



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANÁLISE COMPARATIVA DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA ENTRE
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONVENCIONAIS E INTEGRADOS

RENAN BENETON DAMASCENO

VARGINHA
2025

RENAN BENETON DAMASCENO

ANÁLISE COMPARATIVA DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA ENTRE
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONVENCIONAIS E INTEGRADOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Centro Federal de Educação Tecnológica
de Minas Gerais como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Egídio Ieno Júnior

Coorientadora: Prof.^a Dra. Valéria Antônia Justino Rodrigues

VARGINHA

2025

RENAN BENETON DAMASCENO

ANÁLISE COMPARATIVA DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA ENTRE
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONVENCIONAIS E INTEGRADOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Centro Federal de Educação Tecnológica
de Minas Gerais como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro Civil.

Data de aprovação: 30/01/2025

Banca examinadora:

Egídio Ieno Júnior, Dr
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) - Unidade
Varginha

Valéria Antônia Justino Rodrigues, Dra
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) - Unidade
Varginha

Daniel Soares de Alcantara, M.Sc
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) - Unidade
Varginha

Leopoldo Uberto Ribeiro Júnior, Dr
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) - Unidade
Varginha

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado especialmente a minha família, que em todos os momentos foram meu suporte, foram a base para a construção dos meus sonhos, pessoas que nunca deixaram de acreditar no meu potencial.

Dedico aos meus pais Rogério e Mônica que nunca mediram esforços para que eu pudesse chegar a algum lugar, que me deram a oportunidade de viver o melhor sempre. Dedico ao meu irmão, Rafael, que sempre foi um exemplo e um espelho para mim.

A conquista de mais esta etapa em minha vida é também de vocês, obrigado pela oportunidade!

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão primeiramente a Deus, por me dar saúde, condições e capacidade de chegar até aqui, sem ele nada seria possível, e a todos que contribuíram para a realização desta graduação.

À minha família, por seu amor incondicional, apoio emocional e incentivo contínuo. Sem o apoio de vocês, este trabalho não seria possível. Agradeço por estarem sempre ao meu lado, me encorajando a alcançar meus objetivos.

Aos meus amigos e colegas de curso, pelo apoio mútuo, troca de experiências e momentos compartilhados ao longo desta jornada acadêmica. Suas palavras de incentivo e apoio foram fundamentais para manter minha motivação e determinação.

Agradecimentos especiais também as empresas Genyx Solar Power e Eternit, que colaboraram para a realização deste trabalho, tendo a disposição de fornecer dados técnicos e informações inerentes a valores, possibilitando uma análise a fundo de ambos os mercados fotovoltaicos.

Por fim, expresso minha gratidão a todas as fontes de inspiração, professores, em especial aos meus orientadores, Egídio e Valéria, que acreditaram e se dedicaram a este trabalho juntos comigo cujo o profissionalismo e conhecimento contribuíram para o embasamento profissional durante toda a graduação.

Este trabalho não seria possível sem o apoio e contribuições de cada um de vocês. Obrigado por fazerem parte desta jornada e por tornarem este momento tão especial e significativo em minha vida acadêmica.

RESUMO

O desenvolvimento da sociedade evidencia a crescente necessidade de energia em todos os contextos de convivência humana, enquanto as preocupações com a exaustão dos combustíveis fósseis, seus impactos ambientais e a insustentabilidade de sua exploração impulsionam a busca por alternativas renováveis. Entre estas, a energia solar destaca-se como uma das fontes mais promissoras, sendo inesgotável tanto como luz quanto como calor. Nos últimos anos, o uso da tecnologia fotovoltaica avançou rapidamente. Contudo, muitas edificações não estão adequadamente preparadas para receber esses sistemas, resultando frequentemente em adaptações que desconsideram aspectos estéticos, estruturais e funcionais. Em contrapartida, os avanços tecnológicos e a qualificação dos profissionais têm possibilitado a integração arquitetônica de sistemas fotovoltaicos por meio de tecnologias BIPV - Building Integrated Photovoltaics. O presente trabalho realiza uma análise comparativa da viabilidade técnica e econômica entre sistemas fotovoltaicos convencionais e integrados aplicados a edificações residenciais. A crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis e a necessidade de integrar esses sistemas de forma arquitetônica motivaram a pesquisa. Para tanto, foi desenvolvido um projeto arquitetônico simulado de uma residência unifamiliar em Varginha, Minas Gerais, utilizando o software Autodesk Revit 2023 para modelagem da edificação e o PVsyst 7.4 para o dimensionamento e análise de desempenho dos sistemas fotovoltaicos. O sistema convencional foi dimensionado totalizando 4,4 kWp, enquanto o sistema BIPV utilizou telhas fotovoltaicas da Tégula Solar®, com potência total de 5,21 kWp. A análise econômica incluiu o levantamento de custos com materiais, mão de obra e tempo de retorno do investimento. Os resultados indicaram que ambos os sistemas foram capazes de suprir o consumo mensal de 600 kWh, porém o sistema convencional apresentou menor custo inicial e retorno financeiro mais rápido. O sistema BIPV, por outro lado, destacou-se pela integração estética e funcional à edificação, apesar de apresentar maior investimento inicial. A escolha entre os sistemas deve, portanto, considerar as prioridades do projeto, como custo, eficiência e integração arquitetônica.

PALAVRAS-CHAVE: sustentabilidade; integração arquitetônica; energia solar.

ABSTRACT

The development of society highlights the growing need for energy in various contexts, while concerns related to the depletion of fossil fuels, their environmental impacts, and the unsustainability of their exploitation drive the search for renewable alternatives. Among these, solar energy stands out as one of the most promising sources, being inexhaustible both as light and heat. In recent years, photovoltaic technology has advanced significantly; however, many buildings are not adequately prepared to accommodate these systems, often resulting in adaptations that overlook aesthetic, structural, and functional aspects. Conversely, technological advancements and the increasing expertise of professionals have enabled the architectural integration of photovoltaic systems through *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV) technologies. This study conducts a comparative analysis of the technical and economic feasibility of conventional and integrated photovoltaic systems applied to residential buildings. The growing demand for sustainable energy solutions and the need to architecturally integrate these systems motivated this research. To this end, an architectural project of a single-family residence in Varginha, Minas Gerais, was simulated using Autodesk Revit 2023 for building modeling and PVsyst 7.4 for system sizing and performance analysis. The conventional system was designed with a total capacity of 4.4 kWp, while the BIPV system employed photovoltaic tiles from Tégula Solar® with a total capacity of 5.21 kWp. The economic analysis included the assessment of material costs, labor, and the payback period. The results indicated that both systems were capable of meeting the monthly consumption of 600 kWh; however, the conventional system presented a lower initial cost and faster financial return. The BIPV system, on the other hand, stood out for its aesthetic and functional integration into the building, despite the higher initial investment. Therefore, the choice between systems should consider project priorities such as cost, efficiency, and architectural integration.

KEYWORDS: sustainability; architectural integration; solar energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)	1
Figura 2: Balanço Energético Nacional	5
Figura 3: Efeito Fotovoltaico.....	6
Figura 4: Potencial de Incidência Solar	8
Figura 5: Irradiação global média anual em cada região brasileira	8
Figura 6: Irradiação Solar Mensal	9
Figura 7: Componentes do Sistema Fotovoltaico.....	10
Figura 8: Sistema Fotovoltaico On-Grid	11
Figura 9: Telhas BIPV	13
Figura 10: Fachada com utilização de BIPV	14
Figura 11: Sistema Fotovoltaico BIPV em fachadas	15
Figura 12: Sistema BIPV	15
Figura 13: Integração do Sistema Fotovoltaico com a agricultura.....	16
Figura 14: Localização do Município de Varginha/MG	17
Figura 15: Vista da fachada do projeto (software Autodesk Revit 2023/versão estudante)	18
Figura 16: Perspectiva isométrica do telhado para implantação da usina (software Autodesk Revit/2023 versão estudante).....	18
Figura 17: Dimensões da cobertura (software da Autodesk Revit 2023 versão estudante)	23
Figura 18: Configuração da incidência solar (PVsyst.7.4, na versão gratuita)	24
Figura 19: Informações do módulo fotovoltaico TSM-DE19-550 Wp.....	25
Figura 20: Disposição em uma fileira dos módulos TSM-DE19-550 Wp/Trina Solar®	26
Figura 21: Disposição em duas fileiras dos módulos TSM-DE19-550 Wp/Trina Solar®	26
Figura 22: Inversor fotovoltaico CSI-7KTL1P-GI-FL/Canadian Solar®.....	27
Figura 23: Características técnicas inversor CSI-7KTL1P-GI-FL (7,0 kW).....	28
Figura 24: Quadro de distribuição QDCC fotovoltaico.....	29
Figura 25: Telhado de edificação coberto com telha fotovoltaica BIG - F11	31
Figura 26: Eficiência energética da telha fotovoltaica BIG - F11	32
Figura 27: Arranjos de distribuição das telhas fotovoltaicas BIG-F11/Tégula Solar®	34

Figura 28: Estimativa de produção de energia nos sistemas convencional e integrado	40
Figura 29: Tempo de retorno financeiro para o sistema fotovoltaico convencional ...	41
Figura 30: Tempo de retorno financeiro para o sistema fotovoltaico integrado	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados técnicos para o projeto do sistema fotovoltaico.....	19
Tabela 2: Incidência solar no município de Varginha-MG	19
Tabela 3: Características técnicas do módulo fotovoltaico Trina Solar®.....	25
Tabela 4: Características técnicas da telha fotovoltaica.....	33
Tabela 5: Características técnicas do arranjo proposto para o circuito 1	35
Tabela 6: Características técnicas do arranjo proposto para o circuito 2	36
Tabela 7: Orçamento do sistema fotovoltaico convencional	37
Tabela 8: Orçamento do sistema fotovoltaico integrado	38

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações Iniciais	1
1.2. Objetivos da Pesquisa	2
1.2.1. Objetivo Geral	2
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Justificativa	3
2.REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1. Energias Renováveis	4
2.2. Energia Solar Fotovoltaica	5
2.3. Incidência Solar	7
2.4. Sistema Solar Fotovoltaico	9
2.5. <i>Building Integrated Photovoltaics</i> (BIPV)	12
2.6. Sistemas Fotovoltaicos no Mundo	14
3.MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1. Projeto Arquitetônico	17
3.2. Incidência Solar	19
3.3. Características do Sistema Fotovoltaico	20
4.RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
4.1. Sistema Fotovoltaico Convencional	22
4.2. Sistema Fotovoltaico Integrado (BIPV)	30
4.3. Análise Econômica do Sistema Fotovoltaico Convencional	36
4.4. Análise Econômica do Sistema Fotovoltaico Integrado	38
4.5. Retorno Financeiro	39
5.CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
6.SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	43
REFERÊNCIAS	45

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No decorrer dos anos, o aumento gradativo da população mundial e a grande demanda por necessidades básicas dos seres humanos, trouxeram ao planeta importantes desafios econômicos, sociais e ambientais. Projetos e produções sustentáveis tornaram-se indispensáveis para a longevidade da raça humana, fazendo com que grandes líderes mundiais se reunissem no intuito de considerar tais desafios, à exemplo da agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015).

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS) são baseados em três pilares centrais: crescimento econômico, inclusão social e proteção ao meio ambiente. Desta forma, foram elencados nestes objetivos 169 metas que serão avaliadas por 232 indicadores globais. Na Figura 1, é apresentado de forma ilustrativa, os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ONU 2015; ONU, 2022).

Figura 1: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)



Fonte: Nações Unidas Brasil (2015).

Entre os objetivos, destaca-se o de número 7, que é responsável por assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível da energia. Neste sentido, é observado a busca por energias mais limpas e acessíveis para a produção

de eletricidade pelo mundo todo, onde o reconhecimento das fontes renováveis passa a ser não mais vistas alternativas, mas como fontes de energia primárias.

A energia solar pode desempenhar um papel de grande importância na redução da poluição mundial, isso porque a energia fotovoltaica é uma das opções mais limpas que existe e contribuirá para transição energética completa, de acordo com a Agência de Proteção Ambiental do Estados Unidos (EPA, 2021). Segundo pesquisas da Mordor Intelligence (2024), o tamanho do Mercado de Energia Solar em termos de base instalada deverá crescer de 1,84 mil gigawatts em 2024 para 5,08 mil gigawatts até 2029, representando um aumento de 28,82% durante o período de previsão (2024-2029).

O Brasil dispõe de uma diversificada matriz energética, sejam elas renováveis e não renováveis, com destaque para o potencial solarimétrico, segundo Bandeira (2012). Conforme afirmou Pereira (2017), o local no Brasil com menor irradiação solar é quatro vezes superior ao índice apresentado em toda a Alemanha, país que é um dos líderes mundiais no aproveitamento de energia solar.

O emprego da energia fotovoltaica desenvolveu-se em ritmo acelerado nos últimos anos, contudo observa-se que em muitos casos as edificações não estão preparadas para receber os equipamentos, o que traz para o meio da engenharia a busca de novas formas para a integração do sistema junto a arquitetura da edificação através dos equipamentos BIPV - Built Integrated Photovoltaics.

O presente estudo buscou as novas tecnologias que chegaram ao mercado que apresentam integração ao sistema fotovoltaico na arquitetura da edificação, seja ela residencial, comercial ou industrial. Ademais, destacou-se a pesquisa exploratória através de um estudo comparativo entre o sistema tradicional e a utilização do sistema baseado em Built Integrated Photovoltaics (BIPV), buscando expor as vantagens e diferenciais da utilização do sistema integrado.

1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1. Objetivo geral

Analisar a viabilidade econômica, técnica e ambiental do sistema fotovoltaico integrado à construção civil em comparação aos sistemas fotovoltaicos convencionais para uma residência unifamiliar.

1.2.2. Objetivos específicos

- Apresentar a tecnologia BIPV por meio das telhas fotovoltaicas;
- Dimensionar os sistemas fotovoltaicos convencional e integrado;
- Analisar e comparar os custos e o tempo de retorno da implantação de cada sistema;
- Avaliar tecnicamente a utilização de cada sistema.

1.3. JUSTIFICATIVA

A crescente demanda por energia no Brasil e no mundo deixa claro a necessidade de novas fontes de produção que sejam menos poluentes e que utilizam de meios sustentáveis. Com isso, a energia solar fotovoltaica tornou-se uma das principais fontes de produção do país. É inegável o grande potencial solarimétrico presente no Brasil, onde o local com menos incidência solar é capaz de gerar mais energia do que o local mais ensolarado da Alemanha (Pereira, 2017).

Com o crescimento do setor de energia solar no país, chegou junto os problemas de adaptações do sistema nas estruturas já existentes, ou seja, a necessidade de grandes áreas voltadas ao norte para instalação dos módulos e, além disso, a falta de integração do projeto fotovoltaico com os projetos já executados, incluindo o arquitetônico.

A introdução das novas tecnologias que chegam ao mercado depende de iniciativa dos profissionais ligados à área com objetivo de incentivar e tornar o sistema fotovoltaico cada vez mais vantajoso e, também, aplicável a construção civil de maneira que seja agregado a ele funções dentro da edificação como um todo, além da geração de energia.

