



MAURO DE OLIVEIRA PACHECO

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA
UTILIZANDO TELHAS FOTOVOLTAICAS EM
RESIDÊNCIAS**

**LAVRAS – MG
2021**

MAURO DE OLIVEIRA PACHECO

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA UTILIZANDO TELHAS
FOTOVOLTAICAS EM RESIDÊNCIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte das
exigências do Curso de Engenharia de Controle e
Automação, para a obtenção do título de
Bacharel.

Prof.Dr. Fábio Domingues de Jesus
Orientador

**LAVRAS – MG
2021**

MAURO DE OLIVEIRA PACHECO

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA UTILIZANDO TELHAS
FOTOVOLTAICAS EM RESIDÊNCIAS**

**TECHNICAL AND ECONOMIC FEASIBILITY ANALYSIS USING
PHOTOVOLTAIC TILES IN RESIDENCES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte das
exigências do Curso de Engenharia de Controle e
Automação, para a obtenção do título de
Bacharel.

APROVADA em 12 de Novembro de 2021.

Prof. Dr. Fábio Domingues de Jesus UFLA
Prof.Dr. Paulo Vitor Grillo de Souza
Bel. Gustavo Lorenzon Tempesta

Prof.Dr. Fábio Domingues de Jesus
Orientador

**LAVRAS – MG
2021**

Dedico este trabalho a minha mãe Marta, a mulher mais doce, guerreira, e de fé que este mundo teve o prazer de conhecer, mulher que me ensinou a persistir, batalhar e acreditar nos meus sonhos, mesmo sem sua presença física, me orienta, me conforta e ilumina os meus passos e decisões. Vou seguir lutando pelos meus ideais de cabeça erguida, sempre feliz, como a senhora, na certeza de que um dia poderei ter de novo o seu abraço confortante e o seu amor infinito

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai José Mauro, por todo o apoio incondicional em minha trajetória acadêmica, sem ele, nada seria possível, é o meu pilar, e meu exemplo de vida.

Aos meus amados filhos Marta e Heitor, que são minha motivação diária, é por vocês que acordo cedo e batalho todos os dias.

Ao meu orientador Prof. Fábio, pela sua atenção dedicada, e por todo o auxílio prestado durante o desenvolvimento deste presente trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise técnica e econômica de um projeto fotovoltaico básico On-Grid, utilizando telhas fotovoltaicas para uma residência de médio porte com localização no município de Lavras – Minas Gerais. Inicialmente será realizada uma revisão bibliográfica e identificação do tema a ser abordado, afim de se verificar a aplicação desta nova tecnologia. A análise será feita através da comparação de custos do sistema fotovoltaico convencional com o sistema utilizando telhas fotovoltaicas e, por fim, apresentar a viabilidade desta nova tecnologia aos usuários.

Palavras-chave: Sistema Fotovoltaico.On-Grid. Telhas Fotovoltaicas. Análise técnica.

ABSTRACT

This work aims to perform a technical and economic analysis of a basic photovoltaic project using photovoltaic tiles for a medium-sized residence located in the municipality of Lavras – Minas Gerais. Initially, a literature review and identification of the topic to be addressed will be carried out in order to verify the application of this new technology. The analysis will be done by comparing the costs of the conventional photovoltaic system with the system using photovoltaic tiles and, finally, present the feasibility of this new technology to users.

Keywords: Photovoltaic System. On-Grid. Photovoltaic Tiles. Technical Analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema fotovoltaico convencional x Sistema fotovoltaico com a telha solar	14
Figura 2 - Variação da intensidade de radiação com a latitude.	19
Figura 3 - Posição e inclinação do eixo terrestre em cada estação do ano.	19
Figura 4 - Crescimento da Energia Solar no Brasil.	21
Figura 5 - Representação de uma célula fotovoltaica.	22
Figura 6 - Célula de silício monocristalina.	23
Figura 7 - Célula de silício policristalino.	24
Figura 8 - Célula de silício amorfo.	24
Figura 9 - Curva (VxI) de uma célula fotovoltaica.	25
Figura 10 - Curva (VxI) de duas células associadas em paralelo.	26
Figura 11 - Curva (VxI) de duas células conectadas em série.	27
Figura 12 - Inversores solares de diferentes marcas.	28
Figura 13 - Esquema simplificado de um SFCR.	29
Figura 14 - Gráfico da Radiação Solar em Lavras-MG.	31
Figura 15- Gráfico da temperatura e precipitação da cidade de Lavras-MG	32
Figura 16 - Pannel Solar CnadianKuMax 360 W.	35
Figura 17 - String Box.	37
Figura 18 - Telha fotovoltaica da marca L8 Energy.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fontes renováveis x Fontes não renováveis.	15
Tabela 2 - Estatísticas da Estrela Solar.....	17
Tabela 3 - Eficiência das células fotovoltaicas por material.	23
Tabela 4 - Irradiação Solar Média/Dia em Lavras-MG.....	31
Tabela 5 - Consumo de energia da residência.	33
Tabela 6 - Custo do sistema utilizando painel fotovoltaico.	40
Tabela 7 - Custo do sistema utilizando telha solar.	40
Tabela 8 - Fluxo de caixa anual em função do reajuste tarifário (Convencional).....	45
Tabela 9 - VPL usando TMA equivalente a poupança 2021(Convencional).....	46
Tabela 10 - Fluxo de caixa anual em função do reajuste tarifário (Telha).....	47
Tabela 11 - VPL usando TMA equivalente a poupança 2021 (Telha).....	48

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

VPL	Valor Presente Líquido
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
a-Si	Silício Amorfo
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio S. Brito
C-Si	Silício Cristalino
FDI	Fator de Dimensionamento do Inversor
HSP	Horas de Sol Pleno
m-Si	Silício Monocristalino
p-Si	Silício Policristalino
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
Payback	Retorno
kWp	Quilo-Watt-pico
kW	Quilo-Watt
kWh	Quilo-Watt-hora
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
GaAs	Arsenato de Gálio
Ge	Germanio
CdTe	Telureto de Cadmio
Si	Silício
V _{mp}	Tensão de Máxima Potência
I _{mp}	Corrente de Máxima Potência
V _{oc}	Tensão de Circuito Aberto
I _{sc}	Corrente de Circuito Aberto

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Fontes de Energia Renováveis e Fontes de Energia não Renováveis.....	15
2.2 Energia Solar	16
2.2.1 Radiação Solar	17
2.2.2 Energia Solar Fotovoltaica	19
2.3 Célula Fotovoltaica	21
2.4 Propriedades Elétricas da Telha Fotovoltaica	24
2.5 Inversores de Frequência (On-Grid)	27
2.6 Normas ANEEL	29
3. METODOLOGIA.....	30
4. DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	31
4.1 Projeto básico de sistema fotovoltaico em uma residência de médio porte.....	32
4.1.1 Cálculo do Número de Painéis Fotovoltaicos Necessários	33
4.1.2 Cálculo do telhado para o sistema convencional	36
4.1.3 Dimensionamento do Inversor de Frequência	36
4.1.4 String Box.....	37
4.2 Projeto básico em uma residência de médio porte com Telhas Fotovoltaicas	38
4.2.1 Cálculo do número de telhas fotovoltaicas necessárias.....	38
4.2.2 Cálculo do número de telhas sem a tecnologia solar	39
5 LEVANTAMENTO DE CUSTO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	40
5.1 Custo do sistema fotovoltaico convencional	40
5.2 Custo do sistema utilizando a telha fotovoltaica.....	40
6 LEVANTAMENTO DOS BENEFÍCIOS.....	41
6.1 Benefícios do sistema solar fotovoltaico convencional	41
6.2 Benefícios do sistema solar utilizando a telha fotovoltaica	42
7 ANÁLISE ECONÔMICA.....	42
7.1 Cálculo do Payback, VPL e TIR dos sistemas fotovoltaicos.....	44
7.2 – Cálculo do VPL, TIR E Paback para o sistema convencional	44

7.3 Cálculo do VPL, TIR e Payback para o sistema utilizando a telha solar.....	47
8 CONCLUSÃO.....	48
REFERÊNCIAS	50
ANEXO 1.....	52
ANEXO 2.....	53
ANEXO 3.....	54

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento em larga escala da população mundial, aumento das tecnologias digitais da indústria 4.0 e, conseqüentemente, o aumento da produção industrial, a demanda por energia elétrica está crescendo cada vez mais. Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2007), “estima-se que fontes de energia tradicionalmente usadas como energia fóssil, nuclear e hidráulica irão atingir o seu limite máximo em 20 TW em geração de energia”. Desse modo, avalia-se que o restante da demanda de energia elétrica será atendido por fontes de energia renováveis. E, na atualidade, também tem-se visto comumente a preocupação de governos e empresas com os impactos ambientais causados por essa alta demanda de energia elétrica, preocupação que tem sido pauta de várias reuniões e debates internacionais no intuito de promover e mobilizar novas políticas afim de reduzir de forma significativa os impactos ambientais oriundos dessa alta demanda de energia.

De acordo com o Governo Federal Brasileiro (GOVBR, 2020), “o Brasil tem atualmente 83% de sua matriz elétrica originada de fontes renováveis, a participação é liderada pela hidrelétrica (63,8%), seguida da eólica (9,3%), biomassa e biogás (8,9%) e solar (1,4%). Ademais, visando não só contribuir com questões ambientais e aspectos tecnológicos, mas também com questões socioeconômicas, geração de renda e emprego para a população, a energia solar fotovoltaica está crescendo exponencialmente no Brasil, energia cujo o estudo é o assunto do presente trabalho.

A disponibilidade de energia elétrica brasileira é bastante desigual. Uma parte da população vive em áreas onde o abastecimento de eletricidade é precário, onde o atendimento por meio da extensão da rede convencional é impossível por motivos naturais e/ou financeiros, como distância, dificuldade de acesso, localização dentro de reservas ambientais, áreas insulares ou montanhosas e clima rigoroso (BARBOSA, 2016). Estas comunidades, geralmente estão localizadas em áreas rurais e remotas do país, áreas onde não existem empecilhos para a instalação da energia solar fotovoltaica.

De acordo com Pinho (2009), existem cerca de 300 mil comunidades isoladas, que não tem acesso a energia elétrica na Amazônia Legal, fator que dificulta adequadas condições de vida, desenvolvimento regional, social e econômico, bem como a prestação de serviços essenciais, tais como, saúde, comunicação e até mesmo entretenimento, em uma área composta por nove estados, que representa aproximadamente 61% do território nacional. Neste contexto, temos claramente a energia solar fotovoltaica como uma possível solução

para ofertar energia elétrica a regiões sem acesso, agregada a contribuição aos impactos sociais e ambientais.

As aplicações de sistemas fotovoltaicos no Brasil vem crescendo a cada dia, devido ao seu maior acesso de crédito, menores preços dos equipamentos, aumento constante do custo de energia, e também por consciência ao meio ambiente. Contudo, os sistemas fotovoltaicos precisam de muito espaço para geração de energia, e para residências em perímetro urbano, isso torna um inconveniente, tanto por falta de espaço, como também por estética arquitetônica. Assim com o avanço das aplicações de sistemas fotovoltaicos, surge a aplicação com telhas fotovoltaicas, que ainda é pouco conhecida no Brasil. Trata-se de uma telha comum que pode ser fabricada em vários modelos e com diferentes materiais, nela está integrada a tecnologia fotovoltaica, semelhante aos painéis convencionais. A telha solar é projetada para suportar diversos ambientes, rurais, residenciais ou industriais, sendo uma aposta para a tecnologia do futuro, e, por este motivo, vem ganhando notoriedade no país.

A telha solar possui fácil instalação comparada ao painel solar convencional, e além de gerar energia elétrica, tem a função de fazer parte da cobertura do imóvel, contribuindo assim para a estética da residência e pela economia de espaço, questão que é reprovada utilizando o painel solar convencional.

Neste contexto, este trabalho tem o objetivo de realizar uma análise técnica e econômica de telhas fotovoltaicas, material que é novidade no Brasil e começou a ser comercializado no primeiro semestre de 2021. Até então, nas residências, são utilizados apenas painéis fotovoltaicos convencionais, e deste modo, com esta nova tecnologia, surge a necessidade de realizar um levantamento básico das vantagens e desvantagens, como também análises de viabilidade econômica para as novas aplicações utilizando as telhas fotovoltaicas.

