



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

KALYANDER DE AQUINO RAMOS

**DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE ECONÔMICA DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL NO MUNICÍPIO DE BARCARENA - PA**

BELÉM

2025

KALYANDER DE AQUINO RAMOS

**DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE ECONÔMICA DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL NO MUNICÍPIO DE BARCARENA - PA**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, do Campus Universitário do Guamá, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Prof. Dra. Carolina de Mattos Affonso

BELÉM

2025

KALYANDER DE AQUINO RAMOS

**DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE ECONÔMICA DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL NO MUNICÍPIO DE BARCARENA - PA**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, do Campus Universitário do Guamá, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Orientador(a): Prof. Dra. Carolina de Mattos Affonso

Data de apresentação: 03/04/2025

Conceito: EXCELENTE

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Carolina de Mattos Affonso

FEEB UFPA

Prof. Dra. Carminda Célia Moura de Moura Carvalho

FEEB UFPA

Prof. Dr. Edson Ortiz de Matos

FEEB UFPA

RESUMO

Este estudo analisa a viabilidade técnica e econômica de um Sistema Fotovoltaico Residencial Conectado à Rede (SFCCR) em Barcarena (PA), região com as tarifas de energia mais altas do Brasil. A partir do dimensionamento técnico, que considerou a irradiação solar local, o consumo de energia e o espaço disponível no telhado, propôs-se um sistema composto por sete módulos de 555 Wp e um inversor de 3 kW, capaz de gerar 5.534,75 kWh/ano. A análise econômica, realizada em horizonte de 25 anos, demonstrou retorno do investimento em 2 anos, com economia acumulada superior a R\$ 400 mil, evidenciando viabilidade econômica do investimento em energia solar para unidades consumidoras residenciais. Este estudo foca em promover o uso da energia solar em residências, incentivando a diversificação da matriz energética e na adoção de tecnologias sustentáveis.

Palavras-chave: energia solar; sistemas fotovoltaicos; viabilidade econômica; sustentabilidade.

ABSTRACT

This study analyzes the technical and financial feasibility of a Residential Grid-Connected Photovoltaic System (RGCPS) in Barcarena (PA), a region with the highest energy tariffs in Brazil. Based on technical sizing, which considered local solar irradiation, energy consumption, and available roof space, a system composed of seven 555 Wp modules and a 3 kW inverter was proposed, capable of generating 5,534.75 kWh/year. The financial analysis, conducted over a 25-year horizon, demonstrated a return on investment within 2 years, with accumulated savings exceeding R\$ 400,000, highlighting the economic viability of investing in solar energy for residential consumers. This study focuses on promoting the use of solar energy in households, encouraging the diversification of the energy matrix and the adoption of sustainable technologies.

Keywords: solar energy; photovoltaic systems; economic feasibility; sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Gráfico com o histórico da tarifa média da classe residencial.....	11
Figura 2 – Gráfico do mercado de GDs no cenário global.....	15
Figura 3 – Gráfico da matriz elétrica brasileira.....	15
Figura 4 – Gráfico com o histórico da geração de energia solar fotovoltaica no Brasil	16
Figura 5 – Mapa da irradiação solar anual no Brasil.....	18
Figura 6 – Variação da irradiância durante um dia	19
Figura 7 – Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica.....	20
Figura 8 – Classificação de sistemas fotovoltaicos	21
Figura 9 – Sistema fotovoltaico conectado à rede (On-Grid).....	22
Figura 10 – Sistema fotovoltaico autônomo (Off-Grid).....	23
Figura 11 – Componentes de um módulo fotovoltaico	24
Figura 12 – Módulo fotovoltaico com células de silício amorfo.....	25
Figura 13 – Módulo fotovoltaico com células policristalinas	25
Figura 14 – Módulo fotovoltaico com células monocristalinas	26
Figura 15 – Moldura de alumínio.....	27
Figura 16 – Película encapsulante (EVA)	27
Figura 17 – Película encapsulante (EVA)	28
Figura 18 – Caixa de Junção	28
Figura 19 – Arranjos dos módulos fotovoltaicos	29
Figura 20 – Aplicação do diodo Bypass em células fotovoltaicas	30
Figura 21 – Funcionamento de um inversor fotovoltaico.....	31
Figura 22 – Gráfico com o máximo Ponto de Potência.....	31
Figura 23 – Aplicativo para monitoramento do sistema fotovoltaico	32
Figura 24 – Dispositivo de proteção contra surtos (DPS)	33
Figura 25 – Modelo de String Box	34
Figura 26 – Funcionamento de um medidor bidirecional.....	35
Figura 27 – Quadro com a irradiação solar diária no município de Barcarena.....	37
Figura 28 – Quadro com os dados levantados da conta de energia.....	38
Figura 29 – Especificações do módulo fotovoltaico	41
Figura 30 – Especificações do inversor.....	44

