julho a média de 19°C podendo chegar a 8°C nas regiões serranas (INPE, 2017).

A Figura 4 o mapa com a irradiação global horizontal em médias mensais do Brasil.

Figura 4 - Mapa da irradiação global horizontal em médias mensais



Fonte: Pereira et al. (2017)

Portanto, conforme mostram os níveis de radiação no Brasil na região nordeste são os maiores do país, considerando a irradiação global horizontal que é a irradiação incidente, constituída pela soma das irradiações difusa e direta (INPE, 2017).

2.1.3 Radiação solar no Paraná

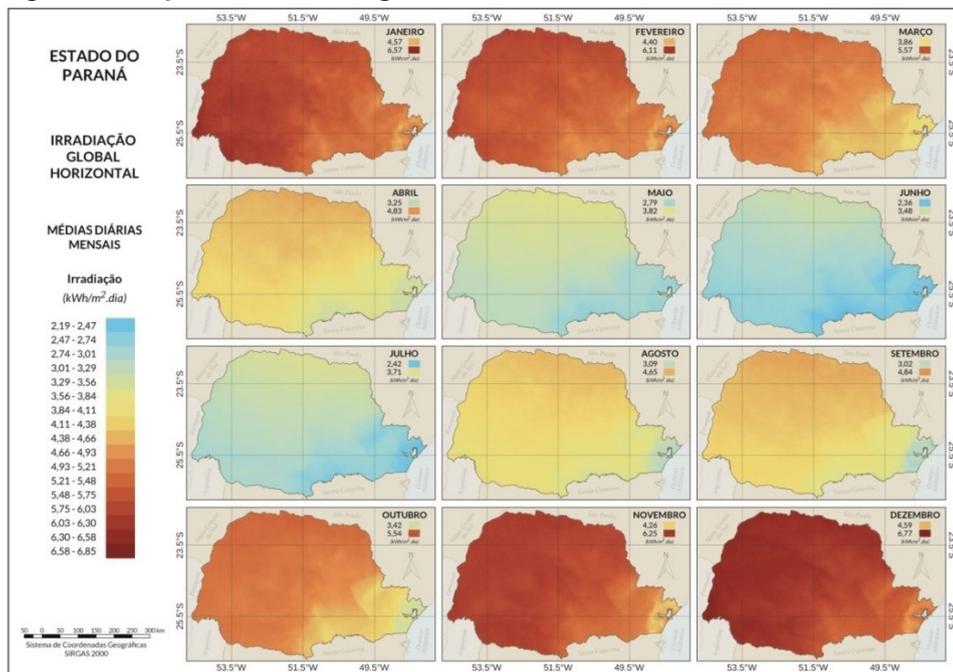
O estado do Paraná está localizado no sul do Brasil e possui um alto contraste de temperatura devido à sua localização e relevo. É um estado que está localizado na transição de climas quentes das baixas latitudes e clima temperado, que afetam os índices pluviométricos. A temperatura no estado do Paraná é geralmente entre 14° e 24°, considerando os meses mais frios e mais quentes do ano (TIEPOLO et al., 2017).

A irradiação global horizontal é a principal informação, e com ela podem ser feitos ajustes em diferentes irradiações (TIEPOLO et al., 2017).

Os sites e softwares disponíveis para projetos de sistemas fotovoltaicos, trabalham com a irradiação no plano inclinado na latitude, que é a irradiação considerando condições ideais, que são os sistemas com direção ao norte geográfico e com inclinação igual à da latitude do local instalado.

A Figura 5 apresenta o mapa de irradiação global horizontal de média diária mensal do estado do Paraná.

Figura 5 - Mapa de irradiação global horizontal média diária mensal no Paraná



Fonte: Tiepolo et al. (2017)

Como mostra a Figura 5, pode-se observar que a região de maior irradiação estende-se do norte ao oeste do estado, com um período de maior incidência entre Novembro a Fevereiro, e com menor incidência, entre Maio a Julho (TIEPOLO et al., 2017).

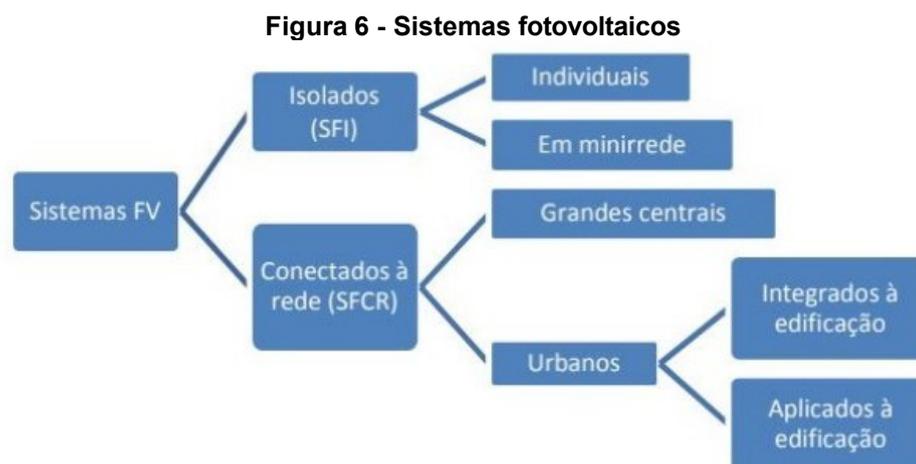
2.2 Sistemas fotovoltaicos

Segundo a ABNT (2013), sistemas fotovoltaicos são um conjunto de elementos composto de gerador fotovoltaico, podendo incluir inversores, módulo fotovoltaico ou telhas fotovoltaicas, controladores de carga, dispositivos para controle,

supervisão e proteção, armazenamento de energia elétrica, fiação, fundação e estrutura de suporte.

Os sistemas possuem diversas classificações, entre elas de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição, sistemas fotovoltaicos offgrid ou ainda sistemas fotovoltaicos híbridos. Os sistemas híbridos podem ser considerados como sistemas com fontes de energia diferente, como por exemplo solar e eólica, que não é o caso de aplicação neste trabalho (PINHO & GALDINO, 2014). Mas também pode ser um sistema fotovoltaico que integre e o sistema conectado à rede de distribuição com o sistema offgrid, formando assim o sistema híbrido que funciona tanto conectado à rede quanto como backup quando a energia da concessionária não estiver disponível.

Na Figura 6 um breve esquema dos tipos principais de sistemas fotovoltaicos e que serão explicados nos itens 2.2.1 e 2.2.2.



Fonte: Urbanetz (2010)

2.2.1 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição

Os sistemas fotovoltaicos por gerarem energia, faz com que instalações que o tenham instalado, sejam geradoras de energia e não apenas consumidores. O que acontece é que a energia produzida por esses geradores por não possuírem um sistema de armazenamento, são injetados na rede de distribuição da concessionária (ZILLES, MACÊDO, GALHARDO, & OLIVEIRA, 2012).

Os sistemas conectados à rede possuem diferentes classificações, e uma delas é pela potência do sistema. Segundo a ANEEL (2015) são:

a) Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW;

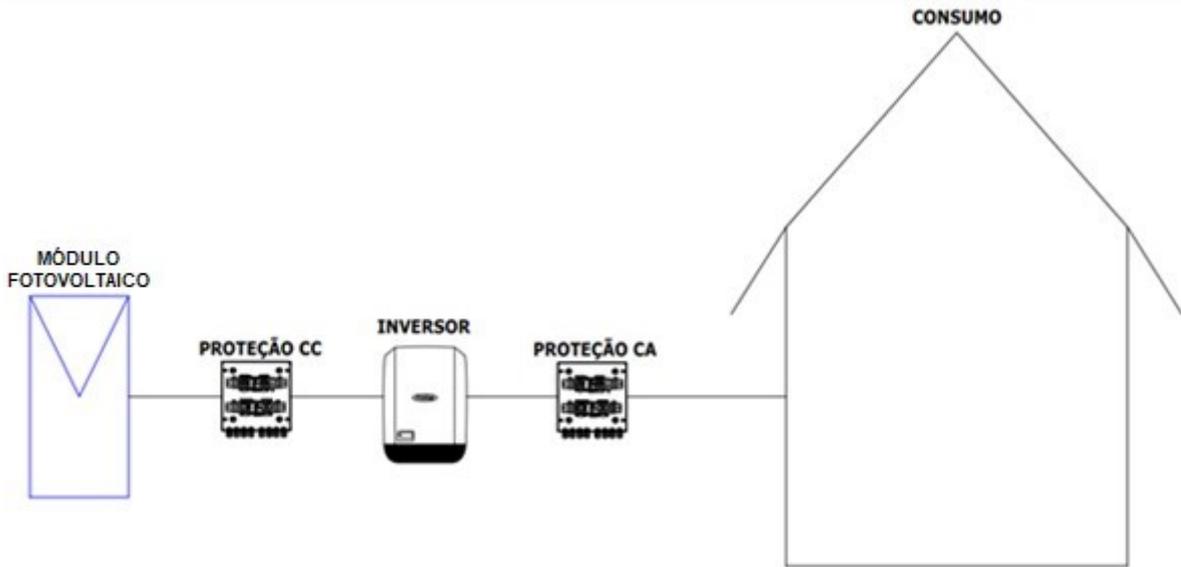
b) Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser aplicados de duas maneiras no sistema elétrico, sendo através da geração centralizada ou da geração distribuída. A geração distribuída é a geração por meio de micro e minigeração. Tanto a geração centralizada quanto a geração distribuída são amparadas pela REN 482 redigida pela ANEEL em 2012 (SCOLARI, 2019).

Em 6 de Janeiro 2022 a Lei 14.300/22 foi aprovada, substituindo a REN 482, mas sua utilização será apenas a partir de 2023. A minigeração distribuída teve uma mudança, que agora são divididas em despacháveis e não despacháveis. A nova classificação tem, portanto, *75 kW (setenta e cinco quilowatts), menor ou igual a 5 MW (cinco megawatts) para as fontes despacháveis e menor ou igual a 3 MW (três megawatts) para as fontes não despacháveis. Sendo que as fontes não despacháveis não considera armazenamento de energia* (GOV. BR).

O sistema fotovoltaico conectado à rede é composto pela utilização dos módulos fotovoltaicos conectados ao inversor solar, esse por sua vez faz a conexão nos dispositivos de proteção, que levam a conexão ao quadro geral da edificação, e conectam à rede da concessionária, conforme mostra a Figura 7 (PINHO & GALDINO, 2014).