Figura 1 - Sistema fotovoltaico convencional x Sistema fotovoltaico com a telha solar



Fonte: L8 Energy (2021)

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fontes de Energia Renováveis e Fontes de Energia não Renováveis

Fontes de energia renováveis são aquelas que se originam de recursos naturais como sol, vento, água, biomassa, maré, sempre produzindo uma energia limpa e sustentável. Assim, são recursos energéticos que podem regenerar-se em um pequeno espaço de tempo, considerados, portanto, fontes inesgotáveis. O uso de fontes energéticas ampliou a capacidade de produção da humanidade, principalmente no contexto da revolução industrial, período em que o uso de tecnologias avançadas e larga escala de maquinários em uso, agregada ao aumento elevado da população mundial, resultava em cada vez mais um aumento da demanda por energia elétrica. Demanda cuja principal fonte de energia utilizada neste contexto era o carvão mineral, considerado um combustível fóssil, e desde então, a matriz energética do mundo é dependente em sua maioria desse tipo de combustível, considerado energia convencional ou não renovável.

Ao contrário de fontes renováveis, as fontes de energias não renováveis são recursos que não se regeneram, portanto são consideradas esgotáveis. A produção de fontes não renováveis gera altos impactos ambientais negativos, a queima de carvão mineral, por exemplo, libera a atmosfera gases poluentes, contribuindo de forma considerável ao aquecimento global. A Tabela 1 exhibe exemplos de fontes de energia renováveis e fontes de energia não renováveis.

Tabela 1 - Fontes renováveis x Fontes não renováveis.

Fontes de Energia Renováveis (Energia derivada direta ou indiretamente do sol)	Fontes de Energia não Renováveis (Energia derivada de combustíveis fósseis)
Solar	Carvão
Biomassa	Petróleo
Eólica	Gás Natural
Biocombustíveis	Areias asfálticas
Energia Derivada da gravidade	Energia derivada da fissão de átomos
Das marés	Nuclear (urânio)
Hidrelétrica	-
Energia do Interior da Terra	-
Geotérmica	-

Fonte: Do autor (2020)

Cerca de quase 90% de todo o consumo global de energia vem de recursos não renováveis e isso é um problema, pois os impactos ambientais são muitas vezes irreversíveis e, a maioria dessas fontes, são compostas de emissores de gases de efeito estufa, além de que os recursos não renováveis tendem a serem esgotados. Em contra partida, os recursos renováveis incluindo biomassa, energia hidrelétrica, biocombustíveis, geotérmica, eólica e energia solar representam apenas 11% do consumo global de energia e espera-se que correspondam apenas a 15% até 2040 (U.S. Energy Information Administration, International Energy Outlook 2013).

No Brasil, as usinas hidrelétricas são responsáveis pela grande maioria do consumo de energia elétrica, no entanto, tal produção vem trazendo riscos a população e ferindo o ecossistema com alagamentos próximos aos rios. Diante não apenas dos impactos ao meio ambiente, mas também visando economia financeira, sendo que a matriz de energia renovável traz benefícios não só ambientais, mas também econômicos e sociais, este trabalho será direcionado para o estudo da energia solar fotovoltaica, cuja utilização é favorável ao Brasil diante de sua localização em relação a radiação solar e também pela atual legislação em relação a compensação de energia elétrica.

2.2 Energia Solar

A energia solar, como o próprio nome designa, é a energia cuja fonte é oriunda dos raios solares, e sua captação se dá por meios de várias tecnologias como por exemplo, aquecedores solares, usinas heliotérmicas e células fotovoltaicas.

A energia obtida do Sol é gerada em seu núcleo, que como ondas eletromagnéticas (fótons), chega à superfície da Terra de maneira direta ou difusa. No Sol, a temperatura (15.000.000° C) e a pressão (340 bilhões de vezes a pressão atmosférica da Terra ao nível do mar) são tão intensas que ocorrem reações nucleares. Estas reações transformam quatro prótons ou núcleos de átomos de hidrogênio em uma partícula alfa, que é o núcleo de um átomo de hélio. A partícula alfa é aproximadamente 0,7% menos massiva do que quatro prótons. A diferença em massa é expelida como energia e carregada até a superfície do Sol, através de um processo conhecido como convecção, e é liberada em forma de luz e calor (UFRGS, 1997). O Sol, estrela central do sistema solar, provê para a atmosfera terrestre aproximadamente $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia todos os anos, considerando o mesmo período, esse valor corresponde a quase 10 mil vezes o consumo mundial de energia, dados que levam a concluir que, além de ser uma fonte essencial para a vida terrestre, é uma fonte energética inesgotável com um enorme potencial de uso para produção de energia elétrica ou térmica

através de sistemas de captação e conversão de energia. A tabela 2 exibe as principais características da estrela solar.

Tabela 2 - Estatísticas da Estrela Solar.

Massa (Kg)	1,989x10 ³⁰
Massa (Terra = 1)	332830
Raio equatorial (Km)	695000
Raio equatorial (Terra = 1)	108,97
Densidade média (Gm / cm ³)	1,410
Período de rotação (dias)	25-36*
Velocidade de escape (km/ s)	618,02
Luminosidade (ergs/s)	3,827x10 ³³
Magnitude (Vo)	-26,8
Temperatura média a superfície	6000 C°
Idade (bilhões de anos)	4,5
Principal composição química	
Hidrogênio	92,1%
Hélio	7,8%
Oxigênio	0,061%
Carbono	0,030%
Nitrogênio	0,0084%
Neon	0,0076%
Ferro	0,0037%
Silício	0,0031%
Magnésio	0,0024%
Enxofre	0,0015%
Restantes	0,0015%

Fonte: UFRGS (2007)

Uma das possíveis maneiras de realizar a conversão da energia solar para energia elétrica consiste na utilização do chamado efeito fotovoltaico, técnica possível através da utilização de dispositivos conhecidos como células fotovoltaicas, dispositivos optoeletrônicos que convertem diretamente a energia solar em energia elétrica, sendo dispositivos basicamente compostos de materiais semicondutores, tendo o Silício (Si) como material mais utilizado.

2.2.1 Radiação Solar

Como lembra Vignola (2012), a radiação solar que alveja o cume da atmosfera terrestre vem de uma região do sol denominada fotosfera e possui uma temperatura superficial

na casa dos 5.778 K que, convertendo para graus Celsius, fica na ordem de 5.504,85 C°. A distância da fotosfera à Terra é cerca de 149.598.106 km. Quando a potência da energia radiante minimiza, na proporção do quadrado da distância da fonte, a temperatura da Terra se mantém mais baixa que a do sol, tendo uma temperatura média de aproximadamente 287 K (14 C° OU 57 F°).

Segundo a ANEEL (2016), “a disponibilidade de radiação solar, também denominada energia total incidente sobre a superfície terrestre, depende além das condições atmosféricas, também da latitude, estações do ano, hora do dia e condições do céu”. Essas influências se definem de tal maneira que, como aponta Lima (2009):

Latitude: a proporção que a latitude aumenta, a área da superfície terrestre que a mesma radiação atinge é maior, resultando em uma menor concentração, conforme a Figura 2.

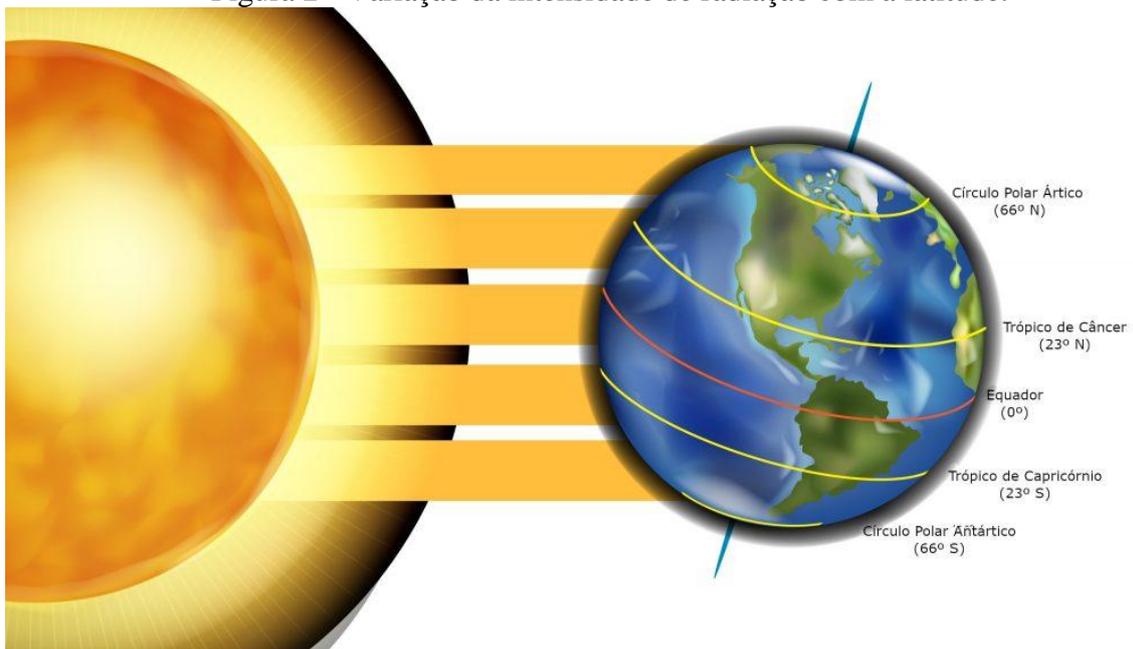
Estações do ano: o movimento de translação da Terra em torno do sol, responsável pelas estações do ano, descreve uma órbita elíptica plana. O eixo de rotação da Terra em volta de si mesmo não coincide com o eixo da elipse, possuindo uma defasagem de 23° 27', como indica a Figura 3. Dessa forma, por um período do ano, o planeta expõe mais o hemisfério Sul a luz solar e por outro período ele expõe mais o hemisfério Norte.

Hora do dia: a cada hora do dia, os raios solares atingem uma dada superfície sob diferentes ângulos.

Condições do céu: as quantidades de nuvens que recobrem o céu interferem na radiação que tinge a superfície terrestre.

Condições atmosféricas: dias enfumados, nublados ou poluídos alteram a radiação disponível. Porém, segundo Hudson Markell (1985), esse fator exerce reduzida influência porque a radiação que atinge a superfície terrestre é formada por radiação direta e difusa. Segundo o autor citado acima, em dias claros, 10% da radiação que chega à superfície terrestre é difusa. Contudo, em dias nublados, a radiação é, frequentemente, toda radiação disponível.

Figura 2 - Variação da intensidade de radiação com a latitude.



Fonte: INFOESCOLA(2020)

Figura 3 - Posição e inclinação do eixo terrestre em cada estação do ano.



Fonte: EvolucGeo(2020)

2.2.2 Energia Solar Fotovoltaica

A conversão direta da radiação solar em energia elétrica utilizando células fotovoltaicas é chamada Energia Solar Fotovoltaica, o termo “fotovoltaica” vem do grego (Phos) que significa “luz” e (volt), a unidade de força eletromotriz que por sua vez vem do nome do físico italiano Alessandro Volta, o inventor da pilha. A conversão de energia solar

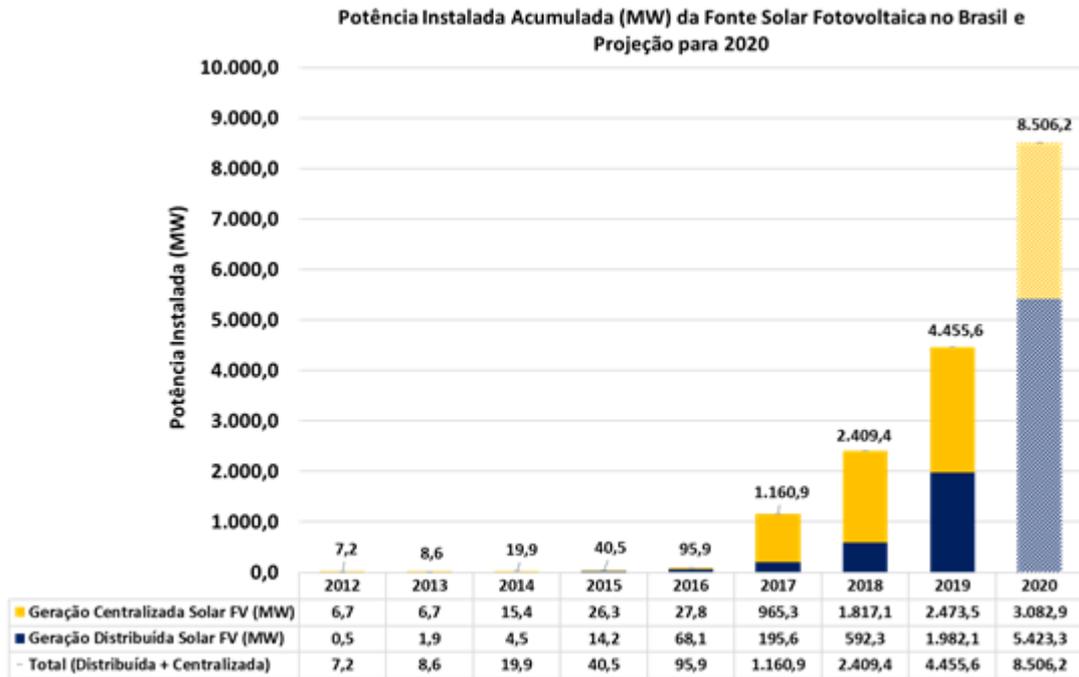
em energia elétrica foi verificada pela primeira vez por um físico francês chamado Alexandre-Edmond Becquerel. Edmond Becquerel estudava o espectro solar, magnetismo, eletricidade, óptica, e em 1839 constatou uma diferença de potencial nos extremos de um material com estrutura semicondutora ao ser exposto a luz. Nascimento (2004) afirma que “uma célula fotovoltaica não armazena energia elétrica. Apenas mantém um fluxo de elétrons num circuito elétrico enquanto houver incidência de luz sobre ela. Este fenômeno é denominado “Efeito Fotovoltaico”.

