

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – UFSCAR
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA – CCET
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA – DEE

Gabriel Ogura Honda Kobayashi

**Análise técnico-econômica de projetos
de sistemas de geração fotovoltaica
residenciais**

Gabriel Ogura Honda Kobayashi

**Análise técnico-econômica de projetos
de sistemas de geração fotovoltaica
residenciais**

Monografia de Conclusão de Curso apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Guimarães Lage

São Carlos - SP

2023

Este trabalho é dedicado primeiramente à Deus, que constantemente guia meus passos e, nos momentos de dificuldade, me concede força para prosseguir. Aos meus pais, Fernando e Mirian, que sempre se doaram ao máximo para que eu pudesse me desenvolver e ter uma educação de qualidade, como também nunca mediram esforços para me apoiar em diversas situações. À minha namorada Beatriz, pelo carinho e companheirismo nos bons e maus momentos. Ao meu orientador, Guilherme, seu apoio, orientação, paciência e conhecimento fizeram desta uma experiência inspiradora para mim.

Agradecimentos

Primeiramente, quero agradecer ao meu pai, Fernando, por ser uma fonte constante de inspiração e orientação. Seu incentivo incansável e sua sabedoria foram fundamentais para me manter focado em meus objetivos. Suas palavras de encorajamento nos momentos de desafio foram luzes que iluminaram meu caminho. Obrigado por sempre acreditar em mim e por ser o meu exemplo de determinação.

À minha mãe, Mirian, minha eterna fonte de amor e força, expresso minha sincera gratidão. Sua paciência infinita, seu apoio emocional e suas palavras gentis foram meu porto seguro ao longo dessa jornada exigente. Você sempre esteve ao meu lado, celebrando cada conquista e me confortando em momentos de dúvida. Este trabalho é dedicado a você tanto quanto a mim, pois sua dedicação moldou quem sou hoje.

À minha amada namorada, Beatriz, seu amor inabalável e sua presença constante foram a luz que iluminou os dias mais difíceis. Suas palavras de encorajamento e seu ouvido atento tornaram cada desafio mais fácil de enfrentar.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Guilherme Guimarães Lage, expresso minha profunda gratidão por sua orientação e *expertise*. Suas observações perspicazes e *feedbacks* valiosos moldaram este trabalho de maneira significativa. Agradeço por compartilhar seu conhecimento e por sempre me encorajar a buscar a excelência.

Aos meus melhores amigos, Henderson, João Victor, Matheus César e Breno, a minha vida foi enriquecida pela sua amizade e apoio inabaláveis. As risadas compartilhadas foram um lembrete constante de que a jornada é tão importante quanto o destino.

“Não fale mal de si mesmo. Pois o guerreiro dentro de você ouve suas palavras e é diminuído por elas.”
(Provérbio japonês)

Resumo

Ao observar a crescente demanda energética e o aumento expressivo nas tarifas de energia elétrica para os consumidores, especial o residencial nos últimos anos, torna-se viável encontrar meios para que se possa diminuir a exposição desses consumidores às variações dessas tarifas. A geração de energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico em painéis solares tem crescido significativamente nos últimos anos, impulsionada por seus benefícios econômicos e ambientais. Dessa forma, este trabalho apresenta uma análise técnico-econômica para o desenvolvimento de projetos de sistemas de geração fotovoltaica residenciais sob as perspectivas normativa, técnica e econômica. Nesta monografia serão apresentados e discutidos os componentes dos sistemas de geração fotovoltaica conectados à rede elétrica, os cálculos para dimensionamento e a instalação dos painéis fotovoltaicos, e um estudo de caso a respeito do dimensionamento de um sistema de geração fotovoltaica residencial com o cálculo da viabilidade econômica de implementação desse sistema.

Palavras-chave: análise técnico-econômica, dimensionamento de sistemas de geração fotovoltaica, norma técnica, painel solar fotovoltaico.

Abstract

Observing the increasing energy demand and the significant rise in electricity tariffs for consumers, especially residential consumers, in recent years, it becomes viable to find means to reduce the exposure of these consumers to fluctuations in these tariffs. The generation of electricity through the photovoltaic effect in solar panels has grown significantly in recent years, driven by its economic and environmental benefits. Therefore, this paper presents a technical-economic analysis for the development of residential photovoltaic generation system projects from normative, technical, and economic perspectives. This monograph will present and discuss the components of grid-connected photovoltaic generation systems, calculations for sizing and installation of photovoltaic panels, and a case study regarding the sizing of a residential photovoltaic generation system with the calculation of the economic feasibility of implementing such a system.

Keywords: photovoltaic solar panel, photovoltaic generation system sizing, technical standard, technical-economic analysis.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Agrupamento células, módulos e painéis fotovoltaicos.	32
Figura 2 – Influência da irradiância solar na potência de saída do módulo fotovoltaico.	34
Figura 3 – Influência da temperatura na potência de saída do módulo fotovoltaico.	34
Figura 4 – Fluxo energético em um SFI com cargas CC e CA.	36
Figura 5 – Fluxo energético em um SFCR com cargas CA.	37
Figura 6 – Diagrama representativo de um SFH com cargas CC e CA.	37
Figura 7 – Painéis fotovoltaicos.	42
Figura 8 – Caixa de junção ou <i>string box</i>	44
Figura 9 – Dispositivos de proteção contra surtos de tensão e corrente.	45
Figura 10 – Chave seccionadora	46
Figura 11 – Disjuntores termomagnéticos.	46
Figura 12 – Cabos monopolares para interconexão de módulos fotovoltaicos e a caixa de junção.	47
Figura 13 – Pontos de instalação dos componentes de proteção, monitoração e controle de um SFCR.	57
Figura 14 – Visão aérea da residência em estudo.	61
Figura 15 – String Box lado CC	68
Figura 16 – Disjuntor e DPS do lado CA	69
Figura 17 – Chave seccionadora escolhida	70
Figura 18 – Especificações dos Cabos CC	70
Figura 19 – Suporte para os módulos	71

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tecnologia e Eficiência de Células Fotovoltaicas	31
Tabela 2 – Comparação entre os módulos fotovoltaicos disponíveis no mercado brasileiro.	42
Tabela 3 – Comparação dos inversores disponíveis no mercado brasileiro.	43
Tabela 4 – Histórico de consumo da residência (2022-2023)	62
Tabela 5 – Irradiação solar média	63
Tabela 6 – Especificações do módulo fotovoltaico	63
Tabela 7 – Especificações do Inversor	65
Tabela 8 – Tabela de equipamentos e preços	72
Tabela 9 – Valor da conta de energia	73
Tabela 10 – Análise Econômica	75
Tabela 11 – Previsão da Taxa Selic	77
Tabela 12 – Estudo Econômico	77

Lista de siglas

ABRACE	Associação dos Grandes Consumidores Industriais de Energia e de Consumidores Livres
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CdTe	Telureto de Cádmiio
CIGS	Cobre, Índio e Gálio e Selênio
DSV	Dispositivo de Seccionamento Visível
DPS	Dispositivo de Proteção Contra Surtos
FDI	Fator de Dimensionamento de Inversores
GaAs	Arseneto de Gálio
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OPV	Compostos Orgânicos
PWM	Modulação por Largura de Pulso
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SFH	Sistema Fotovoltaico Híbrido
SFI	Sistema Fotovoltaico Isolado
SF	Sistema Fotovoltaico
Si	Silício
SPDA	Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas
TIR	Taxa Interna de Retorno

W/m²	Watts por metro quadrado
Wh/m²	Watt-hora por metro quadrado
VPL	Valor Presente Líquido

Sumário

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Motivação	24
1.2	Organização da monografia	25
2	LEVANTAMENTO TEÓRICO E NORMATIVO	27
2.1	Fundamentação teórica	27
2.1.1	Energia solar e o efeito fotovoltaico	27
2.1.2	Tipos de células fotovoltaicas	28
2.1.3	Módulos fotovoltaicos	32
2.1.4	Fatores de influência no desempenho dos módulos fotovoltaicos	33
2.1.5	Inversores	34
2.1.6	Tipos de sistemas fotovoltaicos	35
2.2	Resoluções e normas técnicas	37
2.2.1	Resoluções normativas ANEEL relacionadas à instalação de sistemas de geração fotovoltaica em residências	38
2.2.2	Normas técnicas ABNT relacionadas à instalação de sistemas de geração fotovoltaica em residências	38
3	PROJETO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA RESIDENCIAIS	41
3.1	Componentes dos SFCRs	41
3.1.1	Módulos fotovoltaicos de SFCRs	41
3.1.2	Inversores para SFCRs	43
3.1.3	Caixa de junção ou <i>string box</i>	44
3.1.4	Dispositivos de proteção	44
3.1.5	Cabeamento	46
3.1.6	Estruturas de suporte e ancoragem	47

3.2	Projeto Técnico	47
3.2.1	O Projeto Básico	47
3.2.2	Projeto Executivo	48
3.3	Dimensionamento do sistema de geração fotovoltaica residencial	49
3.3.1	Localização	49
3.3.2	Demanda solicitada	50
3.3.3	Dimensionamento do número de módulos	50
3.3.4	Dimensionamento dos inversores	51
3.3.5	Tensão de entrada	52
3.3.6	Faixa de tensão de operação MPPT do inversor	53
3.4	Instalação dos módulos fotovoltaicos	53
3.4.1	Orientação e inclinação dos módulos fotovoltaicos	54
3.4.2	Montagem da estrutura de suporte e ancoragem dos módulos fotovoltaicos	54
3.4.3	Instalação de dispositivos de controle de energia	55
3.4.4	Instalação da proteção	55
3.4.5	Aterramento	56
3.5	Análise de viabilidade econômica	58
4	ESTUDO DE CASO	61
4.1	Projeto e dimensionamento	61
4.1.1	Localização	61
4.1.2	Histórico de consumo da residência	62
4.1.3	Análise da irradiação solar	62
4.1.4	Escolha dos módulos	63
4.1.5	Escolha dos inversores	64
4.1.6	Arranjo dos módulos	66
4.1.7	Escolha dos dispositivos de proteção e condutores	68
4.1.8	Escolha do suporte para os módulos	71
4.2	Investimento inicial	71
4.3	Análise de viabilidade econômica do estudo de caso	72
4.3.1	Evolução das contas de energia	72
4.3.2	Energia gerada pelo sistema	73
4.3.3	Custos de manutenção	74
4.3.4	Estudo econômico VPL e TIR	75
5	CONCLUSÕES	79
	REFERÊNCIAS	81
ANEXO A	<i>DATASHEET</i> MÓDULO FOTOVOLTAICO	85

ANEXO B	<i>DATASHEET</i> INVERSOR	89
---------	-------------------------------------	----

Capítulo 1

Introdução

A matriz energética do setor elétrico brasileiro é composta majoritariamente pela fonte hidráulica e fortemente dependente do planejamento da operação de usinas hidrelétricas energeticamente interconectadas ao longo das principais bacias hidrográficas do país. No entanto, alterações pluviométricas nessas bacias hidrográficas decorrentes das já perceptíveis mudanças climáticas têm afetado as disponibilidades de recursos hídricos. Devido às crises hídricas que invariavelmente impactam o setor elétrico brasileiro, além do aumento da demanda por eletricidade, incentivos governamentais como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), instituído pelo art. 3º da Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, promovem a diversificação dessa matriz a fim de se aumentar a participação de outras fontes energéticas renováveis, mesmo que intermitentes, na matriz energética elétrica brasileira.

Apesar do PROINFA não contemplar a fonte energética solar, a participação dessa fonte na matriz energética elétrica brasileira tem crescido significativamente (MEDEIROS et al., 2021). Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a participação da fonte energética solar na matriz energética elétrica brasileira em 2022 foi de aproximadamente 4,0%; a previsão para o ano de 2027 é que esse valor chegue a aproximadamente 7,4% (ONS, 2023). Ademais, consumidores residenciais, cativos e pertencentes ao grupo tarifário B1, correspondem ao segundo maior grupo consumidor de energia elétrica no Brasil, com uma participação de 26,4%, atrás apenas dos consumidores industriais, com uma participação de 37,4% (EPE, 2022). Diante desses indicadores, são significativos os benefícios para a segurança energética nacional advindos de uma maior inserção e “popularização” da geração de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos residenciais.

O crescimento da geração de energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos pode ser atribuído a diversos fatores como a redução dos custos de implementação, alto nível de

irradiação solar na maior parte do território brasileiro, conscientização ambiental e criação de políticas públicas que incentivam a geração de energia solar no país (RIGO et al., 2022). Uma dessas políticas públicas é a Resolução Normativa 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que estabelece as regras para a geração distribuída de energia elétrica no Brasil.

Não obstante, o fator mais significativo para a maior exploração dessa fonte de energia foi o aumento expressivo nas tarifas de energia elétrica, principalmente as do grupo tarifário B1. Segundo dados divulgados pela Associação dos Grandes Consumidores Industriais de Energia e de Consumidores Livres (ABRACE), nos últimos 5 anos, o custo da energia elétrica no Brasil aumentou 47%, e esse aumento fez do Brasil o segundo país do mundo com a conta de luz mais alta, ficando atrás apenas da Colômbia (ABRACE, 2021).

O preço da conta de luz varia de acordo com o tipo de consumidor. No atual contexto do setor elétrico brasileiro, consumidores residenciais pagam mais caro pela energia elétrica do que consumidores industriais e comerciais. Isso ocorre porque as tarifas para os consumidores residenciais são definidas em função do seu perfil de demanda (cujo pico se concentra em um curto intervalo de tempo ao longo do dia) e de acordo com a remuneração de capital para a amortização dos investimentos realizados por concessionárias e permissionárias em seus respectivos sistemas de distribuição. Também incidem na tarifa custos adicionais como cota de depreciação dos componentes do sistema de distribuição, iluminação pública e encargos direcionados ao custeio do setor e à aplicação de políticas públicas. Ademais, diante dos reajustes nos últimos anos, a conta de luz representa um dos principais gastos mensais para 67% dos brasileiros (ABRACEEL, 2022).

1.1 Motivação

A vantagem financeira aliada ao apelo socioambiental trouxe para as cidades o conceito de edificações inteligentes (*smart buildings*) que apresentam alternativas sustentáveis, dentre elas, o emprego de equipamentos com alta eficiência energética e sistemas de geração de energia, que beneficiam o meio ambiente e as finanças dos moradores (GOMES et al., 2020). No contexto brasileiro, salienta-se que tais fatores favorecem o uso de sistemas de geração fotovoltaica para reduzir a exposição de consumidores, sobretudo os residenciais, às oscilações inerentes ou decorrentes de crises hídricas no preço da energia elétrica.

Prospecta-se, no futuro, que os consumidores residenciais brasileiros serão participantes-chave no mercado de eletricidade ao seguir o mesmo modelo e estratégia energética da União Europeia. No entanto, várias barreiras regulatórias precisam ser superadas para promover a participação ativa de pequenos prosumidores nos procedimentos de mercado. Nesse contexto, Zepter et al. (2019) desenvolveram um modelo para o gerenciamento de fontes energéticas, tomada de decisões e contabilização em *smart buildings* que integra comunidades prosumidoras nas operações de mercado de véspera e intradiário, chamado de

modelo STEP (*Smart elecTricity Exchange Platform*). Por meio da proposição desse modelo, os autores exploraram o potencial do comércio *peer-to-peer* (P2P) e da flexibilidade operacional proporcionada pelo armazenamento de energia em baterias no curto prazo. Como principal resultado, são constatadas reduções substanciais nas contas de eletricidade dos consumidores residenciais dessas comunidades ao possibilitar que prosumidores vendam seu excedente de energia a preços mais altos e que consumidores adquiram energia localmente a preços mais baixos que os da rede elétrica.

No entanto, é importante ressaltar que a implementação bem-sucedida desse modelo requer, primeiramente, uma maior inserção e popularização da geração de energia elétrica por consumidores residenciais para se justificar uma posterior implementação de um ambiente de rede inteligente (*smart grid*) com troca bidirecional de informações e maior interconexão entre os agentes desse mercado; questões relacionadas à privacidade dos dados e à regulamentação também precisam ser consideradas para se garantir a segurança e a conformidade.

É, portanto, neste cenário que surge a motivação desta monografia de conclusão de curso. Tendo em vista os comprovados benefícios advindos da popularização da geração de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos residenciais e antecipando-se às iminentes mudanças no mercado de eletricidade brasileiro no médio prazo, apresenta-se aqui uma metodologia para a condução de análises técnico-econômicas a respeito de projetos e implantação de sistemas de geração fotovoltaica residenciais com o objetivo inicial de diminuir a exposição de consumidores residenciais às variações no preço da conta de luz.

1.2 Organização da monografia

Este trabalho está estruturado na seguinte forma.

No Capítulo 2 é apresentado um levantamento teórico e normativo a respeito do princípio do efeito fotovoltaico em painéis solares, das formas de exploração da energia solar e normas técnicas vigentes.

No Capítulo 3 apresenta-se a metodologia para o dimensionamento de projetos de sistemas de geração fotovoltaica residenciais.

O Capítulo 4 traz um estudo de caso a respeito do dimensionamento de um sistema de geração fotovoltaica residencial na cidade de Marília – SP bem como a análise técnico-econômica do investimento a ser realizado.

E, por fim, as principais conclusões a respeito da metodologia e análise aqui apresentadas são elencadas no Capítulo 5.

Capítulo 2

Levantamento teórico e normativo

Neste capítulo será apresentado um levantamento teórico e normativo sobre a conversão da energia solar em energia elétrica. Serão abordados os diferentes tipos de células e módulos fotovoltaicos disponíveis no mercado, suas propriedades e fatores que influenciam seu funcionamento. Além disso, a importância do arranjo dos módulos fotovoltaicos e sua conexão à rede por inversores serão apresentados em conjunto os tipos de sistemas de geração fotovoltaica mais comuns. Este levantamento também abordará aspectos normativos brasileiros em vigor sobre a geração de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos.

2.1 Fundamentação teórica

2.1.1 Energia solar e o efeito fotovoltaico

A cada ano, o planeta Terra recebe uma quantidade de energia solar equivalente a $1,5 \cdot 10^9$ TWh, que é equivalente a 10.000 vezes o consumo mundial de energia durante esse período. A radiação solar não só é crucial para sustentar a vida na Terra, como também representa uma fonte de energia renovável e, para fins práticos, inesgotável, com grande potencial para ser captada e convertida em outras formas de energia, como térmica e elétrica (PINHO; GALDINO, 2014).