Figura 7 - Sistema fotovoltaico conectado à rede



Fonte: Autoria própria (2021)

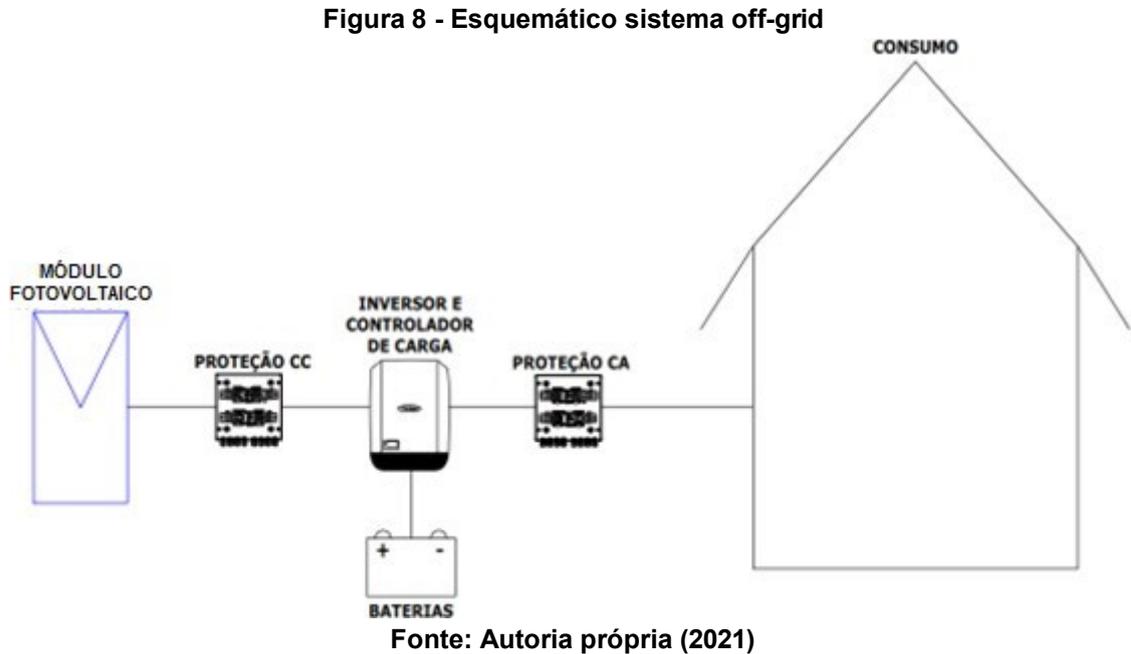
2.2.2 Sistemas fotovoltaicos off-grid

Também chamados de sistemas isolados ou sistemas autônomos, são os sistemas fotovoltaicos com finalidade de fornecer energia elétrica nos momentos em que a radiação solar é muito baixa ou não há radiação, como no período da noite. Para isso o sistema é conectado a um banco de baterias que faz o armazenamento da energia gerada pelo sistema durante os momentos em que há radiação, e não são conectados à rede (GOETZBERGER & HOFFMANN, 2005).

Os sistemas fotovoltaicos de armazenamento podem afetar a geração de energia dependendo de como foram projetados, uma vez que, quando as cargas estão cheias, o controlador de baterias desliga o sistema gerador, já que não terá onde armazenar. Deve ser um ponto de atenção para projetos off-grid (ZILLES, MACÊDO, GALHARDO, & OLIVEIRA, 2012). Alguns “exemplos de aplicações de SFVI: comunidades isoladas da rede elétrica, alimentação de baterias de veículos elétricos, postes de iluminação, bombas d’água, geladeiras para armazenar vacinas, entre outros” (TONIN, 2017, p. 27).

O sistema isolado é composto pelos módulos fotovoltaicos, que são conectados ao inversor fotovoltaico que é acoplado a um controlador de carga, esse sistema se liga a um banco de baterias que será o responsável por armazenar a

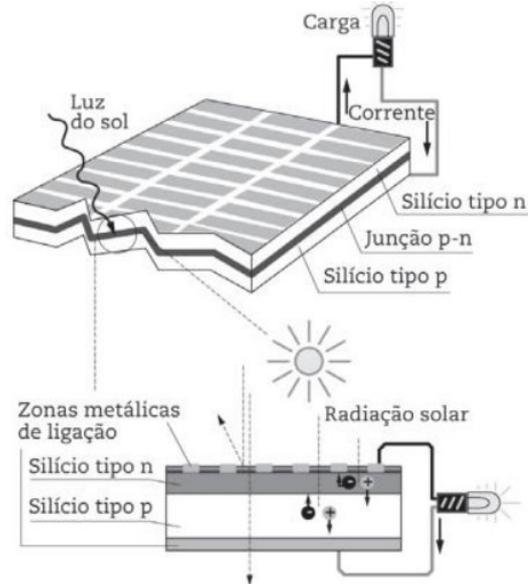
energia até que seja necessário utilizá-la (PINHO & GALDINO, 2014). Um esquemático do sistema está representado na Figura 8.



2.2.3 Efeito fotovoltaico

O Efeito fotovoltaico é um fenômeno físico no qual a luz solar é convertida em eletricidade ao incidir radiação eletromagnética (fótons) em uma célula com compostos semicondutores. Essa célula, chamada de célula fotovoltaica, é a unidade fundamental do sistema fotovoltaico, responsável pela conversão. Composta por uma junção de duas camadas finas de materiais semicondutores análogos, chamados tipo N, possuindo elétrons em excesso, e tipo P, possuindo lacunas em excesso, ela caracteriza-se por possuir uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução totalmente vazia a temperaturas muito baixas (FADIGAS, 2012) Essas duas bandas de energia são separadas por uma zona chamada “gap de energia”, ou “banda proibida”, que proporciona ao semicondutor características especiais. Devido à excitação térmica dos portadores, sua condutividade é aumentada. Como ilustra a Figura 9.

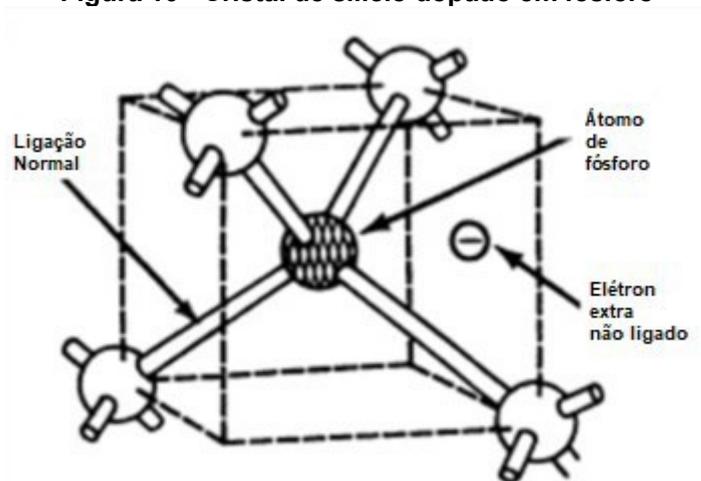
Figura 9 - Estrutura de uma célula fotovoltaica



Fonte: Zilles; Macêdo; Galhardo; & Oliveira (2012)

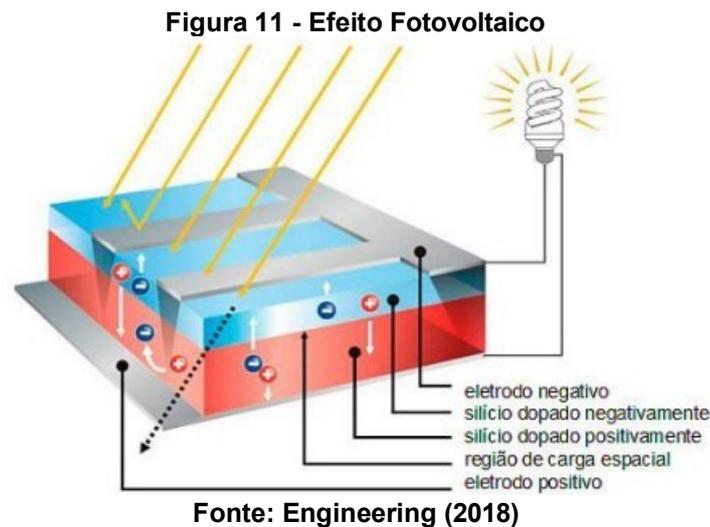
A tecnologia de semicondutores mais difundida comercialmente na construção de células fotovoltaicas é a de silício. Os átomos de silício caracterizam-se por possuírem quatro elétrons na camada de valência, formando uma rede cristalina, onde não há elétrons livres e impedindo a passagem de corrente elétrica. Para que a passagem de corrente seja permitida, é necessário inserir no cristal puro de silício minúsculas quantidades de impurezas. A Figura 10 ilustra um cristal de silício dopado em fósforo.

Figura 10 - Cristal de silício dopado em fósforo



Fonte: B. -S. E. Solar (2018)

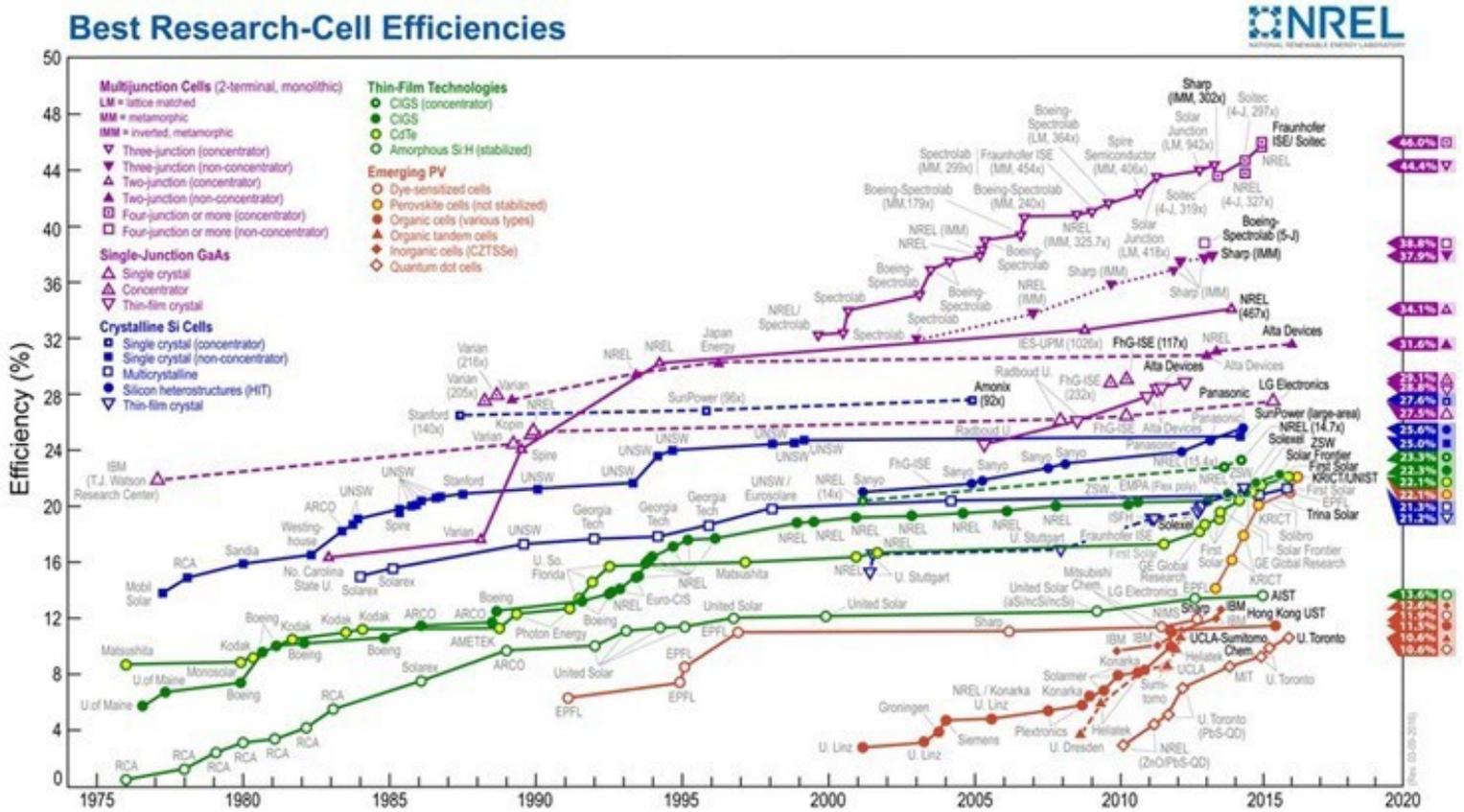
Quando a luz incide sobre a célula fotovoltaica, os fótons chocam-se com os elétrons da estrutura de silício, fornecendo energia e transformando-os em condutores. Ao conectar a camada positiva à negativa através de um condutor externo, uma corrente elétrica é gerada e, enquanto a luz incidir sobre a célula, essa corrente se manterá e irá variar proporcionalmente com a intensidade da luz incidente (NASCIMENTO, 2004). A Figura 11 ilustra o efeito fotovoltaico.