Diante disto, observa-se que a comparação entre os sistemas fotovoltaico de forma tradicional e com a tecnologia da Eternit®, que são telhas com células fotovoltaicas, é de grande relevância para a sustentabilidade de projetos e construções dentro da engenharia. Ademais, estudos que visam a análise dos custos de implantação de ambos os projetos, expondo as vantagens e desvantagens, estudo de viabilidade e a integração do projeto com a edificação é uma forma de apresentar novas tecnologias no mercado.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

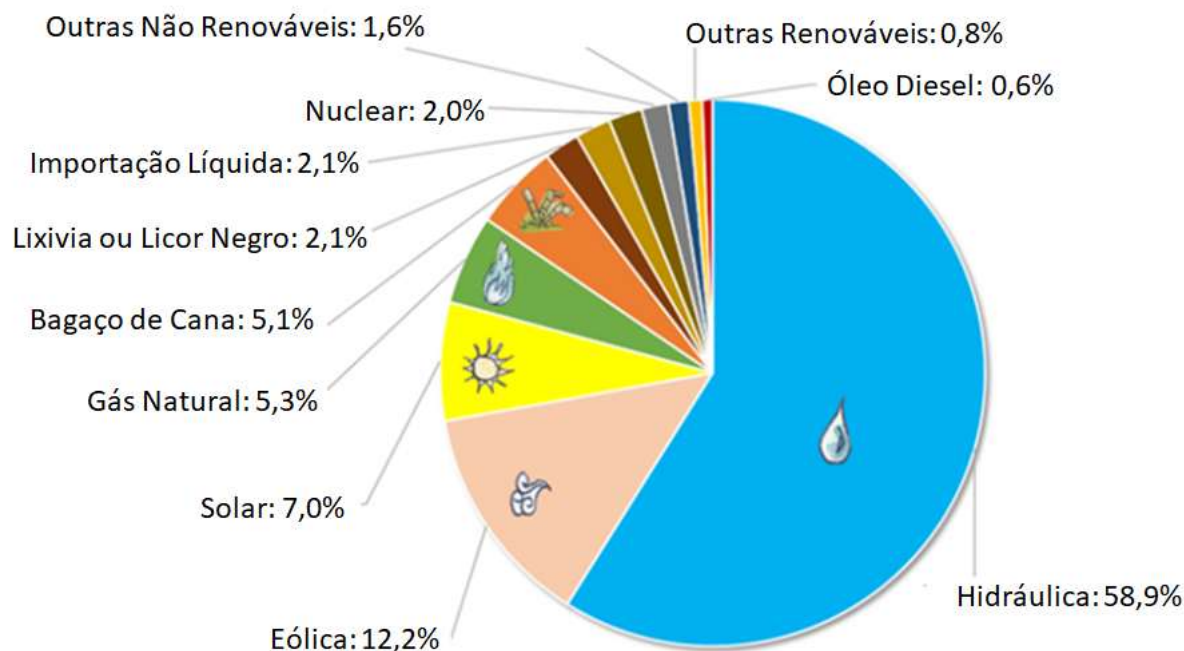
2.1. ENERGIAS RENOVÁVEIS

As fontes de energia renováveis referem-se aos recursos naturais disponíveis na natureza, que podem ser renovadas ao longo do tempo, com ou sem a intervenção humana, incluindo água, radiação solar, ventos e ondas. Esses recursos têm se destacado como alternativas sustentáveis às fontes de energia convencionais, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis e a mitigação dos impactos ambientais associados.

O sistema de produção de energia elétrica brasileiro é hidrotérmico de grande porte e com forte predominância de usinas hidroelétricas, com usinas localizadas nas regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte (Raupp; Luz; Delagnelo, 2024). O Brasil se encaixa como um potencial precursor do projeto de transição energética, sendo um tópico relevante no cenário internacional, tendo em vista sua vantagem geográfica e o acesso a fontes renováveis de energia (Carvalho; Pereira, 2024). Segundo o Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2023, da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) a utilização da energia solar saltou de 2,5% em 2021 para 7,0% da matriz energética brasileira em 2023, fazendo com que o Brasil seja considerado uma das nações mais renováveis dentre todas as grandes economias mundiais.

O sol, segundo Abbot (2010), constitui a maior fonte de energia renovável, caracterizando-se por ser limpa, sustentável, inesgotável e por não gerar emissões de gases poluentes, como ocorre com fontes de energia convencionais. Além disso, os impactos ambientais associados ao uso da energia solar são consideravelmente reduzidos, reforçando seu papel crucial na transição energética para sistemas mais sustentáveis e menos dependentes de combustíveis fósseis (EPE, 2022). Na Figura 2, é apresentado um gráfico retirado do relatório escrito pela EPE em 2023, onde tem-se o balanço energético nacional.

Figura 2: Balanço Energético Nacional



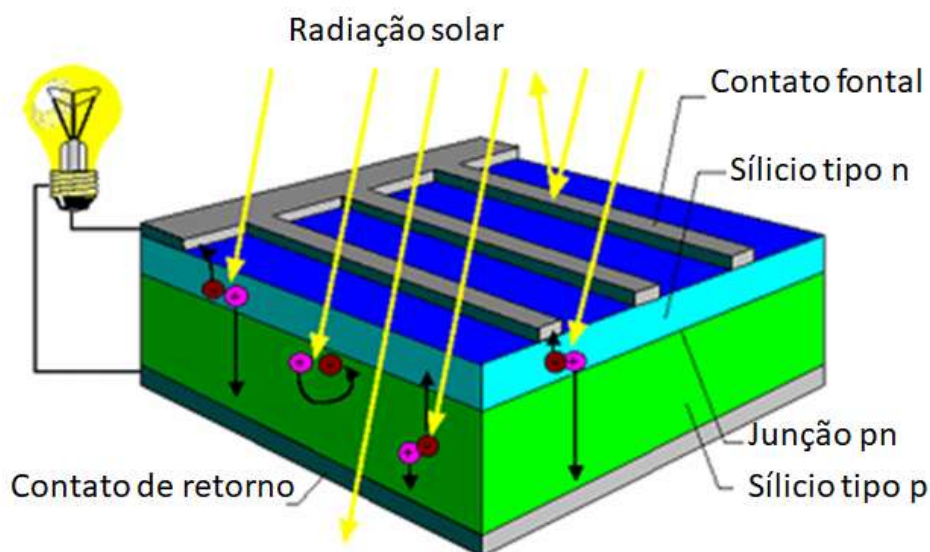
Fonte: adaptado de EPE (2023).

2.2. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é uma das tecnologias mais promissoras e amplamente utilizadas no campo das energias renováveis. Esta fonte de energia é obtida através da conversão direta da luz solar em eletricidade, utilizando dispositivos chamados células fotovoltaicas, geralmente feitos de materiais semicondutores, como o silício. Villalva e Gazoli (2012) afirmaram que a energia do sol é transmitida para o nosso planeta através do espaço na forma de radiação constituída de ondas eletromagnéticas que possuem frequências e comprimentos de ondas diferentes.

A produção de energia fotovoltaica é realizada através de placas solares, produzidas em material semicondutor, que absorvem a luz solar, ocasionando uma diferença de potencial, gerando uma corrente elétrica contínua a partir da energia luminosa. Por outro lado, Lana *et al.* (2016) relatou que uma célula fotovoltaica não armazena energia elétrica, ela apenas mantém um fluxo de elétrons num circuito elétrico enquanto houver incidência de luz sobre ela. Este fenômeno, denominado efeito fotovoltaico, foi descoberto no século XIX pelo físico francês Alexandre-Edmond Becquerel (Bühler, 2014). Na Figura 3, é apresentado uma ilustração representativa do efeito fotovoltaico.

Figura 3: Efeito Fotovoltaico



Fonte: adaptado de Castro (2007).

As vantagens da geração de energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos são inúmeras, dentre elas, destaca-se a inexistência de partes móveis, o que contribui para a durabilidade e a confiabilidade do sistema. Além disso, a instalação é rápida e o nível de manutenção exigido é baixo, conforme aponta Rüther (2004). Outros benefícios incluem a natureza não poluente da energia solar, que a torna como alternativa ambientalmente correta, bem como seu funcionamento silencioso e renovável. Esses atributos fazem da energia solar uma opção atrativa para a geração de eletricidade sustentável. Tais benefícios são classificadas pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2016) em três esferas principais: socioeconômica, ambiental e estratégica.

Na esfera socioeconômica, um dos principais impactos é a redução de gastos com energia elétrica para a população, a geração de empregos e a atração de capital externo e os novos investimentos privados ao país que impulsionam o desenvolvimento econômico. Em termos ambientais, a energia solar se apresenta como uma solução limpa, renovável e sustentável, visto que não emite gases de efeito estufa, não produz resíduos, não demanda água (aliviando a pressão sobre os recursos hídricos) e opera de maneira silenciosa. Por fim, na esfera estratégica, promove a diversificação da matriz elétrica brasileira, incorporando uma nova fonte renovável e aumentando a segurança no suprimento de energia elétrica.

Ademais, a forma de geração distribuída oferece a vantagem de possibilitar o uso da energia no próprio ponto de geração ou em áreas muito próximas. Esse modelo reduz significativamente as perdas com a transmissão, uma vez que a energia gerada é consumida de forma quase imediata, sem necessidade de percorrer longas distâncias através das redes elétricas. Essa proximidade entre geração e consumo não apenas melhora a eficiência do sistema, mas também gera economia ao diminuir a necessidade de constantes reformas e expansões nas redes de distribuição, aliviando a infraestrutura elétrica e prolongando sua vida útil.

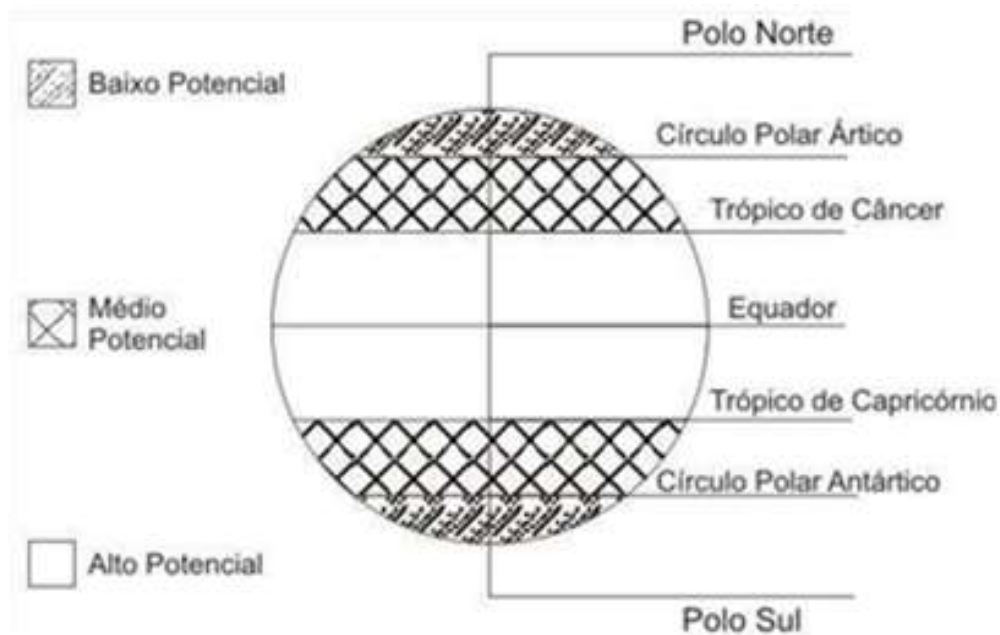
2.3. INCIDÊNCIA SOLAR

A superfície da Terra recebe energia solar, nas formas de luz e calor, suficiente para suprir as necessidades da população mundial. Embora praticamente toda energia usada pelo ser humano tem origem no sol apenas uma pequena parcela dessa energia é aproveitada de forma direta (Silva; Araújo, 2022).

A incidência solar é influenciada por diversos fatores, como a latitude, a estação do ano, a hora do dia, a inclinação da superfície terrestre e as condições atmosféricas (Steffens, 2017). Ela refere-se à quantidade de radiação solar que atinge uma superfície terrestre em determinado local e período de tempo, sendo, um fator fundamental na avaliação do potencial de aproveitamento da energia solar para diversos fins, como a geração de eletricidade em sistemas fotovoltaicos ou o aquecimento solar de água.

O potencial de aproveitamento da energia solar em uma determinada região é influenciado pela sua localização geográfica na superfície terrestre (Sales, 2008). O autor afirma que as regiões localizadas entre os círculos polares e os trópicos apresentam um potencial médio para a geração de energia solar, enquanto aquelas situadas entre as linhas tropicais podem ser classificadas como de alto potencial. O Brasil, situado entre os trópicos e próximo à linha do Equador, beneficia-se de elevados índices solarimétricos, o que o torna um país privilegiado para a exploração da energia solar. Na Figura 4, é mostrado a distribuição do potencial solar em diferentes regiões do globo.

Figura 4: Potencial de Incidência Solar



Fonte: adaptado de Rosa e Filho (2007).

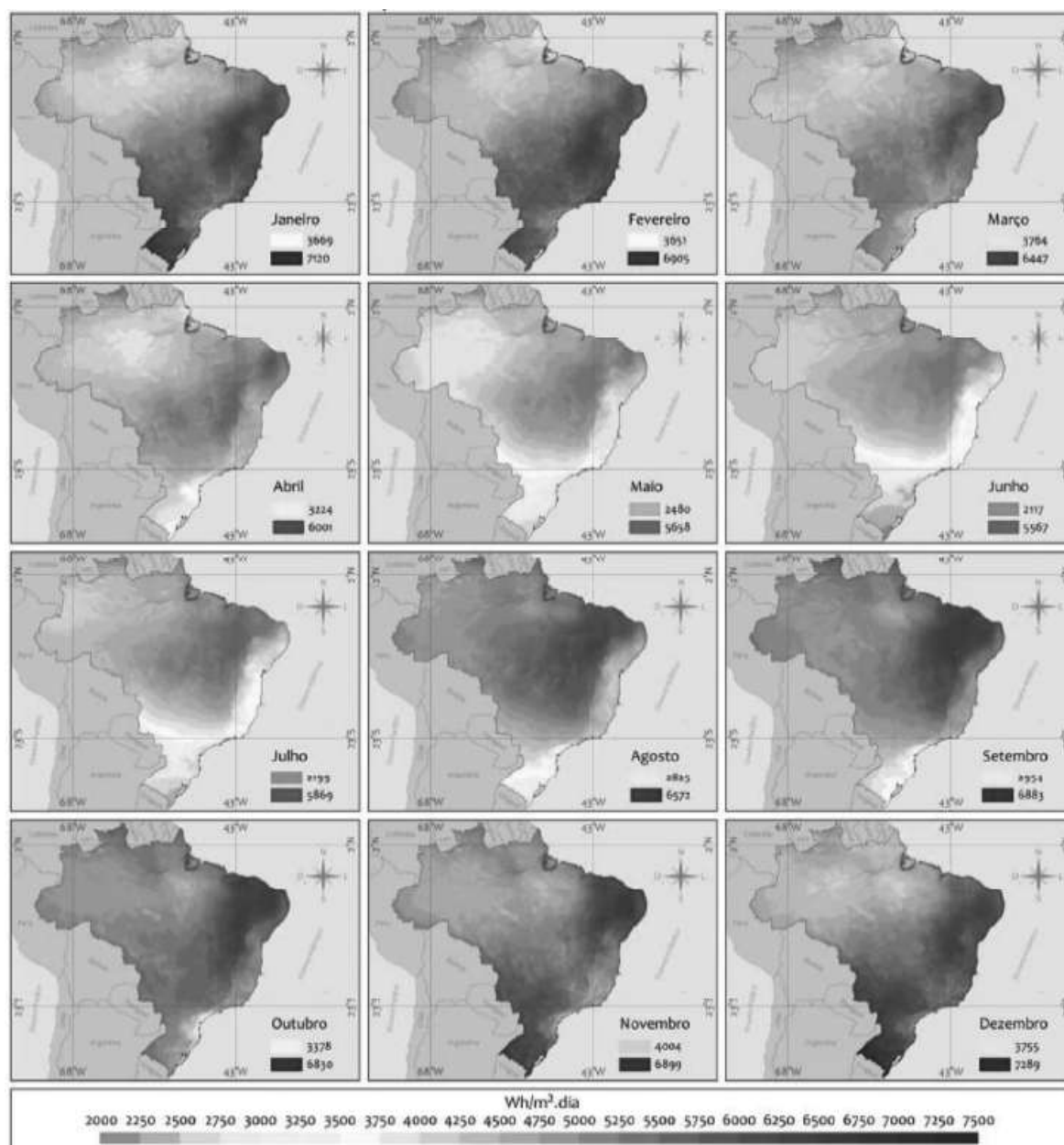
Villalva e Gazoli (2012) apontaram que a energia solar transmitida na forma de onda está associada à sua frequência. Ademais, Pinho e Galdino (2014) comentaram que a radiação solar pode ser medida em fluxo de potência quando se trata de irradiância solar, ou em energia por unidade de área, quando se trata de irradiação solar. Nas Figuras 5 e 6, são apresentadas a irradiação global média anual (horizontal e plano inclinado) e a variação da incidência solar (ao longo dos meses do ano) nas diferentes regiões brasileiras, evidenciando o elevado índice solarimétrico do país.

Figura 5: Irradiação global média anual em cada região brasileira

	Irradiação global horizontal		Irradiação global no plano inclinado	
	kWh/m ² .dia	kWh/m ² .ano	kWh/m ² .dia	kWh/m ² .ano
Norte	4,64	1.693	4,66	1.701
Nordeste	5,49	2.003	5,52	2.015
Centro-oeste	5,07	1.849	5,20	1.900
Sudeste	5,06	1.846	5,26	1.918
Sul	4,53	1.654	4,77	1.743

Fonte: <https://integracaosolar.com.br/img/component/lr/tabela-br.png> (2024).