A energia solar incidente na superfície terrestre, de forma perpendicular, é composta por dois tipos de radiação: a radiação direta, composta pelos raios solares que atingem diretamente a superfície, e a radiação difusa, composta pelos raios solares que atingem a superfície de forma indireta devido a interferências como nuvens, poeira e outros objetos (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

A irradiância é uma medida que indica a quantidade de energia solar do tipo direta

e é expressa em W/m^2 . Sob condições de céu claro, a irradiância máxima medida na superfície terrestre é de $1.000 W/m^2$ (ALDABÓ, 2002). Essa irradiância é utilizada como um padrão na indústria fotovoltaica para avaliação e especificação de células e módulos fotovoltaicos.

A irradiação é uma medida que quantifica a quantidade de energia solar que incide sobre uma determinada área durante um período de tempo, expressa em Wh/m^2 . Essa medida de irradiação é importante para calcular o potencial de energia solar disponível em uma região específica e é utilizada para dimensionar sistemas fotovoltaicos (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Uma das maneiras de se aproveitar a energia obtida através do sol é por meio do efeito fotovoltaico em dispositivos conhecidos como células fotovoltaicas. Tais células são componentes optoeletrônicos que convertem diretamente a radiação solar em eletricidade e são constituídas basicamente de materiais semicondutores, sendo o silício o material mais empregado.

O efeito fotovoltaico foi visto pela primeira vez em 1839 pelo físico francês Edmond Becquerel, que observou que certos materiais produziam pequena quantidade de corrente quando expostos à luz. Em 1876, foi desenvolvido o primeiro dispositivo fotovoltaico, mas sua produção em larga escala só começou em 1956 devido à necessidade de fornecimento de energia para a permanência e manutenção de satélites no espaço durante a chamada corrida espacial.

Além das empresas que buscavam soluções para a corrida espacial, empresas de telecomunicações também demonstraram interesse em utilizar a energia solar para abastecer sistemas remotos. Em 1973, a Primeira Crise do Petróleo teve como uma de suas consequências um aumento geral do interesse na energia solar, mas o alto custo das células fotovoltaicas utilizadas em explorações espaciais àquela época tornava essa tecnologia economicamente inviável para seu uso em outras aplicações. No final da década de 1990, o compromisso em reduzir as emissões de gases causadores do efeito estufa como o CO_2 , como estabelecido no Protocolo de Kyoto, levou à criação de políticas governamentais na Alemanha e no Japão que impulsionaram significativamente o desenvolvimento e o mercado da energia solar.

2.1.2 Tipos de células fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são fabricadas, na sua grande maioria, usando o Silício (Si) e podendo ser constituída de cristais monocristalinos, policristalinos, amorfo ou filmes finos. As células de Si monocristalino são aproximadamente 2% mais eficientes que as células policristalinas; no entanto as células policristalinas são mais baratas, pois exigem um processo de preparação menos rigoroso. Por sua vez, as células de Si amorfo têm menor eficiência, mas possuem processo de fabricação mais simples e barato e são mais resistentes ao sombreamento e altas temperaturas. Essas diferenças nas características

das células fotovoltaicas permitem a escolha da tecnologia mais adequada de acordo com as necessidades específicas do projeto e orçamento disponível (GOETZE, 2017).

2.1.2.1 Si monocristalino

A tecnologia de células de Si monocristalino é a mais utilizada e comercializada para a conversão de energia solar em eletricidade, tendo um processo de fabricação bem estabelecido. A produção começa com a extração do dióxido de silício, que é desoxidado em fornos, purificado e solidificado. Isso resulta em um material com 98% a 99% de pureza, valor suficiente para a produção de células fotovoltaicas. No entanto, para se obter um grau de pureza ainda maior, na faixa de 99,9999%, são necessários dispositivos semicondutores adicionais (CRESESB, 2006).

2.1.2.2 Si policristalino

As células de Si policristalino são mais baratas que as de Si monocristalino por exigirem um processo de preparação das células menos rigoroso. A eficiência, no entanto, é menor quando comparada às células de Si monocristalino.

Segundo (CRESESB, 2006), o processo de pureza do silício utilizado na produção das células de Si policristalino é similar ao processo do Si monocristalino, o que permite obtenção de níveis de eficiência compatíveis. Basicamente, as técnicas de fabricação de células policristalinas são as mesmas que as da fabricação das células monocristalinas, porém com menor rigor de controle da qualidade.

2.1.2.3 Si amorfo

A célula de Si amorfo se diferencia das outras estruturas cristalinas devido à alta desordem na estrutura dos átomos. Embora possua uma eficiência de conversão menor em comparação às células de Si monocristalino e policristalino, o uso do Si amorfo apresenta vantagens significativas, como as propriedades elétricas e o processo de fabricação. O Si amorfo tem uma absorção eficiente da radiação solar na faixa do visível e pode ser fabricado em diversos tipos de substratos, tornando-se uma opção para sistemas fotovoltaicos de baixo custo. Apesar de suas vantagens, o uso do Si amorfo apresenta duas desvantagens: a primeira é a baixa eficiência de conversão quando comparada às células de Si monocristalino e policristalino, e a segunda é a degradação das células nos primeiros meses de operação, reduzindo assim sua eficiência ao longo da vida útil. Não obstante, o processo de fabricação do Si amorfo é relativamente simples e barato (CRESESB, 2006).

2.1.2.4 Filmes finos

Os dispositivos de filmes finos são fabricados pulverizando-se finas camadas de Si sobre uma base de material rígido ou flexível, como plástico, vidro ou metal. Uma das

vantagens desse método é o menor custo de produção, uma vez que não há a necessidade de serragem de lingotes, o que resulta em menor desperdício de material. Embora sejam mais baratos para serem fabricados, os dispositivos de filmes finos apresentam baixa eficiência e precisam de uma área maior para gerar a mesma quantidade de energia que as tecnologias cristalinas, o que resulta em maiores custos de instalação do sistema de geração fotovoltaica.

Os diferentes tipos de painéis solares de filmes finos podem ser categorizados de acordo com o material depositado sobre o substrato: Si amorfo, Telureto de Cádmio (CdTe), Cobre, Índio e Gálio e Selênio (CIGS), entre outros materiais emergentes.

O CdTe é uma tecnologia de película fina que se destaca no mercado de painéis solares, superando o custo/eficiência dos painéis de silício cristalino em uma parcela significativa. No entanto, essa tecnologia possui desvantagens relacionadas à alta toxicidade e baixa disponibilidade dos elementos utilizados (PINHO; GALDINO, 2014).

As células de CIGS são uma tecnologia de filmes finos que possuem boa competitividade em aplicações integradas a edificações, devido à possibilidade de alcançarem eficiências relativamente altas e excelente estética. Entre os filmes finos disponíveis comercialmente, os módulos CIGS são os mais eficientes (PINHO; GALDINO, 2014).

2.1.2.5 Emergentes

Existem diversos materiais semicondutores emergentes disponíveis para o uso em sistemas fotovoltaicos como o Arseneto de Gálio (GaAs), as perovskitas e alguns compostos orgânicos. Embora a eficiência da conversão da radiação solar em energia elétrica seja uma métrica significativa, o custo por Wh produzido é considerado mais relevante para a maioria das aplicações.

O GaAs é um dos semicondutores mais estudados há décadas, com aplicações em várias áreas, inclusive na composição de células fotovoltaicas comerciais. As células que têm apresentando melhor eficiência são chamadas de células de multijunção (MJ) compostas por materiais oriundos da família III-V da tabela periódica. Essas células de MJ compostas por GaInP/GaAs/GaInAsNSb atingiram o recorde de eficiência, o que gerou interesse e inúmeras pesquisas envolvendo a liga GaInAsNSb (THOMEN, 2020).

As células fotovoltaicas de perovskita são uma tecnologia recente e promissora. São compostas por um material semicondutor, de fórmula química $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, cuja estrutura se assemelha à do mineral titanato de cálcio (CaTiO_3). A matéria-prima empregada na produção dessas células não é retirada da natureza, mas sintetizada em laboratório. Elas são construídas em camadas, com diferentes filmes finos com composição química e funções diferentes (VASCONCELOS, 2017).

As células fotovoltaicas de perovskita não requerem elevada pureza, uma vez que defeitos em sua estrutura não reduzem sua eficiência. Elas são feitas com compostos químicos baratos e podem ser elaboradas com métodos simples que reduzem seu custo.

Outra característica das células fotovoltaicas de perovskita é sua espessura, em torno de 1 μm , diante de cerca de 180 μm das de silício (VASCONCELOS, 2017).

Dentre as tecnologias emergentes, também merece destaque a célula fotovoltaica de compostos orgânicos ou células OPV; que é um tipo de célula composta por um polímero que utiliza a eletrônica orgânica, um ramo da eletrônica que lida com polímeros orgânicos condutores ou pequenas moléculas orgânicas, para absorção de luz e transporte de carga a fim de produzir eletricidade a partir da radiação solar (PINHO; GALDINO, 2014).

2.1.2.6 Comparativo entre as tecnologias das células fotovoltaicas

As diferentes tecnologias de células disponíveis no mercado possuem custos e eficiências diferentes. No mercado brasileiro são homologados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) três tipos de tecnologia: silício monocristalino, silício policristalino e filmes finos (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2012). Além dos custos e da eficiência, outros fatores devem ser considerados na escolha do painel solar para o dimensionamento e projeto de um sistema de geração fotovoltaica residencial, como o tipo de suporte necessário para a sua fixação e o ambiente em que será instalado.

A Tabela 1 lista as tecnologias citadas acima, bem como as respectivas eficiências. Percebe-se que os módulos de Si mono e policristalino são os que apresentam as maiores eficiências de conversão, ficando apenas atrás da MJ GaAs tanto na conversão celular, que é a menor unidade fotovoltaica, quanto no módulo fotovoltaico que é o agrupamento dessas células.

Tabela 1 – Tecnologia e Eficiência de Células Fotovoltaicas

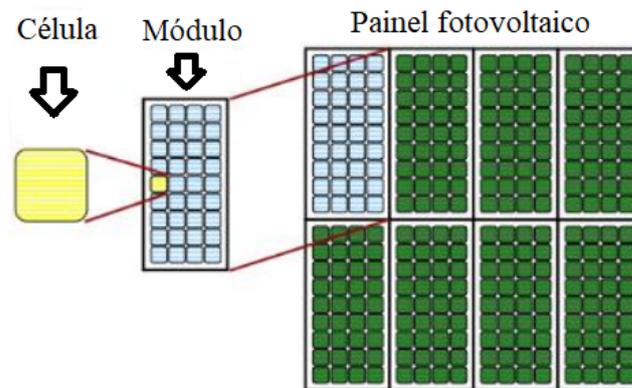
Tipo	Tecnologia	Eficiência	
		Conversão celular [%]	Conversão do módulo [%]
Cristalino	Si monocristalino	27,6	24,4
	Si policristalino	23,3	20,4
	MJ GaAs	47,1	38,9
Filmes finos	CdTe	22,1	19,5
	CIGS	23,4	19,2
Emergentes	Perovskita	25,7	17,9
	OPV	18,2	11,7

Fonte: Adaptado de (CENTER FOR SUSTAINABLE SYSTEMS, 2021)

2.1.3 Módulos fotovoltaicos

A menor unidade fotovoltaica é a célula fotovoltaica, capaz de gerar potência elétrica a uma tensão abaixo de 1 V (PINHO; GALDINO, 2014). A fim de se obter potências maiores, essas células são agrupadas de forma a compor módulos fotovoltaicos. Esses módulos agrupados, por sua vez, compõem os painéis fotovoltaicos. A Figura 1 ilustra o agrupamento de células, módulos e painéis fotovoltaicos.

Figura 1 – Agrupamento células, módulos e painéis fotovoltaicos.



Fonte: Adaptado do (LEVA et al., 2017).

Células fotovoltaicas são montadas sobre uma estrutura rígida e prensadas entre lâminas plásticas, que são cobertas por uma lâmina de vidro e fixadas em uma moldura de alumínio, formando assim um módulo fotovoltaico. Na parte de trás desse módulo há uma caixa de conexões que permite a conexão de cabos padronizados fornecidos com o módulo. Quando esses módulos são interconectados, eles formam o painel ou arranjo fotovoltaico.

Para se obter diferentes valores de corrente e tensão, células e módulos podem ser conectados em série e/ou em paralelo. Quando conectados em série, a tensão nos terminais é somada em concordância com a lei das tensões de Kirchhoff. Quando conectados em paralelo, a corrente de saída é somada em concordância com a lei das correntes de Kirchhoff.

2.1.3.1 Conexão de módulos fotovoltaicos em série

Os módulos conectados em série formam fileiras ou sequências, sendo recomendado o uso de módulos do mesmo modelo para minimizar as perdas no arranjo. O número de módulos em série determina a tensão de saída do sistema de geração fotovoltaica, que é a tensão aplicada aos terminais de entrada do inversor. Para se garantir funcionamento adequado do sistema, o inversor deve ser dimensionado para suportar a soma das tensões de circuito aberto resultante da associação em série dos módulos fotovoltaicos (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

2.1.3.2 Conexão de módulos fotovoltaicos em paralelo

Para aumentar a potência do sistema de geração fotovoltaica, fileiras ou sequências de módulos fotovoltaicos (com a mesma tensão de circuito aberto) são conectadas em paralelo de acordo com corrente máxima do inversor. A corrente de saída do sistema fotovoltaico corresponde à soma das correntes de saída de cada fileira ou sequência de módulos fotovoltaicos.

A associação em paralelo de módulos fotovoltaicos individuais é geralmente utilizada apenas em sistemas isolados, não sendo comum esse tipo de associação em sistemas conectados à rede, exceto em situações em que o inversor tem uma baixa tensão de entrada (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

2.1.4 Fatores de influência no desempenho dos módulos fotovoltaicos

A eficiência dos módulos fotovoltaicos é significativamente afetada por variações na irradiância solar e temperatura do módulo fotovoltaico ao longo do dia. Esses são os dois principais fatores ambientais que afetam o desempenho dos módulos fotovoltaicos, sendo importantes suas considerações em projetos de sistemas fotovoltaicos.

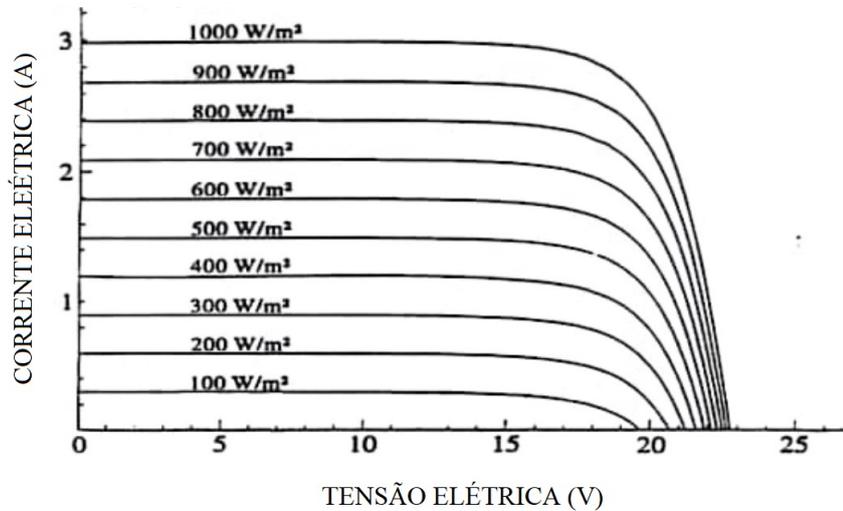
2.1.4.1 Influência da irradiância solar

A corrente de saída do módulo aumenta com o aumento da irradiância solar. Quando um módulo fotovoltaico é exposto à irradiação solar de 1.000 W/m^2 , ele atinge a corrente de saída máxima. Como a corrente de saída do módulo é diretamente proporcional à irradiação solar incidente, a redução da irradiação solar causa uma queda significativa na corrente de saída do módulo. Como a potência elétrica gerada no módulo fotovoltaico consiste no produto da tensão de saída pela corrente de saída, a diminuição na corrente de saída resulta na diminuição da potência gerada pelo módulo fotovoltaico (PINHO; GALDINO, 2014). Essa relação é ilustrada na Figura 2.

2.1.4.2 Influência da temperatura

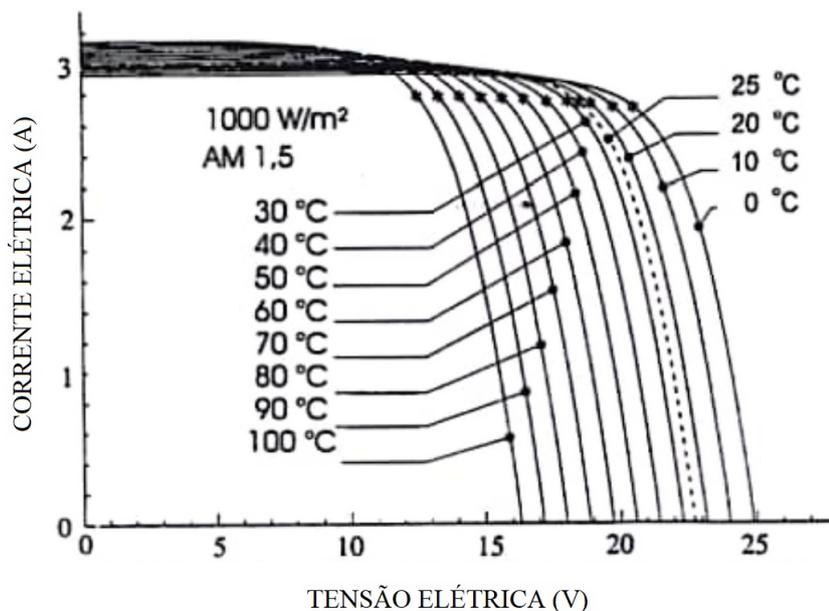
Variações na temperatura do módulo fotovoltaico influenciam na sua tensão de saída. Nesse sentido, à medida que a temperatura do módulo aumenta, sua tensão diminui, o que resulta na diminuição da sua potência de saída. Isso ocorre porque a tensão nos terminais dos módulos é inversamente proporcional à temperatura, ao passo que a corrente sofre uma elevação muito pequena (PINHO; GALDINO, 2014). Essa relação é ilustrada na Figura 3.