Figura 31 – Gráfico com o tempo de retorno do investimento.....	61
Figura 32 – Forma de calcular a TIR no Excel.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – <i>Ranking</i> dos Estados com as maiores tarifas média de energia elétrica	12
Tabela 2 – Estimativa de geração, em kWh, mensal e anual.....	45
Tabela 3 – Kit fotovoltaico	47
Tabela 4 – Serviços.....	48
Tabela 5 – Investimento inicial total	48
Tabela 6 – Investimento total requerido	51
Tabela 7 – Geração estimada ao longo de 25 anos.....	53
Tabela 8 – Histórico dos dez últimos reajustes tarifários.....	55
Tabela 9 – Projeção da tarifa de energia ao longo de 25 anos	57
Tabela 10 – Fluxo de caixa no período de 25 anos	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.2	Objetivos	12
1.2.1	Objetivo geral	12
1.2.2	Objetivos específicos	13
1.3	Estrutura	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Geração distribuída	14
2.2	Irradiação solar	17
2.3	Horas de Sol a Pico	18
2.4	Efeito fotovoltaico	19
2.5	Sistemas fotovoltaicos	20
2.6	Módulo fotovoltaico	23
2.7	Inversor fotovoltaico	30
2.8	Proteções e String Box	32
2.9	Medidor de energia bidirecional	34
2.10	Sistema de Compensação de Energia Elétrica	35
3	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	36
3.1	Irradiação solar local	36
3.2	Levantamento do consumo de energia	37
3.3	Definição e dimensionamento dos módulos fotovoltaicos	39
3.4	Definição e dimensionamento do inversor fotovoltaico	42
3.5	Geração mensal e anual	44
4	ANÁLISE ECONÔMICA	46
4.1	Investimento total requerido	46
4.1.1	Investimento inicial	46
4.1.2	Manutenções	49
4.1.3	Troca do inversor	49
4.1.4	Resultado	50
4.2	Geração de energia total estimada	52
4.3	Tarifa de energia elétrica	54
4.4	Fluxo de caixa e <i>payback</i>	58

4.4.1	Cálculo do fluxo de caixa	58
4.4.2	Resultados do fluxo de caixa	59
4.4.3	Análise do <i>payback</i>	61
4.5	Outras métricas financeiras	61
4.5.1	Valor Presente Líquido	62
4.5.2	Taxa Interna de Retorno	63
4.6	Análise para o cenário conservador	64
5	CONCLUSÃO	66
	REFERÊNCIAS	68
	ANEXO A – FATURA DE ENERGIA	74
	ANEXO B – MANUAL DO MÓDULO FOTOVOLTAICO JINKO JKM555M-72HL4 TIGER NEO (PARTE 1)	75
	ANEXO B – MANUAL DO MÓDULO FOTOVOLTAICO JINKO JKM555M-72HL4 TIGER NEO (PARTE 2)	76
	ANEXO C – MANUAL DO INVERSOR GROWATT MIC3000TL-X (PARTE 1)	77
	ANEXO C – MANUAL DO INVERSOR GROWATT MIC3000TL-X (PARTE 2)	78

1 INTRODUÇÃO

A energia é o elemento fundamental que viabiliza todos os processos, desde fenômenos naturais (como o ciclo da água) até atividades humanas (como o uso de dispositivos eletrônicos). Estudos apontam que qualquer sistema, de microrganismos a ecossistemas complexos, depende de fontes energéticas para manter suas funções básicas de produção, consumo e reciclagem. O consumo de energia elétrica ampliou-se de tal forma que se observa, atualmente, seu papel como alicerce estrutural para o progresso econômico e a organização da sociedade (CAMARGO, 2017).

A matriz energética global ainda é predominantemente sustentada por fontes não renováveis, como carvão, gás natural e petróleo. A combustão desses recursos emite gases do efeito estufa, responsáveis pelo aumento progressivo da temperatura terrestre (aquecimento global). Além dos impactos ambientais, a dependência de combustíveis fósseis compromete a disponibilidade futura de energia, reforçando a necessidade de transição para fontes renováveis (EPE, 2024).