Desse modo, um agregado de células conectadas umas às outras constituem o módulo fotovoltaico.

Um conjunto de células associadas em série paralelo forma um painel fotovoltaico, e com outros dispositivos como acumuladores, conversores e inversores constituem um sistema fotovoltaico de geração de energia elétrica. A confiabilidade desse sistema é uma das características mais importantes. Porque não possui partes móveis, baixo nível de complexidade, não se degrada com os efeitos naturais, como: ventos fortes, descargas atmosféricas e além de tudo apresenta alto índice de disponibilidade. Para um sistema fotovoltaico utilizado como complemento de energia elétrica em relação a convencional, uma das vantagens é que caso ocorra um defeito, este se limita à instalação específica, não se estendendo às demais. (NASCIMENTO, 2004)

Segundo Projeções da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, a fonte solar fotovoltaica gerou mais de 120 mil novos empregos aos brasileiros em 2020, espalhados por todas as regiões do País. Segundo a avaliação da entidade, os novos investimentos privados ultrapassaram a cifra de R\$ 19,7 bilhões este ano, somando os segmentos de geração distribuída, “sistemas em telhados e fachadas de edifícios” e centralizada em “grandes usinas solares” (ABSOLAR, 2020). A Figura 4 apresenta um gráfico do crescimento da energia solar no Brasil desde o ano de 2012 e a projeção para o encerramento de 2020.

Figura 4 - Crescimento da Energia Solar no Brasil.



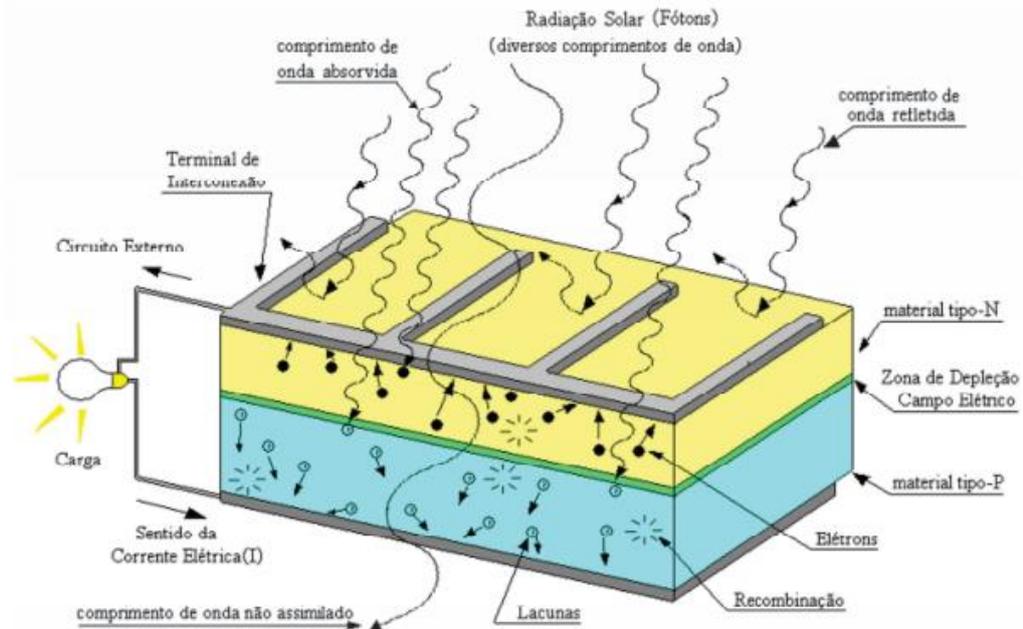
Fonte: ABSOLAR (2020)

2.3 Célula Fotovoltaica

Células fotovoltaicas, ou também chamada de células solares, são dispositivos semicondutores de estado sólido que convertem a luz em energia elétrica de forma direta. Esta operação é basicamente baseada na habilidade de conversão desses materiais semicondutores utilizando o efeito fotovoltaico. Os materiais semicondutores tem como característica a presença de duas bandas energéticas, uma é conhecida como banda de valência e a outra é chamada de banda de condução. Na banda de valência, é encontrada a presença de elétrons e, na banda de condução, não existe presença de elétrons. Na produção de células solares podem ser utilizados semicondutores como o Arsenato de Gálio (GaAs), Germânio (Ge), o Telureto de Cádmio (CdTe), mas o mais utilizado é o Silício (Si), por ser um material com propriedades físicas adequadas para fabricação de dispositivos com boas características elétricas. Os átomos do Silício são caracterizados por possuírem 4 elétrons que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina. Porém, o cristal de Silício puro, por não ter elétrons livres, é considerado um mal condutor elétrico e por isso, se faz necessário o processo de “dopagem” que nada mais é do que a adição de outros elementos. Na dopagem do Silício utilizando o elemento Fósforo, obtém-se material com portadores de carga negativa, materiais com elétrons livres denominados (Silício tipo N), de forma análoga, e realizando a dopagem

do Silício com Boro, obtém-se material com características contrárias, ou seja, materiais com falta de elétrons denominados (Silício tipo P).

Figura 5 - Representação de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Ghensev(2006)

Uma célula fotovoltaica é composta de uma camada grossa de Silício tipo P e outra fina do Silício tipo N.

Separadamente, ambas as capas são eletricamente neutras. Mas ao serem unidas, na região P-N, forma-se um campo elétrico devido aos elétrons livres do silício tipo N que ocupam os vazios da estrutura do silício tipo P. Ao incidir luz sobre a célula fotovoltaica, os fótons chocam-se com outros elétrons da estrutura do silício fornecendo-lhes energia e transformando-os em condutores. Devido ao campo elétrico gerado pela junção P-N, os elétrons são orientados e fluem da camada “P” para a camada “N”. Por meio de um condutor externo, ligando a camada negativa à positiva, gera-se um fluxo de elétrons (corrente elétrica). Enquanto a luz incidir na célula se manterá este fluxo.(NASCIMENTO, 2004).

As células fotovoltaicas de Silício são classificadas de acordo com sua estrutura molecular, que são: Silício Amorfo; Silício Policristalino; Silício Monocristalino. As células monocristalinas feitas a partir de um único cristal de silício ultrapuro são aproximadamente 3% mais eficientes que as células policristalinas. O silício monocristalino também tem um preço maior comparado ao policristalino, e isso se deve ao fato de o processo de fabricação das células ser mais rigoroso. Quanto ao silício amorfo, são os que apresentam custo mais reduzido, porém em contrapartida, sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade

não ultrapassa 10%. A Tabela 3 apresenta a comparação da eficiência de células fotovoltaicas policristalinas, monocristalinas e também de silício amorfo.

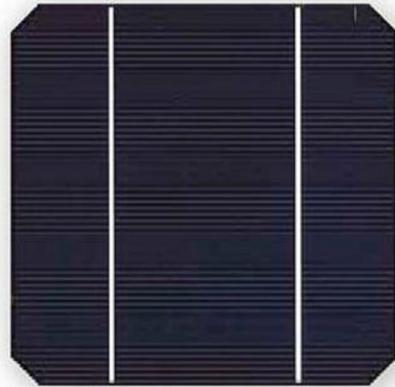
Tabela 3 - Eficiência das células fotovoltaicas por material.

Material	Máxima teórica	Em laboratório
Silício Mono	24,7%	18%
Silício Poli	19,8%	15%
Silício Amorfo	15%	10,5%

Fonte: GreenPro(2017)

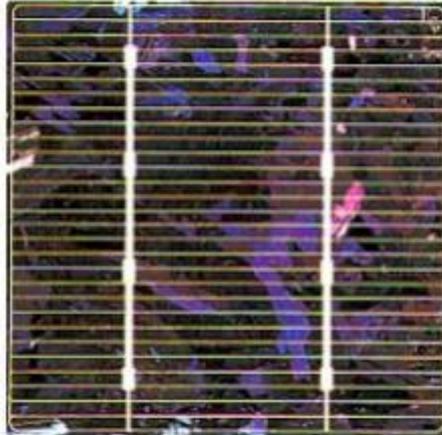
As células de silício monocristalinas são obtidas a partir de barras cilíndricas de silício monocristalino, produzidas em fornos especiais, sendo obtidas por corte das barras em forma de pastilhas finas (0,4 – 0,5 mm de espessura). As células de silício policristalino são produzidas através de blocos de silício obtidos por fusão de silício puro em moldes especiais. As células de silício amorfo são obtidas por meio da deposição de camadas finas de silício sobre superfícies de vidro ou metal. A figura 6, 7 e 8 exibem imagens das células de silício monocristalino, silício policristalino e silício amorfo, respectivamente.

Figura 6 - Célula de silício monocristalina.



Fonte: Cepel (2016)

Figura 7 - Célula de silício policristalino.



Fonte: Cepel (2016)

Figura 8 - Célula de silício amorfo.



Fonte: Cepel (2016)

2.4 Propriedades Elétricas da Telha Fotovoltaica

As telhas solares ou telhas fotovoltaicas tem o princípio de funcionamento semelhante aos painéis solares convencionais, tendo sua única diferença na montagem, já que a telha solar faz parte da construção do telhado e são projetadas em conjunto com a nova cobertura.

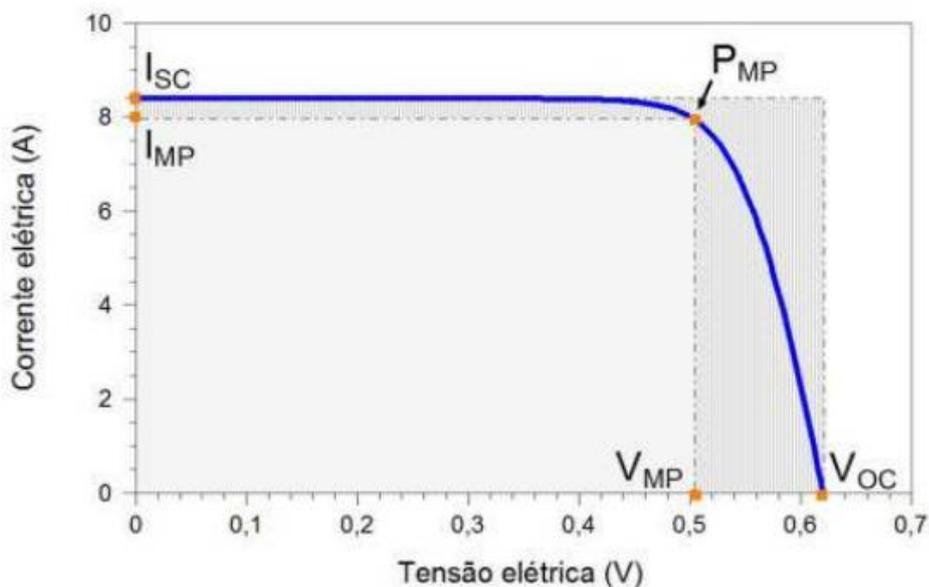
As telhas fotovoltaicas são compostas por células fotovoltaicas que são responsáveis pela geração de energia elétrica em corrente contínua (CC), isso quando está exposta a radiação solar. Abaixo tem-se uma lista de parâmetros que juntos compõem as características elétricas da telha solar

- Potência elétrica (P): é o produto da corrente elétrica (I) pela tensão (V). O ponto em que a corrente (I) é nula e tensão (V) é máxima é conhecido como tensão de circuito aberto (V_{oc}). O ponto em que a tensão (V) é nula e a corrente (I) é máxima é

conhecido como corrente de curto circuito (I_{sc}). Em ambos os casos temos uma potência nula.