Figura 6: Irradiação Solar Mensal



Fonte: Pereira (2017).

Destaca-se, que o estado de Minas Gerais, apresenta uma redução na incidência solar em determinados meses do ano, embora mantenha, de forma geral, um potencial significativo para a geração de energia solar.

2.4. SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

Os painéis solares, também conhecidos como módulos, são os componentes primordiais do sistema fotovoltaico destinado à geração de energia. Estes módulos são compostos por um conjunto de células fotovoltaicas que são interligadas

eletricamente em série e/ou em paralelo. O conjunto deles é denominado gerador fotovoltaico, representando a primeira etapa do sistema responsáveis pela captação da irradiação solar e pela conversão dessa energia em eletricidade (Pereira; Oliveira, 2011).

No sistema fotovoltaicos, os inversores de corrente desempenham um papel fundamental, sendo responsáveis pela conversão da energia elétrica gerada em corrente contínua (DC) pelos painéis solares em corrente alternada (AC) (Pinho; Galdino, 2014). Essa conversão é essencial, uma vez que a maioria dos equipamentos residenciais e comerciais opera com corrente alternada. Portanto, os inversores garantem que a eletricidade produzida pelo sistema fotovoltaico possa ser utilizada de forma eficaz em aplicações cotidianas, além de possibilitar a integração com a rede elétrica (Pereira; Oliveira, 2011).

Além dos módulos e inversores, existem componentes específicos que desempenham um papel crucial na segurança dos sistemas de geração de energia solar. Esses itens de proteção incluem disjuntores, dispositivos de proteção contra surtos (DPS) e cabos com dupla isolamento. Os disjuntores são responsáveis por interromper o fluxo de corrente em caso de sobrecargas ou curtos-circuitos, prevenindo danos ao sistema, os DPS protegem os equipamentos contra surtos elétricos, que podem ser causados por descargas atmosféricas ou flutuações na rede elétrica. Já os cabos com dupla isolamento garantem maior segurança e durabilidade, minimizando o risco de falhas elétricas. Na Figura 7, são mostrados o sistema fotovoltaico e os equipamentos utilizados como placas, inversores e baterias.

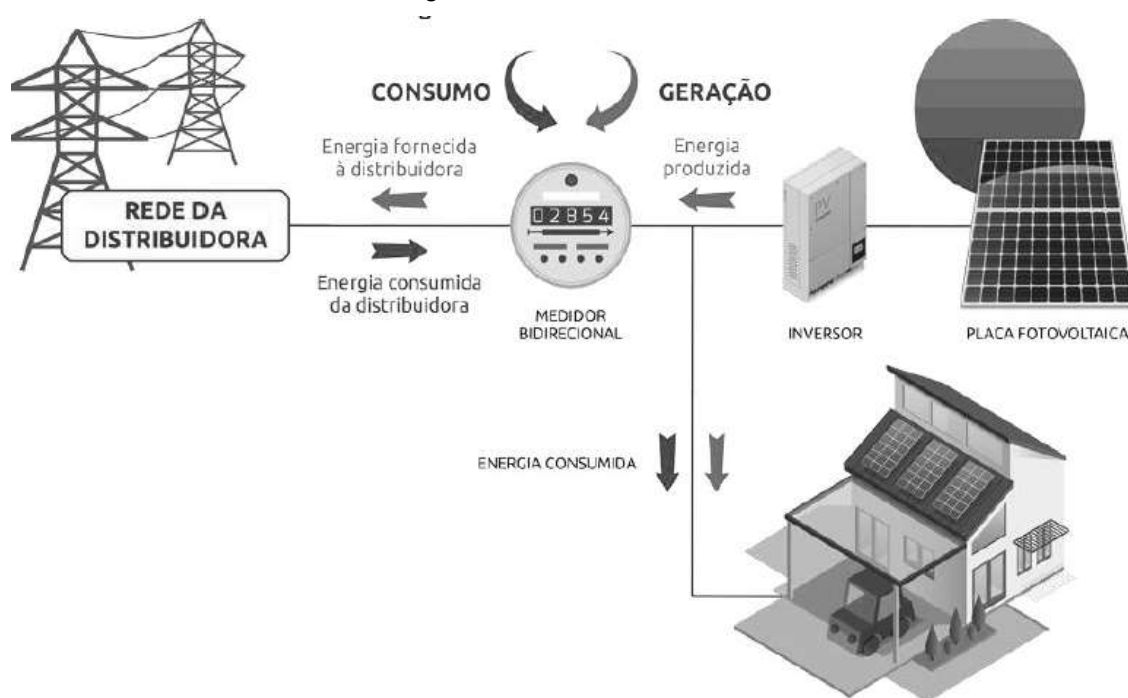
Figura 7: Componentes do Sistema Fotovoltaico



Fonte: Neosolar Energia (2024)

Existem dois grupos principais de sistemas fotovoltaicos: conectado à rede da concessionária (On-Grid) e o que utiliza de baterias para o abastecimento da energia gerada (Off-Grid), cada um com características distintas e aplicações específicas. O sistema On-Grid permite que a energia solar gerada pelos painéis seja utilizada diretamente no local e qualquer excedente pode ser injetado na rede elétrica (Castro, 2008). Sendo assim, é necessário um medidor bidirecional, como é exemplificado na Figura 8, para registrar a energia consumida da rede e a injetada de volta, possibilitando a cobrança ou créditos na conta de energia.

Figura 8: Sistema Fotovoltaico On-Grid



Fonte: Inovacare Solar (2017)

Por outro lado, o sistema Off-Grid é projetado para operar de forma independente da rede elétrica. Esse tipo de sistema é frequentemente utilizado em áreas remotas onde não há acesso à eletricidade convencional. As principais características desse sistema incluem a autonomia energética, permitindo que o sistema Off-Grid forneça energia de forma autônoma, utilizando baterias para armazenar a eletricidade gerada durante o dia para uso durante a noite ou em dias nublados (Ruther, 2004).

A escolha entre um sistema On-Grid e Off-Grid depende das necessidades energéticas, da localização e das condições específicas de cada usuário. Enquanto sistemas On-Grid são ideais para quem tem acesso à rede elétrica, sistemas Off-Grid

oferecem uma solução viável para aqueles que buscam autonomia energética em áreas remotas. Ademais, ainda têm os sistemas fotovoltaicos híbridos que combinam On-Grid com Off-Grid para garantir um fornecimento constante e confiável de energia.

2.5. BUILD INTEGRATED PHOTOVOLTAICS (BIPV)

Conforme relatado por Li, Yang e Lam (2013), a integração de elementos fotovoltaicos com a estrutura do edifício é chamada de Sistema Fotovoltaico Integrado à Construção/Build Integrated Photovoltaic (BIPV). Uma das principais características do BIPV é que, além de funcionar como geradores renováveis de eletricidade, seus componentes são projetados para atuar como parte da construção (Schuetze; Willkomm; Roos, 2015).

Deste modo, os elementos fotovoltaicos podem ser incorporados de forma estética e funcional na arquitetura do edifício, como telhados, fachadas ou janelas, eliminando a necessidade de estruturas adicionais para suportar os painéis solares. Ademais, a área, a eficiência e o rendimento solar total do BIPV são fatores que influenciam no melhor aproveitamento dos sistemas (Schuetze; Willkomm; Roos, 2015). Entretanto, o investimento inicial é a principal fator de desvantagem quando comparado ao sistema tradicional (Calise *et al.*, 2020).

Conforme informado pelo PORTAL SOLAR (2021), novas tecnologias irão possibilitar a transformação de superfícies em sistemas geradores de energia limpa e renovável e com o avanço na produção de painéis fotovoltaicos, novas formas de aplicá-los começaram a surgir, oferecendo maior versatilidade nos formatos e na arquitetura. Essa abordagem permite melhor integração estética e funcional dos sistemas fotovoltaicos às construções modernas, promovendo edificações mais sustentáveis e eficientes em termos energéticos.

Ao contrário dos sistemas fotovoltaicos convencionais, que são instalados sobre as superfícies do edifício, como telhados ou suportes externos, os sistemas BIPV são instalados como parte integrante da própria construção. Tais sistemas podem representar grande economia de energia no setor da construção civil, em especial aos edifícios “zero energia” que reduzem os custos totais com material de construção e montagem, pois não exigem suportes e trilhos (Tripathy; Sadhu; Panda, 2016; Lamnatou *et al.*, 2019). Um exemplo prático é a substituição de parte das telhas tradicionais por telhas BIPV, como é mostrado na Figura 9.

Figura 9: Telhas BIPV



Fonte: CREA-AM (2022).

A utilização do sistema fotovoltaico BIPV vai além da integração em telhados, sendo também amplamente aplicada em fachadas de edifícios, onde o próprio vidro pode conter células fotovoltaicas. Essa inovação permite que superfícies verticais, como janelas e painéis de vidro, se tornem geradores de energia solar, aproveitando a radiação solar que incide diretamente nas fachadas. A integração das células fotovoltaicas no vidro possibilita a geração de eletricidade sem comprometer a transparência ou a estética da construção.

A conscientização sobre a importância da transição energética e a necessidade de tecnologias limpas, o BIPV surge como uma solução altamente relevante e oportuna. Aplicações do sistema fotovoltaico BIPV não só amplia as possibilidades de uso de energia renovável em áreas urbanas, onde os espaços para painéis solares convencionais podem ser limitados, como também oferece benefícios adicionais, como a proteção contra raios Ultravioleta (UV) e o melhor isolamento térmico, contribuindo para segurança e a o conforto (Kelly; Sen; Tatari, 2020). Na Figura 10, é apresentado a utilização do BIPV em fachada, substituindo a película de vidro convencional.

Figura 10: Fachada com utilização de BIPV



Fonte: Alunobre (2019).

2.6. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO MUNDO

A construção de prédios com a integração de energia solar, por meio da tecnologia BIPV, é uma tendência crescente no mercado europeu. Esse modelo de construção sustentável tem ganhado destaque, especialmente em países que investem no BIPV como uma solução promissora para a geração de energia limpa em áreas urbanas. Considerando este cenário, a instalação de painéis fotovoltaicos nas fachadas e telhados de edifícios vem demonstrando ser uma alternativa potencial para a geração de energia limpa e renovável (Jelle *et al.*, 2012).

Santos *et al.* (2024) citaram alguns exemplos da aplicação de sistemas BIPV. Dentre eles, o projeto do edifício da Sede da Organização Mundial da Saúde em Genebra (Suíça), cuja fachada é composta por painéis fotovoltaicos que, além de desempenharem sua função estrutural e o Centro de Convenções de Munique (Alemanha), no qual foram utilizados telhados fotovoltaicos, ilustrando a viabilidade em grandes projetos. A Itália também tem se destacado por integrar energia solar diretamente na arquitetura de suas construções, aproveitando a abundância de radiação solar e o incentivo governamental às energias renováveis. Nas Figuras 11 e 12, são mostrados dois sistemas fotovoltaico BIPV localizados na Itália, nos quais foram utilizadas a fachada (Milão) e o telhado (Viareggio-Toscana) das edificações, sendo este último em funcionamento há 14 anos.

Figura 11: Sistema Fotovoltaico BIPV em fachadas



Fonte: Do autor (2024).

Figura 12: Sistema BIPV



Fonte: Do autor (2024).

Não apenas a integração de sistemas fotovoltaicos em edificações vem crescendo na Europa, mas também a combinação com a produção agrícola está ganhando destaque. Segundo um estudo da instituição Ember, realizado no de 2024, a tendência nos próximos anos é expandir a integração fotovoltaica, conciliando o uso da terra para a agricultura e geração de energia. Esse conceito é conhecido como “AGRIVOLTAICO” e permite que os painéis solares sejam instalados sobre áreas agrícolas (Figura 13), possibilitando que a agricultura e a geração de eletricidade coexistam de forma eficiente.

Figura 13: Integração do Sistema Fotovoltaico com a agricultura



Fonte: Smart Building Italia (2024).

Como observado na Figura 13, além de otimizar o uso do solo, o sombreamento proporcionado pelos painéis pode reduzir a evaporação da água, protegendo as plantações do excesso de calor e promovendo um microclima mais favorável. Ao mesmo tempo, a energia gerada contribui para a sustentabilidade das operações agrícolas, reduzindo custos energéticos e gerando uma fonte adicional de renda para os produtores.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

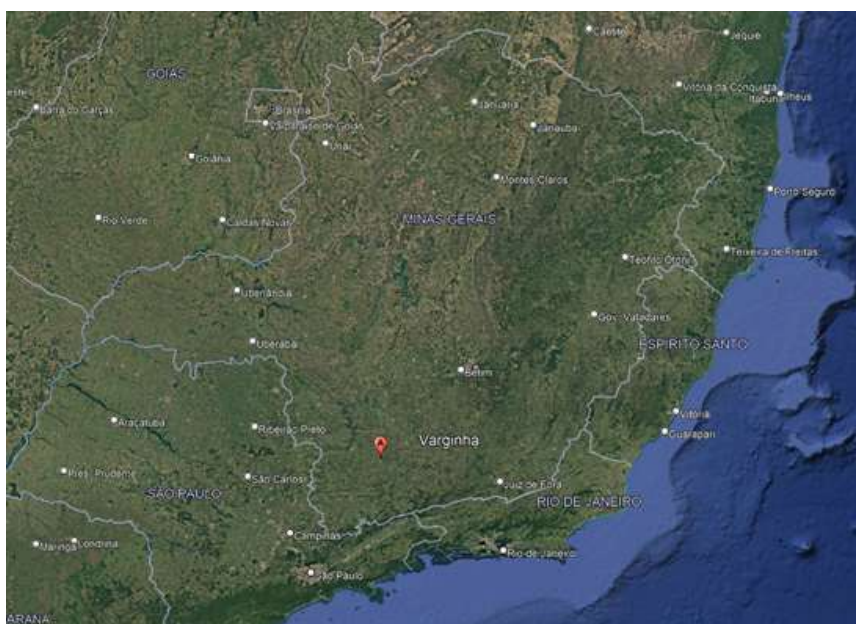
Neste estudo foi adotado a pesquisa exploratória para apresentar as

características dos sistemas fotovoltaicos convencional e integrado. A pesquisa buscou comparar os dois sistemas para melhor compreender os processos de implementação, os desafios enfrentados, os impactos e a viabilidade técnica e econômica.

3.1. PROJETO ARQUITETÔNICO

Para dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos, convencional e integrado (BIPV), foi simulado um projeto arquitetônico de uma residência unifamiliar de aproximadamente 150 m², caracterizada pelo padrão construtivo médio-alto, localizada na cidade de Varginha em Minas Gerais. Na Figura 14, é mostrado a localização do município, através da utilização do software Google Earth.

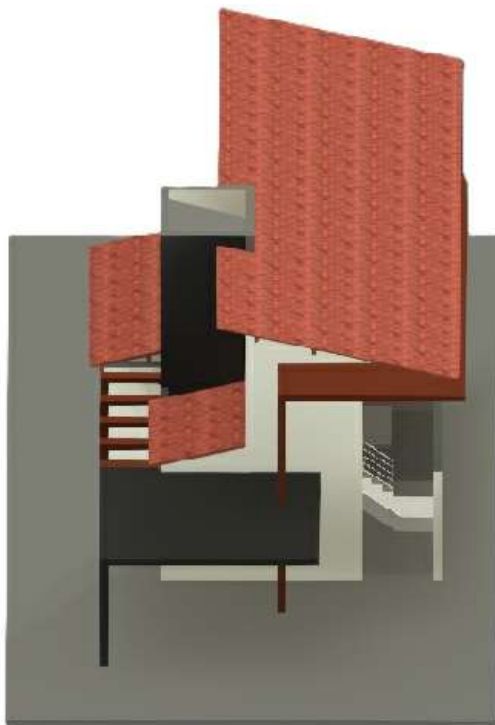
Figura 14: Localização do Município de Varginha/MG



Fonte: Adaptado de Google Earth (2024).