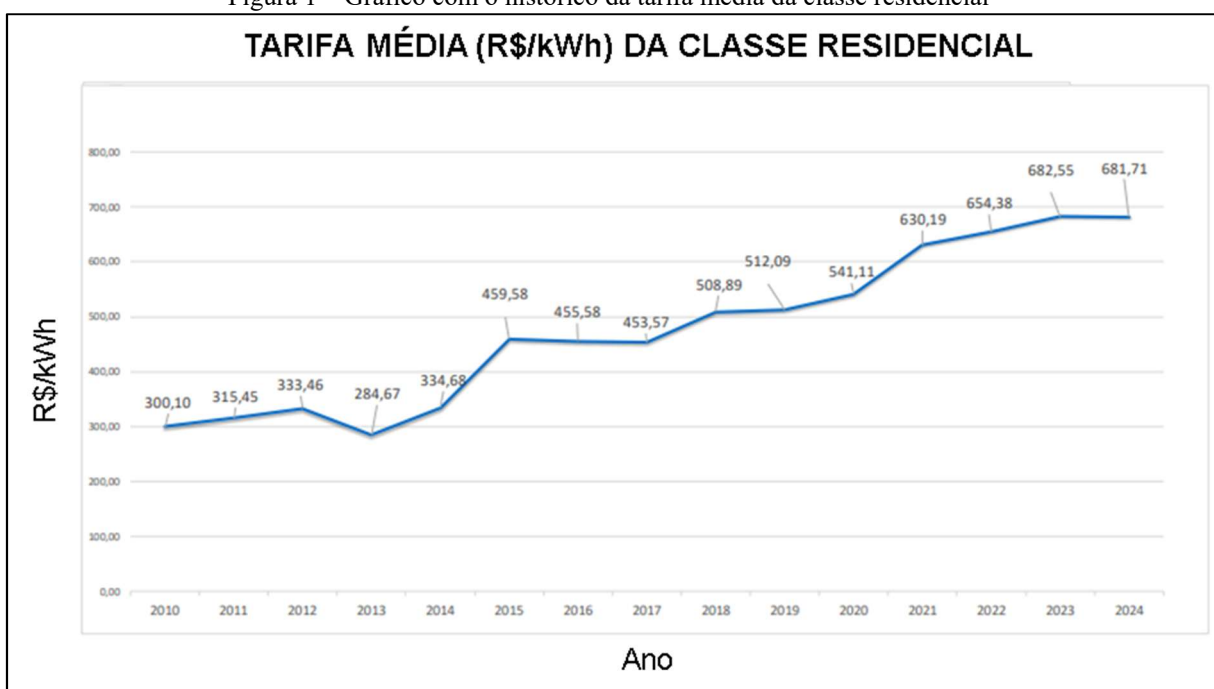
A demanda por fontes de energia sustentáveis tem crescido significativamente nas últimas décadas, impulsionada pela urgência em mitigar os impactos da crise climática e acelerar a transição para matrizes limpas. Nesse cenário, a energia solar emerge como uma das tecnologias mais relevantes, devido à sua acessibilidade e versatilidade de aplicação, desde empreendimentos de grande porte a instalações residenciais. No contexto brasileiro, caracterizado por alto potencial de irradiação solar, a implementação de sistemas fotovoltaicos configura-se não apenas como uma alternativa estratégica para geração descentralizada, mas também como um mecanismo essencial para consolidar modelos energéticos de baixo carbono (VIAN, 2021).

Apesar do aumento expressivo na adoção de sistemas fotovoltaicos nos centros urbanos, ainda persiste a ideia de que essa tecnologia é voltada apenas para empresas e projetos de grande porte, subestimando seu uso em residências. No entanto, os avanços tecnológicos e a queda nos custos de instalação e manutenção têm tornado cada vez mais viável a aplicação desses sistemas em residências. Comprovar essa viabilidade pode incentivar mais famílias a adotarem a tecnologia, reduzindo gastos com energia elétrica e fortalecendo práticas sustentáveis (COSTA *et al.*, 2020).

A escalada histórica das tarifas médias (representam o faturamento mensal pelo referente consumo) de energia elétrica no Brasil acumulou uma alta de 127% entre 2010 e 2024,

como mostra o gráfico na Figura 1. Este aumento na tarifa impacta significativamente o poder de compra de residências e empresas, sobretudo no Pará, estado que liderou o *ranking* nacional de tarifas em 2024 conforme mostra a Tabela 1. Os aumentos contínuos dos custos energéticos comprometem a competitividade de setores produtivos, sobrecarregam orçamentos familiares e ampliam desigualdades socioeconômicas, especialmente em regiões com infraestrutura energética precária. A crise de suprimento de 2001, somada à dependência de fontes convencionais sujeitas a flutuações de preços, evidenciou a urgência de soluções estruturais para reduzir a vulnerabilidade do sistema elétrico. Diante desse cenário, a energia solar fotovoltaica destacou-se como alternativa viável, por conta da redução progressiva nos custos de equipamentos (painéis solares e inversores fotovoltaicos), aliada à maturidade tecnológica (GOMES, 2021).