As células solares estão classificadas em três gerações. A primeira geração é composta por silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), a segunda geração, também denominada de filmes finos, é menos presente no mercado e inclui o silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre-índio (CIS) e disseleneto de cobre-índio-gálio (CIGS), a terceira geração é composta por Célula Fotovoltaica Multijunção e Célula Fotovoltaica para Concentração (CPV), Células Sensibilizadas por Corante (DSSC) e Células Orgânicas ou Poliméricas (OPV) (SOBRINHO, 2016).

A Figura 12 apresenta um gráfico desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL), no Centro Nacional para Fotovoltaica (NCPV), Estados Unidos, mapeando os melhores índices de eficiência atingidos pelas células fotovoltaicas. Apesar de observar-se um rendimento relativamente baixo, conforme a segunda lei da termodinâmica, há de considerar que a energia fornecida pelo Sol é gratuita e inesgotável. Entretanto, essa eficiência pode ser importante ao levar em consideração o espaço utilizado na instalação de painéis solares (PINHEIRO, 2016).

Figura 12 - Gráfico de eficiência de célula fotovoltaica



2.2.4 Inversores

Segundo Pinho e Galdino (2014), inversores são equipamentos eletrônicos que recebem energia elétrica em corrente contínua de qualquer que seja a fonte, módulo ou bateria, e a transforma em energia elétrica de corrente alternada, que é a corrente elétrica compatível com frequência, corrente e tensão presente no sistema elétrico brasileiro. Ainda, ao considerar um inversor conectado à rede elétrica de distribuição, é necessário que o inversor tenha a mesma tensão de saída que a tensão que a rede elétrica oferece. Um exemplo de inversor é apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Inversor Fronius Primo 8.2-1

Fonte: Fronius (2021)

Pode-se encontrar no mercado, inversores de um estágio, dois estágios ou múltiplos estágios. O inversor de um estágio faz o controle do ponto de máxima potência (MPPT) e da energia injetada na rede em apenas um estágio. No inversor de dois estágios o controle da MPPT é pelo conversor CC-CC, enquanto a energia injetada na rede é controlada pelo conversor CC-CA. No inversor de múltiplos estágios o controle da MPPT é feito por vários conversores CC-CC e a energia injetada na rede por um único conversor CC-CA (TONIN, 2017).

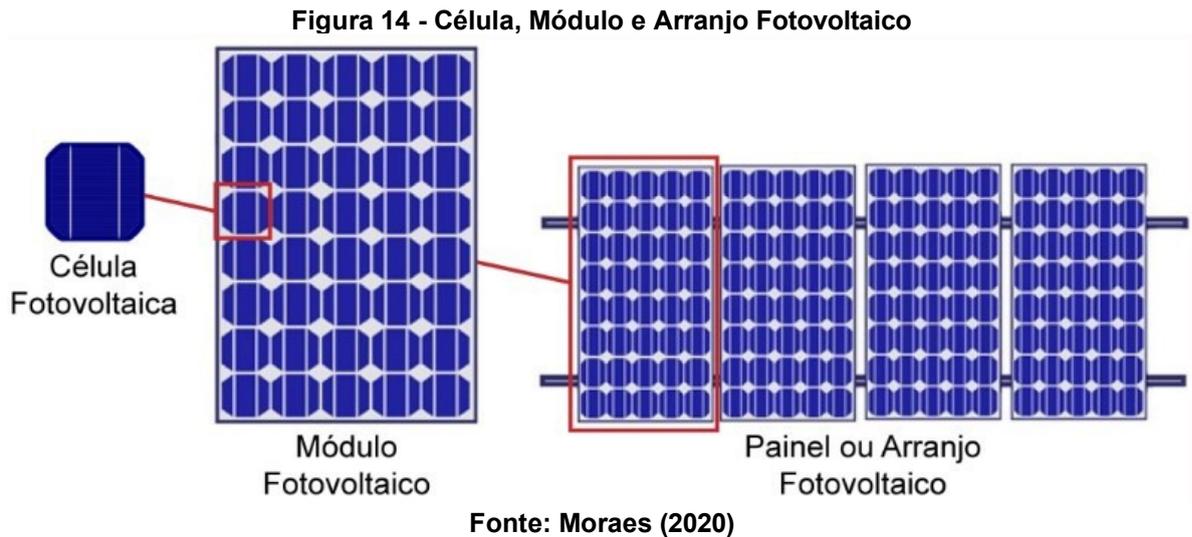
É importante considerar nos inversores, para melhor desempenho do sistema fotovoltaico, a função denominada de ponto de máxima potência (MPPT), a qual controla o valor de corrente e tensão em seus valores máximos (MARIANO, 2017).

Segundo Tolmasquim (2016), os inversores possuem 3 classificações quanto às suas aplicações, podendo ser divididos em microinversores, inversor string ou inversores centrais. Os microinversores atuam com módulos individuais ou strings muito pequenas, podendo otimizar a geração uma vez que sofre menos influências quanto à sombreamentos ou defeitos nos módulos. Já os inversores string são os de uso mais comum em projetos residenciais ou comerciais, pois podem conectar um número maior de módulos, reduzindo o custo de instalação. Os inversores centrais são aplicados em sua maioria em usinas fotovoltaicas, pois possuem potências maiores.

2.2.5 Módulos fotovoltaicos

Segundo a ABNT (2013, p. 8), módulos fotovoltaicos são: “unidade básica formada por um conjunto de células fotovoltaicas interligadas eletricamente e

encapsuladas com o objetivo de fornecer energia elétrica.”. O agrupamento de células fotovoltaicas torna-se necessário, assim chamando-o de módulo solar fotovoltaico, ou painéis fotovoltaicos. Esses módulos podem ser ligados em paralelo ou série, formando então um arranjo fotovoltaico. A Figura 14 contém uma representação de célula, módulo e arranjo fotovoltaico.

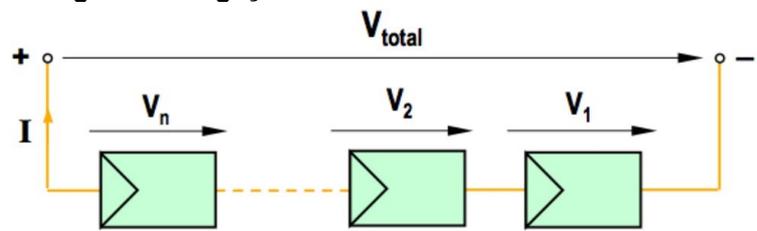


Dentre os parâmetros elétricos significativos fornecidos pelos fabricantes do módulo fotovoltaico, destacam-se a potência nominal, em Watt-pico (Wp), válida sob condições padrão de teste (STC, Standart Test Conditions), que correspondem a 1000 W/m² de irradiância, 25°C de temperatura da célula e AM = 1,5 para massa de ar. Entretanto, para levantar o valor da potência nominal em condições de instalação em campo, é necessária algumas grandezas inerentes ao módulo, como tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de curto-circuito (I_{sc}), fator de forma (FF) que seria a razão entre a máxima potência da célula e o produto de curto circuito com a tensão de circuito aberto, e a eficiência (η) que mostra a efetividade do processo de conversão de energia solar em energia elétrica (ZILLES, MACÊDO, GALHARDO, & OLIVEIRA, 2012).

Quando conectados em série, a corrente total do arranjo fotovoltaico permanece constante e a tensão total é a somatória de tensões individuais de cada módulo. Em paralelo, a tensão permanece constante e o nível da corrente, somados. Para atingir valor de potência maiores, são realizadas ligações mistas dos módulos.

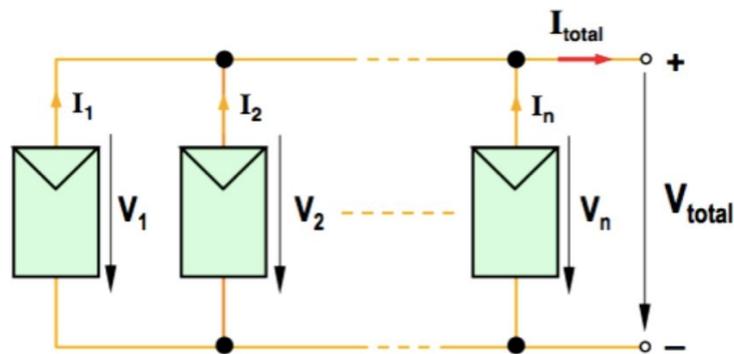
A Figura 15 e a Figura 16 ilustram uma ligação em série e em paralelo, respectivamente, de células fotovoltaicas.