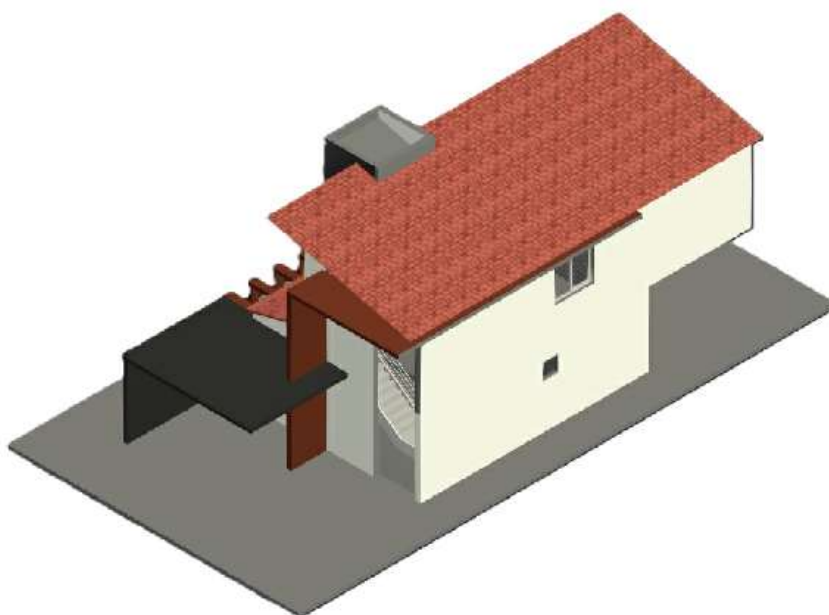
Um dos pontos de interesse para a realização de projetos fotovoltaicos é a cobertura da edificação, a qual foi planejada com estrutura de madeira e telhas cimentícias. Para evitar sombreamento de edificações vizinhas no sistema fotovoltaico, a residência foi simulada com dois pavimentos. Ademais, foi definido que uma das águas do telhado ficasse voltado para o norte geográfico, visando o maior rendimento. Nas Figuras 15 e 16, são mostradas a projeção 3D da residência e a perspectiva isométrica do telhado, respectivamente.

Figura 15: Vista da fachada do projeto (software Autodesk Revit 2023/versão estudante)



Fonte: Do autor (2024).

Figura 16: Perspectiva isométrica do telhado para implantação da usina (software Autodesk Revit/2023 versão estudante)



Fonte: Do autor (2024).

Na Tabela 1, é apresentada as características técnicas para instalação do sistema fotovoltaico.

Tabela 1: Dados técnicos para o projeto do sistema fotovoltaico

Características Técnicas	
Município	Varginha/MG
Temperatura máxima.	35°C
Temperatura mínima.	0°C
Inclinação do telhado	30°
Azimute	0°
Área do telhado	95 m²
Tipo de estrutura	Madeira
Tensão de entrada	220 V
Número de fases	3
Disjuntor geral	80 A
Fonte: Adaptado de INMET (2024).	

3.2. INCIDÊNCIA SOLAR

A radiação solar local é o principal fator que influencia a quantidade de energia com potencial de ser convertida em energia elétrica. Os dados de incidência solar, baseados em estudos e mapas solarimétricos existentes, foram obtidos por meio do software Sun Data, disponibilizados no site do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB, 2024). Na Tabela 2, é apresentada a incidência solar, global e inclinada, para o município de Varginha/MG.

Tabela 2: Incidência solar no município de Varginha-MG

Mês	kWh/m²dia		kWh/m²	
	Global	Inclinada	Global	Inclinada
Jan	5,49	4,98	170,19	154,38
Fev	5,70	5,43	159,60	152,04
Mar	4,85	4,96	150,35	153,76
Abr	4,59	5,16	137,70	154,80
Mai	3,95	4,83	122,45	149,73
Jun	3,76	4,83	112,80	144,90
Jul	4,01	5,07	124,31	157,17
Ago	4,86	5,73	150,66	177,63
Set	5,08	5,40	152,40	162,00
Out	5,37	5,23	166,47	162,13
Nov	5,22	4,79	156,60	143,70
Dez	5,59	5,00	173,29	155,00

Fonte: Adaptado de CRESESB (2024).

Com base nos dados da Tabela 2, foram obtidos 4,87 kWh/m²dia e 5,12 kWh/m²dia para irradiação média diária global e no plano inclinado a 22°, respectivamente, resultando no total anual de 1.776,82 kWh/m² (global) e de 1.867,24 kWh/m² (inclinado a 22°).

3.3. CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

O dimensionamento das cargas elétricas em residências é definido pela NBR 5410 (ABNT, 2020) que estabelece as diretrizes de segurança e eficiência das instalações elétricas. O cálculo destas cargas é importante para determinar a infraestrutura necessária, como a seção dos condutores e a capacidade dos disjuntores. Entretanto, o consumo real de energia em uma residência depende do período de funcionamento dos equipamentos e dos hábitos dos moradores.

De forma geral, os valores consumidos são informados aos usuários em kilowatts-hora (kWh) por meio da fatura disponibilizada pela concessionária de energia. Por regra, os projetos fotovoltaicos utilizam os dados históricos do consumo de energia elétrica da residência acrescidos de valores referentes a possíveis usos futuros.

Na ausência de informações prévias, o consumo de energia pode ser estimado pela potência ativa consumida (kW) multiplicada pelo tempo (h) de funcionamento dos equipamentos pré-definidos no projeto que estão ligados a rede elétrica. Os cálculos do consumo diário, da potência instalada e da tensão foram realizados utilizando as Equações 1, 2 e 3.

$$Cd = \frac{Cm}{D} \quad (1)$$

Onde:

Cd : consumo diário (kWh/d);

Cm : consumo mensal (kWh);

D : quantidade de dias no mês (d).

$$Pi = \frac{Cd}{Ir} \quad (2)$$

Onde:

Pi : potência instalada do sistema fotovoltaico (kWp);

C_d : consumo diário (kWh/d);

I_r : irradiação solar média local (kWh/m²d), dividida pela irradiância de referência de 1 kWh/m², expressa em número de horas (h).

$$V_t = V_m \times Q_m \quad (3)$$

onde:

V_t : tensão total do circuito (V);

V_m : tensão do módulo fotovoltaico (V/unidade);

Q_m : quantidade de módulos fotovoltaicos (unidades).

O dimensionamento do sistema fotovoltaico convencional foi realizado por meio do software PVsyst 7.4, na versão gratuita por tempo determinado. A escolha do software foi por causa das ferramentas avançadas de simulação e análise de sistemas solares, permitindo calcular o desempenho do sistema com precisão, considerando uma variedade de fatores, tais como irradiação solar, inclinação dos módulos, perdas no sistema, sombreamento e outros parâmetros técnicos. Tanto para o sistema convencional como para o BIPV, o total de telhas sem células fotovoltaicas foi realizado utilizando a Equação 4. E somente no caso do sistema BIPV foi utilizado a Equação 5 para calcular o total de telhas fotovoltaicas, conforme produção estimada pelo manual técnico da Tégula Solar®.

$$Q_t = A_t \times Q_m \quad (4)$$

Onde:

Q_t : quantidade total de telhas (unidades);

A_t : área total do telhado (m²);

Q_m : quantidade média de telhas por m² (unidades/ m²).

$$Q_t = \frac{E_g}{G_m} \quad (5)$$

Onde:

Q_t : quantidade de telhas com células fotovoltaicas (unidades);

E_g : energia média mensal (kWh/mês);

G_m : geração média estimada por telha (kWh/mês/unidade)

A viabilidade econômica foi realizada por meio do orçamento em empresas conhecidas pela confiabilidade e da estimativa do custo, com base nos preços de mercado da região de instalação do sistema fotovoltaico, referente ao projeto técnico. Para calcular o custo com a mão de obra especializada foi utilizado a Equação 6.

$$C = P \times V \quad (6)$$

Onde:

C : custo com mão de obra especializada (R\$);

P : potência instalada do sistema fotovoltaico (kWp);

V : valor médio praticado na região de instalação do sistema (R\$/kWp).

O software PVsyst foi utilizado para realizar simulações para o cálculo do número de módulos fotovoltaicos e prever a geração anual de energia do sistema. Este dimensionamento garante que o sistema seja adequado para atender ao consumo energético da residência, levando em conta as condições reais de instalação e operação. Para efeito de comparação entre os sistemas fotovoltaicos convencional e o integrado (BIPV), o custo da cobertura com telhas cimentícias Big da Eternit® foi adicionado ao valor final do sistema fotovoltaico convencional, com o objetivo de oferecer uma análise comparativa completa dos investimentos. Esta análise foi importante devido ao fato do sistema fotovoltaico convencional depender da cobertura para fixação dos painéis ao contrário do BIPV que dispensa, pois, a geração de energia ocorre diretamente no revestimento do telhado.

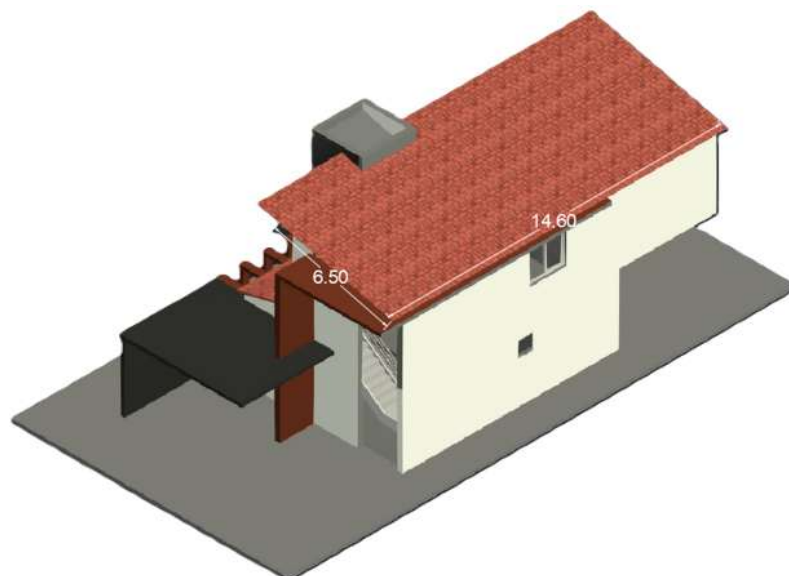
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. SISTEMA FOTOVOLTAICO CONVENENCIONAL

Primeiramente, foi realizado o dimensionamento do sistema fotovoltaico convencional para o consumo mensal arbitrário de 600 kWh, refere-se a uma média alcançada em anos de atuação no mercado regional através da empresa In Solar MG, com base ao padrão construtivo das residências. Com base nas dimensões definidas para o projeto arquitetônico foi possível calcular a área de 94,9 m² referente a cobertura da edificação, conforme mostrado na Figura 17. Ademais, os painéis solares geralmente são instalados seguindo a inclinação natural do telhado, garantindo assim a estabilidade e a segurança da instalação. As informações do espaço disponível e

da inclinação do telhado são importantes para analisar a viabilidade da instalação dos painéis fotovoltaicos.

Figura 17: Dimensões da cobertura (software da Autodesk Revit 2023 versão estudante)



Fonte: Do autor (2024).

A inclinação ideal para maximizar a geração de energia é baseada na latitude local, que para a cidade de Varginha é apontada como 22° N, porém a estrutura do telhado da edificação foi projetada com uma inclinação de 30°, sendo esta angulação necessária para utilização das telhas cimentícias. Pereira *et al.* (2017) relatou que a inclinação definida com base na latitude local é importante para que os painéis captem maior quantidade de radiação solar ao longo do ano. Ademais, não é viável realizar ajustes significativos na inclinação do painel devido ao aumento de riscos associados à força de arrancamento pelo vento, ou seja, a melhoria da eficiência energética deve ser considerada observando a redução dos riscos estruturais (Canal Solar, 2019).

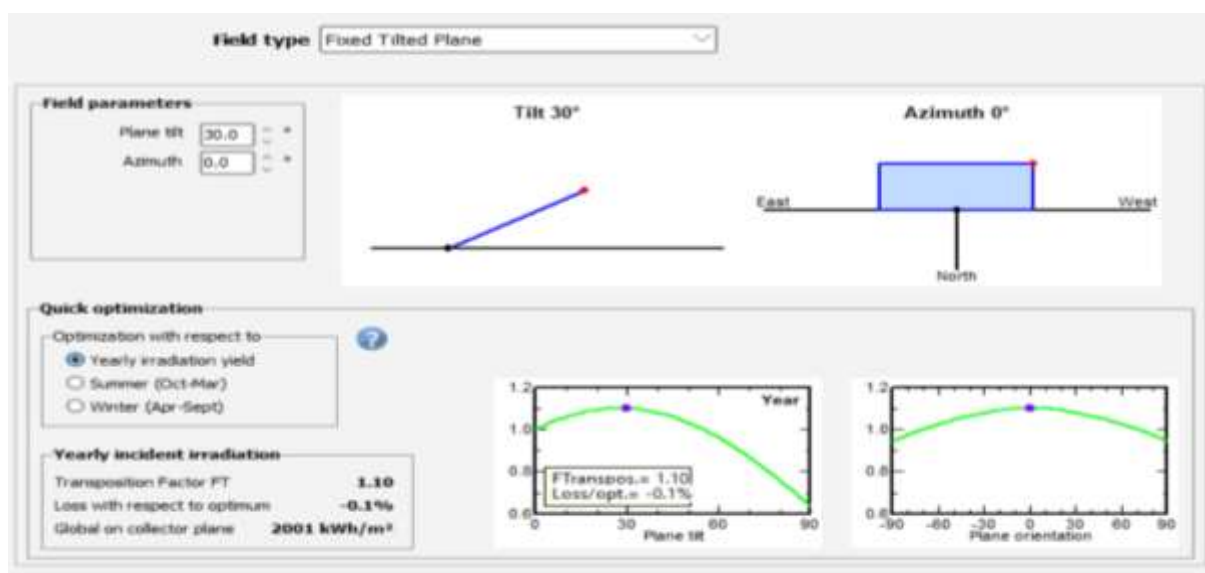
Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico foi necessário calcular a potência necessária em kilowatts pico (kWp). Esse valor foi obtido relacionando o consumo diário de energia elétrica da residência com a média de irradiação solar disponível no município de Varginha para a latitude de 22°N, conforme apresentado nos cálculos utilizando as Equações 1 e 2.

$$Cd = \frac{600 \text{ kWh}}{30 \text{ d}} = 20 \text{ kWh/d} \qquad Pi = \frac{20 \text{ kWh/d}}{5,12 \text{ h/d}} = 3,90 \text{ kWp}$$

O valor de 3,90 kWp representa a capacidade nominal do sistema fotovoltaico que precisa ser instalado para fornecer o consumo diário de energia elétrica da

residência. Posteriormente, foi necessário incluir as características de orientação e inclinação previstas no projeto para implantação dos painéis. Na Figura 18, é mostrado a representação gráfica da incidência solar de acordo com os parâmetros estabelecidos anteriormente (Tabela 1).

Figura 18: Configuração da incidência solar (PVsyst.7.4, na versão gratuita)



Fonte: Do autor (2024).

A utilização do PVsyst no processo de dimensionamento garante um projeto otimizado e ajustado às condições reais de operação, resultando em estimativas de produção de energia mais precisas e confiáveis. Sendo assim, no dimensionamento detalhado do sistema fotovoltaico foi adicionado a potência necessária, 3,90 kWp, além das informações do projeto (características dos módulos e inversores, perdas estimadas no sistema, como exemplo: perdas de cabo, térmicas, sombreamento potencial e outras variáveis que podem impactar no desempenho), no software PVsyst.

O dimensionamento do sistema no PVsyst, combinado com a escolha de equipamentos confiáveis e bem avaliados, assegura um projeto robusto e eficiente para atender às necessidades energéticas da residência, garantindo a durabilidade, além de proporcionar segurança e conformidade com as normas vigentes. Embora, os equipamentos sejam importados o que dificulta encontrar bons fornecedores, existem alguns fornecedores específicos que se destacam pela confiabilidade no estado de Minas Gerais.

Por meio das informações do projeto, foi proposto um sistema composto de 8 módulos fotovoltaicos com potência unitária de 550 Wp, gerando potência total de 4,4 kWp. Foi escolhido o modelo TSM-DE19-550 Wp fabricados pela empresa Trina Solar® que é consolidada no cenário mundial. Na Tabela 3 e na Figura 19, são mostradas as características técnicas e as informações gerais do módulo fotovoltaico TSM-DE19-550 Wp conforme descrito no manual do fornecedor Trina Solar®.

Tabela 3: Características técnicas do módulo fotovoltaico Trina Solar®

Painel TSM-DE19-550 Wp	
Potência máxima	550 W
Tipo de célula	Monocristalina
Dimensões (CxL)	2384x1096 mm
Eficiência	21%
Peso	32 Kg

Fonte: Adaptado do Manual Trina Solar® (2024).

Figura 19: Informações do módulo fotovoltaico TSM-DE19-550 Wp



Fonte: Adaptado do manual Trina Solar® (2024).

Com base nas dimensões dos módulos fotovoltaicos foi possível propor dois layouts diferentes para a instalação dos painéis sobre o telhado do projeto arquitetônico simulado. Nas Figuras 20 e 21, são mostrados os layouts com uma fileira composta por 8 módulos fotovoltaicos e com duas fileiras composta 4 módulos, respectivamente.