Figura 1 – Gráfico com o histórico da tarifa média da classe residencial



Fonte: Adaptado de BRASIL (2024).

Tabela 1 – *Ranking* dos Estados com as maiores tarifas média de energia elétrica

Ranking	Estado	Tarifa média de energia elétrica
1º	Pará	R\$ 0,938/kWh
2º	Mato Grosso do Sul	R\$ 0,870/kWh
3º	Rio de Janeiro	R\$ 0,870/kWh
4º	Alagoas	R\$ 0,863/kWh
5º	Amazonas	R\$ 0,857/kWh
6º	Mato Grosso	R\$ 0,847/kWh
7º	Piauí	R\$ 0,829/kWh
8º	Tocantins	R\$ 0,823/kWh
9º	Bahia	R\$ 0,821/kWh
10º	Amapá	R\$ 0,808/kWh

Fonte: Adaptado de PORTAL SOLAR (2024).

Apesar da tecnologia de geração fotovoltaica ser acessível no mercado e estar sendo amplamente difundida, muitos consumidores ainda tem dúvidas quanto a sua viabilidade econômica. Alguns questionamentos comumente feitos são: Como é o funcionamento prático do sistema? Qual valor do investimento? Qual a vida útil do equipamento? Qual o tempo de retorno do investimento (*payback*)?

Esses questionamentos revelam uma lacuna comum: a, ainda, tímida divulgação dos benefícios da energia fotovoltaica em alguns estados do país. Este estudo visa suprir essa demanda, oferecendo uma avaliação prática e regionalizada, desde o dimensionamento do sistema até a simulação do retorno financeiro, traduzindo complexidades técnicas em linguagem acessível.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este Trabalho de Curso tem como objetivo principal dimensionar um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede elétrica (*on-grid*) para uma residência localizada na cidade de Barcarena, Pará, considerando as particularidades técnicas e condições climáticas da região, bem como demonstrar a viabilidade financeira do investimento em energia solar por meio da aplicação de métodos de engenharia econômica.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, foram realizados os seguintes objetivos específicos:

- Calcular o consumo energético médio mensal da residência em estudo;
- Dimensionar o sistema fotovoltaico com base na irradiação solar local e demanda energética;
- Estimar a produção de energia mensal e anual;
- Estimar custos de implantação, manutenção e substituição de equipamentos;
- Analisar a viabilidade econômica do projeto por meio de índices econômicos como *payback*, valor presente líquido (VPL) e taxa interna de retorno (TIR).

1.3 Estrutura

A estrutura deste trabalho está organizada em cinco capítulos. O Capítulo 2 aborda os fundamentos teóricos relacionados à energia solar fotovoltaica, contemplando conceitos como geração distribuída, irradiação solar, efeito fotovoltaico, componentes de sistemas conectados à rede (SFCR) e o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE). No Capítulo 3, são detalhadas as etapas de dimensionamento do sistema proposto, incluindo o cálculo da irradiação local, levantamento do consumo energético da residência, seleção de módulos e inversor, além da projeção da geração mensal e anual. O Capítulo 4 apresenta a análise econômica do projeto, com ênfase em métricas de viabilidade econômica, como *payback*, Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR). Por fim, o Capítulo 5 sintetiza as conclusões do estudo, destacando os resultados técnicos e financeiros, limitações e recomendações para futuras pesquisas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordadas as principais informações teóricas dos conceitos necessários para fundamentar o entendimento acerca do Sistema Fotovoltaico Conectado Rede (SFCR). Será explicado acerca da geração distribuída (GD), dos conceitos da irradiação solar, a importância do efeito fotovoltaico, os tipos de sistemas fotovoltaicos, os componentes principais de um SFCR (módulos fotovoltaicos, inversor, proteções e o medidor bidirecional) e como funciona o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE).