Figura 2 – Influência da irradiância solar na potência de saída do módulo fotovoltaico.



Fonte: Adaptado do (FADIGAS, 2000).

Figura 3 – Influência da temperatura na potência de saída do módulo fotovoltaico.



Fonte: Adaptado do (FADIGAS, 2000).

2.1.5 Inversores

O inversor é um dispositivo de eletrônica de potência que converte a potência em Corrente Contínua (CC) gerada nos módulos fotovoltaicos em potência em Corrente Alternada (CA). O inversor é um componente fundamental nos sistemas de geração fotovoltaica dado que parte significativa das cargas eletrodomésticas são projetadas para operação em CA com tensão eficaz de 127 V ou 220 V a 60 Hz (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

O inversor adequado deve ser escolhido para cada tipo de sistema de geração foto-

voltaica em função de sua tensão, corrente e potência de entrada (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Os inversores para sistemas fotovoltaicos são divididos em dois grupos: comutados pela rede e autocomutados (PINHO; GALDINO, 2014).

2.1.5.1 Inversores comutados pela rede

Os primeiros inversores utilizavam tiristores (SCR, TRIAC) como elementos de chaveamento, sendo esses dispositivos semicondutores capazes de suportar altas tensões. Apesar de robustos e simples, eles possuem baixa qualidade de tensão e corrente de saída, portanto, requerem o uso de filtros para uma maior qualidade da energia elétrica gerada. Com o surgimento de novos dispositivos de chaveamento (MOSFET, IGBT), a utilização de inversores a tiristor foi reduzida e atualmente são utilizados apenas em unidades com potência maior que 100 kW e acionadores de motores elétricos de grande porte (PINHO; GALDINO, 2014).

2.1.5.2 Inversores autocomutados

Nos inversores autocomutados são utilizados MOSFETs ou IGBTs. Esses dispositivos operam com a estratégia de controle de Modulação por Largura de Pulso (PWM), o que permite um bom controle sobre a forma de onda e o valor de tensão e corrente de saída.

Os inversores autocomutados podem ser do tipo fonte de tensão ou fonte de corrente. Devido à sua estabilidade frente a perturbações na rede e à facilidade no controle do fator de potência, o controle de corrente é geralmente adotado nos modelos para sistemas fotovoltaicos conectados à rede, ao passo que o controle de tensão é mais utilizado em inversores para sistemas fotovoltaicos autônomos.

2.1.5.3 MPPT

Inversores possuem um recurso chamado *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) que consiste em um tipo de controlador de carga responsável por otimizar a geração de energia pelo sistema fotovoltaico, “rastreamento” o ponto de máxima potência dos painéis solares e ajustando a tensão e a corrente de saída para garantir que a máxima transferência de potência à rede elétrica.

2.1.6 Tipos de sistemas fotovoltaicos

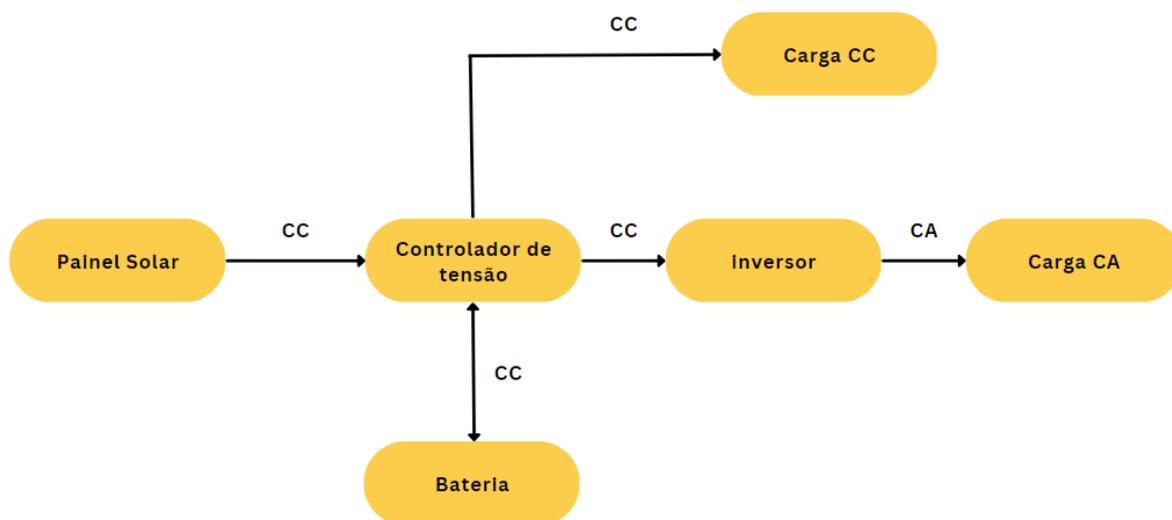
Os Sistemas Fotovoltaicos (SF) podem ser categorizados em duas principais classes: Sistema Fotovoltaico Isolado (SFI) e Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR). Em ambas as categorias, eles podem operar exclusivamente a partir da fonte fotovoltaica ou em combinação com uma ou mais fontes de energia, conhecido como Sistema Fotovoltaico Híbrido (SFH) (PINHO; GALDINO, 2014).

A integração de acumuladores como sistemas de armazenamento de energia em baterias ou células combustíveis em SFHs oferece uma oportunidade adicional para otimizar o uso da energia solar, aumentar a independência energética de consumidores do grupo tarifário B e contribuir para uma maior sustentabilidade ambiental (SON et al., 2023).

2.1.6.1 Sistema fotovoltaico isolado

Os SFIs são aqueles que produzem eletricidade independentemente de outras fontes de energia. Esses podem alimentar cargas CC e/ou CA, dependendo da aplicação desejada. Esse tipo de sistema pode demandar o uso de baterias para o armazenamento de energia no curto prazo quando a energia gerada for maior que a demanda, e os elementos que irão compor o sistema podem variar de acordo com as necessidades exigidas. A Figura 4 traz um diagrama que representa o fluxo energético em um SFI alimentando cargas CC e CA.

Figura 4 – Fluxo energético em um SFI com cargas CC e CA.

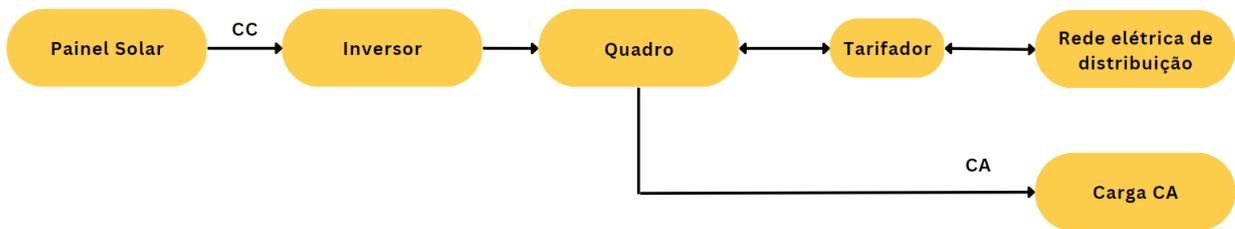


Fonte: Autoria própria.

2.1.6.2 Sistema fotovoltaico conectado à rede

Os SFCRs dispensam o uso de acumuladores como sistemas de armazenamento de energia em baterias ou células combustíveis, pois a energia por eles produzida pode ser consumida diretamente pela carga ou injetada diretamente na rede elétrica. No Brasil, no caso da unidade consumidora gerar mais energia do que consumir ao longo de um mês, a Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL prevê que ela terá direito a créditos de energia que podem ser aproveitados por até cinco anos ou esse excedente de energia pode ser utilizado em outras unidades consumidoras desde que estejam na mesma região da concessionária ou permissionária de energia e todas as contas de força e luz estejam cadastradas sob o mesmo CPF ou CNPJ. A Figura 5 traz um diagrama que representa o fluxo energético em um SFCR.

Figura 5 – Fluxo energético em um SFCR com cargas CA.



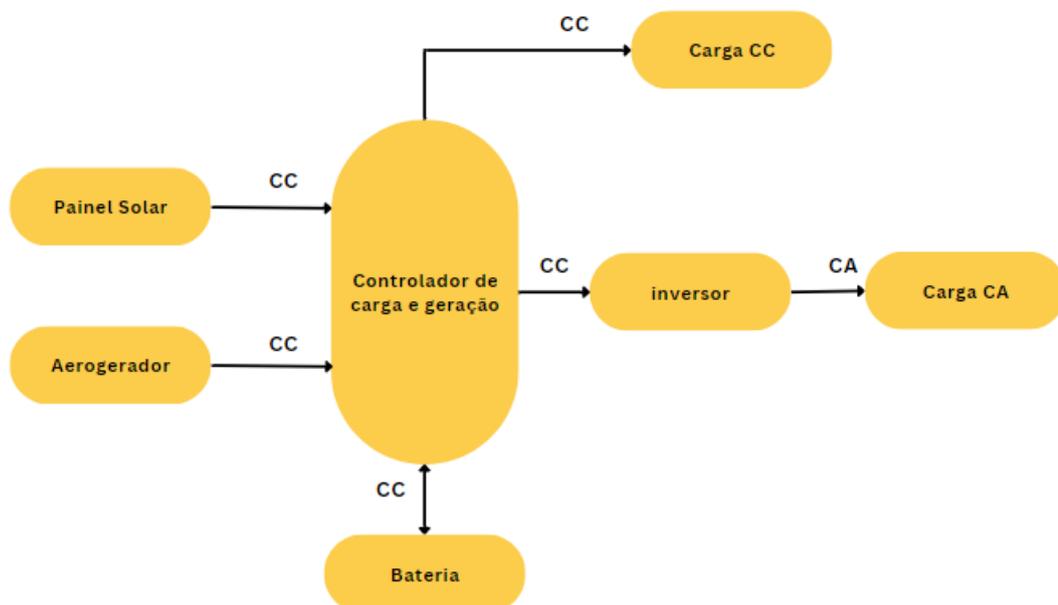
Fonte: Autoria própria.

2.1.6.3 Sistema fotovoltaico híbrido

Os SFHs são comumente os sistemas isolados operando em conjunto com outros geradores, como os eólicos, a diesel, a gás, a gasolina, etc. Em algumas situações, essa associação de fontes energéticas pode ser mais vantajosa e econômica que um sistema de geração fotovoltaica operando de forma autônoma, onde os painéis fotovoltaicos atuariam como uma fonte de energia complementar.

A Figura 6 traz um diagrama que representa o fluxo energético em um SFH no qual a geração fotovoltaica complementa a geração eólica.

Figura 6 – Diagrama representativo de um SFH com cargas CC e CA.



Fonte: Autoria própria.

2.2 Resoluções e normas técnicas

O setor elétrico no Brasil é formado por diversos órgãos que regulamentam e fiscalizam todas as etapas do processo de produção e distribuição de energia, da geração ao consumo

final. Cada instituição tem suas responsabilidades bem definidas para garantir a operação eficiente e regulada do setor elétrico brasileiro.

Esta subseção elenca resoluções normativas da ANEEL e normas técnicas da ABNT relacionadas à implementação de sistemas de geração fotovoltaica no Brasil. Cabe ressaltar a importância da consulta adicional às normas técnicas específicas da concessionária ou permissionária de energia do local onde o sistema de geração fotovoltaica residencial será implementado.

2.2.1 Resoluções normativas ANEEL relacionadas à instalação de sistemas de geração fotovoltaica em residências

❑ Resolução normativa ANEEL nº 482/2012

Estabelece as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, incluindo sistemas fotovoltaicos em residências, e define as regras para o sistema de compensação de energia elétrica, permitindo que o consumidor injete o excesso de energia produzida em sua unidade consumidora na rede elétrica, recebendo créditos para uso posterior. Essa resolução também estabelece os procedimentos de conexão dos sistemas de geração fotovoltaica à rede elétrica de distribuição.

❑ **Resolução normativa ANEEL nº 687/2015** Estabelece os requisitos técnicos para a conexão de sistemas fotovoltaicos em baixa tensão à rede de distribuição de energia elétrica, incluindo a definição de limites de tensão e corrente, a proteção contra sobretensões e sobrecorrentes, a conexão com o nó terra, entre outros.

❑ Resolução Normativa ANEEL nº 1.059/2023

Regulamenta a geração distribuída de energia elétrica no Brasil a partir de fontes renováveis, além das demais atribuições dispostas em (ANEEL, 2023).

2.2.2 Normas técnicas ABNT relacionadas à instalação de sistemas de geração fotovoltaica em residências

❑ ABNT NBR 16690:2018

Estabelece os requisitos mínimos para instalação de sistemas de geração fotovoltaica em edificações, além de determinar as exigências relacionadas à segurança elétrica, proteção contra descargas atmosféricas, fixação e suporte dos equipamentos.

❑ ABNT NBR 16274:2014

Estabelece as características e requisitos técnicos para conexão dos sistemas de geração fotovoltaica à rede elétrica de distribuição, incluindo os procedimentos de

conexão, os limites de tensão e corrente, a proteção contra sobretensões e sobrecorrentes.

□ **ABNT NBR 10899:2013**

Intitulada Terminologia sobre Energia Solar Fotovoltaica, estabelece uma padronização e define os principais termos técnicos utilizados no Brasil em relação à energia solar e sistemas de geração fotovoltaica.

□ **ABNT NBR 5410:2004**

Estabelece as condições adequadas para o funcionamento de instalações elétricas de baixa tensão como residencial, comercial e industrial. Essa norma define regras de segurança e desempenho que devem ser seguidas em todas as etapas de elaboração e implementação da instalação elétrica em baixa tensão. O objetivo principal desta norma é garantir a segurança das pessoas e animais e a integridade dos equipamentos utilizados nas instalações elétricas.

Capítulo 3

Projeto de sistemas de geração fotovoltaica residenciais

Como visto no capítulo anterior, a maioria dos sistemas de geração fotovoltaica residenciais é conectada à rede elétrica de distribuição ou *on-grid*, pois essa é uma opção mais acessível, prática e econômica para a maioria dos prosumidores residenciais. Outra razão para a maioria dos sistemas de geração fotovoltaica residenciais serem conectados à rede elétrica pública é que a instalação e manutenção de um sistema autônomo, desconectado da rede elétrica de distribuição ou *off-grid*, pode ser mais complexa, cara e demandar maior conhecimento técnico. Desse modo, a metodologia aqui apresentada foca no projeto de SFCRs.

3.1 Componentes dos SFCRs

3.1.1 Módulos fotovoltaicos de SFCRs

Os módulos fotovoltaicos de SFCRs diferem dos usados nos sistemas autônomos em termos de tamanho e potência. Tipicamente um módulo de Si cristalino para a conexão à rede possui de 60 a 144 células fotovoltaicas em série, com tensões de saída de circuito aberto em torno de 37 V a 50 V e potências que variam de 230 W a 530 W. No entanto, esses valores podem variar de acordo com o fabricante do módulo ou mesmo entre diferentes modelos de módulos produzidos pelo mesmo fabricante (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Na Figura 7 traz as imagens de associações de alguns módulos fotovoltaicos.

Figura 7 – Painéis fotovoltaicos.



Fonte: Autoria própria.

3.1.1.1 Comparação entre os módulos fotovoltaicos disponíveis no mercado brasileiro

Com o intuito de facilitar a comparação e análise dos modelos de módulos fotovoltaicos disponíveis no Brasil, a Tabela 2 apresenta informações relevantes sobre alguns dos modelos oferecidos pelos principais fabricantes. Os preços unitários dos módulos foram obtidos por meio de pesquisas realizadas nos sites Energia Total e EnergyShop, cujos valores são referentes ao ano de 2023. Essas consultas foram realizadas com o objetivo de obter informações atualizadas e representativas do mercado brasileiro, auxiliando na tomada de decisão em relação à escolha dos módulos fotovoltaicos que irão compor o sistema de geração fotovoltaica residencial.

Tabela 2 – Comparação entre os módulos fotovoltaicos disponíveis no mercado brasileiro.

Marca	Modelo	Tipo	Eficiência [%]	Dimensões [mm·mm·mm]	Preço [R\$]
Canadiansolar	CS7N-660MB-AG	Si Mono	21,2	2384·1303·35	1.499,99
	CS6W-545MS	Si Mono	21,3	2261·1134·30	1.375,60
RESUN	340W	Si Poli	17,53	1956·992·40	799,00
Amerisolar	AS-7M144-HC-545W	Si Mono	21,3	2256·1133·35	1.850,36
Jinko	Tiger Pro	Si Mono	20,55	2274·1134·35	1.159,90

Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Inversores para SFCRs

Os inversores são essenciais para os SFCRs, sem os quais não seria possível a injeção da energia produzida pelos módulos fotovoltaicos na rede elétrica.

Inversores para microgeração, usados em sistemas de geração fotovoltaica com potência instalada até 100 kW, estão disponíveis no mercado brasileiro em versões monofásicas com diversos valores de potência, variando de algumas centenas até alguns quilowatts (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Esses inversores são indicados para sistemas de geração fotovoltaica residenciais, comerciais e industriais que possuem potência instalada de até algumas dezenas de quilowatts. Dependendo do tamanho do SFCR, vários inversores são empregados em paralelo, conectados a redes monofásicas ou trifásicas.

3.1.2.1 Microinversores

Existe uma categoria de inversores de pequena potência projetados especialmente para trabalhar com um único módulo fotovoltaico. Esses equipamentos, chamados microinversores, são muito usados em pequenos sistemas fotovoltaicos residenciais. Eles diferem dos demais inversores pelo fato de serem pequenos e principalmente por poderem ser acoplados diretamente aos módulos fotovoltaicos. São normalmente posicionados na parte traseira dos módulos e sua conexão à rede elétrica é simples. O conjunto de um módulo e um microinversor acoplado é conhecido como módulo CA integrado, ou seja, um módulo fotovoltaico que pode ser conectado diretamente à rede elétrica de corrente alternada.