Figura 20: Disposição em uma fileira dos módulos TSM-DE19-550 Wp/Trina Solar®



Fonte: Do autor (2024).

Figura 21: Disposição em duas fileiras dos módulos TSM-DE19-550 Wp/Trina Solar®



Fonte: Do autor (2024).

O layout com todos os módulos em uma fileira linear pode ser ideal para telhados longos e estreitos. No mais, este arranjo facilita a instalação e a manutenção, pois todos os módulos estão alinhados, permitindo um acesso mais simples em cada um deles. Já, o layout com os módulos distribuídos em duas fileiras, sendo 4 módulos em cada uma delas é ideal para telhados com dimensões mais compactas, onde o espaço horizontal é limitado, mas com disponibilidade vertical. Outro ponto a ser considerado é à disposição mais equilibrada que pode atenuar o peso sobre a estrutura do telhado e a otimizar o uso da área disponível.

De forma geral, ambos os layouts têm vantagens e desvantagens e a escolha final entre eles deve levar em consideração os fatores como o espaço disponível no telhado e a melhor acomodação visual, além da facilidade de instalação e manutenção dos módulos. No mais, vale ressaltar que a diferença entre os materiais da estrutura para o suporte das placas em ambos os layouts não sofre grandes variações.

Como nos sistemas fotovoltaicos é produzido corrente contínua (DC) e os equipamentos eletroeletrônicos utilizam corrente alternada (AC) foi necessário escolher um inversor de corrente. Geralmente, o inversor é definido com capacidade maior do que a potência calculada nas condições atuais, para atender os casos de uma futura ampliação do sistema. Sendo assim, foi escolhido o modelo CSI-7KTL1P-GI-FL fabricado pela Canadian Solar® como da Figura 22, com potência nominal de 7,0 kW compatível com a rede elétrica da residência.

Figura 22: Inversor fotovoltaico CSI-7KTL1P-GI-FL/Canadian Solar®



Fonte: Adaptado do Manual Canadian Solar® (2024).

O inversor CSI-7KTL1P-GI-FL é conhecido por sua eficiência elevada e apresenta funcionalidades avançadas, como monitoramento remoto, proteção contra sobrecargas e uma interface amigável para instalação e manutenção.

O projeto composto por 8 módulos fotovoltaicos foi dimensionado com apenas um circuito (string) conectados em série. Tal configuração funciona com corrente constante ao longo do circuito e a tensão é a soma do valor em cada módulo. De acordo com o manual técnico dos módulos fotovoltaicos, a tensão de operação unitária (V_{mp}) e a corrente de operação unitária (I_{mp}) foram 31,8 V e 17,2 A, respectivamente. Sendo assim, a tensão total do circuito, resultado da soma das tensões de cada um dos 8 módulos foi 254,4 V (Equação 3).

$$T = 31,8\text{ V} \times 8 = 254,4\text{ V}$$

Os módulos e o inversor devem ser compatíveis em termos de tensão e corrente para assegurar a eficiência e segurança do sistema. Ademais, para garantir desempenho adequado do sistema, é importante verificar se a tensão total do circuito DC excede os limites de entrada e a corrente ficou dentro da faixa operacional do inversor escolhido. Analisando as características técnicas do inversor 7,0 kW, dados extraídos do datasheet (Figura 23), é observado que a tensão DC precisa estar entre 120 e 600 V e a corrente máxima não pode ultrapassar 30 A.

Figura 23: Características técnicas inversor CSI-7KTL1P-GI-FL (7,0 kW)

SYSTEM/TECHNICAL DATA				
MODEL NAME	CSI-7KTL1P-GI-FL	CSI-8KTL1P-GI-FL	CSI-9KTL1P-GI-FL	CSI-10KTL1P-GI-FL
DC INPUT				
Max. PV Power	8.0 kW	9.2 kW	10.8 kW	11.5 kW
Max. DC Input Voltage	600 V _{dc}			
Start-up DC Input Voltage/Power	120 V _{dc}			
Number of MPP Trackers	3			
MPPT Voltage Range	100 - 500 V _{dc}			
Max. Input Current (I _{mp})	30 A (10 A per MPPT)			
Max. Short Circuit Current (I _{sc})	46.8 A (15.6 A per MPPT)			
Number of DC Inputs	3 (1 per MPPT)			
DC Disconnection Type	Load rated DC switch			

Fonte: Adaptado do Manual Canadian Solar® (2024).

Com as informações anteriores, foi possível dimensionar o Quadro de Distribuição de Corrente Contínua (QDCC) que é essencial para a proteção e a interseção da corrente contínua que chega dos painéis fotovoltaicos antes da

conversão em corrente alternada pelo inversor. O QDCC incluiu dispositivos de proteção como o Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS) e porta-fusíveis para ambos os polos, positivo e negativo, do circuito de módulos fotovoltaicos. O DPS protege o sistema contra sobretensões transitórias causadas por raios ou outros distúrbios elétricos e os porta-fusíveis são usados para proteger as linhas de corrente contínua.

Os fusíveis de proteção no QDCC são dimensionados com base na corrente máxima que os módulos podem gerar, considerando um fator de segurança para atuação adequada em situações de sobrecorrente. De acordo com a NBR 5410 (ABNT, 2020), um fusível pode ser dimensionado para proteger um circuito com uma corrente de operação de 17,2 A utilizando um fusível de corrente nominal de 20 A para corrente contínua. Porém, a escolha de um fusível com corrente nominal ligeiramente superior à corrente de operação (neste caso, 20 A em relação a 17,2 A) é aceita pela norma técnica. Essa margem de segurança é importante para evitar disparos desnecessários do fusível e ao mesmo tempo a proteção adequada do sistema fotovoltaico. Na Figura 24, foi mostrado um quadro de distribuição QDCC para proteção de três circuitos DC.

Figura 24: Quadro de distribuição QDCC fotovoltaico



Fonte: Do autor (2024).

No projeto, foram utilizadas chaves seletoras para interromper a corrente manualmente ao invés de porta fusíveis e fusíveis, visto que alguns inversores já possuem a proteção DC internamente. Na parte do Quadro de Distribuição de Corrente Alternada (QDCA), é necessário dimensionar um disjuntor termomagnético junto com um Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS) para proteger as cargas alternadas conectadas ao inversor. No datasheet (Figura 23) é recomendado uma corrente de 33,7 A para o inversor com potência de 7,0 kW.

Considerando que a tensão da rede da CEMIG bifásica é igual a 220 V, o disjuntor deve suportar a corrente prevista sem desarmar em condições normais e ainda proteger o circuito em caso de sobrecargas ou curtos-circuitos. Então, foi utilizado um disjuntor bifásico de 36 A que é adequado para suportar a corrente nominal (33,7 A) e fornecer uma margem de segurança do inversor. Este disjuntor garantirá a proteção adequada do sistema e estará em conformidade com as exigências da instalação elétrica, proporcionando segurança e confiabilidade ao sistema fotovoltaico.

Além do dimensionamento do disjuntor, a NBR 5410 (ABNT, 2020) relata que o dimensionamento adequado dos cabos garante a segurança e a eficiência do sistema elétrico. Para o circuito que alimenta o inversor de 7,0 kW foi escolhido um cabo de seção nominal de 6 mm², considerando a corrente de 33,7 A e a tensão de 220 V. A escolha do cabo de 6 mm² foi baseada na capacidade de condução da corrente e na necessidade de minimizar a queda de tensão ao longo do cabo.

Com informações obtidas, foi possível elaborar o diagrama unifilar da instalação fotovoltaica. Este diagrama representa como os componentes do sistema estão conectados, desde os módulos fotovoltaicos até a ligação da residência com a rede elétrica. No Apêndice I, é representado o diagrama unifilar do projeto, destacando os principais componentes como os módulos fotovoltaicos, o inversor, os quadros de distribuições QDCC e QDCA, disjuntores, DPS e as conexões necessárias para integrar o sistema fotovoltaico à rede elétrica.

4.2. SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO (BIPV)

Para realizar a comparação com o sistema convencional, foi realizado o dimensionamento de um sistema integrado (BIPV), considerando o mesmo modelo do inversor e substituindo apenas os módulos convencionais por telhas fotovoltaicas. É

importante comentar que a utilização das telhas fotovoltaicas promoveu redução no valor do custo final da construção devido a substituição de parte das telhas tradicionais. Sendo assim, foi analisado o custo das telhas fotovoltaicas em comparação com o custo dos módulos fotovoltaicos incluindo as telhas tradicionais para a cobertura da edificação e estrutura de fixação dos painéis.

A telha escolhida para o sistema BIPV foi o modelo BIG - F11 da marca Tégula Solar®, lançamento recente no mercado de energia solar, comercializada pela Eternit®. A empresa também fornece a mesma telha, sem as células fotovoltaicas, especificada como telha cimentícia BIG. Na Figura 25, é mostrado o formato e a aparência das telhas BIG - F11/Tégula Solar®.

Figura 25: Telhado de edificação coberto com telha fotovoltaica BIG - F11



Fonte: Adaptado do catálogo técnico Tégula Solar® (2024).

Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico integrado (BIPV) foi necessário calcular a quantidade de telhas necessárias para cobrir 94,9 m² de área do telhado e definir quantas destas precisam ter a célula fotovoltaica para poder abater no consumo de energia na residência. Como no manual do fornecedor, cada metro

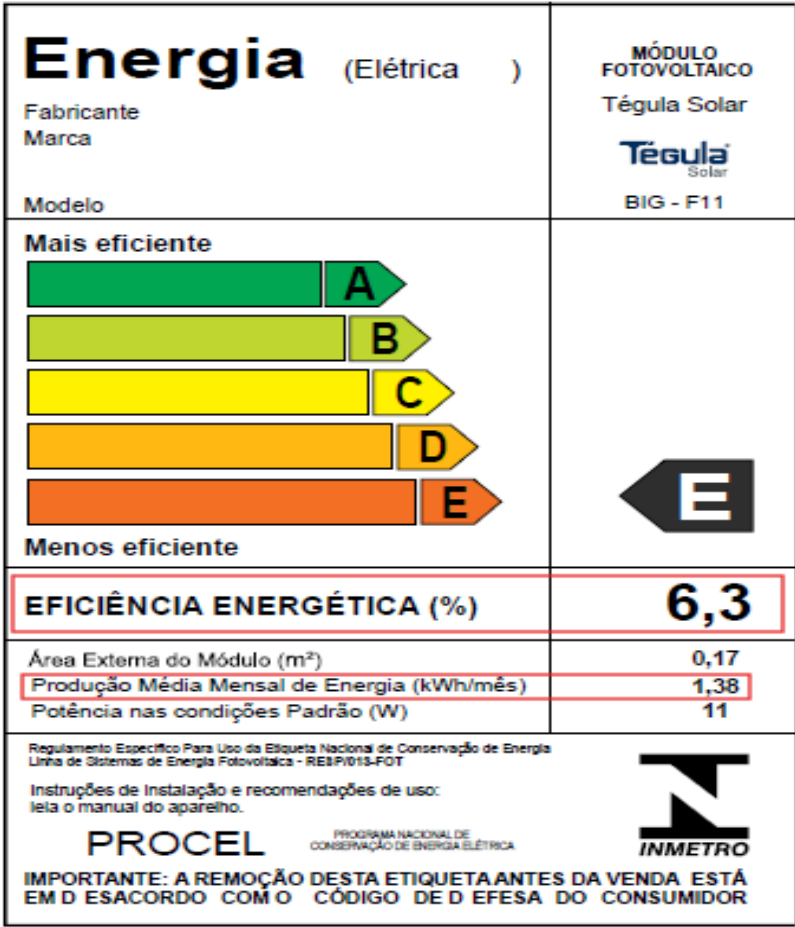
quadrado de telhado requer de 7,5 a 8,5 telhas, foram necessárias 760 unidades utilizando um valor médio dentre aquele especificado (Equação 4).

$$Q_t = 94,9 \text{ m}^2 \times 8 \text{ unidades/m}^2 \approx 760 \text{ unidades}$$

É importante ressaltar que foram previstas a substituição das telhas convencionais por fotovoltaicas somente no plano do telhado que foi utilizado para implantação dos módulos do sistema convencional. No Apêndice II, é mostrado a planta de cobertura da edificação simulada para o estudo.

Para atender a produção de 600 kWh por mês da mesma forma que foi proposto para o sistema convencional foi fundamental considerar a eficiência das células fotovoltaicas utilizadas nas telhas solares. De acordo com o manual técnico, as telhas fotovoltaicas do modelo BIG - F11 da marca Tégula Solar® apresentam eficiência aproximada de 6,3%. Na Figura 26 e na Tabela 4, são apresentadas as informações técnicas das telhas fotovoltaicas.

Figura 26: Eficiência energética da telha fotovoltaica BIG - F11



Fonte: Catálogo técnico da Tégula Solar® (2024).

Tabela 4: Características técnicas da telha fotovoltaica

Telhas BIG - F11	
Potência máxima	11 W
Tensão	6,54 V
Corrente	2,18 A
Tipo de célula	Monocristalina
Dimensões (CxL)	34x30 mm
Inclinação mínima	30°

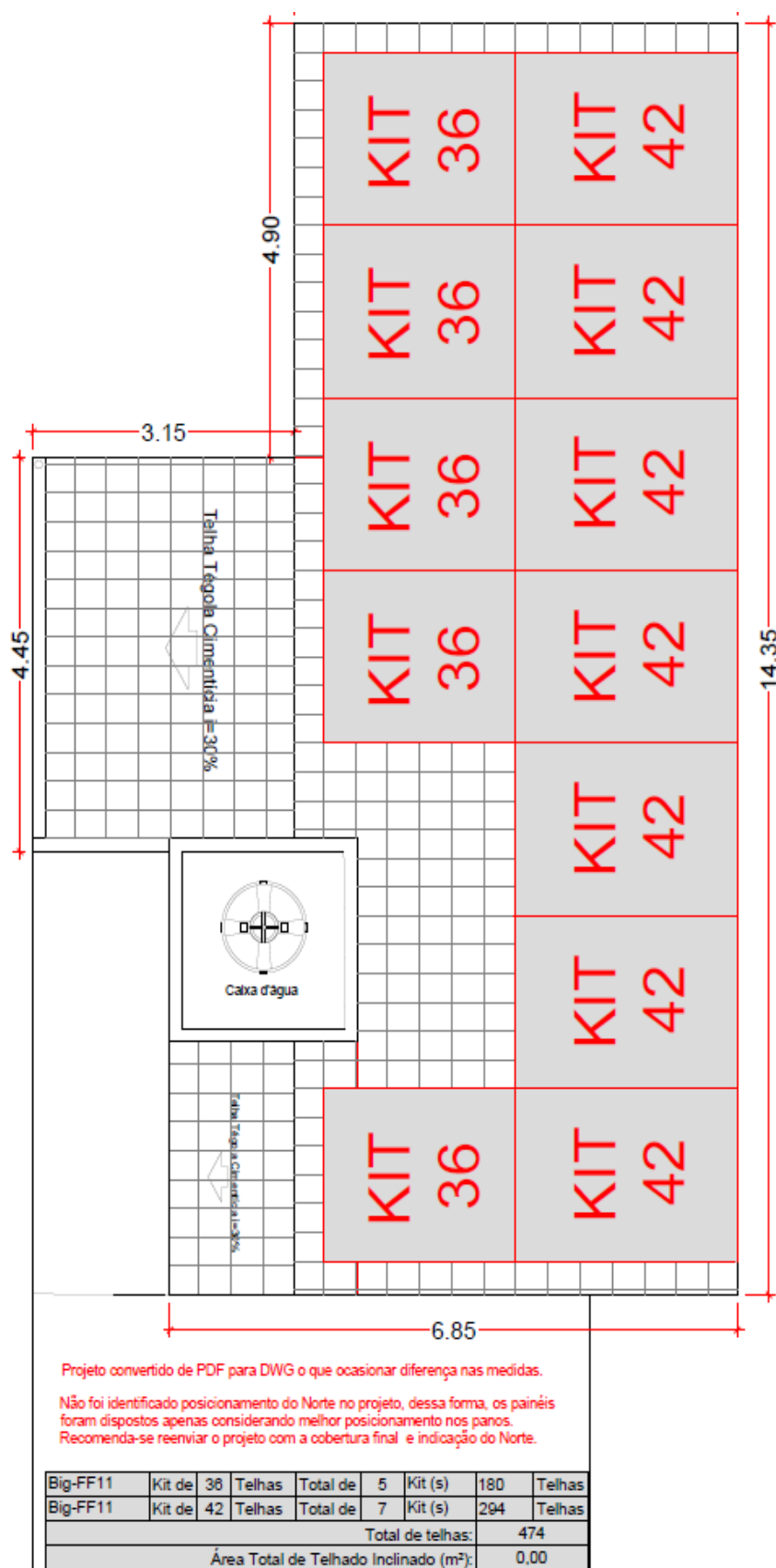
Fonte: Adaptado do catalogo técnico da Tégula Solar® (2024).