- Potência de pico (W_p): é a potência produzida pela telha em uma situação de exposição solar a 1000 W/m^2 e temperatura de 25 C° . É importante lembrar que o aumento da radiação solar incidente na telha fotovoltaica aumenta a corrente produzida e, também, sua temperatura, e isso irá influenciar no rendimento, pois com o aumento da temperatura a tensão diminui e a corrente tende a sofrer pequenas variações.
- Tensão de máxima potência (V_{mp}) e corrente de máxima potência (I_{mp}): existe um ponto da curva em que a potência é máxima (P_{max}) e, conseqüentemente, existe corrente e uma tensão para qual a potência máxima é gerada. Esses são os parâmetros utilizados pelos fabricantes de telhas solares, além da tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de curto circuito (I_{sc}) e eficiência (η). Na Figura 9 tem-se o gráfico da curva (Tensão x Corrente) aplicada em uma célula fotovoltaica.

Figura 9 - Curva (VxI) de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Biosf.Enciclopédia(2017)

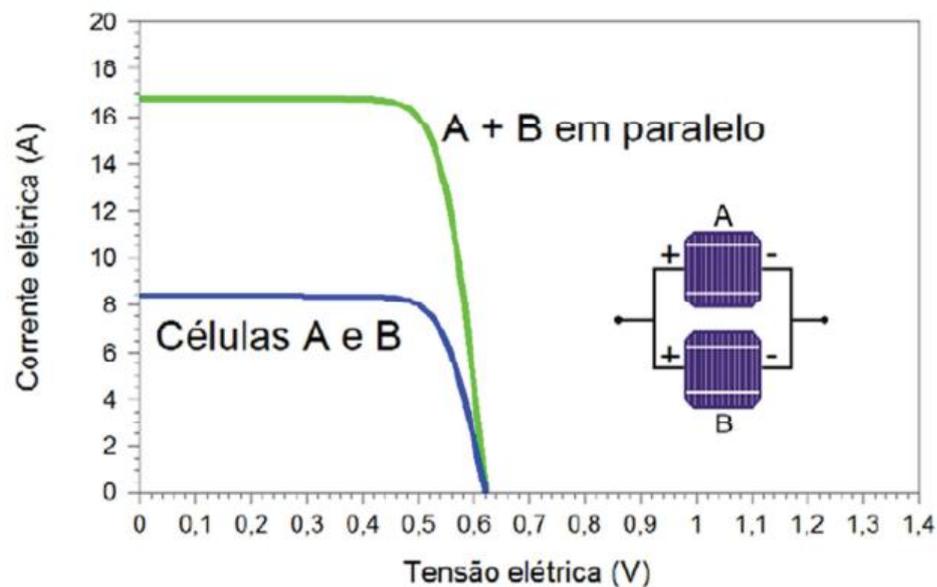
Para obtenção dos níveis de tensão e corrente desejados, as telhas fotovoltaicas devem ser conectadas ou em série ou em paralelo. Na conexão em paralelo, os terminais positivos são interligados entre si, analogamente os terminais negativos também são interligados, a tensão não se altera e as correntes elétricas são somadas, como mostra as equações:

$$V = V1 = V2 = \dots = Vn \quad (1)$$

$$I = I1 + I2 + \dots + In \quad (1.1)$$

A Figura 10 catequiza o resultado das correntes elétricas somadas em células ideais ligadas em paralelo:

Figura 10 - Curva (VxI) de duas células associadas em paralelo.



Fonte: Cepel; Cresesb (2017)

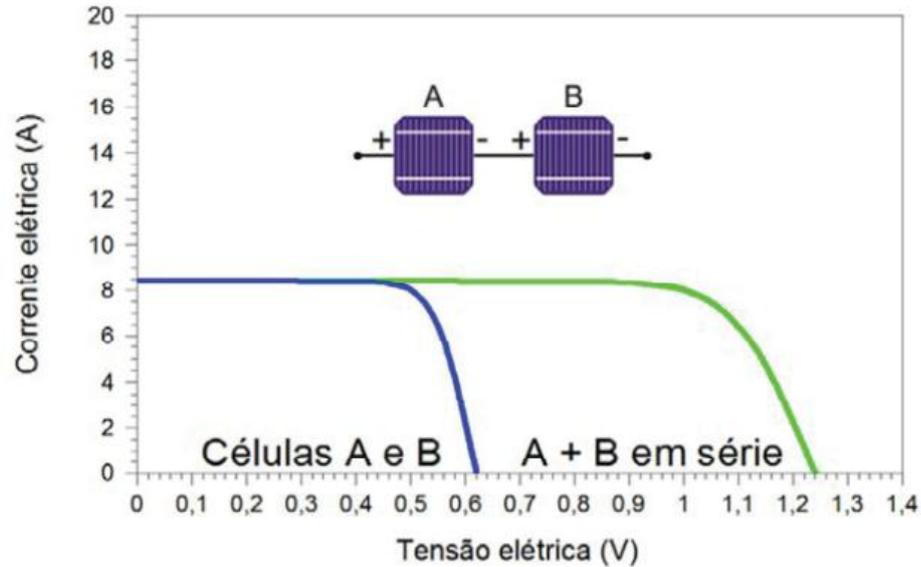
Na associação em série, o terminal positivo de uma telha é ligado ao terminal negativo de outra e assim sucessivamente. Quando a associação é em série a corrente elétrica não se altera e as tensões são somadas, de acordo com as fórmulas:

$$V = V1 + V2 + \dots + Vn \quad (2)$$

$$I = I1 = I2 = \dots = In \quad (2.1)$$

Para casos de conexão de telhas fotovoltaicas em série com diferentes correntes I_{sc} , a corrente elétrica resultante será limitada pela menor entre elas. É importante ressaltar que a associação de telhas distintas não é recomendada, pois poderá ocasionar superaquecimento. A Figura 11 ilustra o resultado da associação em série por meio da curva característica (VxI).

Figura 11 - Curva (VxI) de duas células conectadas em série.



Fonte: Cepel; Cresesb (2017)

2.5 Inversores de Frequência (On-Grid)

O inversor de frequência tem a função de converter a energia elétrica gerada em corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), igualmente entregue pela rede de distribuição de energia. Ao dimensionar o inversor é importante verificar a potência, pois ele deve possuir potência suficiente para o sistema. No caso deste trabalho, estamos dimensionando um sistema fotovoltaico On-Grid, onde o sistema será conectado à rede elétrica e, por conseguinte, precisaremos de inversores conhecidos como “grid-tie”, tendo como principal característica um controle adequado sobre a tensão, a fase e a frequência.

A constituição básica de um inversor controlado pela rede é de uma ponte de tiristores. A utilização de inversores tiristorizados em sistemas de automação como controle de motores, por exemplo, levou o uso de tiristores nos primeiros inversores para uso fotovoltaico e, assim, inversor controlado pela rede utiliza a frequência e a tensão da rede para chavear os tiristores. Em casos de falta de energia na rede, o inversor se desliga. Resumindo, esse tipo de inversor não funciona de forma autônoma e também pode ser reconhecido como inversor de onda quadrada, pois gera pulsos de corrente de onda quadrada durante o seu funcionamento. Esse tipo de inversor é construído para interagir com o sinal senoidal presente na rede de distribuição, as diferenças da forma de onda senoidal da rede elétrica provocam grandes distorções harmônicas na tensão de saída, além de consumo alto de potência reativa, logo, por essa razão, são utilizados limitadores de harmônicos como filtros e dispositivos.

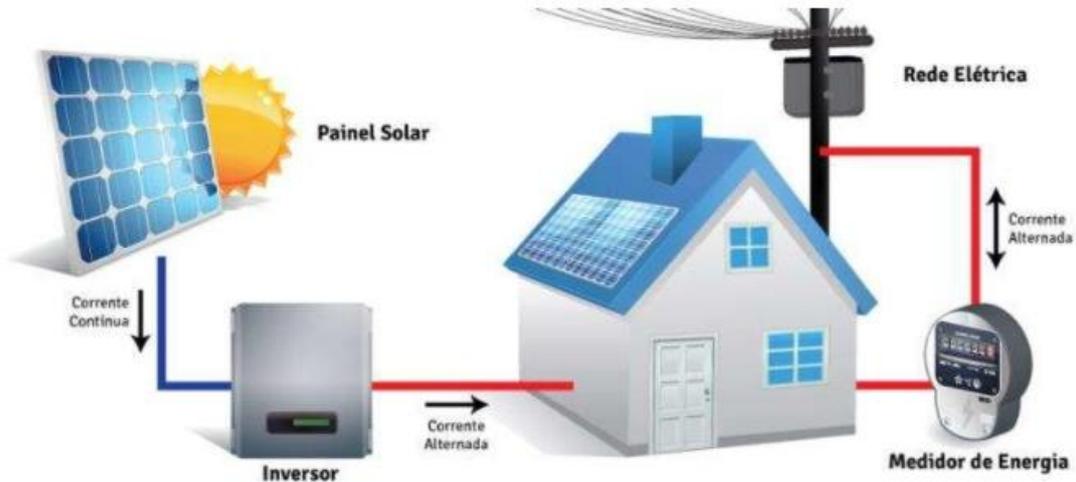
Figura 12 - Inversores solares de diferentes marcas.



Fonte: Sergreen(2021)

O sistema fotovoltaico conectado à rede corresponde à conexão do sistema fotovoltaico com a rede elétrica para complementar o fornecimento de energia elétrica oriundos dos geradores base, como hidroelétricos, termoelétricos, dentre outros. A energia elétrica gerada pelas células fotovoltaicas ao receberem a luz do sol, na forma de corrente contínua, passa pelo inversor de frequência, onde é transformada em corrente alternada e injetada na unidade consumidora. Desse modo, caso as cargas da unidade consumidora não demandem toda energia produzida pelo sistema fotovoltaico, a energia não utilizada é injetada na rede elétrica da concessionária local, gerando créditos de energia para o consumidor, podendo também ser compensada em outra propriedade do mesmo. Em casos que o consumo é maior que a energia gerada pelo sistema solar, o consumidor será suprido também pela concessionária local, a figura 13 representa o esquema simplificado de ligação de um SFCR.

Figura 13 - Esquema simplificado de um SFCR.



Fonte: Google (2021)

2.6 Normas ANEEL

A Resolução Normativa nº 482 publicada em 17 de abril de 2012 pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) foi o marco regulatório que concedeu aos consumidores realizar a troca da energia gerada com a da rede elétrica, criando as regras e o sistema que compensa o consumidor pela energia elétrica injetada na rede, assim como expõe o 1º artigo da normativa, que visa “estabelecer as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica” (ANEEL,2012).

Em novembro do ano de 2015, foi concretizada a aprovação da complementação da normativa nº 482, através da Resolução nº 687, que teve como desfecho adotar as seguintes definições (ANEEL,2015):

I - microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

II - sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa;

III - melhoria: instalação, substituição ou reforma de equipamentos em instalações de distribuição existentes, ou a adequação destas instalações, visando manter a prestação de serviço adequado de energia elétrica;

IV - reforço: instalação, substituição ou reforma de equipamentos em instalações de distribuição existentes, ou a adequação destas instalações, para aumento de

capacidade de distribuição, de confiabilidade do sistema de distribuição, de vida útil ou para conexão de usuários;
 V – geração compartilhada: caracterizada pela reunião de consumidores, dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, composta por pessoa física ou jurídica, que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada;

Na data que as regras entraram em vigor, 1º de março de 2016, foi permitida a microgeração e minigeração distribuída à central geradora com potência instalada, respectivamente, de até 75 kW e acima de 75 kW, porém menor ou igual a 5MW, conectadas à rede de distribuição através de instalações de unidades consumidoras. Se o valor da energia gerada for excedente ao valor de energia consumida, esse excedente será gerado em créditos e descontado nas próximas faturas. Salienta-se também a permissão de compensação de energia elétrica em endereços diferentes, sendo comprovada por meio de vínculos entre os integrantes da compensação.

Foram estabelecidas regras que simplificam o processo: foram instituídos formulários padrão para realização da solicitação de acesso pelo consumidor. O prazo total para a distribuidora conectar usinas de até 75 kW, que era de 82 dias, foi reduzido para 34 dias. Adicionalmente, a partir de janeiro de 2017, os consumidores poderão fazer a solicitação e acompanhar o andamento de seu pedido junto à distribuidora pela internet. (ANEEL, 2016).

3. METODOLOGIA

O presente trabalho consiste em uma pesquisa aplicada, exploratória e estudo de caso, compreendendo as seguintes etapas:

- Identificação do Problema: Análise da viabilidade técnica e econômica utilizando telhas fotovoltaicas em residências quando comparada ao método convencional;
- Identificação dos componentes necessários para a realização do projeto solar;
- Dimensionamento do projeto solar, utilizando o painel solar convencional e a telha solar;
- Dimensionamento do inversor de frequência ;
- Levantamento de Custos das Alternativas: Avaliação do custo das duas alternativas, sistema convencional e utilizando telha solar;
- Benefícios das alternativas;

- Análise Econômica: Fluxo de Caixa, Payback, Valor Presente Líquido (VPL), e Taxa Interna de Retorno (TIR);
- Conclusão: Concluir a viabilidade econômica comparado ao método convencional.

4. DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Nesta etapa será realizado o dimensionado básico do projeto fotovoltaico convencional e com as telhas fotovoltaicas para se obter um quantitativo que dará base a análise econômica.

Inicialmente, tanto para o dimensionamento de projetos fotovoltaicos convencional como utilizando as telhas fotovoltaicas têm-se que verificar a quantidade de irradiação solar no local. Desse modo, para a realização do trabalho, foi utilizado o site do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica – CRESESB (2021). Assim, para instalação realizada na cidade de Lavras – Minas Gerais, que possui as seguintes coordenadas: Latitude 21° 14' 45" Sul, Longitude 44° 59' 59" Oeste, têm-se irradiação solar média diária de 4,98 kWh/m²dia. A Tabela 4 apresenta dados de irradiação dos meses do ano.

Tabela 4 - Irradiação Solar Média/Dia em Lavras-MG.

#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m ² .dia]																	
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta	
✓	Lavras	Lavras	MG	BRASIL	21,201° S	45,049° O		7,1	5,70	5,85	5,03	4,72	4,02	3,80	4,06	4,97	5,19	5,44	5,25	5,71	4,98	2,05
✓	Ijaci	Ijaci	MG	BRASIL	21,201° S	44,949° O		7,3	5,62	5,80	5,02	4,68	3,97	3,77	4,02	4,92	5,16	5,41	5,25	5,67	4,94	2,03
✓	Lavras	Lavras	MG	BRASIL	21,301° S	45,049° O		8,0	5,66	5,86	5,00	4,67	4,00	3,80	4,05	4,94	5,15	5,46	5,27	5,72	4,96	2,06

Fonte: CRESESB (2021)

Através do gráfico da Figura 14, é possível perceber detalhadamente a radiação na região, onde o mês de fevereiro possui maior irradiação com 5,85 kWh/m²dia e o mês de junho, a menor com 3,80 kWh/m²dia.

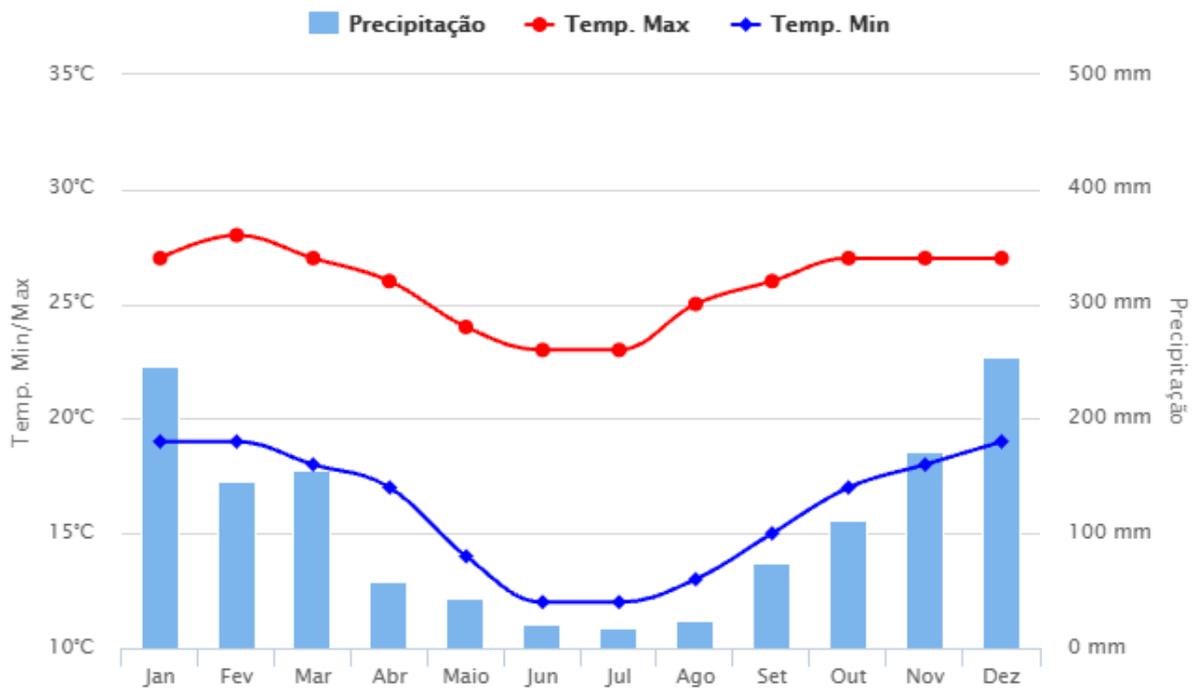
Figura 14 - Gráfico da Radiação Solar em Lavras-MG.



Fonte: CRESESB (2021)

Outro fator a verificar para a realização do projeto fotovoltaico é a temperatura da região. A cidade de Lavras- MG possui clima quente e temperado, chovendo mais no verão que no inverno, e possui uma temperatura média anual de 20.2 C°, com pluviosidade média anual de 1237mm (GOOGLE, 2021).

Figura 15- Gráfico da temperatura e precipitação da cidade de Lavras-MG



Fonte: Climatempo (2021)

Os dados encontrados acima, são utilizados como referência para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos apresentados a seguir.

4.1 Projeto básico de sistema fotovoltaico em uma residência de médio porte.

Para a análise e dimensionamento utilizando painéis ou telhas fotovoltaicas, é preciso realizar alguns passos, que são:

- 1) Verificar junto a conta de energia da residência em que será instalada o sistema, o consumo médio de energia em W (Watts), diários.
- 2) Calcular o número de painéis/telhas fotovoltaicos que serão necessários para o projeto.
- 3) Realizar o dimensionamento do inversor a ser utilizado no projeto.

Existem vários métodos para se calcular o número de painéis/telhas solares a serem utilizados, dentre os mais conhecidos se destaca o Método Comercial, geralmente indicado pelas empresas fornecedoras dos dispositivos. Este método consiste basicamente em encontrar o total de energia mensal fornecida pelos painéis ou telhas solares em watts e realizar a divisão do consumo mensal de energia da residência em (kWh) pela energia total mensal fornecida pelos painéis. Neste trabalho realizaremos um método diferente do método comercial, afim de potencializar a eficiência do projeto, visando sempre atender a demanda de energia da residência e também um retorno financeiro do investimento no menor tempo possível.

4.1.1 Cálculo do Número de Painéis Fotovoltaicos Necessários

O dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos será para uma residência em construção, nessa nova instalação viverá uma família de 4 pessoas. Desse modo utilizaremos a média do consumo mensal e diário dessa mesma família como base para os cálculos. A Tabela 5 nos mostra informações do consumo mensal e diário em kWh.

Tabela 5 - Consumo de energia da residência.

Mês/Ano	Consumo (kWh)	Média kWh/dia
Mar/2019	175	5,64
Abril/2019	126	4,50
Mai/2019	168	5,80
Jun/2019	174	5,61
Jul/2019	156	5,20
Ago/2019	235	7,12
Set/2019	160	5,33
Out/2019	212	7,31
Nov/2019	207	6,27
Dez/2019	184	6,57
Jan/2020	48	1,48
Fev/2020	71	2,29
Média	159,66	5,26

Fonte: Do autor (2020)

Para realizar os cálculos foi estimado os rendimentos com o valor de 0,90. Utilizaremos a tensão de potência máxima (V_{mp}) do painel selecionado, a energia média

diária da casa em kWh (Ecasa), a corrente de potência máxima (Imp) do painel e HSP sendo a irradiância mínima, disponível na Tabela 4. Os dados de (Vmp) e (Imp) mencionados acima podem ser encontrados no datasheet do painel solar que se encontra no anexo 1 do presente trabalho.

Vmp → Tensão de potência máxima = 39,6V

Imp → Corrente de potência máxima = 9,10A

Ecasa → Energia média diária = 5,26 kWh/dia

HSP → Irradiância mínima disponível = 3,80 h/dia

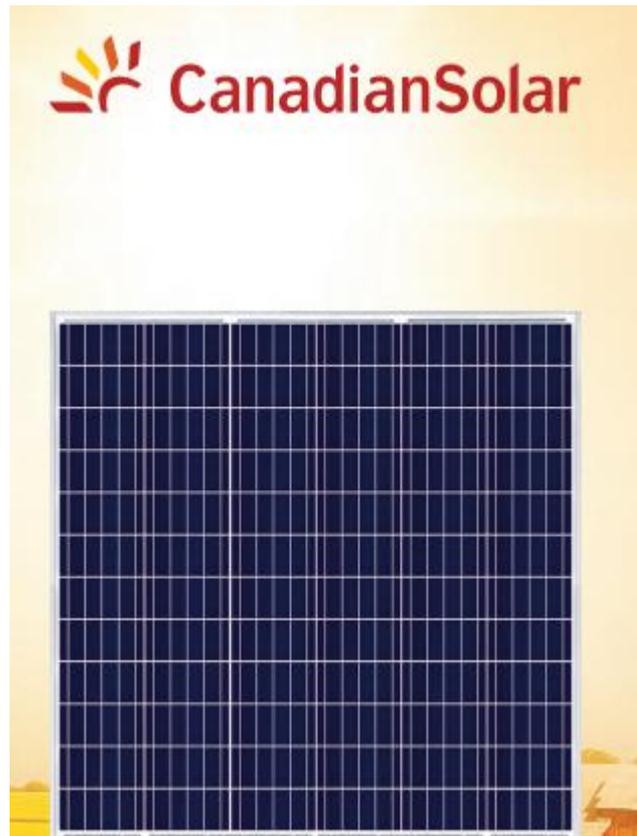
Desse modo, a equação fica:

$$N_{paineis} = \frac{\frac{E_{casa}}{V_{mp}}}{0,90 * I_{mp} * HSP} \quad (3)$$

$$N_{paineis} = \frac{5,26 \frac{kWh}{dia}}{0,90 * 9,10A * 3,80h/dia} = 4,26 \quad (3.1)$$

Sendo assim, será necessário aproximadamente 5 painéis. Após uma extensa pesquisa, levando em consideração qualidade, recomendações e preço competitivo de mercado, foi escolhido o painel solar da marca CanadianSolar modelo CS3U com potência de 360 Watts. A Figura 16 a seguir ilustra o painel escolhido.

Figura 16 - Paine Solar CanadianKuMax 360 W



Fonte: CanadianSolar (2021)

Quanto ao ângulo de inclinação que deverá ser usado na instalação do painel fotovoltaico, uma ótima regra a ser seguida é inclinar os módulos com o mesmo ângulo de latitude do local, garantindo o melhor desempenho do sistema fotovoltaico, com uma produção de energia considerada constante durante os meses do ano, sem privilegiar nenhuma época do ano em especial. Se o desejo é produzir mais energia no verão, uma boa regra é subtrair 15° graus da latitude local, ao contrário, para produzir mais energia no inverno, uma opção seria somar 15° graus a latitude. No caso deste projeto, como o objetivo é uma produção de energia aproximadamente constante ao longo do ano, utilizaremos como ângulo de inclinação a latitude de Lavras-MG.

4.1.2 Cálculo do telhado para o sistema convencional

Como o projeto está sendo dimensionado para uma residência em construção, será considerado o custo do telhado em que será instalado o sistema fotovoltaico convencional, no intuito de verificar o real valor investido no sistema.

O telhado da residência possui tamanho de 100 m^2 , sendo assim, ao consultar o fabricante de telhas coloniais americanas, foi verificado que são necessárias 12,5 telhas para cada 1 m^2 . Desse modo temos:

$$\text{Telhas Coloniais} = 100 * 12,5 = 1250 \quad (4)$$

Serão necessárias 1250 telhas coloniais americanas para cobrir o telhado do sistema convencional.

4.1.3 Dimensionamento do Inversor de Frequência

O inversor de frequência é encarregado da conversão da corrente contínua (CC) gerada nos painéis/telhas fotovoltaicos para corrente alternada (CA), conforme a rede de distribuição de energia elétrica entrega. Para fazer o dimensionamento do inversor, utilizaremos o chamado FDI (Fator para Dimensionamento do Inversor), que consiste na razão entre a potência nominal do inversor (PN_{inv}) pela potência nominal do gerador fotovoltaico (PN_{fv}). Desse modo considerando as perdas do sistema no valor de 0,9 temos:

$$P_{fv} = 5 * \left(\frac{360}{0,9} \right) = 2000W \quad (5)$$

A equação acima nos auxilia no encontro da potência nominal do gerador fotovoltaico. Como calculado anteriormente, para o projeto será necessário um número de 5 painéis fotovoltaicos, cada um com potência de 360W, e de acordo com a equação, a potência nominal entregue pelos 5 painéis será de 2kW.