3.1.2.2 Comparação entre os inversores *grid-tie* disponíveis no mercado brasileiro

A Tabela 3 apresenta informações relevantes sobre alguns dos modelos de inversores do tipo *grid-tie* disponíveis no mercado brasileiro. Os preços unitários dos inversores foram obtidos por meio de pesquisas realizadas nos sites Energia Total e EnergyShop, cujos valores são referentes ao ano de 2023.

Tabela 3 – Comparação dos inversores disponíveis no mercado brasileiro.

Marca	Modelo	Potência [kW]	Eficiência [%]	MPPT	Preço [R\$]
Fronius	PRIMO 5.0-1	5,0	98,1	Sim	10.200,00
	Primo 4.0-1	4,0	98,1	Sim	7.526,80
Canadiansolar	CSI-5K-S22002-E	5,0	98,0	Sim	5.472,86
Growatt	3KW	3,0	97,4	Sim	3.199,00
	1,5KW	1,5	97,4	Sim	2.499,00

Fonte: Autoria própria.

3.1.3 Caixa de junção ou *string box*

A caixa de junção, também conhecida como *string box*, é responsável por interligar os dispositivos de proteção no lado CC e conectar os cabos elétricos provenientes do painel fotovoltaico. Essa caixa é equipada com diferentes elementos de proteção, tais como fusíveis, diodos de bloqueio, dispositivos de proteção contra sobretensão CC e interruptores CC (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Na parte externa, os cabos elétricos são conectados à caixa de junção através de conectores externos, que podem ser vistos na Figura 8. É importante destacar que as caixas de conexões dos módulos fotovoltaicos comerciais costumam ser seladas e preenchidas com resina, o que impede que o usuário acesse seu conteúdo (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Figura 8 – Caixa de junção ou *string box*.



Fonte: Autoria própria.

3.1.4 Dispositivos de proteção

Garantir a segurança das pessoas, animais domésticos e dos equipamentos é crucial, e a proteção desempenha um papel fundamental nesse sentido, uma vez que ajuda a prevenir falhas no sistema que poderiam representar um risco de vida ou à integridade do sistema de geração fotovoltaica. Os dispositivos de proteção podem estar integrados aos equipamentos, como no caso dos inversores, ou podem ser adicionados externamente (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Ao instalar um dispositivo de proteção, é importante considerar se ele irá operar com tensão contínua ou alternada no local de instalação. No sistema de geração fotovoltaica são geralmente utilizadas chaves seccionadoras, fusíveis, disjuntores e Dispositivos de Proteção Contra Surtos (DPSs) para fins de proteção. Eles são dimensionados em função dos valores máximos permitidos de tensão e corrente em cada trecho do circuito.

3.1.4.1 Diodos

Em determinadas circunstâncias, os módulos fotovoltaicos podem ser expostos a sombras que resultam no aumento da temperatura do material semicondutor. Esse fenômeno

ocorre quando, em vez de produzir energia, células fotovoltaicas ficam inversamente polarizadas e passam a funcionar como uma carga, convertendo a eletricidade em calor. Essas áreas afetadas são conhecidas como pontos-quentes ou *hot spots* e podem causar danos permanentes ao módulo fotovoltaico.

A fim de se prevenir a ocorrência dos *hot spots*, é necessário impedir a corrente inversa em células fotovoltaicas por meio de um diodo de derivação, também conhecido como diodo *bypass*. Esse diodo é conectado de forma inversamente polarizada em relação a uma fileira ou sequência de células.

Outro diodo utilizado para proteção dos módulos fotovoltaicos é o diodo de bloqueio. Esses diodos são empregados em fileiras de módulos conectados em série, com o objetivo de evitar que um módulo sombreado afete toda a fileira ou sequência de módulos fotovoltaicos.

3.1.4.2 Dispositivos de proteção contra surtos

O uso de DPSs é crucial para evitar danos à integridade de equipamentos causados por sobretensões e sobrecorrentes de surtos elétricos, muitas vezes causados por descargas atmosféricas (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Esses dispositivos são relativamente baratos em comparação aos módulos fotovoltaicos ou inversores, mas são indispensáveis para garantir a segurança da instalação elétrica. A Figura 9 traz as imagens de alguns DPSs.

Figura 9 – Dispositivos de proteção contra surtos de tensão e corrente.



Fonte: Autoria própria.

3.1.4.3 Chaves seccionadoras

Chaves seccionadoras sob carga ou Dispositivos de Seccionamento Visíveis (DSVs) são instalados no medidor, a fim de desconectar a geração fotovoltaica durante a realização de procedimentos de manutenção da rede. A Figura 10 traz as imagens de algumas chaves seccionadoras sob carga.

Figura 10 – Chave seccionadora



Fonte: Autoria própria.

3.1.4.4 Disjuntores termomagnéticos

O objetivo do disjuntor termomagnético em um sistema de geração fotovoltaica é proteger os cabos, equipamentos e outros componentes contra sobrecorrentes causadas por sobrecarga, falhas no isolamento e curtos-circuitos acidentais. É preferível o uso de disjuntores termomagnéticos em vez de fusíveis, pois esses precisam ser substituídos após atuarem. A Figura 11 traz as imagens de disjuntores termomagnéticos.

Figura 11 – Disjuntores termomagnéticos.



Fonte: Autoria própria.

3.1.5 Cabeamento

A conexão do arranjo de módulos fotovoltaicos à caixa de junção se dá por meio de dois cabos monopolares padronizados para sistemas fotovoltaicos (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Esses cabos são fornecidos pelos fabricantes dos módulos fotovoltaicos.

Esses cabos possuem características específicas para se evitar ressecamento e deterioração acelerados, dado que são expostos a intempéries e radiação solar excessiva (VILLALVA; GAZOLI, 2012). A Figura 12 traz as imagens de cabos monopolares para a interconexão de módulos fotovoltaicos e a caixa de junção.

Figura 12 – Cabos monopolares para interconexão de módulos fotovoltaicos e a caixa de junção.



Fonte: Autoria própria.

3.1.6 Estruturas de suporte e ancoragem

Estruturas de suporte são componentes essenciais para a ancoragem estável e segura dos painéis fotovoltaicos, garantindo ventilação adequada para dissipação do calor gerado. Elas devem ser projetadas para se adequar a orientação e posicionamento dos módulos fotovoltaicos com relação ao telhado da residência. Também devem ser capazes de suportar o peso dos módulos, resistir à corrosão e suportar ventos fortes. De forma geral, essas estruturas devem propiciar soluções específicas para cada caso.

3.2 Projeto Técnico

A elaboração de um projeto técnico vai além do dimensionamento do sistema de geração fotovoltaica residencial. É necessário incluir uma lista de elementos, que podem variar em complexidade dependendo da magnitude do projeto e da forma de execução. No caso de projetos que são objeto de licitação pública, é obrigatória a elaboração de um projeto básico de acordo com a Lei 8.666. Existem dois tipos de projeto comumente utilizados em engenharia: o básico e o executivo. Independentemente de ocorrer uma licitação para aquisição de materiais e serviços ou apenas uma consulta a empreendedores, é comum estabelecer um contrato entre o proprietário/usuário do sistema e o prestador de serviços.

3.2.1 O Projeto Básico

É um conjunto de informações essenciais e precisas que descrevem e caracterizam uma obra ou serviço a ser realizado. Ele deve estar em conformidade com normas e regulamentos, considerar o impacto ambiental e garantir a viabilidade do empreendimento. O Projeto Básico é elaborado por um profissional habilitado e inclui desenhos, memória descritiva, especificação técnica, orçamento e cronograma. É obrigatória a Anotação de Responsabilidade Técnica do CREA e a assinatura do autor nos documentos.

- ❑ Os desenhos no Projeto Básico são representações visuais do objeto a ser executado, como plantas e diagramas elétricos. Devem seguir as normas técnicas e conter informações como nome e local da obra, entidade responsável, tipo de projeto, data, nome do responsável técnico com número de registro no CREA e sua assinatura.
- ❑ A memória descritiva e de cálculo é um documento em formato de texto que descreve detalhadamente o sistema projetado, incluindo informações sobre as condições ambientais, soluções técnicas adotadas, normas e regulamentos aplicáveis. Ela complementa as informações dos desenhos e contém justificativas e cálculos para garantir o completo entendimento do projeto.
- ❑ A especificação técnica é um documento que estabelece as regras e condições para a execução da obra, detalhando as características dos materiais, equipamentos, sistemas construtivos e os critérios de verificação e qualidade. Também inclui planos para comissionamento, testes, limpeza do local, licenças ambientais e descarte de baterias (se aplicável). Pode conter descrições de treinamentos para usuários e técnicos de operação e manutenção, se solicitado pelo contratante
- ❑ O orçamento é a avaliação do custo total da obra, considerando os preços de mercado ou valores de referência dos insumos. É baseado nas quantidades de materiais e serviços descritos anteriormente. O orçamento é apresentado em composições de custos unitários, expressos em planilhas de custos e serviços, com detalhes sobre cada insumo, unidade de medida, preço unitário e custo total do serviço.
- ❑ O cronograma físico-financeiro é uma representação gráfica do desenvolvimento dos serviços ao longo do tempo durante a duração da obra. Ele demonstra, em cada período, o percentual físico a ser executado e o valor financeiro correspondente.

3.2.2 Projeto Executivo

Após a elaboração do projeto básico e antes do início da obra, é necessário desenvolver o projeto executivo, que contém todos os elementos necessários e suficientes para a completa execução da obra, seguindo as normas e legislações aplicáveis. Durante a instalação do sistema, o projeto executivo pode sofrer algumas alterações, desde que não descaracterizem o projeto inicial. Após o comissionamento, é entregue ao proprietário do sistema o projeto executivo "as built", ou seja, o projeto executivo que reflete exatamente como a obra foi construída.

O projeto executivo é muito mais detalhado do que o projeto básico, pois serve como base para a execução da obra. Ele deve incluir plantas e diagramas detalhados de todas as estruturas e circuitos, bem como cálculos detalhados do sistema de geração, proteção, aterramento, entre outros, além de cálculos estruturais para suportes e construções civis.

É fundamental fornecer detalhes sobre compartimentos, como distâncias e ventilação recomendadas para os equipamentos, acesso para manutenção, bem como detalhes sobre a logística de acesso e transporte ao local, que não devem ser negligenciados.

O projeto executivo deve conter uma lista completa de todos os materiais e equipamentos, incluindo fabricante, modelo e normas de certificação, juntamente com catálogos e manuais, inclusive para equipamentos de controle, monitoramento e medição do sistema fotovoltaico, quando aplicável.

É recomendável apresentar um cronograma detalhado, com atividades desmembradas, para facilitar o acompanhamento, supervisão dos serviços e resolução de problemas.

3.3 Dimensionamento do sistema de geração fotovoltaica residencial

Para o dimensionamento do sistema de geração fotovoltaica residencial *on-grid*, é necessário analisar a quantidade de energia que se deseja produzir alinhada com a irradiância, demanda solicitada, disponibilidade de área, características dos módulos, recursos financeiros disponíveis e condições do ambiente.

3.3.1 Localização

Mesmo dentro de uma região com recurso solar uniforme, a escolha do local em que os painéis solares serão instalados é crucial para o seu desempenho (PINHO; GALDINO, 2014). Existem alguns fatores importantes ao analisar a localização, dentre eles:

- ❑ A irradiação solar é fundamental para dimensionar sistemas fotovoltaicos. No entanto, é importante destacar que seu valor varia diariamente devido a fatores como as estações do ano, presença de nuvens e ocorrência de chuvas.
- ❑ O sombreamento é outro fator importante a ser considerado. O sistema fotovoltaico residencial deve ser instalado em um local que não seja sombreado por árvores, prédios ou outras estruturas que possam bloquear a luz solar. Até mesmo pequenas sombras podem reduzir significativamente a produção de energia do sistema.
- ❑ A inclinação do telhado deve ser considerado ao instalar um sistema fotovoltaico residencial. A inclinação ideal para um telhado de um sistema fotovoltaico varia de acordo com a localização geográfica. Em geral, um ângulo de inclinação de 30 a 45 graus é ideal para maximizar a produção de energia solar.
- ❑ É importante considerar também o espaço disponível para instalar o sistema fotovoltaico residencial. O tamanho do sistema será determinado em grande parte pela

quantidade de energia que o proprietário deseja gerar e pelo espaço disponível no telhado. As condições climáticas da região também são importantes para determinar a viabilidade de um sistema fotovoltaico residencial. As áreas que recebem muita chuva ou neve podem exigir ajustes no projeto para garantir a eficiência do sistema.

Além disso, é importante levar em conta outros fatores relacionados à instalação do gerador fotovoltaico, como possíveis casos de vandalismo, crescimento de vegetação próxima, construção de edifícios e instalação de objetos que possam causar sombreamento em um futuro próximo (PINHO; GALDINO, 2014).

3.3.2 Demanda solicitada

Para projetar um sistema fotovoltaico residencial eficiente, é importante analisar o consumo de energia da residência nos últimos meses. Com base nessa análise, é possível determinar uma média de consumo e dimensionar o sistema fotovoltaico de acordo com as necessidades do cliente. A partir disso, é possível calcular o tamanho ideal do sistema para suprir a demanda energética da residência e projetar um sistema que atenda às suas necessidades específicas.

A priori, para o dimensionamento da potência do sistema é importante ter o entendimento do sistema de compensação regulamentado da região do projeto. No Sistema de Compensação de Energia (net metering) adotado pelo Brasil pela Resolução Normativa ANEEL 482/2012, quando o SF gerar mais energia do que a demandada pela instalação consumidora, a energia excedente é entregue a rede elétrica e o medidor registra essa energia (PINHO; GALDINO, 2014).

Antes de dimensionar um sistema de energia solar conectado à rede, é necessário definir a quantidade de energia que se deseja produzir. A energia que se deseja produzir com o sistema fotovoltaico pode ser determinada com base no consumo médio mensal de eletricidade, a partir de dados obtidos da conta de eletricidade. Pode-se desejar suprir parcialmente ou integralmente a demanda de energia elétrica de um determinado consumidor (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Outra maneira de determinar a energia produzida é levar em conta o espaço disponível para a instalação dos módulos fotovoltaicos. Sabendo o número de módulos que serão instalados, é possível calcular a produção de energia diária ou mensal do sistema fotovoltaico. Um terceiro critério de escolha pode ser econômico, considerando o limite de investimento que o consumidor deseja realizar no sistema fotovoltaico (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

3.3.3 Dimensionamento do número de módulos

Os sistemas de energia solar conectados à rede geralmente possuem um sistema de MPPT integrado, tornando o método adequado para determinar a produção de energia

baseado na insolação diária em uma determinada localidade, medida em kWh/m²/dia. Com essa informação, juntamente com a área e eficiência do módulo fotovoltaico, é possível calcular facilmente a energia elétrica produzida diariamente. Para obter a produção mensal, basta multiplicar o valor diário pelo número de dias no mês. Esse método é comumente utilizado para dimensionar sistemas fotovoltaicos residenciais e comerciais conectados à rede (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Após calcular a energia produzida por um módulo e definir a quantidade de energia que se deseja produzir diariamente ou mensalmente, de acordo com os critérios adotados pelo projetista, é possível determinar a quantidade de módulos necessários para o sistema fotovoltaico. Dessa forma, obtemos a equação 1 abaixo:

$$n_p = \frac{E_{sistema}}{E_p} \quad (1)$$

Sendo:

- n_p - Número de módulos da instalação fotovoltaica.
- $E_{sistema}$ - Energia produzida pelo sistema [kWh] no intervalo de tempo considerado.
- E_p - Energia produzida por um módulo [kWh] no mesmo intervalo de tempo.

3.3.4 Dimensionamento dos inversores

Os módulos fotovoltaicos vêm apresentando acentuada redução de custos nos últimos anos, porém apesar dos inversores também apresentarem redução nos preços, eles não tem acompanhando o mesmo nível de redução apresentado pelos módulos. Isso resulta em uma tendência de otimizar ao máximo o inversor utilizado, de modo a se obter um custo final de energia produzida mais competitivo. O dimensionamento do sistema deve ser realizado de maneira que o inversor não trabalhe por muito tempo em potências demasiadamente abaixo do nominal e nem que seja sobrecarregado (PINHO; GALDINO, 2014).

O Fator de Dimensionamento de Inversores (FDI) representa a relação entre potência nominal de corrente alternada do inversor e a potência de pico do gerador fotovoltaico, como mostra a equação 2.

$$FDI = \frac{P_i(W)}{P_{int}(W)} \quad (2)$$

onde:

- FDI (adimensional) – Fator de dimensionamento do inversor.
- P_i (W) – Potencia nominal em corrente alternada do inversor.

□ P_{int} (W) – Potencia de pico do painel.

A potência do gerador fotovoltaico e do inversor devem ser ajustados de modo que o FDI do inversor tenha a melhor relação custo/benefício. Análise de literatura mostra que os valores inferiores de FDI recomendados por fabricantes e instaladores situam-se na faixa de 0,75 e 0,85, enquanto o limite superior é 1,05 (PINHO; GALDINO, 2014).

De acordo com (VILLALVA; GAZOLI, 2012), ao escolher um inversor para um sistema fotovoltaico, é essencial garantir que a tensão de circuito aberto do string não exceda a tensão máxima permitida na entrada do inversor. Deve-se observar cuidadosamente este critério, pois uma sobretensão na entrada do inversor pode danificar o equipamento irreversivelmente.

Ademais, ao escolher um inversor para um sistema fotovoltaico, é importante certificar-se de que a potência do inversor seja igual ou superior à potência máxima que pode ser gerada pelo conjunto de módulos solares. Porém, é comum sobredimensionar levemente o conjunto fotovoltaico ou subdimensionar o inversor. Isso ocorre pois a potência máxima do conjunto de módulos solares só é atingida sob condições padronizadas de teste (STC) e, na maior parte do tempo, o conjunto fornece potência abaixo de sua capacidade nominal (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

3.3.5 Tensão de entrada

A tensão de entrada do inversor é a soma das tensões dos módulos associados em série. Para evitar danos no equipamento, é crucial lembrar que a tensão de entrada do inversor não deve exceder seus limites suportáveis. É possível calcular essa tensão usando a equação 3 a seguir.

$$n_p \cdot V_{octmin} < V_{imax} \quad (3)$$

onde:

- V_{octmin} (V) - Tensão em circuito aberto (V_{oc}) de um módulo FV na menor temperatura de operação prevista;
- V_{imax} (V) - Máxima tensão CC admitida pela entrada do inversor.