Figura 15 - Ligação em série de células fotovoltaicas



Fonte: Carneiro (2010)

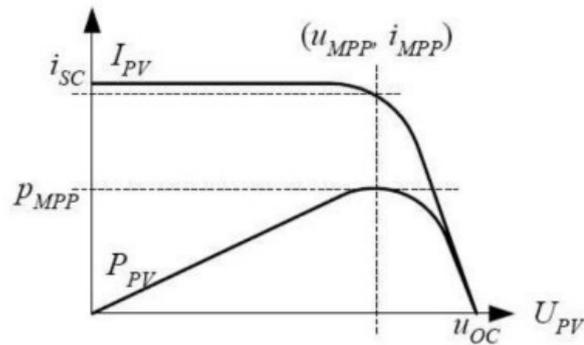
Figura 16 - Ligação em paralelo de células fotovoltaicas



Fonte: Carneiro (2010)

Para avaliar o desempenho de um módulo fotovoltaico, é utilizado a análise das curvas características I-V de corrente e tensão e curva P-V de potência e tensão. Tais curvas são elaboradas tomando como referência uma irradiância de 1000 W/m^2 , sendo a irradiância padronizada para teste em STC (SILVA M. C., 2008). A figura 17 apresenta o gráfico das curvas características I-V e P-V de um painel fotovoltaico.

Figura 17 - Curva característica de um painel fotovoltaico



Fonte: Silva, M., C. (2008)

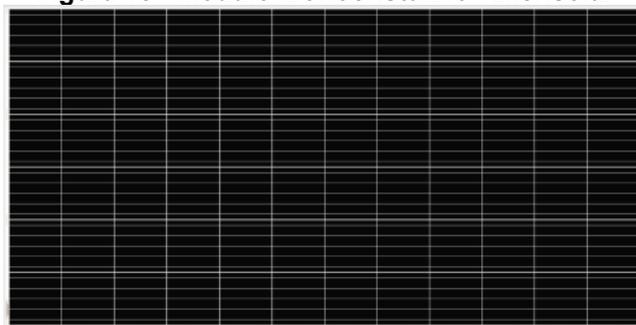
2.3 Tecnologias fotovoltaicas

As tecnologias fotovoltaicas disponíveis são de silício monocristalino e policristalino, aplicadas em módulos convencionais, já outras tecnologias que são a CIGS, a de telureto de cádmio e a amorfa que são aplicadas em filme fino. Serão apresentadas para melhor entendimento de suas aplicações as tecnologias de silício monocristalino, silício policristalino, CIGS, e telureto de cádmio.

2.3.1 Silício monocristalino

Segundo Tonin (2017), entre as características principais de células de silício monocristalino destaca-se a alta pureza do material semicondutor, que faz com que a eficiência seja a maior dentre as tecnologias, porém, a mais cara. Outra forte característica são as cores, que estão concentradas em azul escuro ou preto. A Figura 18 é uma representação de um módulo monocristalino da Amerisolar.

Figura 18 - Módulo Monocristalino Amerisolar



Fonte: Amerisolar (2020)

As células de silício monocristalino são concebidas com a utilização de blocos de silício com elevado grau de pureza, aquecidos em altas temperaturas e submetidos a um processo de formação de cristal chamado método de Czochralski, que é o método mais comum, que resulta no produto denominado lingote de silício monocristalino, constituído de uma organização molecular homogênea e única. As perdas de material ocorridas neste processo é um dos fatores que torna o produto caro (VILLALVA & GAZOLI, 2012).

Após processos químicos para receber as impurezas, duas faces são separadas formando as camadas P e N, necessárias para o funcionamento da célula fotovoltaica, o módulo recebe uma película metálica em uma das faces, uma grade metálica na outra e uma camada de material antirreflexivo que irá receber a incidência luminosa (VILLALVA & GAZOLI, 2012). A eficiência dos módulos varia entre 15 a 23%, sendo que a variação da eficiência se dá através das diferentes arquiteturas e utilização de materiais, como a tecnologia PERC que pode atingir o valor máximo de eficiência (ALAAEDDINA, SAPUAN, ZUHRI, ZAINUDIN, & AL - OQLA, 2019).

2.3.2 Silício policristalino

As células policristalinas, diferente das monocristalinas, possuem múltiplos cristais em sua composição. Devido as suas várias interfaces e descontinuidades da estrutura molecular, os elétrons possuem dificuldade em movimentar-se, reduzindo sua eficiência. Sendo que a arquitetura é similar ao monocristalino, mudando apenas a superfície, que neste caso possui microcristais na superfície (PINHO & GALDINO, 2014). A Figura 19 é uma representação do módulo policristalino da Amerisolar.

Figura 19 - Módulo Policristalino Amerisolar



Fonte: Amerisolar (2021)

A forma mais comum de fabricação do módulo policristalino é a Siemens, que possui quatro etapas de fabricação. Sendo a primeira a formação de triclorossilano através da hidrocloreção do silício monocristalino, a segunda é a purificação, que faz a destilação do triclorossilano, a terceira parte é a decomposição do material anterior que produz silício purificado e então a última etapa que consiste em reciclagem do restante do material, que sobrou por não ter sofrido reação (MITIN & KOKH, 2017).

2.3.3 Tecnologia CIGS

Segundo Tonin (2017) a tecnologia de CIGS é composta por cobre-índio-gálio-selênio, e é uma das tecnologias utilizadas para fabricação do filme fino, que são caracterizados pela flexibilidade, além de possuir a melhor performance e eficiência dentre os materiais utilizados para essa tecnologia. A Figura 20 é uma representação de um módulo de filme fino com tecnologia CIGS.

Figura 20 - Módulo Filme Fino com Tecnologia CIGS



Fonte: Miasolé (2019)

Sua fabricação pode ser feita por inúmeros processos diferentes, não possuindo nenhum como forma principal, pois possuem diversas etapas. Algumas dessas etapas são a deposição de um molibdênio pulverizado no substrato de sustentação, o processo de coevaporação que obtém a camada CIGS, e a utilização de revestimento antirreflexivo (PINHO & GALDINO, 2014). A produção utilizando esse método possui uma diminuição na quantidade de matéria-prima utilizada e suas perdas, além de possuir uma menor complexidade de fabricação, consequentemente

diminuindo, também, seu custo e possibilitando a produção em larga escala (PICOLLI, 2015).

2.3.4 Telureto de Cádmio

A tecnologia Telureto de cádmio é mais utilizada para o desenvolvimento de módulos de filme fino. Devido a sua toxicidade, possui dificuldade em adaptar uma produção em larga escala, acarretando em um aumento de seu preço médio de mercado. É uma tecnologia que possui alta absorção à luz, o que facilita a instalação em lugares com frequentes sombreamento (PINHO & GALDINO, 2014).

São diversas as formas de fabricação, sendo elas mais baratas que as de silício. Um dos processos de fabricação para essa tecnologia, pode ser através do processo de decomposição de telureto de cádmio, passando depois por um laser que realiza os cortes nas camadas de geração, e por último então o encapsulamento. É um material altamente sensível à umidade (PINHO & GALDINO, 2014).

2.4 Telhas solares

As telhas solares são tecnologias desenvolvidas para substituir os módulos convencionais e trazer um apelo estético às instalações, uma vez que se parecem com telhas convencionais, o que ajuda a aumentar a aplicabilidade de sistemas solares no setor imobiliário (VIAN, TAHAN, AGUILAR, GOUVEA, & GEMIGNANI, 2021).

Há, portanto, alguns cuidados a serem tomados quando trata-se da junção de uma telha convencional à tecnologia fotovoltaica. Os produtos devem ser considerados um só, e não tratá-los como dois produtos distintos que serão unidos ao final, pois isso agregaria pontos de falha ao produto. Não podendo esquecer ainda a manutenção, já que ao passar dos anos de um sistema instalado, há a necessidade tanto de limpeza quanto de possíveis trocas de material, e isso deve ser feito de forma simples e fácil (BODÃO, 2014).

Com o aumento consumo de energia elétrica, a pressão para o desenvolvimento de regulamentos e certificações para métodos de construções mais eficientes passaram a ser prioridade para o setor. E assim, a presença da telha solar, ajuda na eficiência das edificações e ainda, contribuem para a parte visual dos projetos (NICCOLÒ, RAJENDRA, & LAVINIA, 2012).

Há diferentes tipos de telhas fotovoltaicas de concreto, cerâmica, plástico (feitas através de materiais reciclados), vidro e que foram desenvolvidas para que pudessem acoplar a tecnologia solar das mais diferentes formas, algumas já disponíveis no mercado, e outras apenas para estudo. Suas aplicabilidades são as mesmas, porém devido seus materiais, podem possuir diferentes resultados por tratar-se de uma tecnologia solar (PANCHENKO, 2018).

Considerando a forma de instalação de telhas solares, é necessário também se preocupar com a ventilação que a mesma possui, uma vez que se não houver uma ventilação adequada, ocorre um aquecimento elevado do sistema, que atrapalha a eficiência das telhas, afetando a capacidade de geração do sistema. Segundo Panchenko (2018), o indicado é que houvesse um sistema de resfriamento, para que as telhas chegassem a melhores resultados.

Outro fator de grande influência são os materiais que envolvem as células fotovoltaicas, um comparativo usando material de vidro e de PVC foi feito, comparando a geração de energia para ambos, a conclusão foi que, utilizando vidro, chegam a produzir 8% mais energia quando aplicadas em PVC. Isso porque a temperatura nas telhas é mais elevada em um do que no outro material, mas também ao fato de que a telha utilizada na comparação era de PVC, e isso mostra que a transmissibilidade do vidro é maior do que a do PVC, já que não permite que a irradiância seja completamente passada às células (FERREIRA, RENSBURG, & NEL, 2018).

Diferentes inclinações e direções de instalação causam efeitos diferentes para o mesmo tipo de telha, sendo que um sistema orientado ao norte tem um melhor aproveitamento de irradiação do que direcionado ao sul. A angulação mais próxima da latitude também é favorável para uma melhor geração. Contudo, as perdas não são tão grandes, e por isso telhas instaladas com direção ao sul se mostram boas o suficiente para que possam ser instaladas, gerando energia sem grandes perdas (GŁUCHY, KURZ, & TRZMIEL, 2013).

Em um estudo realizado por (MARTINI, JÚNIOR, & REIS 2021) onde seria instalado telhas solares em um edifício de suínos e aves, obteve-se um resultado positivo quanto à instalação de telhas solares no parâmetro técnico. O estudo mostra uma área de 484 m² direcionada ao norte. Por dimensionamento, verificou-se a necessidade de uma área de 56 m² para suprir o consumo local, como a área disponível era maior que isso, obtiveram um resultado positivo quanto à instalação.

Não houve análise financeira, pois a telha analisada ainda não estava inserida no mercado.