Agora, conhecendo a potência nominal entregue pelos painéis, basta consultar a potência nominal do inversor escolhido para o cálculo do FDI. A potência nominal do

inversor é fornecida pelo fabricante e facilmente encontrada na folha de dados do inversor anexada ao fim do trabalho.

$$FDI = \frac{PN_{inv}}{PN_{fv}} = \frac{1600}{2000} = 0,8 \quad (6)$$

Para o correto dimensionamento do inversor, os valores calculados de FDI devem ficar entre 0,75 e 0,85. Desse modo, como o valor calculado ficou na casa de 0,80, o inversor é considerado adequado ao projeto.

4.1.4 String Box

O String Box é responsável pela proteção dos equipamentos sensíveis do sistema fotovoltaico. É muito importante utilizar essa proteção, pois em uma eventual tempestade, a incidência de raios pode acarretar em danos e até perdas dos equipamentos utilizados, além de proteger a vida das pessoas durante o processo de instalação e manutenção do sistema contra choques elétricos, diretos ou indiretamente, e também de incêndios. O local mais apropriado para instalação do String Box é o mais próximo do arranjo fotovoltaico possível, nunca sendo dentro da residência.

Figura 17 - String Box



Fonte: Google (2021)

4.2 Projeto básico em uma residência de médio porte com Telhas Fotovoltaicas

A tecnologia utilizada na telha fotovoltaica é semelhante a do painel, utilizando a aplicação das células fotovoltaicas composta de materiais semicondutores como o Silício, Gálio, Selênio, dentre outros diretamente no material da telha. O Brasil já conta com empresas que desenvolvem essa tecnologia totalmente em território nacional, que é o caso da empresa L8 Energy, que utiliza a tecnologia de filmes finos, uma película composta por cobre-índio-gálio-selênio. Esta liga pode ser utilizada tanto para produção de filmes finos quanto módulos fotovoltaicos, a espessura desta película chega a ser 100 vezes mais fina que uma folha de papel e tem a grande vantagem de ser altamente versátil, possibilitando a criação de produtos fotovoltaicos com grande variedade, como telhas fotovoltaicas, fachadas de prédio que geram energia solar, coberturas, dentre outras. Neste trabalho utilizaremos a telha solar da marca L8 Energy, que possui potência de 30 W, comprimento de 500 mm e largura de 721 mm

Figura 18 - Telha fotovoltaica da marca L8 Energy



Fonte: L8 Energy(2021)

4.2.1 Cálculo do número de telhas fotovoltaicas necessárias

Para realizar o cálculo do número de telhas fotovoltaicas necessárias para o projeto, fez-se os cálculos semelhantes ao sistema convencional, porém utilizando os dados da telha, dados que podem ser consultados no datasheet da telha L8 Energy. O datasheet está disponível no Anexo 2 do referente trabalho, são eles:

$V_{mp} \rightarrow$ Tensão de potência máxima = 7,9V
 $I_{mp} \rightarrow$ Corrente de potência máxima = 3,8A
 $E_{casa} \rightarrow$ Energia média diária = 5,26 kWh/dia
 $HSP \rightarrow$ Irradiância mínima disponível = 3,80 h/dia

Desse modo, a equação fica:

$$N_{telhas} = \frac{\frac{E_{casa}}{V_{mp}}}{0,90 * I_{mp} * HSP} \quad (7)$$

$$N_{telhas} = \frac{5,26 \frac{kWh}{7,9V} / dia}{0,90 * 3,8A * 3,8 h / dia} = 51,23 \quad (7.1)$$

Desse modo, serão necessárias aproximadamente 52 telhas fotovoltaicas.

4.2.2 Cálculo do número de telhas sem a tecnologia solar

A residência em que será instalado o sistema fotovoltaico possui um telhado de 100 m^2 , desse modo consultando o datasheet da telha solar, podemos verificar que cada telha possui comprimento de 700 mm por 521 mm de largura, totalizando em 0,36 m^2 ocupado por cada telha. Sendo assim, basta dividir a área total do telhado pela área ocupada por cada telha para descobrir a quantidade necessária para o telhado da residência, logo após subtrair do número total a quantidade com a tecnologia solar e encontrarmos o número necessário de telhas comuns.

$$Quantidade\ total = \frac{100m^2}{0,36m^2} = 278\ telhas \quad (8)$$

$$Telhas\ Comuns = 278 - 52 = 226\ telhas \quad (8.1)$$

Sendo assim, de acordo com os cálculos, o número de telhas sem a tecnologia solar necessárias são 226 unidades.

5 LEVANTAMENTO DE CUSTO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Para determinar a viabilidade econômica do projeto primeiramente será calculado o custo dos dois sistemas, ou seja, utilizando os painéis fotovoltaicos e as telhas fotovoltaicas. O levantamento de custo é apresentado nas Tabelas 6 e 7, que está considerando o custo dos painéis ou telhas fotovoltaicas, do inversor e também o custo de instalação do sistema que envolve os disjuntores utilizados, o string box, o cabeamento, impostos, mão de obra, homologação na concessionária de energia, entre outros componentes que eventualmente podem ser necessários.

5.1 Custo do sistema fotovoltaico convencional

Tabela 6 - Custo do sistema utilizando painel fotovoltaico.

Descrição	Quantidade	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
Painel Solar Canadian 360 W	5	799,00	3995,00
Inversor Canadian CSI 1,5k-TL	1	4989,90	4989,90
Custo de Instalação do Sistema	1	2500,00	2500,00
Custo das Telhas Coloniais	1250	2,30	2875,00
Custo Total			14.359,90

Fonte: Do Autor (2021)

5.2 Custo do sistema utilizando a telha fotovoltaica

Semelhante ao painel, a tabela abaixo apresenta informações do custo do sistema fotovoltaico utilizando a telha fotovoltaica. Nela está contida informações do custo da telha, do inversor, custo completo da instalação e também o número de telhas fotovoltaicas sem a tecnologia solar que serão necessárias, visando a estética do imóvel.

Tabela 7 - Custo do sistema utilizando telha solar.

Descrição	Quantidade	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
Telha Solar L8 ENERGY HW-MQSB-V230	52	400,00	20800,00
Inversor Canadian CSI 1,5k-TL	1	4989,90	4989,90
Custo de Instalação do Sistema	1	3000,00	3000,00
Telhas Comuns	226	40,00	9040,00
Custo Total			37829,90

Fonte: Do Autor (2021)

6 LEVANTAMENTO DOS BENEFÍCIOS

6.1 Benefícios do sistema solar fotovoltaico convencional

Quanto aos termos benéficos oriundos da instalação do sistema solar fotovoltaico, a maioria das opiniões estão ligadas a economia financeira, principal objetivo da aquisição de um sistema de compensação de energia elétrica. Porém, o sistema fotovoltaico possui inúmeras vantagens, que agregada ao retorno financeiro após o investimento, deixa o sistema solar altamente atrativo. Abaixo estão listadas as principais vantagens do sistema solar fotovoltaico:

- 1) economia financeira;
- 2) necessidade mínima de manutenção;
- 3) fácil instalação, com manutenção significativamente barata;
- 4) vida útil de mais de 25 anos;
- 5) queda de preços com o avanço da tecnologia;
- 6) o sistema ocupa pouco espaço, e valoriza o imóvel de instalação;
- 7) podem ser usados em áreas isoladas da rede elétrica;
- 8) redução nos impactos ambientais

A energia oriunda de sistemas fotovoltaicos também contribui para a diminuição da poluição sonora, pois possui funcionamento discreto e silencioso, sem nenhum tipo de ruído desagradável. Além disso, sua matéria prima, que é a luminosidade do sol, é inesgotável e gratuita. Comparada às vantagens, o número de desvantagens do sistema solar é bem baixo, tendo basicamente como principal desvantagem o alto custo de aquisição, pois o sistema solar fotovoltaico é um investimento, que irá ser pago em alguns anos e só então começará a dar retorno financeiro significativo. Agregada à desvantagem do alto custo de aquisição, temos também o fato de que o sistema não gera energia à noite e ainda é pouco incentivado em território nacional, fator que vem mudando na atualidade. Juntamente com essas desvantagens não se pode esquecer do sistema de anti-ilhamento.

Segundo o site Portal Solar (2021), “o anti-ilhamento é causado pelo desligamento automático do sistema, quando há intervalo de energia na rede elétrica. Sendo assim, é

possível que ocorram problemas técnicos no próprio inversor solar, visto que ele depende da rede para sincronizar a corrente”.

Desse modo, em um sistema fotovoltaico conectado à rede (On-Grid), existe a possibilidade de o isolamento da rede pública não ser detectado, ocasionando uma pausa no funcionamento, garantindo o corte do fornecimento de energia limpa.

6.2 Benefícios do sistema solar utilizando a telha fotovoltaica

Quando se trata dos benefícios do sistema solar utilizando a telha fotovoltaica no lugar do painel fotovoltaico convencional, estamos também englobando todos os benefícios citados na seção anterior, mas com o acréscimo de alguns pontos positivos, como por exemplo, a facilidade de instalação da telha solar é ainda maior comparado aos painéis solares, isso porque não precisará de nenhuma adaptação especial no imóvel que irá receber a telha, ou seja, não precisará de suportes para a instalação. Em casos de falhas, o impacto na geração final de energia é bem menor, pois a telha possui potência relativamente menor que um módulo fotovoltaico. Outra vantagem de utilizar a telha solar ao invés do painel solar é a estética do imóvel, pois são feitas no formato de telhas, como as comuns de cerâmica, porém com outros materiais, sendo assim elas se enquadram perfeitamente no visual da casa, ficam bonitas quando instaladas, ao contrário do painel solar que se destaca negativamente em termos estéticos. Além disso, as telhas são comercializadas em vários modelos e cores diferentes, podendo se adequar aos vários tipos e estilos de cada imóvel.

7 ANÁLISE ECONÔMICA

Para a realização da análise financeira será calculado o VPL (Valores Líquidos Presentes), a TIR (Taxa Interna de Retorno) e o Payback (Prazo de retorno do projeto). O VPL é definido como a soma algébrica dos valores descontados do fluxo de caixa a ele associado. Para o projeto ser considerado viável, o valor do VPL deve ser obrigatoriamente maior que zero (R\$ 0,00) e, quanto maior for o valor do VPL, melhor será o projeto em análise. Resumindo, o VPL nada mais é do que a diferença do valor presente das receitas, menos o valor presente dos custos. Segundo Ross (2002), o VPL pode ser calculado utilizando a seguinte fórmula:

$$VPL = \frac{FC_1}{(1+i)} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \frac{FC_3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{FC_n}{(1+i)^n} - CF_0$$

(9)

Em que:

FC_n → Fluxo de caixa de ordem n

i → Taxa de desconto, também chamada de TMA

n → Período (ano)

CF_0 → Investimento Inicial

A taxa interna de retorno (TIR) é a taxa que representa o retorno do investimento ao longo do tempo a partir de um determinado fluxo de caixa do projeto. Segundo Ragnini (2018), “é a taxa em que relaciona o VPL do projeto com o investimento feito inicialmente para determinado período. É considerado um projeto viável e atraente aquele que possui o TIR acima da TMA. Ou seja, no caso de uma diferença negativa entre as taxas TIR e TMA o projeto é visto como inviável”.

A TIR pode ser calculada pela seguinte equação:

$$0 = -CF_0 + \frac{FC_1}{(1+TIR)} + \frac{FC_2}{(1+TIR)^2} + \frac{FC_3}{(1+TIR)^3} + \dots + \frac{FC_n}{(1+TIR)^n}$$

(10)

Em que:

FC_n → Fluxo de caixa de ordem n

n → Período (ano)

CF_0 → Investimento Inicial

O Payback mostra o tempo necessário para que os benefícios do projeto restitua o valor investido. Em outras palavras, expressa o período de tempo necessário para que as entradas de caixa se igualem ao que foi inicialmente investido, podendo ser considerado uma medida de risco do projeto (RASOTO et al, 2012).

7.1 Cálculo do Payback, VPL e TIR dos sistemas fotovoltaicos

A unidade consumidora deste projeto tem consumo médio anual de 159,66 kWh/mês, desse modo, utilizando o preço do kWh atual cobrado pela concessionária local de R\$ 1,06, já incluso todos os impostos, o custo médio mensal de sua conta é R\$ 169,23.

É importante ressaltar que mesmo compensando a energia com o sistema fotovoltaico, existe a taxa de custo de disponibilidade cobrada pela concessionária mensalmente, no valor de R\$ 53,00 (Valor mínimo de 50kWh para residencial bifásico). Serão utilizados os métodos de avaliação de projeto vistos na seção 7 com a finalidade de realizar a análise de viabilidade econômica, as considerações iniciais para os cálculos são:

- a) Será utilizado como Taxa Mínima de Atratividade (TMA), o rendimento anual da poupança de 2021 (3,67%);
- b) Reajuste das tarifas de energia de 5% ao ano;
- c) Vida útil do projeto de 25 anos, após esse tempo, a eficiência do projeto poderá cair, em função da vida útil dos módulos e telhas fotovoltaicas.