Devido a tensão possuir forte dependência da temperatura, as condições extremas de inverno e verão devem ser utilizadas no dimensionamento. Portanto, deve garantir a compatibilidade entre as tensões do gerador fotovoltaico com a faixa de tensão de operação do inversor (PINHO; GALDINO, 2014).

O cálculo da máxima tensão de entrada deve ser realizado com cuidado e atenção, pois ela nunca deve ultrapassada, sendo este um dos maiores riscos de danificar o equipamento (PINHO; GALDINO, 2014).

3.3.6 Faixa de tensão de operação MPPT do inversor

Para garantir o funcionamento correto do inversor com o sistema fotovoltaico, é importante que o número de módulos conectados em série seja adequado para atender a faixa de tensão MPPT do inversor.

Devido às altas temperaturas que podem ser alcançadas pelos módulos solares durante o verão no Brasil, é importante garantir que a tensão do sistema fotovoltaico não caia abaixo da mínima tensão do MPPT do inversor ($V_{mpptMIN}$). Caso contrário, a eficiência do inversor pode ser significativamente reduzida, e pode até mesmo levar à sua desconexão.

Por outro lado, em épocas mais frias, a tensão do sistema pode aumentar e atingir valores superiores à máxima tensão do MPPT do inversor. Nesses casos, também é necessário tomar medidas para evitar danos ao inversor e garantir a operação segura e eficiente do sistema (PINHO; GALDINO, 2014). Para garantir que as duas condições mencionadas anteriormente sejam cumpridas, é necessário que a equação 4 a seguir seja atendida.

$$\frac{V_{mpptMIN}}{V_{mpTmax}} < n_p < \frac{V_{mpptMAX}}{V_{mpTmin}} \quad (4)$$

onde:

- $V_{mpptMIN}$ - Mínima tensão CC de operação do MPPT do inversor;
- $V_{mpptMAX}$ - Máxima tensão CC de operação do MPPT do inversor;
- V_{mpTmax} - Tensão de potência máxima de um módulo na maior temperatura de operação prevista;
- V_{mpTmin} - Tensão de potência máxima de um módulo na menor temperatura de operação prevista.

3.4 Instalação dos módulos fotovoltaicos

De acordo com um estudo realizado na Alemanha entre 1991 e 1995, que analisou o desempenho de 1000 SF instalados em telhados, constatou-se que quase 40% das falhas foram devidas a problemas na instalação e outros 30% por erros de projeto (PINHO; GALDINO, 2014). Esses resultados destacam a importância de um gerenciamento de qualidade durante todo o processo, não se limitando apenas ao bom dimensionamento e especificação de equipamentos de qualidade. É crucial ter critérios e especificações bem definidos para todas as etapas do projeto e instalação. Essas medidas são essenciais para garantir um bom resultado final. É importante ressaltar que essas conclusões são relevantes mesmo após muitos anos desde o estudo realizado na Alemanha, especialmente para países como o Brasil, onde sistemas fotovoltaicos ainda estão em ascensão.

Como dito em (PINHO; GALDINO, 2014), para garantir uma instalação segura e adequada de um sistema fotovoltaico, é importante que os instaladores estejam familiarizados com as medidas de segurança aplicáveis a cada projeto, seguindo as normas vigentes e as recomendações dos fabricantes. Dependendo das especificidades do projeto, pode ser necessário envolver diferentes profissionais, como carpinteiros, pedreiros e eletricitas. Esses profissionais devem ser supervisionados por um especialista em Energia Solar Fotovoltaica com treinamento adequado e experiência comprovada, para garantir que a instalação seja realizada corretamente e sem riscos, atendendo todas as normas técnicas exigidas. A presença do especialista qualificado também ajuda a solucionar quaisquer problemas que possam surgir durante o processo de instalação.

3.4.1 Orientação e inclinação dos módulos fotovoltaicos

A orientação dos módulos fotovoltaicos deve seguir a direção da linha do equador, com exceção de locais com variações climáticas significativas durante o dia. No hemisfério Sul, a orientação deve ser para o Norte Verdadeiro, enquanto no hemisfério Norte, deve ser para o Sul Verdadeiro. É necessário fazer a correção da orientação magnética usando a Declinação Magnética do local, obtida através de mapas e programas computacionais.

Para obter a máxima geração de energia, o ângulo de inclinação do gerador fotovoltaico deve ser igual à latitude do local de instalação. No entanto, pequenas variações na inclinação não afetam significativamente a geração de energia. Em áreas com muita poeira, é necessário limpar regularmente a superfície dos módulos com água e um pano macio, sem danificar o vidro ou qualquer outro material. Recomenda-se realizar a limpeza no início da manhã ou ao final da tarde, quando a produção do gerador não é significativa.

3.4.2 Montagem da estrutura de suporte e ancoragem dos módulos fotovoltaicos

Assim como dito na subseção 3.1.6, a estrutura que suporta os módulos fotovoltaicos tem como objetivo mantê-los estáveis e ventilados para dissipar o calor produzido pela conversão de energia e pelos raios solares. É importante que a estrutura permita o distanciamento adequado entre os módulos para evitar danos mecânicos e que seja projetada para se adaptar às características dos módulos, ao terreno ou à estrutura do prédio, além de fornecer a orientação e o ângulo de inclinação necessários. A estrutura também deve ser rígida o suficiente para suportar o peso dos módulos e ventos fortes, ser eletricamente aterrada e feita com materiais resistentes à corrosão em ambientes agressivos.

Ao escolher o tipo de estrutura para suporte de sistemas de geração de energia, é importante considerar diversos fatores, como o tamanho do sistema, o local de instalação, a exposição a sombreamento, a capacidade de suporte da edificação ou solo, entre outros.

Em residências com sistemas fotovoltaicos de pequeno porte, é comum a instalação dos painéis solares no telhado, desde que a estrutura do telhado suporte adequadamente o peso dos módulos e receba radiação solar suficiente. Caso contrário, a alternativa é a instalação do painel solar no topo de um poste, localizado próximo à casa (PINHO; GALDINO, 2014).

3.4.3 Instalação de dispositivos de controle de energia

A instalação dos dispositivos de controle de energia em SFs refere-se ao processo de instalar os componentes que regulam a geração, armazenamento e distribuição de energia produzida por um painel solar. Isso inclui a instalação de inversores, controladores de carga, baterias e outros equipamentos que são necessários para garantir que a energia gerada pelo sistema fotovoltaico seja utilizada de maneira eficiente e segura.

Uma maneira de facilitar a instalação dos controladores de carga, inversores e conversores em um sistema fotovoltaico é pré-montar esses componentes de condicionamento e proteções em painéis ou caixas projetadas especificamente para este fim. Esses painéis ou caixas podem então ser fixados diretamente nas paredes ou colocados em suportes na estrutura do edifício. Essa abordagem ajuda a simplificar o processo de instalação, tornando-o mais rápido e eficiente.

Para garantir uma vida útil adequada dos dispositivos eletrônicos utilizados nos sistemas fotovoltaicos, é importante que eles sejam instalados em um ambiente seco, bem ventilado e protegido da luz solar direta. Idealmente, a instalação deve ser o mais próximo possível do gerador fotovoltaico e permitir fácil acesso para manutenção. É importante controlar o acesso ao local de instalação por razões de segurança. Quando são utilizadas caixas, é essencial que elas sejam bem vedadas, mas permitam uma ventilação adequada, conforme recomendado pelos fabricantes. Poeira e insetos são problemas comuns em áreas de instalação de sistemas fotovoltaicos, portanto, medidas de precaução, como o uso de telas, são frequentemente necessárias.

Segundo (PINHO; GALDINO, 2014), a instalação dos inversores pode variar de acordo com as especificações do equipamento. Alguns inversores são de fácil instalação, exigindo apenas a conexão dos terminais de alimentação corrente contínua e carga corrente alternada, seguido pelo acionamento do interruptor on/off. Por outro lado, outros inversores são mais complexos, exigindo uma série de configurações e ajustes em sua configuração para que funcionem corretamente.

3.4.4 Instalação da proteção

Para garantir a proteção dos SF, é necessário selecionar os componentes adequados, levando em consideração os valores máximos permitidos de tensão e corrente em cada trecho do circuito, conforme estabelecido pela norma NBR 5410:2004 (citado na subseção

2.2.3). A corrente do gerador fotovoltaico é limitada pela corrente de curto-circuito na condição de maior irradiância, porém, para os componentes instalados entre o gerador e o controlador de carga ou inversor, é comum utilizar um fator multiplicativo de segurança de 1,25 (PINHO; GALDINO, 2014). Além disso, é importante verificar se o componente é adequado para operar com o tipo de tensão (CC ou CA) do local de instalação.

Além dos componentes de proteção elétrica convencionais, a proteção dos SFs também inclui um sistema específico para proteção contra descargas atmosféricas, conhecido como Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA). Isso porque os geradores fotovoltaicos são instalados em áreas abertas e estão sujeitos a descargas atmosféricas diretas ou indiretas. Para a instalação do SPDA, é importante consultar a NBR 5419:2005, que define os requisitos para proteção contra descargas atmosféricas.

No que diz respeito aos fusíveis fotovoltaicos ou diodos de bloqueio, normalmente são instalados na *string box*, que são utilizadas para realizar as interconexões entre os módulos fotovoltaicos.

3.4.5 Aterramento

A norma ABNT NBR 5410:2004 é responsável por regulamentar o aterramento em sistemas elétricos de baixa tensão. Esse processo consiste em conectar intencionalmente estruturas ou instalações à terra, com o objetivo de garantir o funcionamento adequado da instalação e, principalmente, oferecer um caminho preferencial para as correntes elétricas indesejadas de surto, falta ou fuga, a fim de evitar riscos para as pessoas e equipamentos.

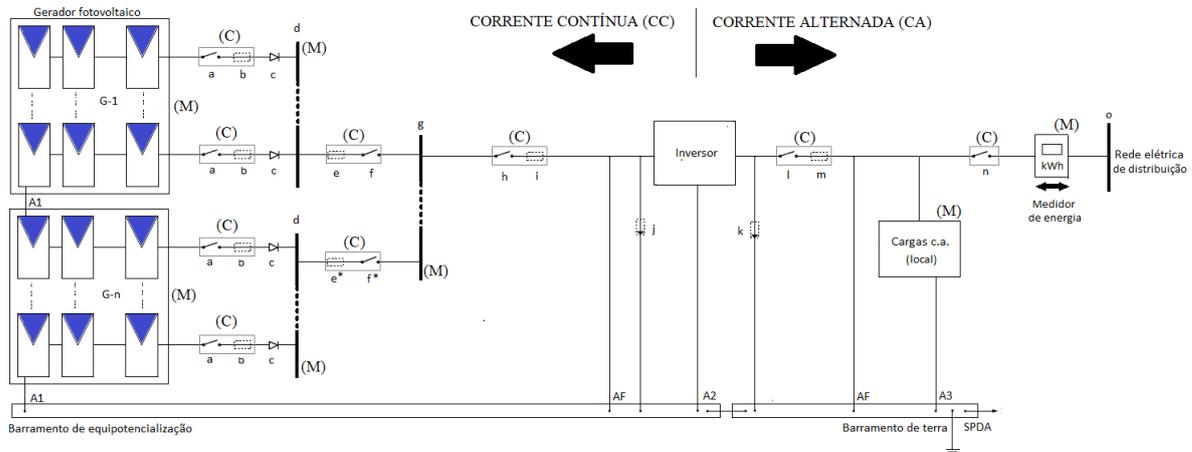
Para um SFCR, é importante realizar dois tipos de aterramento: o de proteção dos equipamentos, que envolve a conexão da carcaça condutora ao terra, e o funcional do sistema, que consiste na conexão do circuito elétrico ao terra através do condutor neutro no lado CA, o aterramento do lado CC varia de acordo com a tecnologia utilizada, sendo que as de filme fino exigem que uma das polaridades seja aterrada, enquanto as de silício cristalino geralmente ficam em flutuação. Em relação aos inversores sem transformadores, é comum que não possam ser aterrados (PINHO; GALDINO, 2014). Para determinar o procedimento correto de aterramento, é recomendado consultar o manual do equipamento fornecido pelo fabricante.

A Figura 13 mostra um diagrama unifilar comum de um SFCR, enfatizando as posições recomendadas para a instalação dos componentes de proteção, bem como, sempre que possível, para monitoramento e controle.

Onde:

- a - Dispositivo utilizado para separar a série de módulos;
- b - Dispositivo de proteção contra sobrecorrente da série de módulos;
- c - Diodo de bloqueio;

Figura 13 – Pontos de instalação dos componentes de proteção, monitoração e controle de um SFCR.



Fonte: Adaptado de (PINHO; GALDINO, 2014).

- ❑ d - Barramento de paralelismo entre séries de módulos;
- ❑ e - Dispositivo de proteção contra sobrecorrente do G-1;
- ❑ f - Dispositivo de seccionamento do G-1. Um disjuntor CC é capaz de atender aos requisitos de proteção e seccionamento;
- ❑ e* - Dispositivo de proteção contra sobrecorrente do G-n;
- ❑ f* - Dispositivo de seccionamento do G-n;
- ❑ g - Barramento de paralelismo entre G-1 e G-n;
- ❑ h - Dispositivo de seccionamento do gerador fotovoltaico;
- ❑ i - Dispositivo de proteção contra sobrecorrente do gerador fotovoltaico;
- ❑ j - DPS do lado de corrente contínua, classe 2, e deve ser instalado o mais próximo possível dos terminais positivo e negativo do inversor.
- ❑ k - DPS do lado de corrente alternada, classe 1+2, e deve ser instalado o mais próximo possível dos terminais do inversor.
- ❑ l - Dispositivo de seccionamento do lado de corrente alternada, deve ser capaz de interromper todos os condutores de saída do inversor, exceto o condutor neutro;
- ❑ m - Dispositivo de proteção contra sobrecorrente do lado de corrente alternada. Um disjuntor de corrente alternada atende aos requisitos de proteção e seccionamento;
- ❑ n - Dispositivo de seccionamento visível, é utilizado para desconectar o sistema de geração da rede de distribuição e é projetado exclusivamente para ser operado pela distribuidora de energia;

- ❑ o - Barramento da rede elétrica de distribuição é responsável por conduzir a corrente elétrica e distribuí-la para os diferentes pontos de consumo;
- ❑ A1 - A conexão da estrutura metálica, que inclui a moldura dos módulos e o suporte do gerador fotovoltaico, é ligada à equipotencialização, garantindo uma ligação elétrica de igual potencial;
- ❑ A2 - A conexão da carcaça metálica do inversor de tensão à equipotencialização assegura uma ligação elétrica de igual potencial entre a carcaça e outros elementos do sistema.
- ❑ A3 - A conexão da carcaça metálica das cargas elétricas locais à equipotencialização estabelece uma ligação elétrica de igual potencial entre a carcaça e outros componentes do sistema.
- ❑ AF - O aterramento funcional é utilizado para direcionar correntes de falta e proteger pessoas e equipamentos de choques elétricos.
- ❑ G-1 - O Gerador fotovoltaico 1 refere-se a um dos geradores do sistema fotovoltaico.
- ❑ G-n - O Gerador fotovoltaico n representa um dos geradores adicionais do sistema fotovoltaico.
- ❑ M - O Ponto de monitoração é um local onde são coletados dados e informações relevantes sobre o sistema fotovoltaico.
- ❑ C - O Ponto de controle é um local onde ocorre a supervisão e controle do sistema fotovoltaico.
- ❑ SPDA - O Sistema de proteção contra descarga atmosférica.

3.5 Análise de viabilidade econômica

É fundamental que qualquer projeto de instalação elétrica busque a eficiência operacional, porém, essa eficiência deve ser avaliada de maneira a encontrar justificativas econômicas para sua implementação. Não é sensato adotar medidas para aumentar a eficiência energética a qualquer custo (MAMEDE, 2017).

Sempre que uma ação de eficiência energética for adotada, é necessário realizar uma análise econômica prévia. O método de cálculo conhecido como Valor Presente Líquido (VPL) é uma ferramenta de fácil utilização e deve ser aplicado em todas as iniciativas de eficiência energética (MAMEDE, 2017). O VPL pode ser determinado pela equação 5 a seguir.

$$VPL = \sum \left(\frac{F_C}{(1+r)^t} \right) - I \quad (5)$$

onde:

- VPL representa o Valor Presente Líquido;
- F_C é o fluxo de caixa em cada período de tempo;
- r é a taxa de desconto;
- t é o período de tempo;
- I é o investimento inicial.

Ao analisar a implementação de um sistema fotovoltaico, é importante considerar a taxa de desconto como parte da análise econômica. Essa taxa representa o custo de oportunidade do tomador de decisão, ou seja, os benefícios marginais que ele abrirá mão ao optar pelo sistema fotovoltaico em vez de outras alternativas disponíveis.

Uma maneira comum de capturar o custo de oportunidade é utilizar a taxa de juros que o indivíduo poderia obter ao investir em outras opções no mercado. Essa taxa de retorno seria o mínimo exigido pelo agente para justificar o investimento no sistema fotovoltaico, uma vez que representa a "remuneração" que ele deixaria de obter ao tomar essa decisão (NOGUEIRA, 2017).

No cenário padrão, é comum adotar uma taxa mínima de atratividade (taxa de desconto nominal) de 13,75% (valor obtido em agosto de 2023), que corresponde à taxa básica de juros estabelecida pelo Comitê de Política Monetária (COPOM).

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa de desconto que iguala o valor presente dos fluxos de caixa de um projeto ao investimento inicial. Em outras palavras, é a taxa de retorno que torna o VPL do projeto igual a zero. Se a TIR de um projeto for maior do que a taxa mínima de atratividade, isso significa que o projeto é considerado atrativo, pois está gerando um retorno superior à taxa mínima de atratividade estabelecida.

É importante ressaltar que mesmo se o Valor Presente Líquido (VPL) de um projeto for próximo de zero, ainda que positivo, não necessariamente indica que o investimento é altamente atrativo. Nesse contexto, é fundamental considerar uma análise mais abrangente, levando em conta diversos fatores e critérios adicionais para determinar se o investimento é realmente vantajoso.