Através do manual do equipamento, foram obtidas as informações de operação da tensão (V_{mp}) e da corrente (I_{mp}) que são importantes para calcular a configuração ideal de telhas em série ou paralelo e verificar se os valores estão dentro dos limites de operação do inversor. Ademais, foi observado que a eficiência de cada painel é maior em comparação com a telha, ou seja, para produzir a mesma quantidade de energia foi necessário utilizar uma área maior do telhado. Essa diferença de eficiência tem um impacto direto no dimensionamento do sistema. Sabendo que cada telha tem produção média de 1,38 kWh/mês, foram necessárias 435 unidades de telhas fotovoltaicas para a produção de 600 kWh/mês (Equação 5).

$$Q_t = \frac{600 \text{ kWh/mês}}{1,38 \frac{\text{kWh}}{\text{mês}}/\text{unidade}} \approx 435 \text{ unidades}$$

De acordo com o estudo técnico realizado pela equipe técnica da Eternit® foram definidos os requisitos para a instalação do sistema fotovoltaico integrado, eficiente e adequado, às necessidades do projeto. A quantidade de telhas e a configuração do sistema foi planejado para atender a demanda energética mensal, considerando a eficiência de captação de energia, a inclinação do telhado, a orientação solar e as condições de irradiação média local. Sendo assim, para garantir uma margem de segurança, foram definidas 474 telhas fotovoltaicas BIG - F11/Tégula Solar® com 11 Wp e 5,21 kWp de potencias nominal e total, respectivamente. Na Figura 27, é mostrado o arranjo em kits de 36 e 42 telhas fotovoltaicas, para o telhado da edificação, que foi sugerido pela equipe técnica da Eternit®.

Figura 27: Arranjos de distribuição das telhas fotovoltaicas BIG-F11/Tégula Solar®



Fonte: Adaptado do orçamento enviado pela Eternit®.

Com base nas informações repassadas pelos técnicos da empresa Eternit®, foi possível desenvolver o esquema elétrico para a ligação das telhas fotovoltaicas, considerando as características específicas do sistema. As telhas fotovoltaicas foram interconectadas para formar a usina solar, garantindo a eficiência máxima na captação e conversão da energia solar em eletricidade. O esquema elétrico atendeu às exigências técnicas do projeto e cumpriu as normas regulatórias vigentes para sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

Para tanto, as telhas foram divididas em dois circuitos paralelos, sendo primeiro e o segundo composto por 180 e 294 telhas, respectivamente. É importante ressaltar que os circuitos possuem as mesmas características técnicas e foram conectados ao inversor de forma a garantir o fluxo contínuo de energia gerada por todo o sistema. No Apêndice III e IV, são apresentados os esquemas de conexão, nos quais estão organizados em arranjos, para os circuitos 1 e 2.

No projeto, o circuito 1 foi organizado em 5 arranjos compostos por 36 telhas fotovoltaicas conectadas na configuração de um módulo fotovoltaico. Cada um dos arranjos foi composto por 6 fileiras paralelas com 6 telhas ligadas em série, em cada uma delas. A configuração em paralelo e série otimiza a eficiência e facilita o controle da corrente e da tensão gerada em cada arranjo. Na Tabela 5, é mostrado as características técnicas de cada arranjo para o circuito 1.

Tabela 5: Características técnicas do arranjo proposto para o circuito 1

KIT	TELHAS	SÉRIE	PARALELO	POTÊNCIA	CORRENTE	TENSÃO
6x6	36	6	6	396 Wp	9,54 A	57,12 V

Fonte: Do autor (2024).

A conexão em série dos arranjos permite que a tensão do sistema seja maior devido a soma individuais em cada arranjo, enquanto a corrente permanece constante. Tal conexão garante que o circuito trabalhe com a tensão necessária para operar de maneira eficiente com o inversor. No circuito 1, formado com 5 módulos arranjados em kit com 36 telhas (Tabela 5), a corrente total foi 9,54 A e a tensão total foi calculada por meio Equação 3.

$$V_t = 57,12 \text{ V/módulo} \times 5 \text{ módulos} = 285,60 \text{ V}$$

Já, no circuito 2, a combinação das telhas fotovoltaicas foi organizada em 7 arranjos com 42 telhas em cada um, sendo composto por 7 fileiras paralelas com 6 telhas ligadas em série. Na Tabela 6, é mostrado as características técnicas de cada

arranjo para o circuito 2.

Tabela 6: Características técnicas do arranjo proposto para o circuito 2

KIT	TELHAS	SÉRIE	PARALELO	POTÊNCIA	CORRENTE	TENSÃO
6x7	42	6	7	462 Wp	11,13 A	57,12 V

Fonte: Do autor (2024).

No circuito 2, formado com 7 módulos arranjados em kit com 42 telhas (Tabela 6), a corrente total foi 11,13 A e a tensão total foi calculada por meio Equação 3.

$$V_t = 57,12 \text{ V/unidade} \times 7 \text{ unidades} = 399,84 \text{ V}$$

Como as telhas foram organizadas em série, a tensão total do sistema aumentou sem ultrapassar o valor máximo suportado pelo inversor escolhido (600 V), para ambos os sistemas fotovoltaicos. Além disso, a corrente gerada por cada circuito também está dentro dos parâmetros aceitáveis (30 A), visto que, uma corrente excessiva poderia sobrecarregar o inversor, comprometendo sua durabilidade e desempenho. Sendo assim, em ambos os circuitos as características elétricas das telhas fotovoltaicas foram compatibilizadas com o inversor CSI-7KTL1P-GI-FL da Canadian Solar®.

Com informações obtidas, também foi possível elaborar o diagrama unifilar da instalação fotovoltaica. No Apêndice V, é representado o diagrama unifilar do projeto, destacando os principais componentes como as telhas em arranjos similar ao módulo fotovoltaico, o inversor, os quadros de distribuições QDCC e QDCA, disjuntores, DPS e as conexões necessárias para integrar o sistema fotovoltaico à rede elétrica. Além disso, o quadro de distribuição QDCC possui um esquema com proteção para 2 circuitos DC, onde cada uma possui entradas e saídas individuais.

4.3. ANÁLISE ECONÔMICA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONVENCIONAL

A escolha de bons fornecedores, desde a compra até o suporte no pós-venda, é importante para garantir a segurança e a eficiência do investimento. Neste sentido, foi realizado o orçamento com a Genyx Solar Power, que se destaca em fornecer desde a estrutura de suporte para os módulos até os dispositivos de monitoramento da usina fotovoltaica. Na Tabela 7, foi mostrado o orçamento dos equipamentos fotovoltaicos.

Tabela 7: Orçamento do sistema fotovoltaico convencional

Item	Quantidade	Valor unitário	Valor total
Módulo Fotovoltaico TSM-DE19-550Wp/Trina Solar®	8	R\$616,75	R\$4.934,00
Inversor CSI-7KTL1P-GI-FL/Canadian Solar®	1	R\$2.658,73	R\$2.658,73
Estrutura de suporte de fixação dos painéis	1	R\$888,56	R\$888,56
Cabo Solar 6 mm ² - vermelho e preto	60	R\$3,54	R\$212,40
Cabo Flexível 6 mm ² - vermelho, preto e verde	30	R\$5,32	R\$159,60
Disjuntores, DPS, Porta Fusível e Fusível	1	R\$484,00	R\$484,00
Outros materiais e conectores	1	R\$250,00	R\$250,00
Custo total com frete			R\$9.587,29

Fonte: Do autor (2024).

Além do orçamento com materiais e equipamentos, deve-se incluir o custo para elaboração do projeto considerando o estudo preliminar de viabilidade técnica, dimensionamento dos componentes, o preparo da documentação necessária e, a instalação do sistema fotovoltaico. Em relação à instalação, o principal custo é a mão de obra qualificada para a montagem dos componentes, conexões elétricas, e o comissionamento do sistema. Em alguns casos, pode ser adicionado custos relacionados as adaptações ou melhorias no local da instalação, como o reforço da estrutura do telhado para suportar a carga extra dos módulos, que pode gerar adicionais.

Por outro lado, o custo de projeto e da instalação de um sistema fotovoltaico, sem incluir o orçamento dos materiais e equipamentos, varia de uma região para outra, do tipo (residencial, comercial ou industrial), da potência instalada e da complexidade da instalação. Na região do sul de Minas, o valor médio utilizado para os custos referentes a elaboração do projeto técnico, a aprovação junto às concessionárias e a mão de obra especializada de instalação gira em torno R\$1.000,00 a R\$ 1.500,00 por kWp instalado, (In Solar, 2024). Neste estudo, foi considerado a média dos valores praticados pela empresa In Solar, ou seja, R\$1.250,00/kWp, conforme a Equação 6.

$$C = 4,40 \text{ kWp} \times R\$1.250,00/\text{kWp} = R\$ 5.500,00$$

Para cobrir a área de 94,9 m², no local de instalação da usina fotovoltaica, foi necessário utilizar 760 telhas BIG. De acordo com o orçamento da Eternit®, o custo

das 760 telhas, sem incluir o frete, foi de R\$ 3.032,40. Sendo assim, o custo para implantação da usina fotovoltaica convencional, com potência de 4,40 kWp, foi de R\$18.119,69, resultando no valor de R\$ 4.118,11 por kWp. Além, do custo das telhas, o orçamento incluiu tanto os componentes do sistema como os serviços de projeto e instalação, sendo um valor competitivo e dentro da média praticada no mercado.

4.4. ANÁLISE ECONÔMICA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO

A telha BIG - F11/Tégula Solar® é um produto patenteado e sua comercialização é exclusiva do fabricante não sendo possível comprar através de outras empresas do ramo. Apesar de não ter concorrentes, o que poderia causar aumento do preço, os consumidores irão adquirir um produto de qualidade com a garantia técnica da empresa.

O orçamento fornecido pela empresa não considerou apenas as telhas, mas todo o kit fotovoltaico, que incluiu o inversor e demais componentes necessários para a instalação do sistema. No entanto, para fins comparativos deste trabalho, foi necessário desmembrar o orçamento para separar o custo das telhas fotovoltaicas. Sendo assim, foi observado que o custo de cada unidade de telha fotovoltaica BIG - F11 foi de R\$ 63,29. Ademais, o inversor, os cabos e os dispositivos eletrônicos, continuaram a ser fornecidos pela empresa Genyx Solar Power. Na Tabela 8, é mostrado o investimento com os equipamentos para a implementação do projeto BIPV.

Tabela 8: Orçamento do sistema fotovoltaico integrado

Item	Quantidade	Valor unitário	Valor total
Telha BIG - F11/Tégula Solar® com conectores	474	R\$63,29	R\$29.999,46
Telha comum BIG/Eternit®	286	R\$3,99	R\$1.141,14
Inversor CSI-7KTL1P-GI-FL/ Canadian Solar®	1	R\$2.658,73	R\$2.658,73
Cabo Solar 6 mm² - vermelho e preto	60	R\$3,54	R\$212,40
Cabo Flexível 6 mm² - vermelho, preto e verde	30	R\$5,32	R\$159,60
Disjuntores, DPS, Porta Fusível e Fusível	1	R\$484,00	R\$484,00
Custo total com frete			R\$34.655,33

Fonte: Do autor (2024).

Além dos custos com os equipamentos, entrou também os custos relacionados ao projeto e a mão de obra de instalação do sistema BIPV, que geralmente é 20% a menos em comparação a um sistema fotovoltaico convencional (In Solar, 2024). Essa redução de custo se deve, em grande parte, a eliminação dos materiais de fixação para módulos.

Desta forma, a responsabilidade da empresa encarregada pela implementação da usina fotovoltaica fica concentrada no cabeamento das telhas, garantindo que a conexão elétrica seja feita de maneira adequada e eficiente. Por outro lado, a instalação das telhas na estrutura do telhado é atribuída ao profissional responsável pela execução do telhado (telhadista).

A divisão das responsabilidades, ou seja, a cobertura conjunta das telhas normais e fotovoltaicas para a execução do projeto integrado, não apenas otimiza o processo de instalação, mas também contribui para a redução dos custos globais, uma vez que a mão de obra pode ser gerenciada de maneira mais eficiente. Assim, o projeto BIPV se torna uma alternativa atraente, combinando economia e praticidade na implementação de sistemas de energia solar.

Desta forma, o valor para projeto e instalação do sistema fotovoltaico convencional foi de R\$ 5.500,00 como mostrado anteriormente e, no caso do sistema BIPV foi de R\$ 4.400,00 considerando um desconto de 20. Assim sendo, tem-se como valor total, para implementação de um sistema BIPV, de R\$ 39.055,33, resultando em R\$ 7.496,22/kWp (5,21 kWp). É importante relatar que apesar do sistema BIPV apresentar a potência em kWp maior que no sistema convencional a produção de energia é a mesma devido a menor eficiência das telhas fotovoltaicas.

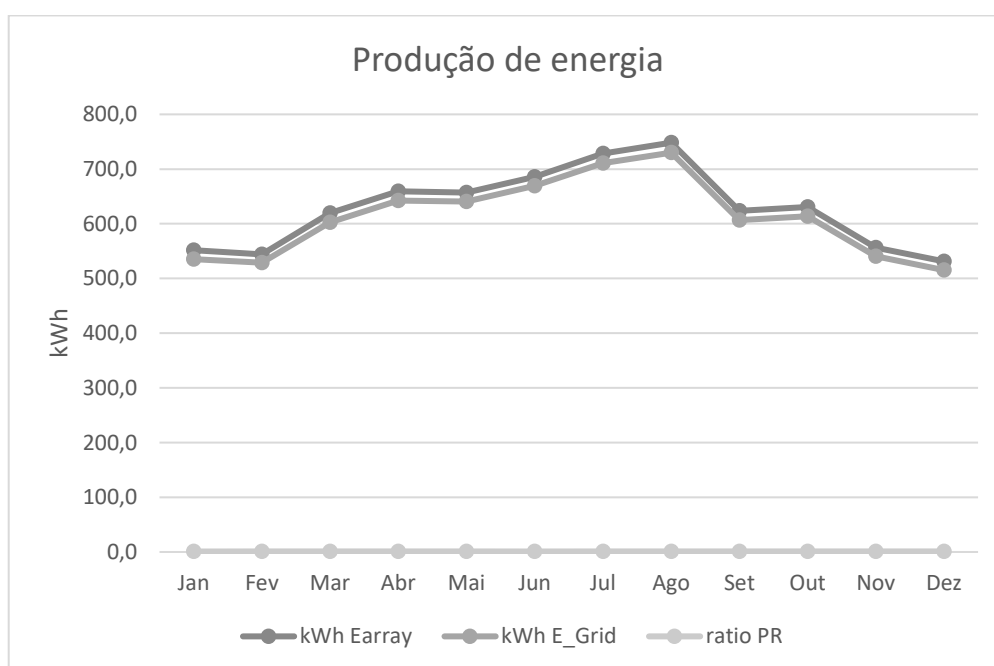
4.5. RETORNO FINANCEIRO

Para a análise do retorno financeiro, conhecido como payback, é indispensável utilizar ferramentas de previsão de geração anual, como o software PVsyst, fornecendo uma previsão detalhada da geração de energia em kWh/mês, considerando uma série de fatores, conforme exposto anteriormente, que afetam a performance do sistema.

A previsão da geração de energia pelo PVsyst leva em conta todas as possíveis perdas e, também, considera a degradação natural da eficiência das placas solares e dos inversores ao longo dos anos. Esse detalhamento é crucial para obter uma

estimativa precisa da quantidade de energia que o sistema fotovoltaico produzirá anualmente. Como o estudo foi realizado por meio de um projeto simulado, foi possível avaliar a eficiência dos sistemas nas condições favoráveis de funcionamento, ou seja, orientação voltada para o norte geográfico, inclinação mais próxima do azimute, entre outras. Na Figura 28, é demonstrado o gráfico de previsão de geração mensal e as perdas do sistema no decorrer do ano, sendo detalhado as características de produção de ambos os sistemas fotovoltaicos.

Figura 28: Estimativa de produção de energia nos sistemas convencional e integrado



Fonte: Do autor (2024).