7.2 – Cálculo do VPL, TIR E Paback para o sistema convencional

A Tabela 8 nos auxilia no cálculo do valor de fluxo de caixa e valor acumulado para o cálculo do Payback Simples, ressaltando que o Payback Simples consiste em uma metodologia de análise financeira composta pela soma de todas as entradas futuras, não considerando a variação de valor do dinheiro. Para o cálculo do fluxo de caixa foi considerado o reajuste anual da tarifa de energia elétrica e também o custo de disponibilidade cobrado pela concessionária de energia.

Tabela 8 - Fluxo de caixa anual em função do reajuste tarifário (Convencional).

Tempo	Ano	Tarifa Consumo (R\$/kWh)	Economia de Consumo	Custo Disponibilidade	Fluxo de Caixa	Valor Acumulado
0	2021	1,06			-R\$ 14.359,90	-R\$ 14.359,90
1	2022	1,11	R\$ 2.132,42	-R\$ 667,80	R\$ 1.464,62	-R\$ 12.895,28
2	2023	1,17	R\$ 2.239,04	-R\$ 701,19	R\$ 1.537,85	-R\$ 11.357,43
3	2024	1,23	R\$ 2.350,99	-R\$ 736,25	R\$ 1.614,74	-R\$ 9.742,69
4	2025	1,29	R\$ 2.468,54	-R\$ 773,06	R\$ 1.695,48	-R\$ 8.047,21
5	2026	1,35	R\$ 2.591,97	-R\$ 811,72	R\$ 1.780,25	-R\$ 6.266,96
6	2027	1,42	R\$ 2.721,57	-R\$ 852,30	R\$ 1.869,27	-R\$ 4.397,69
7	2028	1,49	R\$ 2.857,65	-R\$ 894,92	R\$ 1.962,73	-R\$ 2.434,96
8	2029	1,57	R\$ 3.000,53	-R\$ 939,66	R\$ 2.060,87	-R\$ 374,09
9	2030	1,64	R\$ 3.150,55	-R\$ 986,64	R\$ 2.163,91	R\$ 1.789,82
10	2031	1,73	R\$ 3.308,08	-R\$ 1.035,96	R\$ 2.272,10	R\$ 4.061,92
11	2032	1,81	R\$ 3.473,49	-R\$ 1.087,78	R\$ 2.385,71	R\$ 6.447,63
12	2033	1,90	R\$ 3.647,16	-R\$ 1.142,16	R\$ 2.505,00	R\$ 8.952,63
13	2034	2,00	R\$ 3.829,52	-R\$ 1.199,27	R\$ 2.630,25	R\$ 11.582,87
14	2035	2,10	R\$ 4.020,99	-R\$ 1.259,24	R\$ 2.761,76	R\$ 14.344,63
15	2036	2,20	R\$ 4.222,04	-R\$ 1.322,20	R\$ 2.899,85	R\$ 17.244,47
16	2037	2,31	R\$ 4.433,15	-R\$ 1.388,31	R\$ 3.044,84	R\$ 20.289,31
17	2038	2,43	R\$ 4.654,80	-R\$ 1.457,72	R\$ 3.197,08	R\$ 23.486,39
18	2039	2,55	R\$ 4.887,54	-R\$ 1.530,61	R\$ 3.356,93	R\$ 26.843,32
19	2040	2,68	R\$ 5.131,92	-R\$ 1.607,14	R\$ 3.524,78	R\$ 30.368,10
20	2041	2,81	R\$ 5.388,52	-R\$ 1.687,50	R\$ 3.701,02	R\$ 34.069,12
21	2042	2,95	R\$ 5.657,94	-R\$ 1.771,87	R\$ 3.886,07	R\$ 37.955,19
22	2043	3,10	R\$ 5.940,84	-R\$ 1.860,47	R\$ 4.080,37	R\$ 42.035,57
23	2044	3,26	R\$ 6.237,88	-R\$ 1.953,49	R\$ 4.284,39	R\$ 46.319,96
24	2045	3,42	R\$ 6.549,78	-R\$ 2.051,16	R\$ 4.498,61	R\$ 50.818,57
25	2046	3,59	R\$ 6.877,26	-R\$ 2.153,72	R\$ 4.723,54	R\$ 55.542,11

Fonte: Do Autor (2021)

A tabela 8 contém o ano de implantação do sistema fotovoltaico, juntamente com os 25 anos de vida útil do projeto. A coluna Economia de Consumo é calculada multiplicando a tarifa vigente pelo cálculo do consumo anual para qual o sistema foi dimensionado. A coluna Custo de Disponibilidade é calculada multiplicando a tarifa do ano equivalente pelo mínimo de kWh cobrado pela concessionária e no caso do projeto, como é bifásico, o mínimo cobrado é 50 kWh. Como esse valor deve ser pago mensalmente mesmo com o sistema fotovoltaico suprindo 100% da demanda de energia, ele será englobado no cálculo da análise financeira. Diante disso, a Tabela 8 demonstra que com o investimento inicial de R\$ 14.359,90 os anos seguintes trazem uma economia de acordo com o que ela informa e, em 8 anos, todo o valor investido inicialmente no projeto é compensado. Desse modo em 25 anos, que é o tempo de vida útil do projeto o retorno financeiro é positivo, acumulando um capital no valor de R\$ 55.542,11.

Ainda analisando a Tabela 8, para o auxílio da análise econômica, pode-se verificar que o sistema possui uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 14% e Payback simples de 8 anos. Como a TIR possui maior valor que taxa da poupança (3,67%), pode-se concluir a princípio que o projeto é viável economicamente. A análise do VPL é apresentada através da Tabela 9.

Tabela 9 - VPL usando TMA equivalente a poupança 2021(Convencional).

Tempo	Ano	Fluxo de Caixa	Valor Presente (Poupança)
0	2021	-R\$ 14.359,90	-R\$ 14.359,90
1	2022	R\$ 1.464,62	R\$ 1.412,77
2	2023	R\$ 1.537,85	R\$ 1.430,90
3	2024	R\$ 1.614,74	R\$ 1.449,25
4	2025	R\$ 1.695,48	R\$ 1.467,85
5	2025	R\$ 1.780,25	R\$ 1.486,67
6	2027	R\$ 1.869,27	R\$ 1.505,75
7	2028	R\$ 1.962,73	R\$ 1.525,07
8	2029	R\$ 2.060,87	R\$ 1.544,63
9	2030	R\$ 2.163,91	R\$ 1.564,45
10	2031	R\$ 2.272,10	R\$ 1.584,52
11	2032	R\$ 2.385,71	R\$ 1.604,85
12	2033	R\$ 2.505,00	R\$ 1.625,44
13	2034	R\$ 2.630,25	R\$ 1.646,29
14	2035	R\$ 2.761,76	R\$ 1.667,41
15	2036	R\$ 2.899,85	R\$ 1.688,80
16	2037	R\$ 3.044,84	R\$ 1.710,47
17	2038	R\$ 3.197,08	R\$ 1.732,41
18	2039	R\$ 3.356,93	R\$ 1.754,63
19	2040	R\$ 3.524,78	R\$ 1.777,15
20	2041	R\$ 3.701,02	R\$ 1.799,95
21	2042	R\$ 3.886,07	R\$ 1.823,04
22	2043	R\$ 4.080,37	R\$ 1.846,42
23	2044	R\$ 4.284,39	R\$ 1.870,11
24	2045	R\$ 4.498,61	R\$ 1.894,10
25	2046	R\$ 4.723,54	R\$ 1.918,40
VPL			R\$ 26.971,43

Fonte: Do autor (2021)

Como pode ser observado na Tabela 9, o VPL para taxa da poupança é maior que zero (VPL > R\$ 0,00). Com a diferença TIR - TMA também positivo, logo o projeto do sistema fotovoltaico pode ser considerado economicamente viável.

7.3 Cálculo do VPL, TIR e Payback para o sistema utilizando a telha solar

Tabela 10 - Fluxo de caixa anual em função do reajuste tarifário (Telha).

Tempo	Ano	Tarifa Consumo (R\$/kWh)	Economia de Consumo	Custo Disponibilidade	Fluxo de Caixa	Valor Acumulado
0	2021	1,06			-R\$ 37.829,90	-R\$ 37.829,90
1	2022	1,11	R\$ 2.132,42	-R\$ 667,80	R\$ 1.464,62	-R\$ 36.365,28
2	2023	1,17	R\$ 2.239,04	-R\$ 701,19	R\$ 1.537,85	-R\$ 34.827,43
3	2024	1,23	R\$ 2.350,99	-R\$ 736,25	R\$ 1.614,74	-R\$ 33.212,69
4	2025	1,29	R\$ 2.468,54	-R\$ 773,06	R\$ 1.695,48	-R\$ 31.517,21
5	2026	1,35	R\$ 2.591,97	-R\$ 811,72	R\$ 1.780,25	-R\$ 29.736,96
6	2027	1,42	R\$ 2.721,57	-R\$ 852,30	R\$ 1.869,27	-R\$ 27.867,69
7	2028	1,49	R\$ 2.857,65	-R\$ 894,92	R\$ 1.962,73	-R\$ 25.904,96
8	2029	1,57	R\$ 3.000,53	-R\$ 939,66	R\$ 2.060,87	-R\$ 23.844,09
9	2030	1,64	R\$ 3.150,55	-R\$ 986,64	R\$ 2.163,91	-R\$ 21.680,18
10	2031	1,73	R\$ 3.308,08	-R\$ 1.035,98	R\$ 2.272,10	-R\$ 19.408,08
11	2032	1,81	R\$ 3.473,49	-R\$ 1.087,78	R\$ 2.385,71	-R\$ 17.022,37
12	2033	1,90	R\$ 3.647,16	-R\$ 1.142,16	R\$ 2.505,00	-R\$ 14.517,37
13	2034	2,00	R\$ 3.829,52	-R\$ 1.199,27	R\$ 2.630,25	-R\$ 11.887,13
14	2035	2,10	R\$ 4.020,99	-R\$ 1.259,24	R\$ 2.761,76	-R\$ 9.125,37
15	2036	2,20	R\$ 4.222,04	-R\$ 1.322,20	R\$ 2.899,85	-R\$ 6.225,53
16	2037	2,31	R\$ 4.433,15	-R\$ 1.388,31	R\$ 3.044,84	-R\$ 3.180,69
17	2038	2,43	R\$ 4.654,80	-R\$ 1.457,72	R\$ 3.197,08	R\$ 16,39
18	2039	2,55	R\$ 4.887,54	-R\$ 1.530,61	R\$ 3.356,93	R\$ 3.373,32
19	2040	2,68	R\$ 5.131,92	-R\$ 1.607,14	R\$ 3.524,78	R\$ 6.898,10
20	2041	2,81	R\$ 5.388,52	-R\$ 1.687,50	R\$ 3.701,02	R\$ 10.599,12
21	2042	2,95	R\$ 5.657,94	-R\$ 1.771,87	R\$ 3.886,07	R\$ 14.485,19
22	2043	3,10	R\$ 5.940,84	-R\$ 1.860,47	R\$ 4.080,37	R\$ 18.565,57
23	2044	3,26	R\$ 6.237,88	-R\$ 1.953,49	R\$ 4.284,39	R\$ 22.849,96
24	2045	3,42	R\$ 6.549,78	-R\$ 2.051,16	R\$ 4.498,61	R\$ 27.348,57
25	2046	3,59	R\$ 6.877,26	-R\$ 2.153,72	R\$ 4.723,54	R\$ 32.072,11

Fonte: Doautor (2021)

Através da análise econômica para o projeto com a telha solar, pode-se perceber que em 25 anos, que é o tempo de vida útil do projeto, temos um retorno financeiro positivo, acumulando o valor de R\$ 32.072,00. O Payback simples para esse sistema é de 16 anos e possui uma TIR de 4%.

Tabela 11 - VPL usando TMA equivalente a poupança 2021 (Telha).