Quando o VPL é pequeno, pode ser um indicativo de que o projeto não oferece um retorno significativo em relação ao investimento inicial, o que levanta dúvidas sobre a sua viabilidade financeira. Portanto, é essencial examinar outros aspectos, como a Taxa Interna de Retorno (TIR), análises de sensibilidade, comparações com alternativas de investimento e considerações estratégicas e qualitativas.

Assim, mesmo com um VPL positivo, é crucial avaliar cuidadosamente se o investimento é a melhor opção disponível, pois projetos com retornos financeiros marginalmente atrativos podem não compensar os recursos e esforços necessários para seu desenvolvimento, especialmente em uma escala significativa.

Capítulo 4

Estudo de caso

Inicialmente, é importante ressaltar que o projeto foi conduzido com propósitos acadêmicos, utilizando informações de uma unidade consumidora específica, com a permissão do proprietário. Com base nisso, serão realizados cálculos de dimensionamento para suprir a demanda média mensal de energia da residência. Ao final, serão analisados os recursos financeiros necessários para concluir todo o projeto.

4.1 Projeto e dimensionamento

4.1.1 Localização

O estudo será conduzido em uma residência localizada em Marília, São Paulo. O objetivo é dimensionar um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica para essa unidade consumidora, considerando que a mesma é abastecida em baixa tensão e pertencendo a classe residencial bifásico 220/127 V.

Figura 14 – Visão aérea da residência em estudo.



Fonte: Google Maps, 2023.

4.1.2 Histórico de consumo da residência

A priori, é conduzida uma análise do consumo de energia dos últimos 12 meses da residência com o objetivo de calcular o consumo médio mensal de forma mais precisa. Nesse contexto, a Tabela 4 apresenta os dados de consumo referentes aos meses de fevereiro de 2022 a janeiro de 2023.

Tabela 4 – Histórico de consumo da residência (2022-2023)

Mês	Consumo [kWh]
Fevereiro/2022	281
Março/2022	352
Abril/2022	280
Maió/2022	284
Junho/2022	274
Julho/2022	230
Agosto/2022	242
Setembro/2022	274
Outubro/2022	280
Novembro/2022	267
Dezembro/2022	224
Janeiro/2023	196

Fonte: Autoria própria.

Média de consumo mensal = 265,3 kWh

É importante mencionar que existe a cobrança de uma tarifa mínima para o uso da energia elétrica, conhecida como custo de disponibilidade do sistema elétrico para unidades consumidoras. No caso da residência analisada, que pertence à classe residencial bifásica, o custo de disponibilidade é de 50 kWh, conforme a Resolução Normativa 1000/2021 da ANEEL (ANEEL, 2021). Como esse valor é uma taxa mínima, ele deve ser subtraído do consumo real de energia, a fim de evitar que o consumidor pague por uma quantidade de energia que ele não utilizou. Portanto, a quantidade de energia a ser efetivamente consumida e cobrada será calculada após a subtração do custo de disponibilidade. Portanto, a energia a ser gerada será:

$$\text{Energia} = \text{Consumo} - \text{Disponibilidade} \quad (6)$$

$$\text{Energia} = 265,3 - 50 = 215,3 \text{ kWh/mês}$$

4.1.3 Análise da irradiação solar

O software SunData, disponibilizado pelo CRESESB em seu site, foi utilizado para obter as médias mensais de irradiação solar para a unidade consumidora em questão. Essa

ferramenta permite obter dados de irradiação solar para qualquer localidade do Brasil. Utilizando as coordenadas geográficas de latitude e longitude da residência, foi possível obter os valores de irradiação solar média diária, mostradas na Tabela 5, para cada mês do ano.

A Tabela 5 apresenta os dados selecionados a partir do banco de dados Sundata de 2023. Para isso, foi utilizada a estação meteorológica mais próxima da localidade desejada, que está a uma distância de 3,2 km e possui as coordenadas geográficas de Latitude: 22,201° Sul e Longitude: 49,949° Oeste, e uma inclinação igual a 22°N.

Tabela 5 – Irradiação solar média

Mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Irradiação [(kWh)/(m² · dia)]	5,18	5,61	5,42	5,39	4,71	4,57	4,82	5,65	5,14	5,40	5,46	5,50

Fonte: SunData, 2023.

Com base nas informações fornecidas, foi obtido o valor médio mensal de irradiação solar diária de 5,24 kWh/(m²dia) para o painel com inclinação de 22°N em relação ao plano horizontal, que apresenta a maior média anual. Essa inclinação próxima à latitude do local é considerada a melhor inclinação para aproveitar ao máximo a energia solar, pois proporciona a maior média mensal de irradiação solar.

4.1.4 Escolha dos módulos

Foi feita a escolha do módulo FV a ser utilizado e optou-se pelo Tiger Pro de 530W da Jinko, pois é um módulo com o tipo de material mais comercializado do mundo e oferece um excelente custo-benefício para o projeto em questão. Este modelo é composto por 144 células monocristalinas e possui uma eficiência de 20,55%. O datasheet completo do módulo pode ser encontrado no Anexo A. A Tabela 6 exhibe as especificações do produto.

Tabela 6 – Especificações do módulo fotovoltaico

Característica	Valor
Potência máxima (P _{max})	530 Wp
Tensão máxima de potência (V _{mp})	40,71 V
Corrente máxima de potência (I _{mp})	13,02 A
Tensão em circuito aberto (V _{oc})	49,35 V
Corrente em curto-circuito (I _{sc})	13,71 A
Eficiência do módulo STC (η_m)	20,55%
Temperatura de operação (°C)	-40°C +85°C
Dimensões	2274 × 1134 × 35 mm
Peso	28,9 kg

Fonte: JINKO, 2023.

A Equação 7 a seguir, baseado na metodologia proposta por (VILLALVA; GAZOLI, 2012), permite determinar a quantidade de energia produzida pelo módulo fotovoltaico. Considerou-se a menor irradiação média no plano inclinado sendo ela de 4,57 kWh/m²dia.

$$E_p = E_s \cdot A_m \cdot \eta_m \quad (7)$$

$$E_p = 4570 \cdot 2,58 \cdot 0,2055 = 2,423 \text{ kWh/dia}$$

onde:

- E_p é a energia produzida pelo módulo fotovoltaico;
- E_s é a irradiação solar incidente na área do módulo = 4.570 Wh/m²dia;
- A_m é a área do módulo = 2,58 m²;
- η_m é a eficiência do módulo = 20,55%.

Com base na energia produzida pelo módulo fotovoltaico (E_p) de 2,423 kWh por dia, realizou-se o cálculo para determinar a quantidade de módulos necessários, conforme a Equação 2, mostrada na subseção 3.3.3 e obteve-se um valor de 2,96.

Após calcular o número de módulos necessário para o sistema como sendo 2,96 módulos, optou-se por arredondar para 3 módulos, uma vez que esse valor é muito próximo ao resultado calculado. Com base nesse dimensionamento, estima-se que a energia média projetada por dia para o mês de menor irradiação seja de 7,269 kWh.

Ademais, para determinar a área total ocupada pelos módulos, multiplica-se a área ocupada por um módulo e a quantidade de módulos requerida. Dessa forma, a área total ocupada pelos módulos será de 7,74 m². É importante destacar que essa área necessária está de acordo com as dimensões do telhado da residência.

4.1.5 Escolha dos inversores

Ao escolher o inversor para o sistema fotovoltaico, é necessário levar em consideração a potência máxima gerada pelo sistema, as características elétricas dos módulos e a topologia da instalação. Além disso, é importante analisar a credibilidade da empresa fabricante do inversor, a garantia oferecida pelo equipamento e a disponibilidade de assistência técnica.

A potência instalada máxima é determinada multiplicando-se a potência de um módulo, onde o mesmo é encontrado nas especificações do módulo, pelo número total de módulos utilizados no sistema. Dessa forma, temos:

$$P_{\text{int}} = P_{\text{max}} \cdot n_p \quad (8)$$

$$530 \cdot 3 = 1.590\text{W}$$

Conforme mencionado no Capítulo 3, especificamente na subseção 3.3.4, é comum dimensionar o inversor utilizando o FDI, que representa a relação entre a potência nominal CA do inversor e a potência de pico gerada pelo gerador fotovoltaico. Esse dimensionamento visa obter a melhor relação custo-benefício. Segundo (PINHO; GALDINO, 2014) Os fabricantes e instaladores geralmente recomendam um limite superior de FDI de 1,05. Portanto:

$$P_i = \text{FDI} \cdot P_{\text{int}} = 1,05 \cdot 1.590 = 1.669,5\text{W}$$

Onde:

- FDI (adimensional) – Fator de dimensionamento do inversor;
- P_i (W) – Potencia nominal em corrente alternada do inversor = 1,05;
- $P_{\text{int}} = 1.590$ W.

Logo, um inversor de 2 kW atende ao dimensionamento realizado. Assim, foi selecionado o inversor solar do modelo MIC 2000TL-X, fabricado pela Growatt. O datasheet completo do inversor pode ser encontrado no Anexo B. Algumas especificações desse inversor que serão utilizadas para o dimensionamento, podem ser encontradas na Tabela 7. É importante destacar que esse inversor possui o selo do INMETRO, o que garante sua conformidade com os padrões de qualidade e segurança.

O modelo possui os seguintes dispositivos de proteção internos: Proteção de polaridade reversa CC, Chave Seccionadora CC, Proteção de sobretensão CC e CA, Monitoramento de resistência de isolamento, Monitoramento de falha de terra, Monitoramento da rede elétrica, Proteção anti-ilhamento e Unidade de monitoramento de corrente residual.

Tabela 7 – Especificações do Inversor

Característica	Valor
Máxima potência fotovoltaica recomendada	2800W
Máxima tensão CC	500V
Faixa de tensão MPPT/Tensão nominal	50V-500V /360V
Máxima corrente curto-circuito por trackers MPP	16A
Potência nominal de saída	2000W
Máxima corrente de saída	9,5A

Fonte: Adaptado de Growatt, 2023.

É possível determinar o número máximo de módulos que o inversor suporta dividindo a potência do inversor pela potência de pico de um único módulo, conforme a Equação

9. Isso permite verificar a capacidade do inversor em lidar com a potência total gerada pelos módulos.

$$N_{mMax} = \frac{P_{inv}}{P_{max}} = \frac{2.000}{530} = 3,77 \quad (9)$$

Isso implica que a quantidade de módulos, que foi dimensionada anteriormente como 3, está de acordo com o número máximo de módulos que o inversor é capaz de suportar.

4.1.6 Arranjo dos módulos

A próxima etapa consiste em definir o tipo de conexão dos módulos solares: em série, em paralelo ou uma combinação de ambos. Inicialmente, vamos considerar a conexão dos três módulos em série e verificar se essa configuração atende aos requisitos mínimos de conexão com o inversor. Para garantir a integridade do equipamento, é essencial que a tensão de entrada suportável pelo inversor não seja excedida. Para realizar essa verificação, utilizaremos a equação a seguir.

De acordo com as informações do catálogo do fabricante, a máxima tensão de um módulo (V_{oc}) em circuito aberto é de 49,35 V. Por sua vez, o catálogo do inversor indica que o valor máximo de tensão de entrada permitida (V_{max}) é de 500 V. No caso de três módulos conectados em série, podemos calcular a tensão total da seguinte maneira:

$$3 \cdot 49,35 < 500$$

onde:

- Número de módulos = 3;
- Tensão em circuito aberto (V_{oc}) de um módulo FV = 49,35;
- V_{max} (V) - Máxima tensão c.c admitida pela entrada do inversor = 500.

Portanto, a primeira condição imposta foi respeitada. Ademais, como dito na subseção 3.3.6 do capítulo 3, é crucial garantir que a tensão de um sistema fotovoltaico no Brasil não caia abaixo da tensão MPPT mínima do inversor ($V_{mpptMIN}$) durante as temperaturas quentes do verão. O não cumprimento deste requisito pode levar a uma redução significativa na eficiência do inversor e até mesmo resultar em sua desconexão.

Por outro lado, durante os períodos mais frios, a tensão do sistema pode aumentar e exceder a tensão MPPT máxima do inversor. Nesses casos, também devem ser tomadas medidas para evitar danos ao inversor e garantir a operação segura e eficiente do sistema.

Para garantir o cumprimento de ambas as condições acima, é necessário satisfazer a equação 4, mencionada na subseção 3.3.6.

As especificações dos valores máximos e mínimos de tensão contínua de operação do MPPT do inversor podem ser encontradas no catálogo do produto. Por outro lado, os valores de tensão de potência máxima para diferentes temperaturas de operação podem ser determinados utilizando as Equações 10 e 11.

$$V_{mpT_{min}} = V_{mp} \cdot (1 + \beta \cdot (T_{op_{min}} - 25)) \quad (10)$$

$$V_{mpT_{min}} = 40,71 \cdot (1 - 0,0026 \cdot (-40 - 25)) = 47,59$$

$$V_{mpT_{max}} = V_{mp} \cdot (1 + \beta \cdot (T_{op_{max}} - 25)) \quad (11)$$

$$V_{mpT_{max}} = 40,71 \cdot (1 - 0,0026 \cdot (85 - 25)) = 34,36$$

Onde:

- V_{mp} – Tensão de potência máxima de um módulo = 40,71V;
- TopMin – Menor temperatura de operação prevista = -40°C;
- TopMax – Maior temperatura de operação prevista = 85°C;
- Coeficiente de variação de tensão devido a temperatura = 0,26%/°C.

Temos então:

$$1,45 < 3 < 10,5$$

Portanto, a segunda condição imposta de variação da tensão devido a variação da temperatura também foi respeitada.

Por fim, deve-se verificar se a corrente máxima de entrada CC não será ultrapassada. Para isso, a Equação a seguir:

$$I_{sc} < I_{maxE} \quad (12)$$

Onde:

- I_{sc} – Corrente de curto circuito do módulo nas STC (Standard Test Conditions);

□ I_{maxE} – Corrente máxima de curto circuito na entrada do inversor.

Assim, utilizando os valores do catálogo do módulo e do inversor podemos verificar:

$$13,71 < 16$$

Concluimos que o arranjo em série dos três módulos é apropriado para a conexão com o inversor, pois atende a todos os requisitos mencionados anteriormente.

4.1.7 Escolha dos dispositivos de proteção e condutores

4.1.7.1 Escolha da *String Box* lado CC

Conforme mencionado no capítulo 3, existem várias opções de dispositivos de proteção para um sistema fotovoltaico, como diodos, fusíveis e outros. Dessa forma, para o quadro de proteção do lado CC optou pela *String Box* mostrada na Figura 15.

Figura 15 – String Box lado CC



Fonte: Energyshop, 2023.

A *String Box* escolhida possui quatro entradas CC, duas saídas CC e uma tensão nominal de 1000V. Quanto aos fusíveis de proteção série e aos diodos de bloqueio, eles não são necessários neste projeto, uma vez que não há conexão de grupos de módulos em paralelo. Portanto, não haverá fluxo de corrente de um conjunto para outro com tensões diferentes, pois o projeto consiste em apenas um conjunto com quatro módulos em série. Como resultado, a utilização desses fusíveis e diodos adicionais não é requerida para garantir a segurança e o funcionamento adequado do sistema.

4.1.7.2 Escolha dos dispositivos de proteção lado CA

Para o lado da corrente alternada, é necessário dimensionar um disjuntor de CA que será instalado entre o inversor e a rede elétrica. Esse disjuntor terá a função de permitir a manobra do circuito e fornecer proteção para essa parte específica do sistema.

Foi adotado o critério estabelecido pela ABNT NBR 5410 para dimensionar os disjuntores, conforme expresso pela Equação 13.

$$I_b < I_n < I_z \quad (13)$$

onde:

- I_b - máxima corrente de saída do inversor;
- I_n - corrente nominal;
- I_z - capacidade de condução de corrente do condutor.

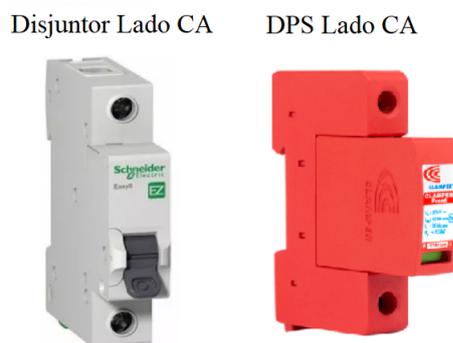
Sendo assim, temos:

$$9,5 < I_n < 24$$

Portanto, escolheu-se o disjuntor CA de 16 A da Schneider, da linha Easy 9, modelo EZ9F33116, como mostrado à esquerda na Figura 16.

Ademais, para a proteção do lado CA do sistema, ainda é necessário escolher um Dispositivo de Proteção contra Surtos DPS que tenha uma tensão nominal superior à tensão de saída do inversor e menor do que a tensão máxima permitida pelos equipamentos conectados. A faixa de tensão recomendada neste caso é de 180 V a 280 V. Escolheu-se então o DPS de 275 Vca e 45 kA para o lado CA, cuja imagem é mostrada à direita da Figura 16 .

Figura 16 – Disjuntor e DPS do lado CA



Fonte: Autoria própria.

4.1.7.3 Escolha da chave seccionadora CA

A chave seccionadora CA deve ser adequada para suportar a potência da geração, garantindo que sua capacidade seja superior à corrente de saída do inversor de 9,5 A. Dessa forma, escolheu-se a chave seccionadora MSW12 da marca WEG, exibida na Figura 17, onde possui sua corrente nominal igual à 12.

Figura 17 – Chave seccionadora escolhida



Fonte: Viewtech, 2023.

4.1.7.4 Escolha dos condutores CC e CA

Já para os condutores CC. Foi decidido utilizar condutores de 4 mm², conforme recomendado pelo fabricante (Anexo A). Dessa forma, optou-se pelos cabos da marca MACKFLEX SOLAR TECH SN com 4 mm², exibida na Figura 18. Esses condutores possuem uma capacidade de condução de corrente de 41 A.

Figura 18 – Especificações dos Cabos CC

CABO MACKFLEX SOLAR TECH SN
1,8kVcc



Seção Nominal (mm ²)*	Diâmetro do Condutor (mm)	Espessura da Isolação (mm)	Diâmetro Externo Nom.(mm)	Espessura da Cobertura (mm)	Massa (kg/km)
1,50	1,50	0,70	4,70	0,90	32,30
2,50	1,90	0,70	5,10	0,90	42,10
4,00	2,50	0,70	5,80	1,00	59,30
6,00	3,00	0,70	6,30	1,00	78,00

Fonte: Energyshop, 2023.