Foi observado, na Figura 28, que o kWh gerado em cada mês variou de acordo com as estações do ano. Sendo assim, em alguns meses do ano, a geração de energia ficou um pouco menor em comparação com valor considerado no estudo (600 kWh/mês). Porém é utilizado a geração média nos projetos fotovoltaicos, onde os meses com maior geração de energia cobrem a falta nos meses com menor.

Com essas previsões, foi possível calcular o retorno financeiro (payback), que significa o tempo necessário para que a economia do valor pago em energia mensalmente para a concessionária seja igualada pelo investimento inicial da instalação do sistema. Para tanto, o cálculo do payback é realizado dividindo o custo total do sistema pela economia anual estimada na conta de energia elétrica,

permitindo determinar em quanto tempo o investimento em energia solar começará a gerar retorno financeiro, ajudando na tomada de decisão e planejamento financeiro.

Observando os valores tarifários praticados pela concessionária Cemig para o Grupo B (residencial), foi considerado um valor de R\$ 0,95/kWh, levando em consideração as diferenças de tributação em bandeiras correspondentes ao consumo ao longo do ano. Embora nos projetos a geração anual foi a mesma, ou seja, 7.336 kWh (Figura 28). O retorno para o investimento no sistema convencional, R\$18.119,69, foi a partir do quarto ano, sendo muito menor que o tempo estimado de vida útil para uso dos painéis, que são de 25 anos. Vale ressaltar que os cálculos para o payback não consideram os possíveis aumentos no custo de energia pela concessionária. Na Figura 29, é apresentado o gráfico do tempo de retorno para o investimento inicial no sistema fotovoltaico convencional.

Figura 29: Tempo de retorno financeiro para o sistema fotovoltaico convencional

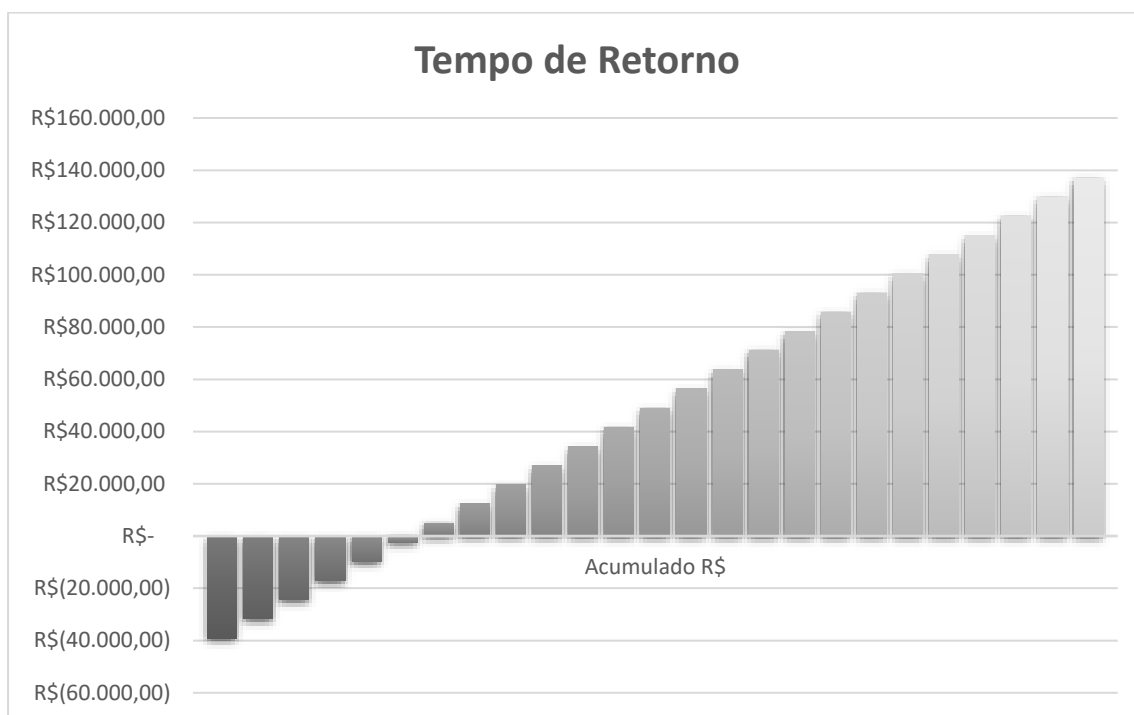


Fonte: Do autor (2024).

O tempo de retorno do investimento para o sistema fotovoltaico integrado, R\$ 39.055,33, nas mesmas condições que o projeto convencional, foi a partir do sétimo ano, sendo muito que o tempo estimado de vida útil das telhas fotovoltaicas que são de 20 anos. Então, foi observado que a possibilidade de manutenção, após o retorno do investimento, será após 21 anos e 14 anos, para os sistemas convencional e

integrado, respectivamente. Na Figura 30, é apresentado o gráfico do tempo de retorno para o investimento inicial no sistema fotovoltaico integrado.

Figura 30: Tempo de retorno financeiro para o sistema fotovoltaico integrado



Fonte: Do autor (2024).

De forma geral, ambos os sistemas apresentaram retorno positivo em relação ao tempo de vida útil de cada um deles. Dentre as vantagens pode-se considerar a contribuição para a sustentabilidade e a geração de energia renovável, além da redução da despesa com a concessionária de energia visto que o valor pago é somente a taxa de disponibilidade da rede elétrica (monofásico, bifásico e trifásico) para os casos de geração autossuficiente. Por fim, é importante relatar que o estudo não considerou a nova tarifação, correspondente ao imposto cobrado de forma gradativa até o ano de 2028, que foi atribuída pelo uso da rede elétrica a partir de julho de 2023.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As telhas fotovoltaicas é uma novidade no mercado nacional e foram disponibilizadas, como sistema gerador de energia integrado, no ano de 2022. Já o

sistema convencional é bastante adotado devido ao seu tempo de comercialização no mercado brasileiro, datado em 1997.

Ao contrário do sistema convencional, o setor de energia solar integrada tem ganhado espaço, principalmente nas zonas metropolitanas, devido a sua versatilidade para o maior aproveitamento de outras áreas existentes na edificação, por exemplo: fachadas e janelas, além das coberturas de forma integrada.

Ambos os sistemas são sustentáveis e apresentam a mesma eficiência em geração de energia final (600 kWh/mês). Em relação ao custo do kWp, os sistemas convencionais são mais baratos pois, possuem tempo de retorno menor e vida útil maior, porém, são menos estéticos e apresentam maior problema em relação a manutenção devido a necessidade de troca do módulo por completo em casos de reparo. Este fato, é explicado pela forma de montagem do projeto das telhas, configurado em arranjos elétricos de 6x6 e 6x7, simulando um módulo. Outro ponto favorável ao uso das telhas fotovoltaicas foi a possibilidade de realizar arranjos em série e paralelo que atenda ao formato da cobertura.

Conclui-se que a escolha entre o sistema fotovoltaico convencional e o sistema integrado com telhas fotovoltaicas (BIPV) depende de uma análise criteriosa das necessidades do projeto, bem como das prioridades funcionais, estéticas e econômicas. Portanto, enquanto o sistema convencional é amplamente aplicável e eficiente em contextos de residências que não exigem uma formatação específica entre os módulos, o sistema integrado com telhas fotovoltaicas se destaca em situações onde a integração arquitetônica e a estética são fatores determinantes, permitindo uma flexibilização da sua forma de montagem. A escolha entre as duas abordagens deve considerar critérios como orçamento, objetivos do projeto, restrições técnicas e os benefícios esperados a longo prazo.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os sistemas fotovoltaicos BIPV apresentam grande variedade de produtos no mercado, além das telhas fotovoltaicas, possibilitando estudos comparativos entre eles. Como proposta de trabalhos futuros apresenta as seguintes sugestões:

- Verificar a eficiência de geração de energia elétrica em um sistema fotovoltaico BIPV executado;

- Avaliar a aplicação do sistema fotovoltaico BIPV nos setores comercial e industrial;
- Analisar a viabilidade, técnica e econômica, de implantação do sistema fotovoltaico BIPV na fase de execução da obra;
- Comparar a geração de energia elétrica entre os sistemas, convencional e integrado, executados com as mesmas características de funcionamento.

REFERÊNCIAS

ABBOTT, D. **Keeping the energy debate clean: how do we supply the world's energy needs**. Proceedings of the IEEE, v.98, n.1, January, 2010.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **World Energy Outlook**. Disponível em: < <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023> > Acessado em: 09/05/2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482: **Condições Gerais Para o Acesso de Micro e Minigeração Distribuída**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **ABSOLAR. Geração distribuída solar fotovoltaica**, Encontro Nacional dos Agentes do Setor Elétrico – ENASE, Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5410**: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

BANDEIRA, F. De P. M. **Aproveitamento da energia solar no Brasil: Aproveitamento e perspectivas**. Disponível em: <http://bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/9008/aproveitamento_energia_bandeira.pdf?sequence> Acessado em: 09/05/2023.

BÜHLER, A. J. **Princípios básicos da conversão fotovoltaica**. Rio Grande do Sul, mar. 2014.

CALISE, F.; CAPPIELLO, F. L.; D'ACCADIA, M. D.; VICIDOMINI, M. **Dynamic simulation, energy and economic comparison between BIPV and BIPVT collectors coupled with micro-wind turbines**. Energy, [s.l.], v.191, p.116439-116484, jan. 2020.

CANADIAN. **Ficha Técnica: Inversor CSI-7KTL1P-GI-FL 7 Kw**. 2024. Disponível em: <<https://genyx.com.br/documentos-tecnicos/documentos-tecnicos-canadian-solar/>> Acessado em: 09/05/2023.

Canal Solar. **Vale a pena ajustar a angulação dos módulos solares nos telhados?** Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/vale-a-pena-ajustar-a-angulacao-dos-modulos-solares-nos-telhados/>> Acessado em: 07/11/2024.

CARVALHO, I. V. M.; PEREIRA, R. M. Impacto econômico, social e político da transição energética no Brasil. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, São Paulo, v. 10, n.6, p.715-736, 2024.

CASTRO, R.M. G. **Introdução à energia fotovoltaica**. Universidade Técnica de Lisboa, maio de 2007.

CRESESB. **Potencial Solar Sun Data v 3.0. 2018**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acessado em: 27/07/2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanco energético nacional 2023**. Rio de Janeiro, 2023.

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE. **Photovoltaics Report. Relatório técnico**. Disponível em: <www.ise.fraunhofer.de>. Acessado em: 12/12/2024.

IN SOLAR MG. **In Solar MG Energia Sustentável**. Disponível em: <<http://www.insolarmg.com.br>>. Acessado em: 12/12/2024.

INOVACARE SOLAR. **Tecnologia**. 2017. Disponível em: <<http://www.inovacare.solar/tecnologia>>. Acessado em: 28/08/2024.

JELLE, B. P.; BREIVIK, C.; RØKENES, H. D. **Building Integrated Photovoltaic Products: a state-of-the-art review and future research opportunities**. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 100, n. 7465, p. 69-96, maio 2012.

KELLY, C.; SEN, B.; TATARI, O. **A system dynamics analysis of the alternative roofing market and its potential impacts on urban environmental problems: a case study in orlando, florida**. *Resources, Conservation and Recycling*, [s.l.], v. 153, p. 104556-104570, fev. 2020.

LANA, L. T. C.; ALMEIDA, E.; DIAS, F. C. L. S.; ROSA, A. C.; ESPIRITO SANTO, O. C.; SACRAMENTO, T. C. B.; BRAZ, K. T. M. Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. **Revista Engenharias Online**, Belo Horizonte, v.1, n.2, p.21-33, 2016.

LI, D. H. W.; YANG, L.; LAM, J. C. **Zero energy buildings and sustainable development implications** – A review. *Energy*, [s.l.], v. 54, p. 1-10, jun. 2013.

Ministério de Minas e Energia, Nota Técnica 19/14 – **Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil**, do Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acessado em: 05/05/2023.

MORDOR INTELLIGENCE. **Análise do mercado de energia solar no mundo**. Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/solar-energy-market>> Acessado em: 01/02/2025.

MORDOR INTELLIGENCE. **Energia solar na Itália – Análise de tamanho de mercado e participação**. Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/italy-solar-energy-market>> Acessado em: 09/11/2024.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 15 de setembro 2015. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel>> Acessado em: 08/05/2023.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **A ONU e o meio ambiente**. A ONU e o meio ambiente. 16 de setembro 2020. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/91223-onu-e-o-meio-ambiente>> Acesso em: 08/05/2023.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar 2a Edição**. 2017.<<http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34P/3PERDJE>>. Acessado em: 25/08/2024.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, março, 2014.

PEREIRA, F.; OLIVEIRA, M. **Curso técnico instalador de energia solar fotovoltaica**. Porto: Publ. indústria.

Portal Solar, 01/21 – **Energia solar é a fonte renovável mais promissora**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/noticias/politica/politica-internacional/energia-solar-e-a-fonte-renovavel-mais-promissora-diz-agencia-de-protecao-ambiental-dos-eua>> Acessado em: 10/05/2023.

RAUPP, E. R.; LUZ, G.; DELGADO, H. G. **Geração de energia fotovoltaica: o seu impacto na qualidade energética no Brasil**. Cacupé –Revista de Textualidades Acadêmicas, Florianópolis, Ano I, v.1, n.1, 2024.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. [S.l.]: LABSOLAR, 2004. ISBN 85-87583-04-2.

SANTOS, F. E. P; HOLANDA, R. P.; SOARES, R. C.; CARNEIRO, F. A.; NETO, M. E. S.; BECO, L. M. B. C.; VALE, M. S.; PEREIRA, M. S. **Análise da energia solar fotovoltaica integrada às edificações –BIPV: avanços e perspectivas**. Revista Delos, Curitiba, v.17, n.62, p.01-17, 2024

SALES, T. R. R. **O uso da energia solar nas obras civis: um estudo sobre o aquecimento de água por sistema de coletores solares em edifícios residenciais**. Disponível em:< <https://repositorio.animaeducacao.com.br/items/8690527b-0d27-4412-a72d-21db05608eaf>> Acessado em: 10/11/2024.

SCHUETZE, T.; WILLKOMM, W.; ROOS, M. **Development of a Holistic Evaluation System for BIPV Façades**. *Energies*, [s.l.], v.8, n.6, p.6135-6152, 19 jun. 2015.

SILVA, H. M. F.; ARAÚJO, F. J. C. **Energia solar fotovoltaica no brasil: uma revisão bibliográfica**. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação. São Paulo, v.8, n.03, 2022.

STEFFENS, E. **Microgeração Solar Distribuída: Estudo de Caso Técnico e Econômico para Aviários em Águas Mornas - SC**. Monografia (Graduação) - UFSC, Florianópolis, SC, 2017.