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram analisadas duas instalações de carport, situados na empresa L8 Energy em São José dos Pinhais – PR, onde uma instalação utiliza módulos fotovoltaicos e outra utiliza telhas fotovoltaicas. As instalações estão situadas uma ao lado da outra, com mesma orientação e inclinação, mas diferentes potências instaladas. As análises serão realizadas utilizando o monitoramento on-line que o inversor possui, para obtenção de dados reais, e por meio de cálculos para os dados ideais.

Foi consultada a plataforma Aurora Vision, disponibilizada pela empresa Fimer, como forma de monitoramento de geração, controlada pelos inversores, para obter as informações de geração disponíveis do período de Abril de 2020 a Março de 2021 dos dois tipos de tecnologia.

Para verificar as informações coletadas, foi realizado o estudo de geração segundo parâmetros calculados obtendo o valor da quantidade de energia gerada no período. Para isso, dados de irradiação solar da localidade estudada foram necessários e coletados no site do INMET.

A estação solarimétrica mais próxima da instalação, segundo (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA), é a estação A[807], localizada na UFPR – Universidade Federal do Paraná com endereço Centro Politécnico da UFPR Rua, Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 210 - Jardim das Américas, Curitiba - PR, 81530-900, e está situada a aproximadamente 12 km da instalação dos carports, localizada na L8 Energy com endereço Av. Rocha Pombo, 2561 – Águas Belas, São José dos Pinhais – PR, 83010-620.

Após selecionar a estação solarimétrica A[807], foi acessado seus dados para que pudesse-se obter os dados de irradiação do período de 2020 a 2021. O INMET disponibiliza, entretanto, os dados em radiação horizontal, de hora em hora, para o período pesquisado. Houve a necessidade de conversão em valores mensais.

Para que os valores pudessem ser utilizados para cálculos realizados posteriormente, fez-se então necessária a utilização do software Radasol, onde pode-se transformar os dados de radiação obtidos pelo INMET em radiação inclinada. Para isso, no software, é necessário a escolha da localidade onde estão instalados os sistemas e então colocados os dados de irradiação mensal obtidos pelo INMET tratados para valores mensais, e então corrigi-los com a inclinação da instalação e a

orientação exata. O software, portanto, faz essa alteração sozinho, de acordo com as informações detalhadas.

Após obter as informações de irradiação inclinada, inseriu-se os dados obtidos em uma planilha de Excel, a fim de realizar os cálculos necessários para descobrir a geração esperada pelo sistema naquele lugar.

3.1 Instalação analisada

Atualmente, com as tecnologias adentrando o mercado, há estudos de novas maneiras de aplicação. O estudo, portanto, utilizou-se de uma instalação já existente nas dependências da empresa L8 Energy, situada em São José dos Pinhais – Paraná. São duas instalações de carport, nome utilizado para definir as garagens solares. Uma possuindo sua cobertura com módulos fotovoltaicos de silício monocristalino e outra com a cobertura de telhas fotovoltaicas, que utilizam da tecnologia CIGS. Estão instalados um ao lado do outro, com inclinação de 10° e orientação de 51° do norte geográfico à oeste. A Figura 21 mostra os dois carports instalados, onde o mais a frente é composto por módulos de silício monocristalino e o mais atrás de telhas fotovoltaicas.

Figura 21 - Instalação das estruturas de carport L8 Energy



Fonte: L8 Energy

Os carports são referentes a duas vagas de carro cada um, onde o carport de módulos possui 15 módulos Q-CELLS Q.PEAK L-G5 – 370W e o carport de telhas possui 98 telhas fotovoltaicas Hanergy HW-P0101-V1-30W. A estrutura de telhas está conectada em um inversor ABB UNO-DM-3.3-TL-PLUS-SB, com potência de telhas em 2940Wp. A estrutura de módulos está conectada em um inversor ABB UNO-DM-

5.0-TL-PLUS-SB, com potência em módulos de 5550Wp. Na Figura 22, observa-se a instalação dos inversores.

Figura 22 - Instalação de inversores e stringboxes



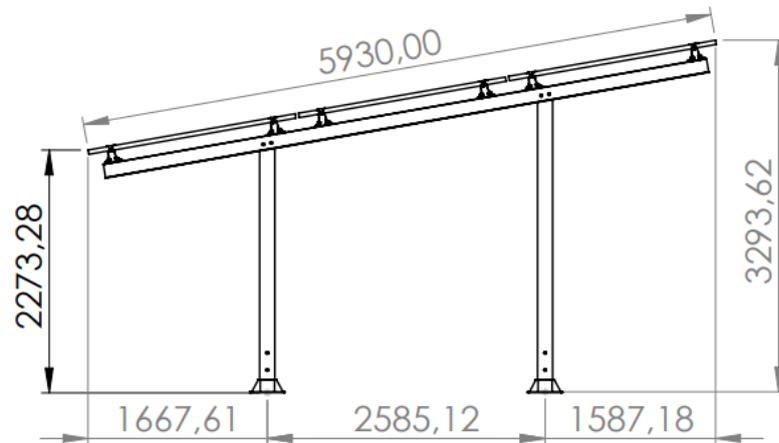
Fonte: Autoria própria (2022)

Ambas as estruturas foram instaladas em Abril de 2020 e operam até os dias atuais, porém, o carport de telhas foi desinstalado algumas vezes por motivos diversos. Por isso, será observado apenas o período de 1 ano após a instalação, que não sofreu nenhuma interferência.

3.2 Orientação e inclinação

O carport foi desenvolvido estruturalmente por uma empresa terceira, pretendendo obter uma melhor instalação do sistema. A inclinação é de 10° , mas há a possibilidade de instalação com variação de até 15° , e com um desvio azimutal de 51° do norte geográfico à oeste. A inclinação ideal para a localização seria de aproximadamente 25° , para que pudesse ter a melhor geração possível com a capacidade das tecnologias. Apesar de não ser a ideal, a inclinação se justifica financeiramente ao ser observada com relação aos custos estruturais. A Figura 23 é uma representação de dimensões, em mm, do carport.

Figura 23 - Dimensões do CARPORT

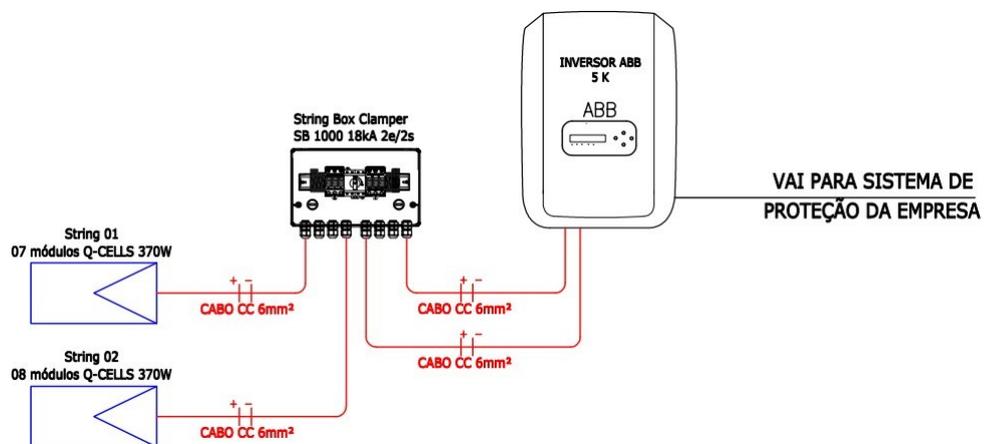


Fonte: Folha de dados L8 Energy

3.3 Arranjos e conexões dos sistemas

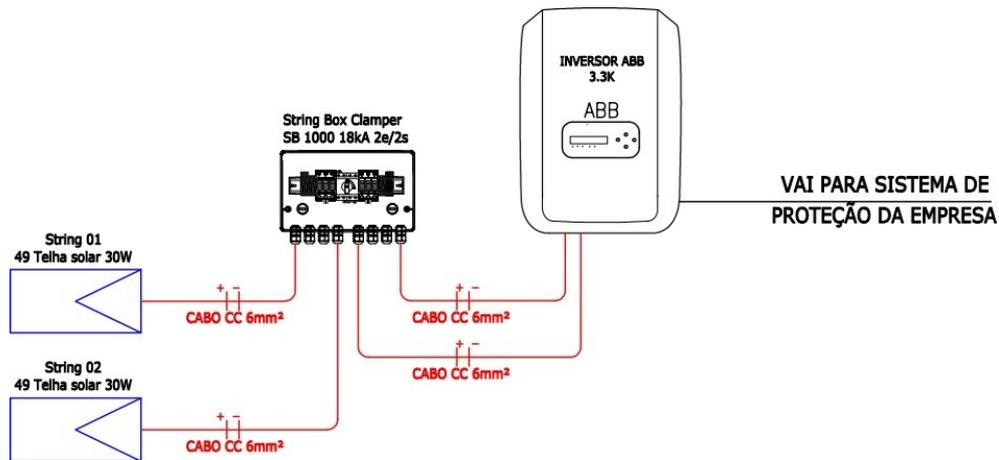
Os sistemas fotovoltaicos analisados são compostos por telhas e módulos fotovoltaicos. O sistema composto por módulos fotovoltaicos, possui 15 unidades, conectados em uma stringbox 2E/2S, que levam ao inversor ABB 5K e, para as telhas, possui 98 telhas conectadas em uma stringbox 2E/2S, que levam ao inversor ABB 3K. Após a conexão com o inversor, há a utilização de um disjuntor junto ao DPS tipo II para proteção da corrente alternada. Essa conexão pode ser vista conforme Figura 24 e Figura 25, que mostra a conexão CC das instalações.

Figura 24 - Representação de conexão CC do sistema de módulos fotovoltaicos



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 25 - Representação de conexão CC do sistema de telhas fotovoltaicas



Fonte: Autoria própria (2022)

O sistema composto pelos 15 módulos está dividido em duas strings, sendo que uma utiliza 7 módulos e a outra utiliza 8, cada string está conectada a um MPPT diferente, pois, apesar de estarem na mesma orientação e inclinação, não possuem a mesma quantidade por string.

O sistema composto pelas 98 telhas fotovoltaicas está também dividido em duas strings, cada uma utilizando 49 telhas. A quantidade elevada de telhas na mesma MPPT se justifica devido os níveis de tensão e corrente que possuem serem muito baixos, permitindo, portanto, a utilização de uma quantidade maior de unidades juntas sem ultrapassar os limites definidos pelo inversor.