Para dimensionar os condutores CA, multiplica-se a corrente de projeto que é calculada multiplicando a corrente máxima de saída do inversor por um fator de segurança. Geralmente, utiliza-se um fator de segurança de 1,25, a fim de dimensionar os condutores de corrente contínua do sistema fotovoltaico, portanto, temos:

$$I = 1,25 \cdot 9,5 = 11,875A$$

Conforme especificado na NBR 5410, para um condutor de cobre com isolamento de PVC e método de instalação B1, a seção mínima recomendada é de 1,0 mm². No entanto, optou-se por utilizar condutores de seção igual a 2,5 mm², de acordo com o método da seção mínima. Esses condutores possuem capacidade de condução de corrente de 24 A, atendendo às exigências de corrente do sistema.

4.1.8 Escolha do suporte para os módulos

Um dos principais requisitos dos suportes é a sua capacidade de suportar o peso dos módulos, que neste caso específico pesam cerca de 28,9 kg cada. Além disso, é fundamental que os suportes sejam projetados para resistir à corrosão e a ventos fortes, garantindo a durabilidade e a segurança do sistema. Percebe-se então a importância desse elemento no sistema fotovoltaico. Neste projeto optou-se por uma estrutura de alumínio adaptados para telha de cerâmica com espaço suficiente para os 3 painéis, que inclui o conjunto de fixadores. Os suportes possuem duas regulagens de altura, se adaptando a todo tipo de telhas e permitindo perfeito nivelamento das placas.

Figura 19 – Suporte para os módulos



Fonte: Energyshop, 2023.

4.2 Investimento inicial

Foi realizado um levantamento de preços em diversos sites de venda online, como Energy Shop, Energia Total, Amazon e Mercado Livre, com o objetivo de obter os valores dos equipamentos dimensionados anteriormente. Esses preços foram utilizados para compor a Tabela 8, que apresenta o custo individual de cada equipamento, bem como o preço final do conjunto.

Além disso, os custos de projeto e mão de obra foram considerados e incluídos na análise. Esses custos englobam atividades como a elaboração do memorial descritivo, criação de diagramas elétricos, homologação do sistema, instalação e solicitação de vistoria. Essas informações foram levantadas a fim de fornecer uma estimativa mais precisa do investimento necessário para o projeto.

Portanto, o investimento inicial médio para a residência em estudo será de aproximadamente R\$ 13.817,92.

Tabela 8 – Tabela de equipamentos e preços

Item	Fabricante	Modelo	Preço Unitário [R\$]	Qtd
Módulo FV	Jinko	TigerPro530W	1.159,90	3
Inversor	Growatt	MIC 3000TL-X	2.799,00	1
Chave sec	Weg	MSW12 12A	109,13	1
Cabo CC	Macflex	4mm ² /1,8KVcc	65,00	2
Cabo CA	Megatron	2,5mm ² /25m	51,62	1
String Box	EnergyShop	4E/2S(CC)	999,00	1
Disjuntor CA	Schneider	EZ9F33116	17,25	1
DPS CA	Clamper	45kA/275V	47,38	1
Suporte Placa	Perfil Master	Solar FV	228,28	3
Projeto	-	-	2.000,00	-
Mão de Obra	-	-	3.500,00	-
Total				13.817,92

Fonte: Autoria própria.

4.3 Análise de viabilidade econômica do estudo de caso

Conforme mencionado no capítulo 3, o método de Valor Presente Líquido (VPL) será empregado para determinar a viabilidade do investimento para o projeto do estudo de caso. Ademais, a taxa SELIC desempenha um papel importante como referência para a taxa de desconto, uma vez que os investimentos em títulos do Tesouro Direto, que estão vinculados à sua rentabilidade, são amplamente acessíveis ao público no mercado. Esses investimentos costumam ser mais lucrativos do que a poupança, que é a opção de investimento escolhida pela maioria dos brasileiros. Sendo assim, a taxa de desconto utilizada será de 13,75% (a taxa Selic fixada pelo Comitê de Política Monetária em 21/06/2023).

Pode-se determinar então, por meio de tais métodos, se o investimento será viável ou não. Dessa forma, o período de tempo para a análise do projeto é de 25 anos, o mesmo utilizado em (BESSO, 2017). É importante ressaltar que esse tempo médio de análise também é influenciado pela vida útil das placas fotovoltaicas, que sofrem degradação ao longo dos anos.

4.3.1 Evolução das contas de energia

Para realizar os cálculos, utilizou-se o valor médio das tarifas, já incluindo os impostos, aplicadas durante o período compreendido entre fevereiro de 2022 e janeiro de 2023, como mostra a Tabela 9, contendo os valores das tarifas de cada mês, consumo em kWh/mês e o cálculo do valor do kWh para cada mês.

No Ano 1 será aplicado o preço de R\$ 0,954 por kWh, no entanto, essa tarifa é sujeita a ajustes anuais por meio do Índice de Reajuste das Tarifas (IRT) feita no Brasil pela ANEEL, o que requer a atualização do seu valor para cada ano do empreendimento. De

Tabela 9 – Valor da conta de energia

Mês	Tarifa [R\$/kWh*]	Consumo [kWh]	Valor do kWh [R\$]
Fevereiro/2022	309,27	281	1,100
Março/2022	297,21	352	0,843
Abril/2022	362,29	280	1,293
Mai/2022	308,79	284	1,086
Junho/2022	286,33	274	1,045
Julho/2022	283,19	230	1,233
Agosto/2022	210,56	242	0,868
Setembro/2022	189,87	274	0,692
Outubro/2022	222,46	280	0,794
Movembro/2022	219,07	267	0,820
Dezembro/2022	196,5	224	0,877
Janeiro/2023	157,06	196	0,801
Média anual (kWh)			0,954

Fonte: Autoria própria.

acordo com o estudo realizado por (NOGUEIRA, 2017), obteve-se uma análise da variação das tarifas de energia ao longo dos últimos anos (2016 até 2020), chegando a uma taxa média anual de aproximadamente 5%. Ademais, com base em estudos estatísticos sobre a variação tarifária da energia nas últimas décadas, de acordo com (MIRANDA, 2014), foi constatado que houve um aumento anual médio de 4,8% nesse período. Portanto, essa taxa de 5% será adotada como referência neste trabalho.

4.3.2 Energia gerada pelo sistema

Para determinar a quantidade de energia gerada por um módulo, é possível utilizar a fórmula que relaciona a irradiação solar média diária (em kWh/m²), a área do módulo (em metros quadrados) e sua eficiência. Esses valores foram previamente calculados e obtidos a partir de informações disponíveis no catálogo.

$$E_m = I \cdot A_m \cdot n \quad (14)$$

$$E_m = 5,24 \cdot 2,58 \cdot 0,2055 = 2,78 \frac{kWh}{dia \cdot módulo}$$

onde:

- E_m representa a energia gerada pelo módulo,
- I é a irradiação solar média diária em kWh/m²
- A_m é a área do módulo em metros quadrados

□ n é a eficiência do módulo.

Agora é necessário multiplicá-lo por 3 (representando o número de módulos) e por 365 (representando o número de dias em um ano), obtendo-se assim, um valor de 3.044,1 kWh por ano. Esse valor representa a quantidade máxima teórica de energia que poderia ser gerada em um cenário ideal.

Porém, assim como em (MIRANDA, 2014), para calcular o valor real de geração de energia, também foram consideradas as perdas elétricas de 18%, resultando na diminuição dos valores de geração que são aproveitados como receita. Portanto, levando em consideração as perdas estimadas, a capacidade de geração de energia é de 2.496,162 kWh por ano.

Portanto, a produção de energia tem início no Ano 1, com uma estimativa de geração de 2.496,162 kWh por ano. Entretanto, para calcular mais precisamente a viabilidade para um tempo determinado, é necessário adicionar a taxa de degradação anual dos módulos escolhidos. Dessa forma, de acordo com as informações fornecidas pelo fabricante do módulo solar, a vida útil estimada do módulo da Jinko inclui uma garantia de 12 anos contra defeitos de fabricação e uma garantia de eficiência de 86,5% por 30 anos. Essa eficiência de 86,5% ao longo de 30 anos sugere uma taxa de degradação anual de aproximadamente 0,45%.

4.3.3 Custos de manutenção

Para calcular com maior precisão a viabilidade de um sistema fotovoltaico ao longo de 25 anos, é importante considerar os custos de manutenção. Cada fabricante estima a vida útil de seus equipamentos, e no caso específico do módulo escolhido da Jinko, a garantia é de 12 anos para defeitos de fabricação. Quanto ao inversor da Growatt, o fabricante oferece uma garantia de 5 anos para defeitos de fabricação, mas sua vida útil pode chegar a 15 anos, dependendo das condições ambientais e da ocorrência de descargas atmosféricas (BARBOSA, 2021). Portanto, em teoria, será necessário adquirir um novo inversor aproximadamente após 12 anos.

A taxa de inflação acumulada em 12 meses (maio de 2023) é de 3,94% obtida por meio da média do IPCA (Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo) (IPCA, 2023). Levando em conta uma taxa constante para simplificar os cálculos, o preço do inversor, que é de R\$ 2.799,00 em 2023, aumentará para R\$ 4.450,00 após o período de doze anos.

Assim, o custo total do sistema fotovoltaico ao longo de 25 anos, considerando o pagamento à vista, será de R\$ 18.267,92. Esse valor inclui a troca do inversor no décimo segundo ano.

4.3.4 Estudo econômico VPL e TIR

Com base nas informações fornecidas, foi elaborada a Tabela 10, que apresenta os valores de produção de energia e lucro em função da quantidade de energia gerada (em kWh) e da conta média de energia para cada ano. Na segunda coluna da tabela, são listados os valores da conta, iniciando em 0,954 R\$/kWh, com um reajuste anual de 5%. Na terceira coluna, são apresentados os valores de produção anual de energia, começando em 2.496,16 kWh.

Na quarta coluna, são exibidos os valores de produção de energia em reais, obtidos multiplicando-se os valores das duas colunas anteriores.

E por fim, o valor presente de cada ano levando em consideração a taxa de desconto de 13,75%. Se o VPL for positivo, ou seja a somatória do valor presente dos 25 anos for maior que o investimento, o projeto é considerado lucrativo. Caso contrário, é considerado não lucrativo.

Tabela 10 – Análise Econômica

Ano	Tarifa [R\$/kWh*]	Energia Gerada [kWh**]	Economia [R\$]	Valor Presente [R\$]
1	0,954	2.496,16	2.381,33	2.093,48
2	1,001	2.484,93	2.489,15	1.923,74
3	1,051	2.473,74	2.601,85	1.767,78
4	1,104	2.462,61	2.719,65	1.624,45
5	1,159	2.451,53	2.842,78	1.492,75
6	1,217	2.440,50	2.971,48	1.371,72
7	1,278	2.429,52	3.106,02	1.260,50
8	1,342	2.418,58	3.246,64	1.158,30
9	1,409	2.407,70	3.393,64	1.064,40
10	1,479	2.396,87	3.547,28	978,10
11	1,553	2.386,08	3.707,89	898,80
12	1,631	2.375,34	3.875,76	825,92
13	1,713	2.364,65	4.051,24	758,96
14	1,798	2.354,01	4.234,65	697,43
15	1,888	2.343,42	4.426,38	640,88
16	1,983	2.332,87	4.626,78	588,92
17	2,082	2.322,38	4.836,26	541,17
18	2,186	2.311,92	5.055,22	497,30
19	2,295	2.301,52	5.284,10	457,00
20	2,410	2.291,16	5.523,34	419,93
21	2,531	2.280,85	5.773,40	385,88
22	2,657	2.270,59	6.034,80	354,59
23	2,790	2.260,37	6.308,02	325,84
24	2,930	2.250,20	6.593,62	299,43
25	3,076	2.240,07	6.892,14	275,15

* Reajuste de 5,00% ao ano.

** Depreciação do painel fotovoltaico em 0,45% ao ano.

Fonte: Autoria própria.

Somando-se toda a coluna do valor presente e subtraindo o investimento total ao longo de 25 anos, obtemos o VPL:

$$\text{VPL} = \text{R\$ } 22.702,40 - \text{R\$ } 18.267,92 = \text{R\$ } 4.434,48$$

obteve-se a Taxa Interna de Retorno (TIR) = 16,74%.

Com base nos resultados da análise financeira, conclui-se que o projeto do sistema fotovoltaico para a residência em estudo apresenta financeiramente viável. O VPL positivo de R\$ 4.434,48 indica que o investimento é capaz de gerar um retorno econômico superior ao custo de oportunidade do capital. Além disso, a taxa TIR de 16,74% supera a taxa mínima de atratividade estabelecida pelo COPOM. Isso significa que o projeto oferece um retorno financeiro atrativo, que compensa os riscos e oportunidades de investimento alternativos.

Dessa forma, com um VPL positivo e uma TIR superior à taxa mínima de atratividade, o projeto do sistema fotovoltaico demonstra ser uma escolha financeiramente viável e promissora.

4.3.4.1 Estudo econômico VPL considerando juros futuros DI

Agora serão apresentados os retornos de investimento considerando as projeções dos juros futuros DI, que correspondem a contratos de depósitos interbancários que estimam a evolução da taxa Selic nos próximos anos. Esses contratos futuros de DI podem ser utilizados como uma estratégia para proteger uma tomada de decisão presente contra grandes variações na taxa de juros Selic de determinados ativos, como o sistema de geração fotovoltaica.

Para obter as cotações diárias dos contratos de juros futuros DI negociados na Bolsa de Valores brasileira (B3), foram utilizados dados do site Infomoney (INFOMONEY, 2023). Essa abordagem permite uma análise mais realista da viabilidade econômica do projeto, considerando a evolução prevista da taxa Selic ao longo do tempo. A Tabela 11 apresenta os valores da taxa Selic obtidos no site em 25 de agosto de 2023, com projeções até o ano de 2033.

Vale ressaltar que os anos em que as taxas de juros DI (Depósito Interfinanceiro) estavam cotadas de forma mensal e trimestral foram convertidos para cotações anuais utilizando a fórmula dos juros compostos. Esse processo de conversão é essencial para permitir uma avaliação consistente ao longo de um período mais extenso, uma vez que os juros compostos consideram o efeito acumulado ao longo do tempo. Ao fazer essa conversão, as taxas mensais e trimestrais foram ajustadas para suas equivalentes taxas anuais de juros compostos, levando em conta os intervalos de capitalização correspondentes.

A análise será limitada a um período de 10 anos devido à disponibilidade das informações sobre a taxa de juros. As cotações diárias dos contratos futuros de DI, que servem

Tabela 11 – Previsão da Taxa Selic

Ano	Taxa de juros (% a.a.)
2023	12,9
2024	11,60
2025	10,30
2026	10,12
2027	10,34
2028	10,58
2029	10,73
2030	10,90
2031	10,03
2032	11,08
2033	11,16

Fonte: Autoria própria.

como base para a previsão da taxa Selic. Em vista dessa limitação, a decisão de focar em uma análise de 10 anos é fundamentada na disponibilidade de dados confiáveis e atualizados, garantindo uma análise realista e embasada nas informações disponíveis. No entanto, é importante destacar que ao restringir a análise a esse período, não serão considerados eventos ou custos que poderiam ocorrer após esse prazo, como a possível substituição do inversor após 12 anos, o que pode impactar a avaliação global da viabilidade econômica do projeto.

A Tabela 12 apresenta o Valor Presente de cada ano considerando os juros futuros mostrados na Tabela 11.

Tabela 12 – Estudo Econômico

Ano	Preço [R\$/kWh*]	Energia		Valor
		Produzida [kWh**]	Economia [R\$]	Presente [R\$]
2023	0,954	2.496,16	2.381,33	2.109,24
2024	1,001	2.484,93	2.489,15	1.998,58
2025	1,051	2.473,74	2.601,85	1.938,90
2026	1,104	2.462,61	2.719,65	1.849,47
2027	1,159	2.451,53	2.842,78	1.738,11
2028	1,217	2.440,50	2.971,48	1.625,22
2029	1,278	2.429,52	3.106,02	1.521,76
2030	1,342	2.418,58	3.246,64	1.419,00
2031	1,409	2.407,70	3.393,64	1.435,71
2032	1,479	2.396,87	3.547,28	1.240,33
2033	1,553	2.386,08	3.707,89	1.176,45

* Reajuste de 5,00% ao ano.
** Depreciação do painel fotovoltaico em 0,45% ao ano.

Fonte: Autoria própria.

$$\text{VPL} = \text{R\$ } 18.052,77 - \text{R\$ } 13.817,92 = \text{R\$ } 4.234,85$$

Dessa forma, mesmo com a análise financeira considerando apenas um período de 10 anos, a viabilidade do projeto ainda se mantém. O VPL positivo, no valor de R\$ 4.234,85, indica que o investimento tem a capacidade de gerar um retorno econômico que excede o custo de oportunidade do capital. Em outras palavras, o retorno esperado do investimento é maior do que a taxa de retorno que poderia ser obtida em uma alternativa de investimento com risco similar. Portanto, o projeto continua a ser promissor e vantajoso do ponto de vista financeiro.

Capítulo 5

Conclusões

A partir do levantamento teórico e normativo realizado, este trabalho apresentou uma análise técnico-econômica de projetos de sistemas de geração fotovoltaica residenciais. O estudo abordou a fundamentação teórica, incluindo informações sobre o efeito fotovoltaico, tipos de sistemas e células solares, módulos fotovoltaicos, inversores e suas características. Além disso, foi explorada a legislação e as normas técnicas relacionadas à instalação de sistemas fotovoltaicos em residências, com ênfase nas normas da ANEEL e as normas da ABNT.

O capítulo 3 foi dividido em seções, com destaque para os componentes dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, como módulos fotovoltaicos, inversores comerciais, *string box*, dispositivos de proteção, cabeamento e estruturas de suporte e ancoragem. A seção abordou tópicos como o projeto técnico, e o dimensionamento do sistema foi detalhado, considerando a localização, a demanda solicitada, o número de módulos, os inversores e as faixas de tensão de operação. Por fim, o processo de instalação das placas fotovoltaicas foi descrito, incluindo orientação, inclinação e a montagem da estrutura de suporte do gerador fotovoltaico, além da instalação de dispositivos de controle de energia, componentes de proteção e aterramento.