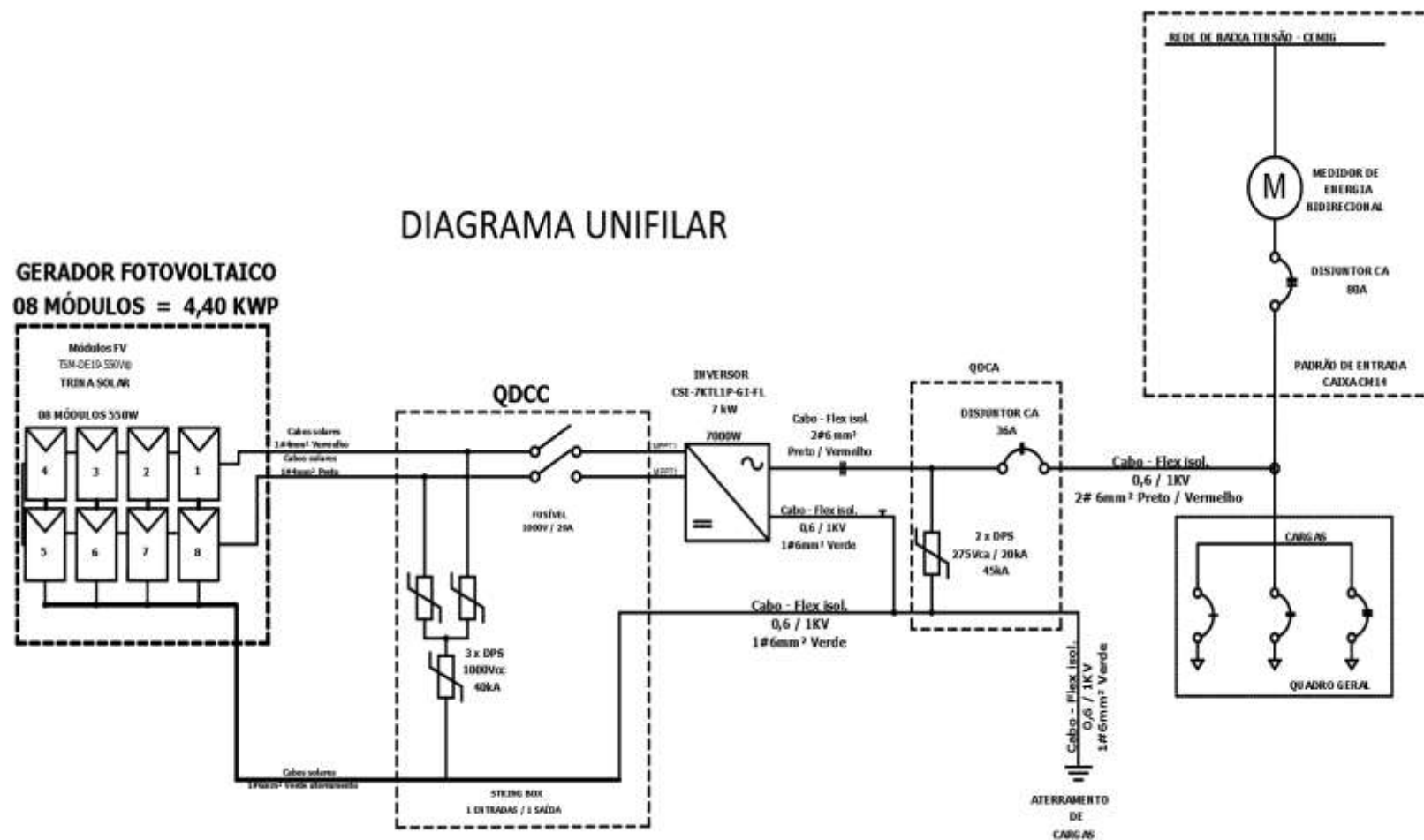
TÉGULA SOLAR. **Ficha técnica BIG-F11**. Disponível em: https://www.tegula.com.br/2020/wp-content/uploads/2020/10/TEG02620_Datasheet-BIG-F10_C.pdf Acessado em: 10/05/2023.

TRINA SOLAR. **Ficha Técnica: TSM-DE19-550Wp. 2024.** Disponível em: < <https://site-test.trinasolar.com/pt/product/VERTEX-DE19>> Acessado em: 10/05/2023.

TRIPATHY, M.; SADHU, P. K.; PANDA, S. K. **A critical review on building integrated photovoltaic products and their applications.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s.l.], v. 61, p. 451-465, ago. 2016.

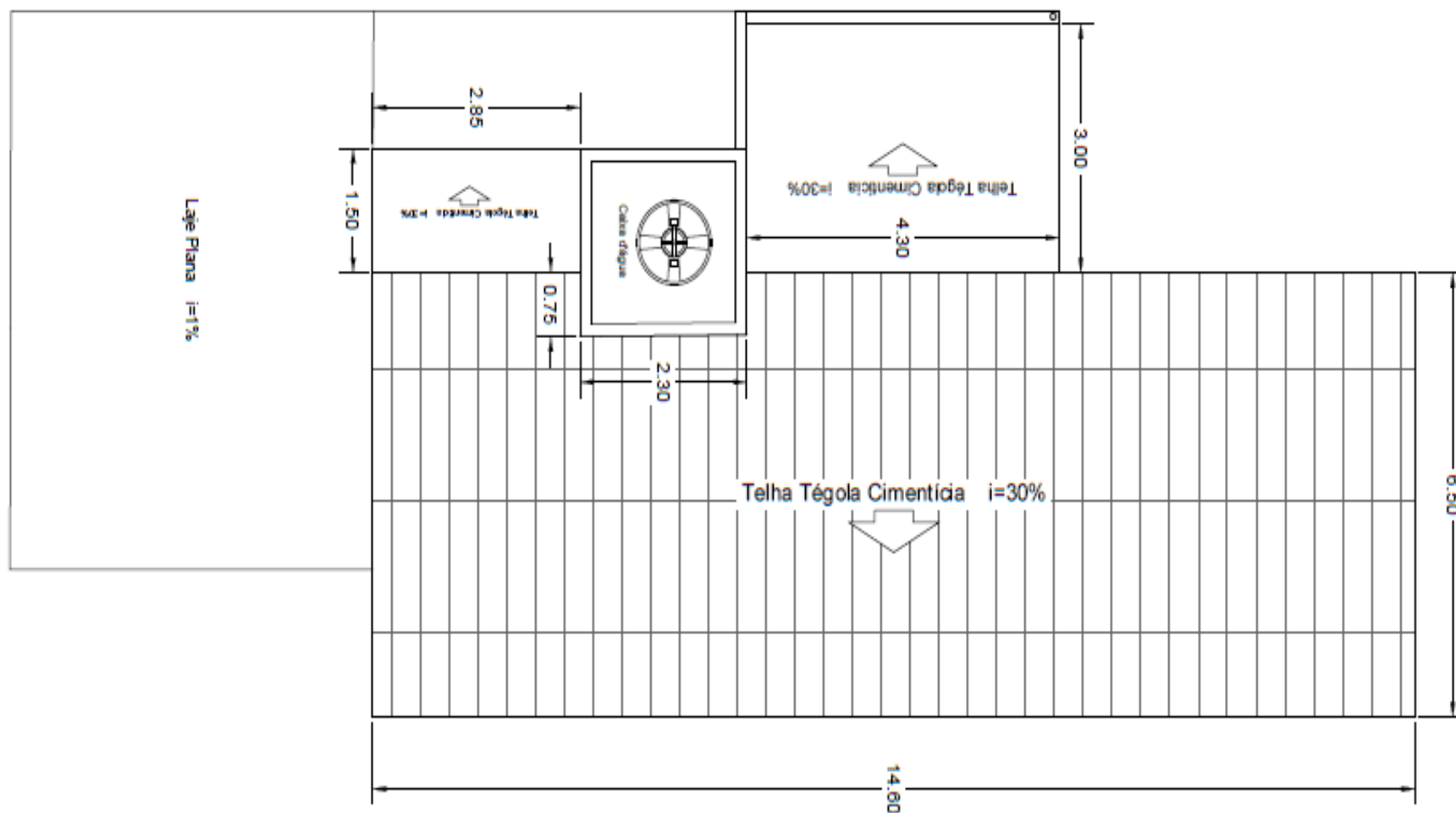
VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações: sistemas isolados e conectados à rede.** 1ª ed., Editora Érica, São Paulo, 224 p., 2012.

Apêndice 1: Diagrama Unifilar do Sistema Fotovoltaico Convencional



Fonte: Do autor.

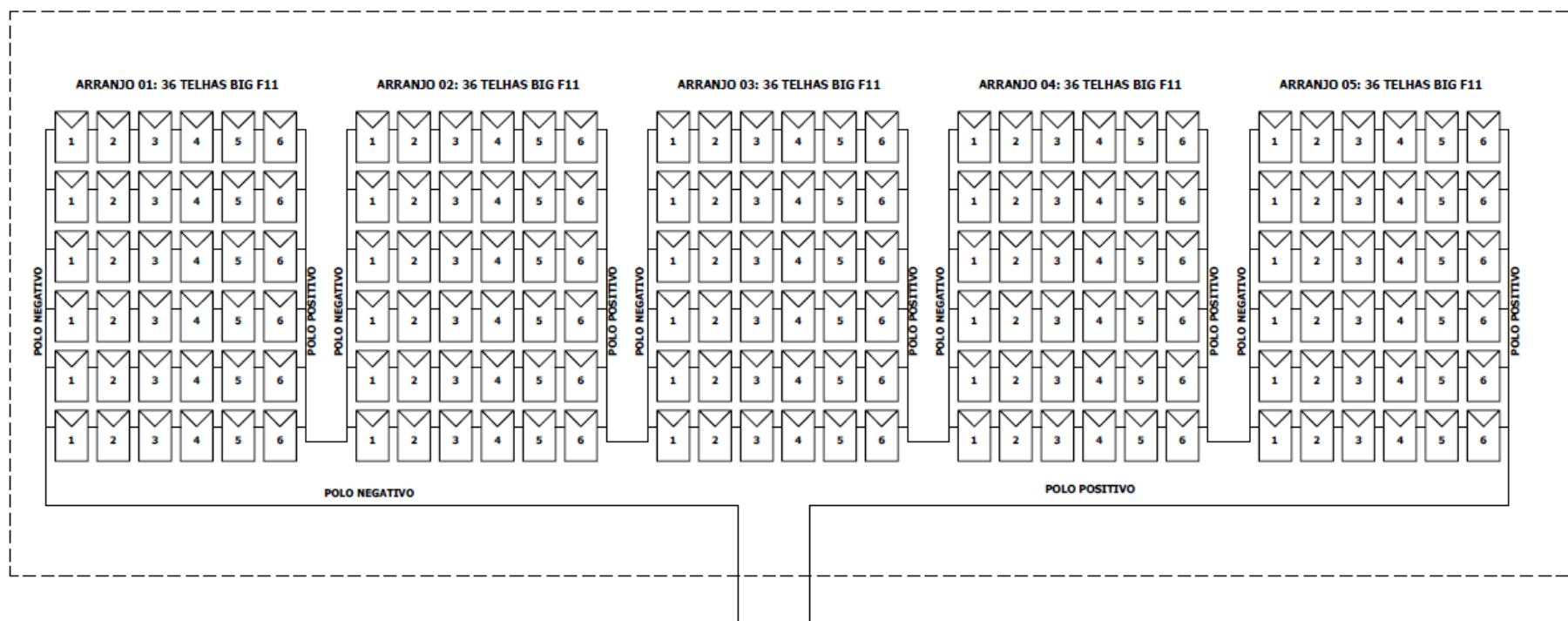
Apêndice 2: Planta de Cobertura



Fonte: Do autor.

Apêndice 3: Arranjo Circuito 1

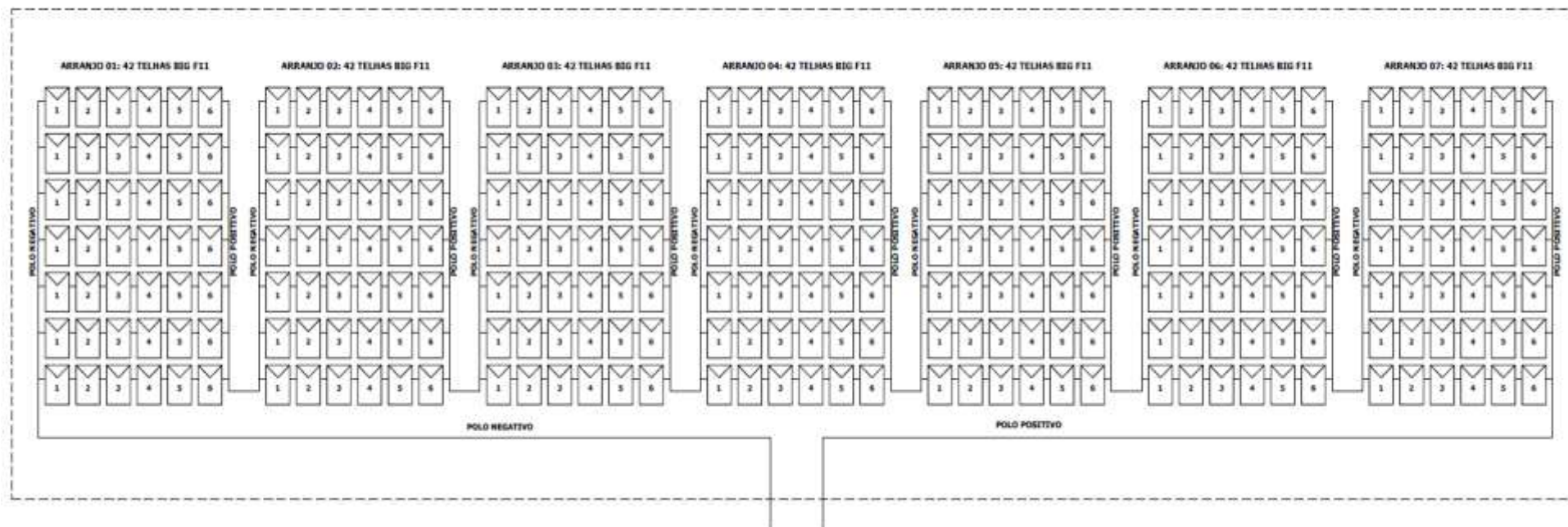
STRING 01: 180 TELHAS BIG F11



Fonte: Do autor.

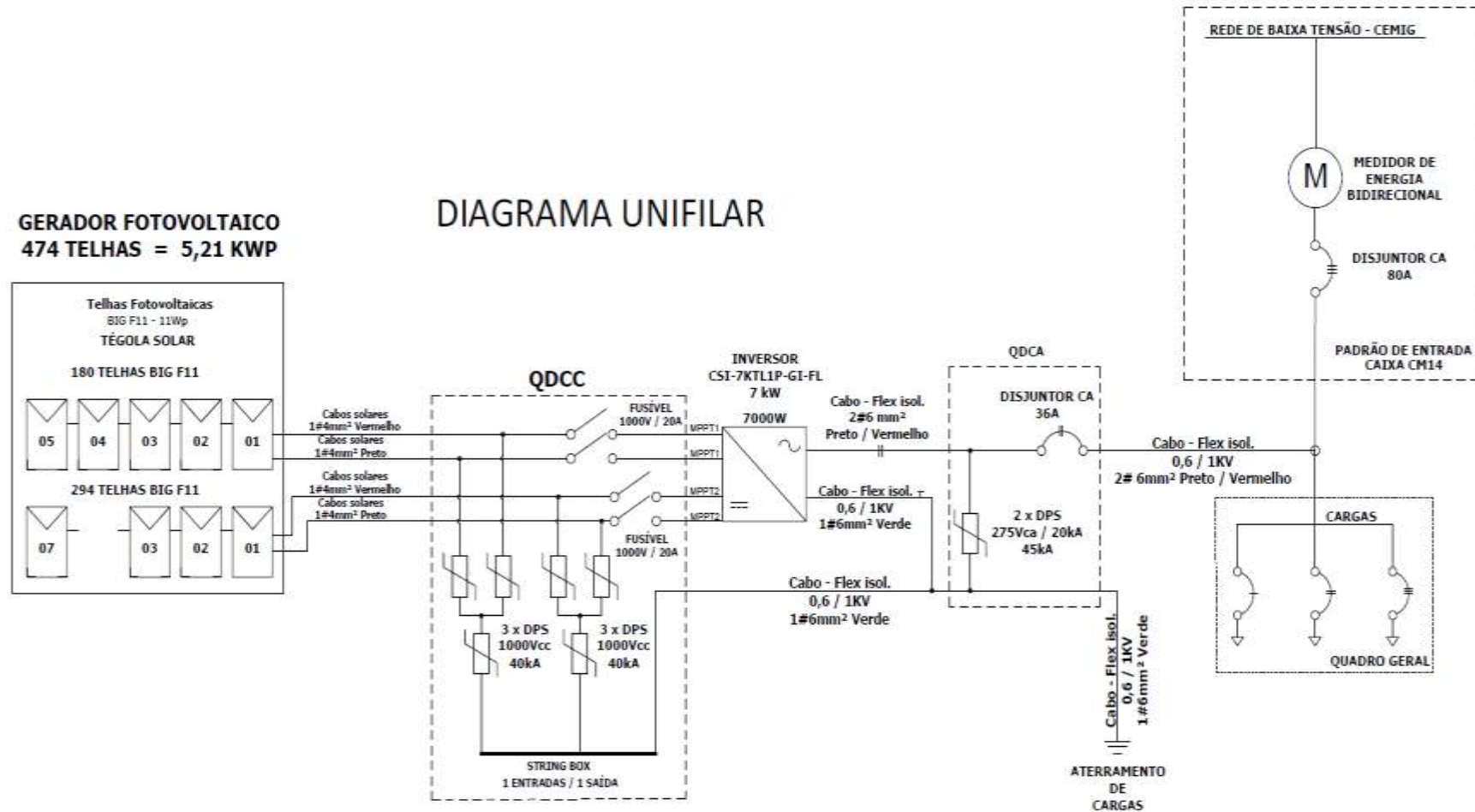
Apêndice 4: Arranjo Circuito 2

STRING 02: 254 TELHAS BIG F11



Fonte: Do autor.

Apêndice 5: Diagrama Unifilar do Sistema Fotovoltaico Integrado



Fonte: Do autor.