Tempo	Ano	Fluxo de Caixa	Valor Presente (Poupança)
0	2021	-R\$ 37.829,90	-R\$ 37.829,90
1	2022	R\$ 1.464,62	R\$ 1.412,77
2	2023	R\$ 1.537,85	R\$ 1.430,90
3	2024	R\$ 1.614,74	R\$ 1.449,25
4	2025	R\$ 1.695,48	R\$ 1.467,85
5	2025	R\$ 1.780,25	R\$ 1.486,67
6	2027	R\$ 1.869,27	R\$ 1.505,75
7	2028	R\$ 1.962,73	R\$ 1.525,07
8	2029	R\$ 2.060,87	R\$ 1.544,63
9	2030	R\$ 2.163,91	R\$ 1.564,45
10	2031	R\$ 2.272,10	R\$ 1.584,52
11	2032	R\$ 2.385,71	R\$ 1.604,85
12	2033	R\$ 2.505,00	R\$ 1.625,44
13	2034	R\$ 2.630,25	R\$ 1.646,29
14	2035	R\$ 2.761,76	R\$ 1.667,41
15	2036	R\$ 2.899,85	R\$ 1.688,80
16	2037	R\$ 3.044,84	R\$ 1.710,47
17	2038	R\$ 3.197,08	R\$ 1.732,41
18	2039	R\$ 3.356,93	R\$ 1.754,63
19	2040	R\$ 3.524,78	R\$ 1.777,15
20	2041	R\$ 3.701,02	R\$ 1.799,95
21	2042	R\$ 3.886,07	R\$ 1.823,04
22	2043	R\$ 4.080,37	R\$ 1.846,42
23	2044	R\$ 4.284,39	R\$ 1.870,11
24	2045	R\$ 4.498,61	R\$ 1.894,10
25	2046	R\$ 4.723,54	R\$ 1.918,40
VPL			R\$ 3.501,43

Fonte: Do Autor (2021)

O VPL do projeto é maior que zero ($VPL > R\$ 0,00$), e possui uma diferença entre TIR e TMA também positiva.

8 CONCLUSÃO

Este trabalho possibilitou realizar a análise técnica e econômica de um projeto de um sistema fotovoltaico convencional, utilizando painéis fotovoltaicos e também utilizando a telha fotovoltaica, com o intuito de compará-los para concluir a viabilidade econômica da telha solar, produto que atualmente é novidade no mercado. Os métodos para análise financeira utilizados foram o VPL, a TIR, e o Payback. No trabalho além da análise financeira foram abordados todos os tópicos considerados de suma importância para o desenvolvimento do projeto solar, bem como uma revisão bibliográfica explicando o funcionamento da célula fotovoltaica, que gera corrente elétrica através da irradiação solar.

Para o painel convencional tivemos um VPL positivo e igual a R\$ 26.971,43, uma TIR de 14% e Payback simples de 8 anos. Já para o projeto utilizando a telha fotovoltaica, o resultado foi um VPL também positivo de R\$ 3.501,43, TIR de 4% e Payback de 16 anos.

Desse modo, foi possível perceber que a tecnologia fotovoltaica requer um investimento inicial alto, e, comparando o painel solar convencional com a telha solar, esta última é consideravelmente mais cara, sendo bem mais alto o investimento, com uma diferença de 8 anos de tempo necessário para restituição dos valores investidos, quando comparado aos painéis solares. Através da análise econômica para a telha fotovoltaica, pode-se constatar que mesmo a TIR sendo positiva, assim como o VPL, esses valores são muito baixos, a TIR foi calculada em 4%, quase atingindo a TMA cuja o valor é 3,67%. Desse modo podemos concluir que o sistema fotovoltaico utilizando a telha solar não possui viabilidade econômica prática, sendo viável em casos onde a estética do imóvel é de suma importância. No entanto, estes custos tendem a serem reduzidos com o passar dos anos e com a evolução da tecnologia, bem como evolução de leis referentes a micro e mini geração de energia elétrica. Apesar do investimento em geração de energia fotovoltaica ser considerado alto, não se tem qualquer previsão ou estimativa de redução de custos para energia elétrica convencional, o que torna a energia solar bastante atrativa para complementar a matriz energética brasileira, no caso do painel solar, o projeto nos trouxe um retorno de investimento em apenas 8 anos, passando a oferecer lucros após este período.

Para conclusão final, através deste trabalho pode-se vislumbrar inúmeras vantagens da aplicação da energia solar fotovoltaica, que, além de variar a matriz energética nacional, ainda traz inúmeros pontos positivos, tanto nos aspectos econômicos, como ambientais e sociais.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. **ANEEL**: Brasil, 2012.

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas Energia Elétrica do Brasil**. 2 ed. Brasília: ANEEL, 2005. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/2005_AtlasEnergiaEletricaBrasili2ed/06b7ec52-e2de-48e7-f8be-1a39c785fc8b>.

Do início ao fim: Sistema solar fotovoltaico On-grid. **SerGreen**. Disponível em: <<http://sergreen.com.br/do-inicio-ao-fim-sistema-solar-fotovoltaico-on-grid/>>.

Energia Fotovoltaica. **Portal Solar**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/energia-fotovoltaica.html>>.

Energia Solar Fotovoltaica. **CRESEB**, 2008. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321>.

Energia solar vai gerar mais de 120 mil empregos no Brasil em 2020 projeta ABSOLAR. Portal Solar, 2020. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/energia-solar-vai-gerar-mais-de-120-mil-empregos-no-brasil-em-2020-projeta-absolar.html>>.

Fontes de energia renováveis representam 83% da matriz elétrica brasileira. **GOV.br**, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletrica-brasileira>>.

GHENSEV, A. **Materiais e processos de fabricação de células fotovoltaicas**. 2006. 154 f. Monografia (Pós Graduação Lato Sensu em Fontes Alternativas de Energia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

HAMILTON, C.J. O Sol. **UFRGS**, 1997. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/ast/solar/portug/sun.htm>>.

HUDSON, L.G.; MARKELL, J. **Solar Technology**. RestonPublishingCompany, 1985.

IMHOFF, J. **Desenvolvimento de Conversores Estáticos para Sistemas Fotovoltaicos Autônomos**. 2007. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2007. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8608/JOHNINSONIMHOFF.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Vantagens da Fusão**. São José dos Campos, 2007.

LIMA, J. B. A. **Otimização de Sistema de Aquecimento Solar de Água em Edificações Residenciais Unifamiliares**. 2003. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-03032004-153752/publico/Juliana.pdf>>.

NASCIMENTO, C. **Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica**. 2004. 23 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2004. Disponível em: <https://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf>.

NETO, M.M.; ZANETTI, W.A.L.; PIAZENTIN, J.C. Ensaio para obtenção das características elétricas de uma célula fotovoltaica para aplicação em um rastreador solar. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 14, n. 25, p. 1862-1874, jun. 2017. Disponível em: <<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2017a/eng/ensaio%20para%20obtencao.pdf>>.

Posições da Terra. **Grupo Evolução**. Disponível em: <http://gruopoevolucao.com.br/livro/Geografia1/posies_da_terra.html>.

RenewableandNonrenewable Energy. **Healing Earth**, 2021. Disponível em: <<https://healingearth.ijep.net/pt/boas-vindas/renewable-and-nonrenewable-energy>>.

RIBEIRO, A. Zonas climáticas da Terra. **InfoEscola**, 2003. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/geografia/zonas-climaticas-da-terra/>>.

SCHOFFEL, E.R. **Radiação solar**. Disponível em: <http://www.etcbest.com.br/janeladofructicultor/artigos/download/04_TXT_RAD_SOL_CO MPILA_ROMERA_2010/RADSOL.pdf>.

SOUZA, R. Célula fotovoltaica – O guia técnico absolutamente completo. BlueSol. Disponível em: <<https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>>.

Tudo sobre inversor solar off-grid. **Aldo**. Disponível em: <<https://www.aldosolar.com.br/categoria/energia-solar/produtos/inversor-solar/inversor-solar-off-grid>>.

VIGNOLA, F.; STOFFEL, T.; MICHALSKY, J. **Solar and Infrared Radiation Measurements**. Nova Iorque: CRC Press, 2012. 408 p. ISBN: 978-1-4398-5190-6.

GREEN PRO. **Energia Fotovoltaica - Manual de Tecnologias, Projeto e Instalação**. 2004. Disponível em: <<http://greenpro.de/po/fotovoltaico.pdf>> .

ANEXO 1

Datasheet Paine Solar 360W CanadianHalfCell CS3U-360P KuMax.



ELECTRICAL DATA | STC*

CS3U	345P	350P	355P	360P
Nominal Max. Power (Pmax)	345 W	350 W	355 W	360 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	39.0 V	39.2 V	39.4 V	39.6 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.86 A	8.94 A	9.02 A	9.10 A
Open Circuit Voltage (Voc)	46.4 V	46.6 V	46.8 V	47.0 V
Short Circuit Current (Isc)	9.43 A	9.51 A	9.59 A	9.67 A
Module Efficiency	17.39%	17.64%	17.89%	18.15%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C			
Max. System Voltage	1000 V (IEC / UL) or 1500 V (IEC / UL)			
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC 61730)			
Max. Series Fuse Rating	30 A			
Application Classification	Class A			
Power Tolerance	0 ~ + 5 W			

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

ELECTRICAL DATA | NMOT*

CS3U	345P	350P	355P	360P
Nominal Max. Power (Pmax)	255 W	259 W	263 W	266 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	35.6 V	35.8 V	36.0 V	36.1 V
Opt. Operating Current (Imp)	7.17 A	7.24 A	7.29 A	7.37 A
Open Circuit Voltage (Voc)	43.3 V	43.5 V	43.7 V	43.9 V
Short Circuit Current (Isc)	7.61 A	7.68 A	7.74 A	7.80 A

* Under Nominal Module Operating Temperature (NMOT), irradiance of 800 W/m², spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Poly-crystalline, 156.75 × 78.38 mm
Cell Arrangement	144 [2 × (12 × 6)]
Dimensions	2000 × 992 × 40 mm (78.7 × 39.1 × 1.57 in)
Weight	22.6 kg (49.8 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame	Anodized aluminium alloy, crossbar enhanced
J-Box	IP68, 3 diodes
Cable	4.0 mm ² & 12 AWG
Cable Length	1670 mm (65.7 in)
Connector	T4 (IEC / UL)
Per Pallet	27 pieces
Per Container (40' HQ)	594 pieces

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.38 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.29 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.05 % / °C
Nominal Module Operating Temperature	43±2 °C

PARTNER SECTION



ANEXO 2

Datasheet Telha Solar L8 Energy



A tecnologia por trás da Telha Solar

A inquebrável tecnologia de vaporização catódica a vácuo é considerada globalmente como sendo a melhor tecnologia para fabricação de filmes finos CIGS. Este tipo de tecnologia é largamente empregado nas Telhas Solares.

Tomando como exemplo uma Telha Solar com três arcos e dupla camada de vidro, a geração de energia é de 103W/m². Esta telha pode gerar energia por cerca de 1200 horas/ano e sua eficiência energética (85%) chega a 25 anos.



Parâmetros Físicos

Modelo:	HW-MQ5B-V230
Comprimento:	500 mm
Largura:	721 mm
Altura dos arcos:	33 mm
Espessura:	7,5 mm
Peso:	6,5 kg
Cor:	Preta
Caixa de junção:	39*46*16,6 (mm) IP67
Tipo de cabo:	2,5mm (cabo solar) 450 (+10/-0) mm
Conector:	MC4

Parâmetros elétricos

Tipo de célula:	CIGS - (Cobre - Índio - Gálio - Selênio)
Potência:	30 W
Corrente de curto-circuito (Isc):	4,4 A
Tensão de circuito aberto (Voc):	10,3 V
Corrente à máxima potência (Imp):	3,8 A
Tensão à máxima potência (Vmp):	7,9 V
Eficiência da Célula:	17%
Tensão Máxima do Sistema:	1000 V
1 m ² ≅ 3 peças da Telha Solar ≅ 103 W	

*STC: 1000W/m², 25°C de temperatura da célula

Parâmetros Gerais

Grau de carga:	2400 Pa
Grau de resistência à água:	IP67
Grau de resistência ao fogo:	A
Grau de resistência ao granizo:	Nível 4 (ANSI FM 4473)

ANEXO 3

Datsheet Inversor Solar OnGrid

Max. DC Input Voltage	450V	550V
Start Voltage	80V	
DC Voltage Range	70-450V	70-550V
MPP Work Voltage Range/ Nominal Voltage	70-450V/250V	70-550V/360V
Full Load DC Voltage Range	175-400V	250-500V
Max. Input Current	10A	13A
Max. Input Current per String	10A	13A
Number of MPP Trackers /Strings per MPPT	1/1	1/2
AC OUTPUT		
Rated AC Output Power	1600W	3000W
Max. AC Output Power	1650W	3000W
Max. Output Current	7.8A	14.3A
AC Nominal Voltage; Range	220,230,240Vac; 180-280Vac	
AC Grid Frequency; Range	50,60Hz; ± 5 Hz	
Power Factor	1	
THDI	<3%	
AC connection	Single Phase	
EFFICIENCY		
Max. Efficiency	97%	
CEC Efficiency	96.5%	
MPPT Efficiency	99.5%	
PROTECTION		
DC Reverse Polarity Protection	Yes	