3.4 Características elétricas dos equipamentos utilizados

O módulo fotovoltaico monocristalino utilizado na instalação é Q-CELLS Q.PEAK L-G5 – 370W e os principais dados técnicos estão na Tabela 1:

Tabela 1 – Características elétricas do módulo

Potência a MPP	Pmpp (W)	370
Corrente de Curto circuito	Isc (A)	9,81
Tensão de Circuito aberto	Voc (V)	48,45
Corrente em MPP	Impp (A)	9,35
Tensão em MPP	Vmpp (V)	39,59
Eficiência	n (%)	19
Coef. de temperatura Isc		0,04
Coef. de temperatura Pmpp		-0,39
Coef. de temperatura Voc		-0,28
Tensão máxima do sistema (V)		1000
Temp. do módulo permitida em funcionamento contínuo		-40°C a +85°C

Fonte: Datasheet módulo Q-CELLS

A telha solar utilizada na instalação é da Hanergy HW-P0101-V1-30W e possui as configurações elétricas conforme a Tabela 2:

Tabela 2 – Características elétricas da telha

Potência a MPP	Pmpp (W)	30
Corrente de Curto circuito	Isc (A)	4
Tensão de Circuito aberto	Voc (V)	10,6
Corrente em MPP	Impp (A)	3,5
Tensão em MPP	Vmpp (V)	8,6
Eficiência	n (%)	10,3
Coef. de temperatura Isc		0,003
Coef. de temperatura Pmpp		-0,4
Coef. de temperatura Voc		-0,36
Tensão máxima do sistema (V)		1000
Temp. do módulo permitida em funcionamento contínuo		-40°C a +85°C

Fonte: Datasheet módulo Q-CELLS

Os inversores da ABB, marca que a empresa Fimer adquiriu e que são utilizados nessa instalação, são os modelos ABB UNO-DM-3.3-TL-PLUS-SB e ABB

UNO-DM-5.0-TL-PLUS-SB e suas características elétricas estão apresentadas nas Tabela 3 e Tabela 4, respectivamente.

Tabela 3 – Características elétricas inversor ABB UNO-DM-3.3-TL-PLUS-SB

Entrada		
Tensão máxima de entrada	V _{max} (V)	600
Tensão de partida	V _{start} (V)	200
Faixa de tensão de operação	V _{min} ... V _{max} (V)	150-530
Potência nominal de entrada	P _{cc} (W)	3500
Números de MPPT independentes		2
Número de entradas por MPPT		1
Potência máxima de entrada por MPPT	P _{mppt} (W)	2000
Corrente máxima de entrada	I _{max} (A)	20
Corrente máxima de entrada por MPPT	I _{mppt} (A)	10
Corrente de curto-circuito	I _{cc} (A)	20
Saída		
Coneção AC	monofásico	
Potência nominal de saída	P _{nom} (W)	3300
Tensão de saída	V _{ac} (V)	220
Corrente máxima de saída	I _{saida} (A)	14,5
Corrente de curto-circuito	I _{cc} (A)	16
Frequência	F (Hz)	60
Eficiência máxima	(%)	97

Fonte: Adaptado datasheet inversor ABB

Tabela 4 – Características elétricas inversor ABB UNO-DM-5.0-TL-PLUS-SB

Entrada		
Tensão máxima de entrada	Vmax (V)	600
Tensão de partida	Vstart (V)	200
Faixa de tensão de operação	Vmin... Vmax (V)	150-530
Potência nominal de entrada	Pcc (W)	5150
Números de MPPT independentes		2
Número de entradas por MPPT		1
Potência máxima de entrada por MPPT	Pmppt (W)	3500
Corrente máxima de entrada	Imax (A)	30,5/19
Corrente máxima de entrada por MPPT	Imppt (A)	11,5
Corrente de curto-circuito	Icc (A)	22
Saída		
Coneção AC	monofásico	
Potência nominal de saída	Pnom (W)	5000
Tensão de saída	Vac (V)	220
Corrente máxima de saída	Isaida (A)	22
Corrente de curto-circuito	Icc (A)	24
Frequência	F (Hz)	60
Eficiência máxima	(%)	97,4

Fonte: Adaptado inversor ABB

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Dados de irradiação no plano horizontal e plano inclinado

Utilizando o site do INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, pode-se observar a estação solarimétrica mais próxima do sistema gerador, que por sua vez está a aproximadamente 12 km de distância. Os dados obtidos pelo INMET são medidos de hora em hora no período em que se escolhe observar. Para o presente trabalho, observou-se o período de Abril de 2020 a Março de 2021. Os dados obtidos foram tratados através de uma planilha de Excel para que se tornassem diários e, depois, mensais.

A partir da obtenção desses dados, foi necessária a sua correção quanto a orientação e inclinação do local. Essa correção foi feita através do software RADIASOL, onde pode-se colocar os dados de orientação de 51° do norte geográfico à oeste e inclinação de 10°, além dos dados de média mensal obtidos pela adaptação dos dados obtidos no INMET. Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 5, na qual também há a comparação da irradiação horizontal e inclinada.

Tabela 5 – Irradiação horizontal e inclinada da instalação

	GLOBAL HORIZONTAL (kWh/m ² .dia)	GLOBAL INCLINADA (kWh/m ² .dia)
ABR 2020	4,945	5,25
MAI 2020	3,855	4,20
JUN 2020	2,498	2,72
JUN 2020	3,319	3,63
AGO 2020	3,800	4,05
SET 2020	4,399	4,60
OUT 2020	4,789	4,87
NOV 2020	5,743	5,71
DEZ 2020	5,128	5,08
JAN 2020	4,338	4,31
FEV 2020	5,732	5,75
MAR 2020	4,310	4,46

Fonte: Autoria própria (2022).

Com os valores de irradiação corrigidos, pode-se observar que Fevereiro, durante o verão, é o mês com maior irradiação, tendo 5,75kWh/m²/dia e Junho, durante o inverno, é o mês de menor irradiação, tendo 2,72 kWh/m²/dia. Esses dados impactam diretamente nos resultados de geração que serão mostrados nos próximos tópicos.

4.2 Índices de mérito

O índice de mérito em sistemas fotovoltaicos é composto pela determinação de valores como o PR (Performance Ratio), Y_f (Produtividade) e FC (Fator de Capacidade), valores que são utilizados para análise de desempenho nos sistemas instalados.

O PR é a taxa de desempenho do sistema fotovoltaico, e para sua obtenção é preciso realizar o cálculo de Yield, que é a produtividade do sistema em kWh/kWp. A equação para a produtividade, segundo (MARION, 2005), é a relação entre a energia gerada e a potência instalada CC, como mostra a Equação 1.

$$Y_f = \frac{\text{Energia gerada}}{\text{Potência instalada CC}} \quad (1)$$

É possível então calcular o PR (Performance Ratio) através da relação entre a produtividade dividida pela irradiação solar (H(t)) total incidente no módulo multiplicada pela irradiância de referência (G_{ref}), cujo valor considerado é de 1.000 W/m² (MARION,2005). Conforme a Equação 2.

$$PR = \frac{Y_f}{H(t)/G_{ref}} \quad (2)$$

O valor do Performance Ratio é obtido em porcentagem e, considerando um sistema que produza em perfeito estado, ou seja, com perdas comuns, conforme literaturas, fica em torno dos 80%. Está mostrado na Tabela 6 o Performance Ratio dos sistemas com seus valores mensais.

Tabela 6 – Performance Ratio mensais

Desempenho Global - PR		
	Telha	Módulo
abril 2020	0,58	0,52
maio 2020	0,79	0,69
junho 2020	0,65	0,71
julho 2020	0,78	0,75
agosto 2020	0,99	0,81
setembro 2020	0,81	0,70
outubro 2020	0,75	0,71
novembro 2020	0,90	0,75
dezembro 2020	0,88	0,70
janeiro 2021	0,89	0,71
fevereiro 2021	0,74	0,64
março 2021	0,89	0,74

Fonte: Autoria Própria (2022).

Observando a Tabela 6, pode-se observar que a telha fotovoltaica teve uma média de 80%, conforme esperado, mas, para os módulos, a média do PR ficou em 70%, o que indica que os módulos foram mais afetados por perdas do que as telhas.

Para (MARION, 2005) o Fator de Capacidade pode ser calculado pela relação entre a energia gerada dividida pelo valor obtido, ao considerar que o sistema opere em potência nominal 24 horas do dia e multiplicando pela quantidade de dias desejado. Conforme Equação 3:

$$FC = \frac{\text{Energia Gerada}}{P_{FV} * 24 * DIAS} \quad (3)$$

Na análise realizada com os sistemas de módulo e de telhas, verificou-se, então, quantos dias do mês os sistemas funcionaram, conforme mostra a Tabela 7, para que fossem utilizados depois para o cálculo do Fator de Capacidade.

Tabela 7 – Dias do mês dos sistemas funcionando.

	telha	Módulo
abril 2020	21	21
maio 2020	31	31
junho 2020	30	30
julho 2020	31	31
agosto 2020	31	31
setembro 2020	30	30
outubro 2020	31	31
novembro 2020	30	30
dezembro 2020	28	31
janeiro 2021	31	31
fevereiro 2021	26	26
março 2021	18	30

Fonte: Autoria Própria (2022).

Os valores obtidos para Fator de Capacidade, obtidos em porcentagem, estão presentes na Tabela 8.

Tabela 8 – Fator de Capacidade

Fator de Capacidade - FC		
	Telha	Módulo
abril 2020	16,41	16,41
maio 2020	13,13	13,13
junho 2020	8,50	8,50
julho 2020	11,34	11,34
agosto 2020	12,66	12,66
setembro 2020	14,38	14,38
outubro 2020	15,22	15,22
novembro 2020	17,84	17,84
dezembro 2020	15,88	15,88
janeiro 2021	13,47	13,47
fevereiro 2021	17,97	17,97
março 2021	13,94	13,94

Fonte: Autoria Própria (2022).

4.3 Geração fotovoltaica obtida pelo monitoramento online do sistema

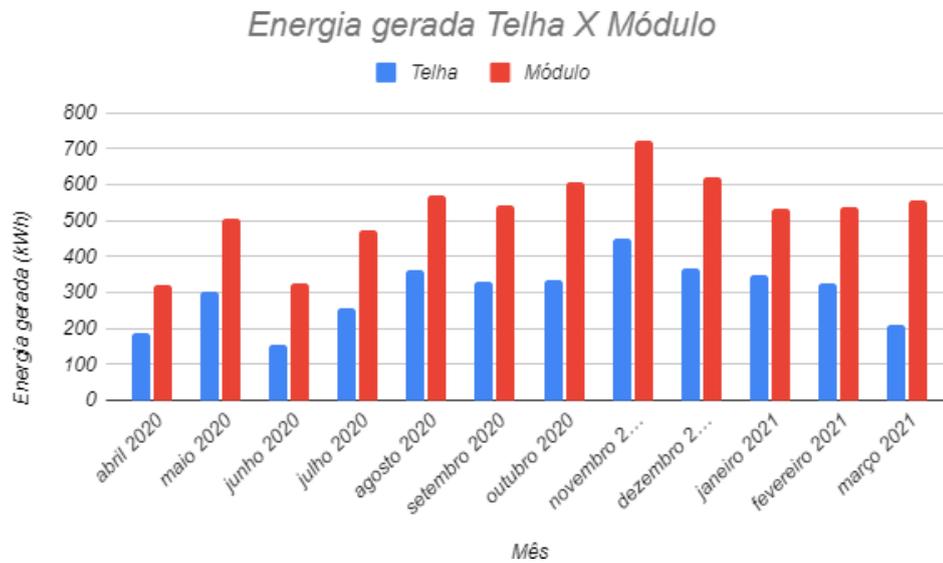
Os inversores utilizados no sistema analisado possuem uma plataforma de monitoramento online, chamada AuroraVision, que pode ser acessada por meio de login e senha. O site retorna informações de geração do sistema, além de avisos de erros, que indicam possíveis problemas com a instalação. A Tabela 9 mostra os dados de geração obtidos na plataforma online do inversor.