O capítulo do estudo de caso apresenta uma visão abrangente do projeto e dimensionamento de um sistema fotovoltaico residencial, juntamente com considerações cruciais, como a escolha dos equipamentos e o investimento inicial. Ao avaliar a demanda de energia elétrica local e calcular cuidadosamente as dimensões do sistema, os proprietários podem aproveitar efetivamente da energia solar para suprir suas necessidades energéticas, ao mesmo tempo em que reduzem sua dependência de fontes de eletricidade tradicionais mais caras. Foi realizado também, um estudo de análise financeira utilizando o Valor Presente Líquido, juntamente com a Taxa Interna de Retorno. Assim, foi possível cons-

tatar que o projeto possui uma alta viabilidade financeira, uma vez que apresenta um valor presente líquido positivo e uma taxa interna de retorno maior que a taxa mínima de atratividade que vale 13,75% , que corresponde à taxa básica de juros estabelecida pelo Comitê de Política Monetária (COPOM).

Optou-se por projetar o sistema fotovoltaico para gerar apenas a quantidade de energia necessária para abater parcialmente os valores na conta de energia, isso devido à obrigatoriedade de pagamento da tarifa mínima equivalente a 50 kWh por mês para esse tipo de unidade consumidora. Caso o sistema fotovoltaico gere um excedente de energia em determinado mês, esse excedente será registrado pelo medidor, gerando créditos de energia que podem ser utilizados nas próximas faturas dentro de um período de até 5 anos. No entanto, é importante ressaltar que haverá a incidência de impostos sobre o consumo desses créditos gerados por outra unidade. Devido ao custo de disponibilidade e à forma de compensação de energia adotada, não é vantajoso gerar uma quantidade anual de energia maior do que o consumo anual.

Portanto, este trabalho buscou fornecer um auxílio aos profissionais envolvidos na elaboração de projetos de sistemas de geração fotovoltaica residenciais, oferecendo informações relevantes e diretrizes claras para garantir a eficiência e segurança na implementação desses sistemas.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.000/2021**. 2021. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>>. Acesso em: 22 Abr. 2023.

_____. **RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.059/2023**. 2023. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html>>. Acesso em: 22 Abr. 2023.

ALDABÓ, R. **Energia Solar**. 1ª edição. ed. São Paulo: Artliber, 2002. 156 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS COMERCIALIZADORES DE ENERGIA (ABRACEEL). **Opinião sobre o setor Elétrico**. 2022. Disponível em: <<https://abraceel.com.br/wp-content/uploads/post/2022/11/Pesquisa-Datafolha2022-1.pdf>>. Acesso em: 09 mar. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS GRANDES CONSUMIDORES INDUSTRIAIS DE ENERGIA E DE CONSUMIDORES LIVRES (ABRACE). 2021. Disponível em: <<https://abrace.org.br/>>. Acesso em: 09 mar. 2023.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN). **Balanco Energético Nacional 2022: ano base 2021**. 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>>. Acesso em: 27 mar. 2023.

BARBOSA, L. H. A. Estudo e projeto de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede. **Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/33067/1/EstudoProjetoSistema.pdf>>. Acesso em: 24 jun. 2023.

BESSO, R. Sistema solar fotovoltaico conectado à rede – Estudo de caso no Centro de Tecnologia da UFRJ. **Universidade Federal do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<https://www.drhima.poli.ufrj.br/images/documentos/tcc/2017/rachel-besso-2017.pdf>>. Acesso em: 24 jun. 2023.

CENTER FOR SUSTAINABLE SYSTEMS. UNIVERSITY OF MICHIGAN. **Photovoltaic Energy Factsheet**. 2021. Disponível em: <<https://css.umich.edu/publications/factsheets/energy/photovoltaic-energy-factsheet>>. Acesso em: 20 abr. 2023.

- CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Energia solar: Princípios e aplicações**. 2006. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2023.
- Energia Total. <<https://lp.energiatotal.com.br/>>. Acesso em: 27 de out. de 2023.
- EnergyShop. <<https://www.energyshop.com.br/>>. Acesso em: 27 de out. de 2023.
- FADIGAS, E. A. F. A. Energia solar fotovoltaica: Fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica. **GEPEA – Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo**, 2000. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/56337/mod_resource/content/2/Apostila_solar.pdf>. Acesso em: 26 mai. 2023.
- GOETZE, F. Projeto de microgeração fotovoltaica residencial: Estudo de caso. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, RS, 2017. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/169263/001049569.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 21 abr. 2023.
- GOMES, J. A. P. et al. Smart cities: construção sustentável e edifícios inteligentes são tendências para o futuro. **Brazilian Journal of Development**, p. 3–4, 2020.
- INFOMONEY. **Cotações - Juros Futuros**. 2023. Disponível em: <<https://www.infomoney.com.br/ferramentas/juros-futuros-di/>>. Acesso em: 21 jul. 2023.
- LEVA, F. et al. Modelo de um projeto de um sistema fotovoltaico. **Núcleo de Eletricidade Rural e Fontes Alternativas de Energia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, MG, 2017. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n5v2/084.pdf>>. Acesso em: 21 abr. 2023.
- MAMEDE, J. **Instalações Elétricas Industriais**. 9^a ed.. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 1292 p.
- MEDEIROS, S. E. L. et al. Influence of climatic variability on the electricity generation potential by renewable sources in the Brazilian semi-arid region. **Journal of Arid Environments**, v. 184, 104331, 2021.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. 2012. Acesso em: 09 mar. 2023.
- MIRANDA, A. B. C. M. Análise de viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico conectado á rede. **Universidade Federal do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, RJ, 2014. Disponível em: <<http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10010504.pdf>>. Acesso em: 24 jun. 2023.
- NOGUEIRA, P. C. Estudo de viabilidade econômica da instalação de sistemas fotovoltaicos conectados á rede elétrica de energia do rio de janeiro: Um estudo de caso. **Universidade Federal do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, RJ, 2017. Disponível em: <<http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10017756.pdf>>. Acesso em: 24 jun. 2023.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **O Sistema em Números**. 2023. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 09 mar. 2023.

PINHO, J. T. S.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPTEL - CRESESEB, 2014. 540 p.

RIGO, P. D. et al. Competitive business model of photovoltaic solar energy installers in Brazil. **Renewable Energy**, v. 181, p. 39–50, 2022.

SON, T. et al. Optimal sizing of renewable energy storage: A techno-economic analysis of hydrogen, battery and hybrid systems considering degradation and seasonal storage. **Applied Energy**, 2023.

THOMEN, D. N. Y. Otimizando a eficiência de células solares baseadas em nanoestruturas semicondutoras quaternárias. **Universidade Federal de São Carlos**, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/12804/Dissertacao-Diana-vf.pdf?sequence=7&isAllowed=y>>. Acesso em: 20 abr. 2023.

VASCONCELOS, Y. Células solares de perovskita podem ser uma alternativa mais barata e eficaz aos módulos de silício que dominam o mercado mundial de painéis fotovoltaicos. **Revista Pesquisa FAPESP**, p. 64–68, 2017. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2017/10/064-068_perovskita_260.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2023.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1ª edição. ed. São Paulo: Érica, 2012. 224 p.

ZEPTER, J. M. et al. Prosumer integration in wholesale electricity markets: Synergies of peer-to-peer trade and residential storage. **Energy Buildings**, v. 184, p. 163–176, 2019.

ÍNDICE NACIONAL DE PREÇOS AO CONSUMIDOR AMPLO. **Inflação acumulada em 12 meses (maio de 2023)**. 2023. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 25 jun. 2023.

ANEXO A

Datasheet módulo fotovoltaico

Tiger Pro 72HC-TV

525-545 Watt

BIFACIAL MODULE WITH
TRANSPARENT BACKSHEET

P-Type

Positive power tolerance of 0~+3%

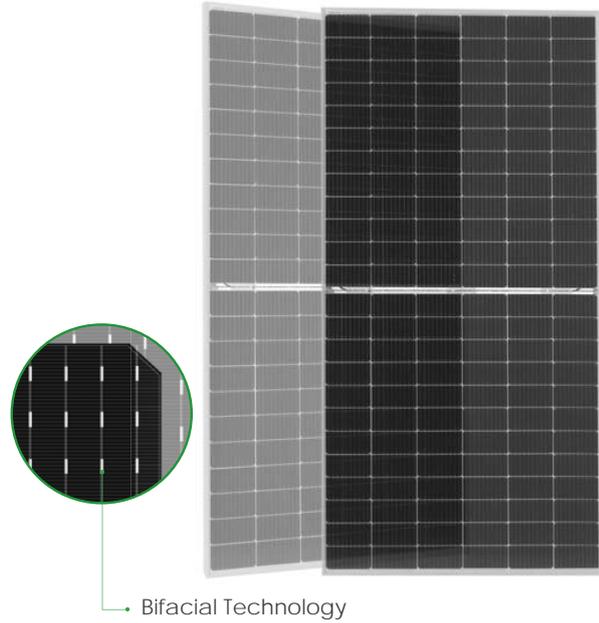
IEC61215(2016), IEC61730(2016)

ISO9001:2015: Quality Management System

ISO14001:2015: Environment Management System

ISO45001:2018

Occupational health and safety management systems



Bifacial Technology

Key Features



Multi Busbar Technology

Better light trapping and current collection to improve module power output and reliability.



Longer Life-time Power Yield

0.45% annual power degradation and 30 year linear power warranty.



Light-weight design

Light-weight design using transparent backsheet for easy installation and low BOS cost.



Enhanced Mechanical Load

Certified to withstand: wind load (2400 Pascal) and snow load (5400 Pascal).



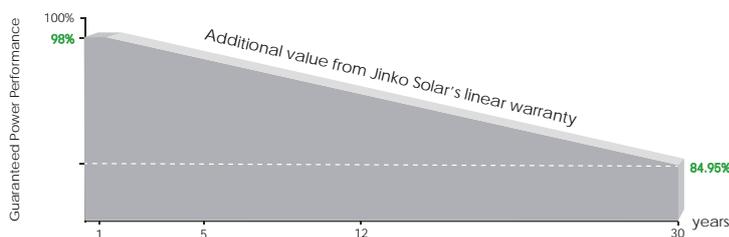
Higher Power Output

Module power increases 5-25% generally, bringing significantly lower LCOE and higher IRR.



POSITIVE QUALITY™
Continuous Quality Assurance

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

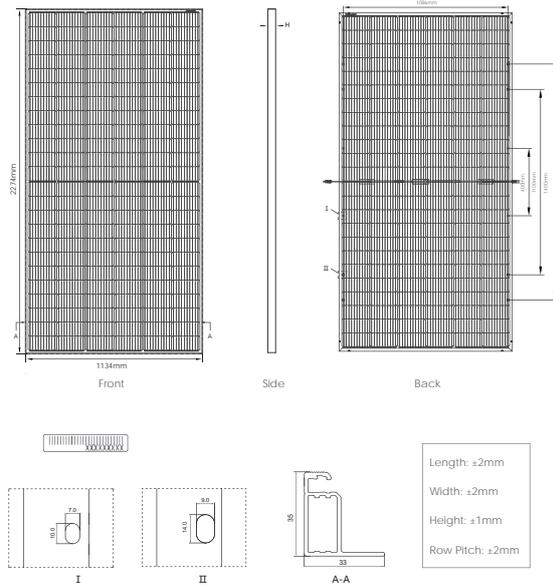


12 Year Product Warranty

30 Year Linear Power Warranty

0.45% Annual Degradation Over 30 years

Engineering Drawings

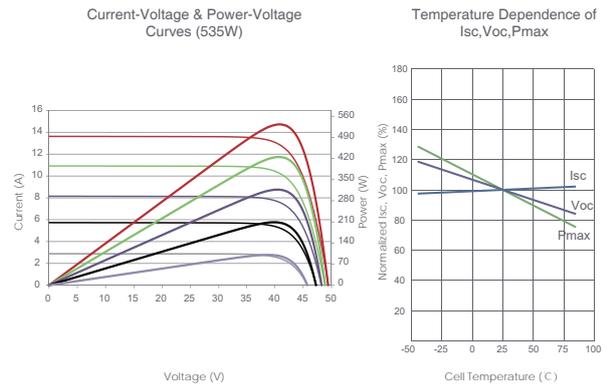


Packaging Configuration

(Two pallets = One stack)

31pcs/pallets, 62pcs/stack, 620pcs/ 40'HQ Container

Electrical Performance & Temperature Dependence



Mechanical Characteristics

Cell Type	P type Mono-crystalline
No. of cells	144 (6×24)
Dimensions	2274×1134×35mm (89.53×44.65×1.38 inch)
Weight	28.9 kg (63.7 lbs)
Front Glass	3.2mm, Anti-Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP68 Rated
Output Cables	TUV 1×4.0mm ² (+): 400mm, (-): 200mm or Customized Length

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM525M-72HL4-TV		JKM530M-72HL4-TV		JKM535M-72HL4-TV		JKM540M-72HL4-TV		JKM545M-72HL4-TV	
	STC	NOCT								
Maximum Power (Pmax)	525Wp	391Wp	530Wp	394Wp	535Wp	398Wp	540Wp	402Wp	545Wp	405Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	40.61V	37.74V	40.71V	37.88V	40.81V	37.98V	40.91V	38.08V	41.07V	38.18V
Maximum Power Current (Imp)	12.93A	10.35A	13.02A	10.41A	13.11A	10.48A	13.20A	10.55A	13.27A	10.62A
Open-circuit Voltage (Voc)	49.27V	46.50V	49.35V	46.58V	49.42V	46.65V	49.49V	46.71V	49.65V	46.86V
Short-circuit Current (Isc)	13.64A	11.02A	13.71A	11.07A	13.79A	11.14A	13.87A	11.20A	13.94A	11.26A
Module Efficiency STC (%)	20.36%		20.55%		20.75%		20.94%		21.13%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	30A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.35%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.28%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.048%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									
Refer. Bifacial Factor	70±5%									

BIFACIAL OUTPUT-REAR SIDE POWER GAIN

		Rear Side Power Gain (%)				
		5%	15%	25%	35%	45%
5%	Maximum Power (Pmax)	551Wp	557Wp	562Wp	567Wp	572Wp
	Module Efficiency STC (%)	21.38%	21.58%	21.78%	21.99%	22.19%
15%	Maximum Power (Pmax)	604Wp	610Wp	615Wp	621Wp	623Wp
	Module Efficiency STC (%)	23.41%	23.64%	23.86%	24.08%	24.30%
25%	Maximum Power (Pmax)	656Wp	663Wp	669Wp	675Wp	681Wp
	Module Efficiency STC (%)	25.45%	25.69%	25.93%	26.18%	26.42%

*STC: Irradiance 1000W/m² Cell Temperature 25°C AM=1.5
 NOCT: Irradiance 800W/m² Ambient Temperature 20°C AM=1.5 Wind Speed 1m/s

ANEXO B

Datasheet inversor

MIC 1000~3000TL-X

- Eficiência máxima de 97,6%
- Design compacto
- Tecla touch & Display OLED
- Interface flexível
- Serviço online



Growatt
POWERING TOMORROW

www.ginverter.com

P O W E R
- I N G O
T O M O -
R R O W O

Ficha de dados	MIC 1000TL-X	MIC 1500TL-X	MIC 2000TL-X	MIC 2500TL-X	MIC 3000TL-X
Dados de entrada					
Máxima potência fotovoltaica recomendada (para módulo STC)	1400W	2100W	2800W	3500W	4200W
Máxima tensão CC	500V	500V	500V	550V	550V
Tensão de partida	50V	50V	50V	80V	80V
Faixa de tensão MPPT/tensão nominal	50V-500V /180V	50V-500V /250V	50V-500V /360V	65V-550V /360V	65V-550V /360V
Máxima corrente de entrada por trackers MPP	13A				
Máxima corrente curto-circuito por trackers MPP	16A				
Número de MPPT / strings por MPPT	1/1				
Saída (CA)					
Potência nominal de saída	1000W	1500W	2000W	2500W	3000W
Potência aparente máxima de CA	1000VA	1500VA	2000VA	2500VA	3000VA
Máxima corrente de saída	4.8A	7.1A	9.5A	11.9A	14.3A
Tensão nominal de saída(Faixa)	230V(180Vac-280Vac)				
Frequência da rede CA(Faixa)	50Hz/60Hz ± 5Hz				
Fator de potência ajustável	0.8i-0.8c				
THDI	<3%				
Conexão CA	Fase única				
Eficiência					
Máx. eficiência	97.4%	97.4%	97.4%	97.6%	97.6%
Euro-eta	96.5%	97.0%	97.0%	97.0%	97.1%
Dispositivos de proteção					
Proteção de polaridade reversa de CC	Sim				
Interruptor CC	Sim				
Varistor para proteção de surtos CC	Sim				
Monitoramento de resistência de isolamento	Sim				
Varistor para proteção de surtos CA	Sim				
Monitoramento de falha de terra	Sim				
Monitoramento de rede	Sim				
Proteção anti-ilhamento	Sim				
Unidade de monitoramento de corrente residual	Sim				
Dados Gerais					
Dimensões (L/A/P)	274/254/138mm				
Peso	6.0kg	6.0kg	6.0kg	6.2kg	6.2kg
Faixa de temperatura operacional	- 25°C ... +60°C (>45°C Derating)				
Emissão de ruído	≤25 dB(A)				
Altitude	4000m(13123ft)				
Consumo noturno	< 0.5 W				
Topologia	Sem transformador				
Resfriamento	Convenção natural				
Grau de proteção	IP65				
Humidade relativa	100%				
Características					
Conexões CC	H4/MC4				
Conexões CA	Conector				
Exibição	OLED				
Interfaces: RS485 / USB / Wi-Fi	Sim/Sim/Sim				
Garantia : 5 anos	Sim				
CE, CE10-21, VDE-AR-N4105, VDE0126-1-1, UTE C 15-712-1, EN50549, IEC60068, IEC61683, IEC62116, IEC61727 INMETRO, G98, C10/C11, AS4777, AS/NZS3100, UNE217001, UNE206007, PO12.2					