Tabela 9 – Geração de energia segundo dados do inversor

Energia gerada (kWh)		
	Telha	Módulo
abril 2020	187,57	323,09
maio 2020	301,93	506,46
junho 2020	156,18	326,24
julho 2020	258,74	474,64
agosto 2020	363,93	571,57
setembro 2020	330,65	541,46
outubro 2020	333,15	606,97
novembro 2020	451,07	724,46
dezembro 2020	368,37	620,36
janeiro 2021	349,4	533,89
fevereiro 2021	327,31	539,87
março 2021	211,18	556,02

Fonte: Plataforma AuroraVision

A Figura 26 mostra o gráfico que representa a geração das telhas e dos módulos, em relação aos meses de observação do sistema.

Figura 26 - Gráfico de geração da Telha e do Módulo

Fonte: Autoria própria (2022)

Segundo a Tabela 9, pode-se observar que o sistema utilizando telhas solares possui uma média anual de geração de 303,29 kWh, enquanto o sistema de módulos possui uma média anual de 527,09 kWh. A análise é anual e o mês de Novembro apresentou maior geração para ambas as tecnologias, já a menor produção foi observada no mês de Abril para os módulos e Junho para as telhas. É importante considerar, também, a Tabela 7 mostrada anteriormente, que informa quantos dias do mês o sistema realmente funcionou.

Os motivos pelos quais o sistema deixou de gerar energia em alguns períodos é desconhecido, exceto no mês de Abril, que só possui 21 dias pois foi o mês de sua instalação, o que é também uma justificativa de ser o mês com uma geração tão baixa. Levando em conta que o mês gerou menos por ter funcionado por menos tempo, o mês que menos produziu, para ambas as tecnologias, foi o de Junho, conforme esperado na análise de irradiação.

4.4 Determinação do potencial de geração fotovoltaica

Para os cálculos de geração foi utilizado a quantidade de dias que o sistema funcionou, conforme a plataforma AuroraVision. Além disso, o PR (Performance Ratio) considerado para os cálculos foi de 75%.

A potência dos sistemas fotovoltaicos são de 2,94 kWp para telhas e de 5,63 kWp para os módulos. Assim, era necessário obter a energia gerada por cada um dos

sistemas mês a mês. Para obtenção desses valores utilizou-se a Equação 4, segundo (MARION,2005):

$$E = \frac{P_{EV} \times H_{TOT} \times PR}{G} \quad (4)$$

Onde:

E: é a energia diária a ser gerada (kWh)

PFV: é a potência instalada

G: é a irradiância na condição STC

HTOT: é a irradiação média diária mensal

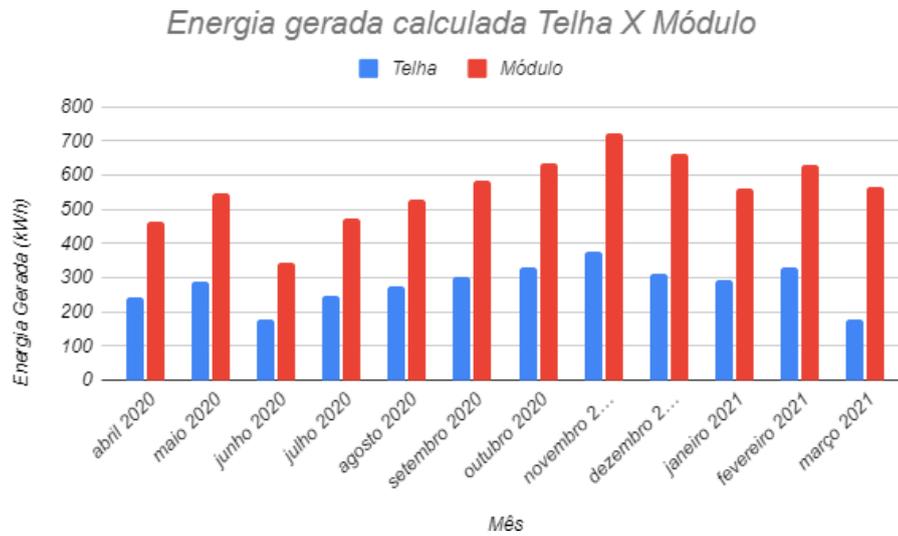
PR: é a performance ratio do SFVCR (0,7 a 0,8)

Para a obtenção dos valores mensais é necessário multiplicar o valor obtido de energia gerada pelos dias do mês, e assim obter o valor mensal. A Tabela 10 e a Figura 26 mostram os valores mensais de geração tanto para as telhas quanto para os módulos.

Tabela 10 – Geração de energia calculada para Telhas e Módulos

	Energia gerada (kWh)	
	Telha	Módulo
abril 2020	243,10	465,12
maio 2020	287,09	549,28
junho 2020	179,93	344,25
julho 2020	248,13	474,74
agosto 2020	276,84	529,66
setembro 2020	304,29	582,19
outubro 2020	332,89	636,90
novembro 2020	377,72	722,67
dezembro 2020	313,64	664,37
janeiro 2021	294,61	563,67
fevereiro 2021	329,65	630,70
março 2021	177,02	564,47

Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 27 - Gráfico de geração calculada da Telha e do Módulo

Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 27 mostra o gráfico com geração mensal dos módulos e das telhas em relação aos meses no período de um ano em que foram observadas. Os valores obtidos pela Tabela 9 representam uma geração média anual de 280,41 kWh/mês para telhas e de 560,67 kWh/mês para os módulos. Já em geração por ano, as telhas somam um total de 3364,90 kWh/ano, e os módulos um total de 6728,02 kWh/ano. Pela geração calculada, o mês de maior geração foi Fevereiro, e o mês de menor geração foi Junho, correspondendo com a expectativa da análise da irradiação.

4.5 Comparação da geração esperada pela real

Na comparação através do Performance Ratio médio mensal no período de um ano, pode-se observar que as telhas obtiveram um valor superior ao dos módulos, tendo, portanto, sofrido menos influências de perdas. Houve uma diferença de aproximadamente 10% nos valores de cada tecnologia, já que a telha teve um PR de 80% e os módulos de 70%.

Além disso, pode-se verificar a produtividade de cada um dos sistemas, observando qual tecnologia teria um melhor rendimento no período observado em comparação com a potência instalada do sistema. A Tabela 11, indica a produtividade do sistema para cada uma das tecnologias observadas, considerando os dados de geração obtidos pela plataforma de monitoramento online dos inversores.

Tabela 11 – Produtividade dos sistemas com telhas e com módulos

Produtividade (kWh/kWp)		
	Telha	Módulo
abril 2020	63,80	57,44
maio 2020	102,70	90,04
junho 2020	53,12	58,00
julho 2020	88,01	84,38
agosto 2020	123,79	101,61
setembro 2020	112,47	96,26
outubro 2020	113,32	107,91
novembro 2020	153,43	128,79
dezembro 2020	125,30	110,29
janeiro 2021	118,84	94,91
fevereiro 2021	111,33	95,98
março 2021	71,83	98,85

Fonte: Autoria própria (2022).

A produtividade média mensal das telhas é de 103,16 kWp e a dos módulos é de 93,70 kWp. Isso confirma a mesma observação realizada pelo PR, de que a produtividade das telhas é aproximadamente 10% maior que a dos módulos.

4.6 Análise financeira

O módulo Q-CELLS utilizado para análise desse trabalho, com potência de 375W, não está mais disponível no mercado para comercialização, pois houve uma evolução de potência nas tecnologias fotovoltaicas e hoje encontra-se tecnologias com potência acima de 500W. Mas para que possa ser feita uma análise financeira, utilizou-se o registro presente na empresa, onde consta um valor de 648,67 reais para o módulo Q-CELLS de 375W. Na mesma época, a telha fotovoltaica era vendida a um valor de 400 reais.

Com os valores de venda do mesmo período, ano de 2020, pode-se calcular então o valor do kW para cada tecnologia, e assim fazer a comparação do valor de forma igual. O cálculo necessário é dividir o valor do produto pela sua potência. O resultado obtido para a telha é 13,33 R\$/kW e o valor encontrado para o módulo Q-

CELLS é de 1,73 R\$/kW. Isso mostra que o kW da telha custa 7 vezes mais que o do módulo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Há no mercado a necessidade de desaceleração do uso de combustíveis fósseis devido ao Acordo de Paris assinado em 2015, onde não apenas o Brasil, mas outros 195 países se comprometeram. A utilização das tecnologias fotovoltaicas auxiliam nessa redução, uma vez que geram energia de forma limpa, e sem previsão de esgotamento, já que o sol é uma fonte inesgotável.

Além da implementação da tecnologia fotovoltaica, há também o pedido do mercado de unir a tecnologia às construções, de forma que pudesse ficar cada vez mais integrada e disfarçada nas construções atuais.

O trabalho propôs, então, fazer a comparação entre duas tecnologias fotovoltaicas aplicadas em produtos de finalidades diferentes. Buscando compreender, através da análise de um sistema real, a tecnologia que obtivesse melhores resultados técnicos e financeiros.

Pode-se observar, portanto, que a aplicação das telhas solares, em questões técnicas, torna-se viável uma vez que, devido à sua tecnologia, a produção de energia aumenta em 10% em relação ao sistema de módulo fotovoltaico utilizando a tecnologia de silício monocristalino. Além disso, a telha solar utilizando tecnologia CIGS, obteve melhores resultados quando analisadas as perdas que o sistema obteve, isso pode ser explicado na forma de montagem da tecnologia CIGS que não possui suas células em série, como nos módulos de silício monocristalino.

O modelo de módulo utilizado não está mais disponível no mercado já que a tecnologia possui uma rápida evolução de potência e eficiência. Mas pode-se fazer uma comparação financeira através dos valores obtidos na época de venda de ambos os produtos, e observou-se que o kW da telha é 7 vezes maior que o do módulo. Além disso, por possuir uma tecnologia mais barata, os módulos evoluíram e obtiveram potências maiores, enquanto as telhas permanecem com as mesmas potências.

Considerando que o valor da produtividade da telha é 1,10 vezes maior que o do módulo, observa-se que a tecnologia é inviável financeiramente, uma vez que seu ganho em geração não supera seu custo.

REFERÊNCIAS

ABENS (Associação Brasileira de Energia Solar). **Histórico**. 2021. Disponível em: <https://www.abens.org.br/historico>. Acesso em: 06 out. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10899**: Energia Solar Fotovoltaica: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16149**: Sistemas Fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ALAAEDDINA, M.; SAPUAN, S.; ZUHRI, M.; ZAINUDIN, E.; & AL – OQLA, F. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**.: 2019.

AL GORE JUNIOR. **An Inconvenient True: The planetary Emergency of Global Warning and what we can do about it**.: 2006.

AMERISOLAR. **Datasheet Módulo Amerisolar AS-6M 360-400W**. 2020. Disponível em: <http://www.weamerisolar.com/d/file/english/product/pro1/2021/0625/60683129ce405016d1bb6af37b845120.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2021.

AMERISOLAR. **Datasheet Módulo Amerisolar AS-6M 360-400W**. 2021. Disponível em: <http://www.weamerisolar.com/d/file/english/product/pro1/2021/0625/60683129ce405016d1bb6af37b845120.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2021.

ANEEL (Agência nacional de energia elétrica). **REN 482/2012**: ANEEL, 2012.

ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. 2019. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/a-aneel>. Acesso em: 06 nov. 2021.

ASTE, N.; ADHIKARI, R. S.; & TAGLIABUE, L. C. **Solar integrated roof: Electrical and thermal production for a**.: 2012.

BANCO MUNDIAL. **World Bank annual report 2016**. 2016. Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/763601475489253430/pdf/108682-WBAR-v1-PUBLIC-English-PUBDATE-9-28-2016.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2022.

B. -S. E. SOLAR. **Introdução a Sistemas de Energia Fotovoltaica**. 2018. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/LucieneJesusLana/apostila-de-fotovoltaica>. Acesso em: 11 nov. 2021.

BARROS, H. A. **Anteprojeto de um sistema fotovoltaico de 12 kWp conectados à rede**. Monografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

BODÃO, J. H. **Desenvolvimento Colaborativo de Telhas Fotovoltaicas com RCD**.: 2014.

CARNEIRO, J. **ELECTROMAGNETISMO B MÓDULOS FOTOVOLTAICOS CARACTERÍSTICAS E ASSOCIAÇÕES**. Universidade do Minho, 2010.

CRESESB. **Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito**. 2021. Disponível em:
http://www.cresesb.cepel.br/download/o_cresesb/missao_estrategia_CRESESB.pdf.
 Acesso em: 07 nov. 2021.

ECOD – Portal do instituto EcoDesenvolvimento. **Mercado aposta em telhas solares capazes de substituir painéis fotovoltaicos**. 2014. Disponível em:
<http://www.ecodesenvolvimento.org/posts/2014/mercado-aposta-em-telhas-solares-capazes-de>. Acesso em: 04 abr. 2022.

ENERGÊS. **ENERGÊS**. 2020. Disponível em: <https://energes.com.br/do-inicio-ao-fim-sistema-solar-fotovoltaico-off-grid/>. Acesso em: 09 nov. 2021.

ENGINEERING, F. S. **Energia Fotovoltaica**. 2018. Disponível em:
<http://www.fotovoltec.com.br/front/tecnologia>. Acesso em: 11 nov. 2021.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Demanda de Energia 2050**. 2016. Nota Técnica.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Demanda de Energia 2050**. 2021. Nota Técnica.

FADIGAS, E. A. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade Técnico Econômica**. Universidade de São Paulo, 2014.

FERREIRA, R.; RENSBURG, N.; & NEL, A. **A study into the efficiency of embedded solar photovoltaic cells in double roman shaped roof tiles**. Department of Mechanical Engineering Science Faculty of Engineering and the Built Environment University of Johannesburg Auckland Park, South Africa, 2014.

FRONIUS. **FRONIUS**. 2021. Disponível em: <https://www.fronius.com/pt-br/brasil/energia-solar/instaladores-e-parceiros/dados-tecnicos/todos-os-produtos/inversor/fronius-primo/fronius-primo-8-2-1>. Acesso em: 08 nov. 2021.

GŁUCHY, D.; KURZ, D.; & TRZMIEL, G. **Studying the Impact of Orientation and Roof Pitch on the Operation of Photovoltaic Roof Tiles**. 2013.

DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. **LEI Nº 14.300**. Janeiro, 2022. Disponível em:
<https://in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.300-de-6-de-janeiro-de-2022-372467821>.
 Acesso em: 07 ago. 2022.

GREENER. **GREENER ESTUDOS ESTRATÉGICOS DE MERCADO**. 2021. Disponível em:
https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms/files/12882/1631223446Estudo_Estratgico_de_Gerao_Distribuda_2021_-_Mercado_Fotovoltaico_1_semestre_v4.pdf. Acesso em: 06 nov. 2021.

HORTA, R. A.; PENNA, R. d.; & OLIVEIRA, R. D. **VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE TELHAS FOTOVOLTAICAS APLICADAS A UMA RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR EM BELO HORIZONTE-MG**. 2019.

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). **Nota Informativa Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. 2017. Disponível em:

<http://www.inpe.br/informativo/08/nota03>: <http://www.inpe.br/informativo/08/nota03>. Acesso em: 05 nov. 2021.

JHA, A. **Solar Cell Technology and Applications. Chronological History and Scientific Advancements in the Development of Solar Cell Technology.** 2009.

JOFRA, J. **Energías Renovables para todos. Solar fotovoltaica.** 2008.

KHIDER, A.; GENARO, F.; & LIMA, M. **Comparação de custos entre sistema de placas e telhas fotovoltaicas em residências unifamiliares de médio padrão.** Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2021.

LEITE, A. C. **A Sustentabilidade empresarial, social, e as fontes de energia. Boletim de inovação e sustentabilidade PUCSP.** São Paulo, 2013.

MARION, B.; ADELSTEIN, J.; BOYLE, K.; HAYDEN, H.; HAMMOND, B.; FLETCHER, T.; CANADA, B.; NARANG, D.; KIMBER, A.; MITCHELL, L.; RICH, G.; TOWNSEND, T. **Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems. In: IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition.** 2005. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1488451/>. Acesso em: 22 jun. 2022.

MARIANO, J. D. **Análise do Potencial da Geração de Energia Fotovoltaica.** Dissertação de Mestrado. Programa de pós graduação em engenharia civil, 2017.

MIASOLÉ. **Datasheet módulo Miasolé Flex Series - 03N.** 2019. Disponível em: https://miasole.com/wp-content/uploads/2019/01/flex-03n_2.6m_datasheet_5.pdf Acesso em: 12 nov. 2021.

MITIN, V.; & KOKH, A. **Polysilicon Market Development and Production Technologies.** 2017.

MME/EPE. **Balanco Energético Nacional.** 2015. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioSintese.aspx?anoColeta=2016&anoFimColeta=> Acesso em: 02 nov. 2021.

MORAES, C. **Eletrônica de Potência.** 2020. Disponível em: <https://eletronicadepotencia.com/celula-fotovoltaica/>. Acesso em: 21 nov. 2021.

NASCIMENTO, C. A. **Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica.** Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2004.

NICCOLÒ, A.; RAJENDRA, S.; & LAVINIA, C. **Solar integrated roof: Electrical and thermal production for a building renovation.** Department of Building Environment Science & Technology, Politecnico di Milano, Via Bonardi 9, Milano 20133, Italy. 2012.

NREL. **Best Research-Cell Efficiency Chart.** 2020. Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. Acesso em: 10 nov. 2021.

OLIVEIRA, A. M.; MARIO, M. C.; & PACHECO, M. T. **Fontes renováveis de energia elétrica: evolução da oferta de energia.** 2020. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BASR/article/view/23315/18748>. Acesso em: 10 nov. 2021.

PALZ, W. **Energia solar e fontes alternativas**. Editora Hemus. Curitiba, 2002.

PANCHENKO, V. A. **Solar Roof Panels for Electric and Thermal Generation**. Russian University of Transport, Moscow, Russia., 2018.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; COSTA, R. S.; GONÇALVES, A. R.; DE LIMA, F. J., RÜNTER, R., et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar 2 edição INPE**. 2017. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>. Acesso em: 05 nov. 2021.

PICOLLI, L. **Desenvolvimento de Metodologia e Bancada para Ensaio de Exposição Solar Prolongada de Módulos Fotovoltaicos de Filmes Finos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre., 2015.

PINHEIRO, R. F. **Implantação de células solares fotovoltaicas em superfícies onduladas e planas: Desenvolvimento de protótipo e projeto para aplicação no campus da UFRN**. Programa de pós-graduação em energia elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

PINHO, J. T.; & GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia Fotovoltaica**. 2014.

REWATT. **REWATT, Cella Solare**. 2021. Disponível em: <http://www.rewatt.it/impianti/definizioni/13/36.html>. Acesso em: 11 nov. 2021.

SCOLARI, B. S. **Panorama da Inserção da Geração Fotovoltaica Conectada à rede**. Dissertação (Mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná-UTFPR, 2019.

SILVA, M. C. **SILVA, M. C.** Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 2008.

SILVA, R. C. **Impactos da geração distribuída nas redes de distribuição de energia elétrica**. UNICESUMAR, Maringá, 2017.

SOBRINHO, L. C. **Desenvolvimentos e pesquisas na terceira geração de células fotovoltaicas**. Rio de Janeiro, 2016.

TIEPOLO, G. M. **Estudo do potencial de geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no estado do Paraná**. 2015.

TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, E. B.; URBANETZ, J.; PEREIRA, S. V.; GONÇALVES, A. R.; & LIMA, F. J., et al. **Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná INPE**. Curitiba, 2017.

TOLMASQUIM, M. T. **ENERGIA RENOVÁVEL Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro, 2016.

TONIN, F. S. **Caracterização de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica de Curitiba**. 2017.

URBANETZ, J. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbanas: Sua Influência na Qualidade da Energia Elétrica e Análise dos Parâmetros que possam Afetar a Conectividade**. 2010. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/0B9uCAMDD9bvbTGIEOUNjX3MwV2c/view?resourcekey=0-ib4vae7Wfsqvl7UUa5l71Q>. Acesso em: 05 nov. 2021.

VIAN, Â.; TAHAN, C. M.; AGUILAR, G. J.; GOUVEA, M. R.; & GEMIGNANI, M. M. **Energia Solar Fundamentos Tecnologias e Aplicações.** São Paulo, 2021.

VILLALVA, M. G.; & GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica Conceitos e Aplicações.** São Paulo, 2012.

ZILLES, R.; MACÊDO, W. N.; GALHARDO, M. A.; & OLIVEIRA, S. H. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica.** São Paulo, 2012.