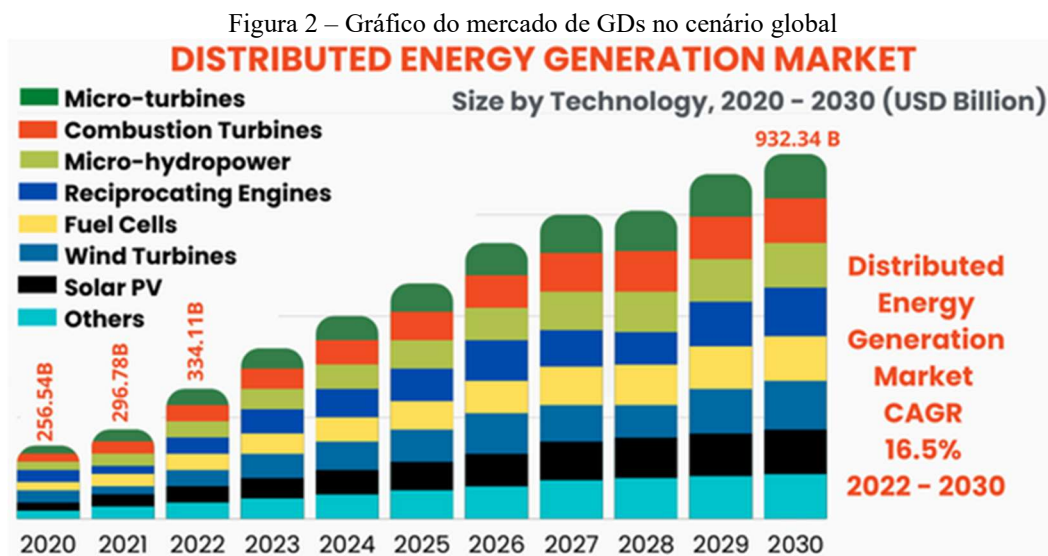
2.1 Geração distribuída

A geração distribuída está se tornando um dos principais agentes no combate as emissões de gases do efeito estufa, fortalecendo a chamada economia de baixo carbono. Sua definição depende de diversos fatores, tais como as leis de cada país, tecnologias empregadas, recursos primários utilizados e a forma de conexão com a rede (IEI, 2018). Entretanto, Ackermann et al. (2001) caracteriza, do modo geral, que a geração distribuída são fontes geradoras de energia que estão conectadas diretamente com a rede de distribuição ou próximo as unidades consumidoras.

No Brasil, a geração distribuída de médio e pequeno porte são representadas, em sua maior parte, pelo uso de tecnologias, tais como: geradores de energia a diesel ou a gasolina, módulos fotovoltaicos, Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) e instalações de cogeração. Nem todas as fontes usadas nos sistemas de geração distribuída são necessariamente limpas e renováveis, porém, a geração distribuída fotovoltaica tem crescido de forma exponencial e ocupado posições de maior relevância no cenário das GDs (IEI, 2018).

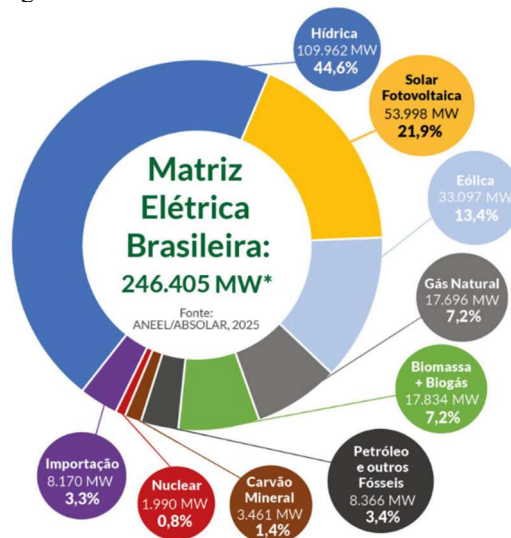
As fontes de energias mais usadas no cenário global, na atualidade, são ainda fontes não renováveis, como carvão, petróleo e gás natural (RIBEIRO, 2025). No entanto, o cenário energético mundial vem passando por uma transformação significativa, impulsionado pela expansão da geração distribuída a partir de fontes renováveis. De acordo com projeções do mercado global (Figura 2), que faz um balanço entre os investimentos, receitas, custos operacionais e outros fatores financeiros, o setor de GD teve um valor estimado em USD 256,54 bilhões (dólar americano) em 2020 e deve alcançar USD 932,34 bilhões até 2030, crescendo a uma taxa anual composta de 16,5%. Esse crescimento é impulsionado por políticas governamentais de descarbonização, debates no cenário global sobre soluções para as

mudanças climáticas– como as Conferências das Partes (COP), aumento da conscientização ambiental e avanços tecnológicos que tornam as soluções renováveis mais acessíveis. Destaca-se a energia solar fotovoltaica, cuja participação na GD apresenta a maior taxa de crescimento (18,25%), refletindo sua viabilidade técnica e econômica, especialmente em países com alto potencial de irradiação, como o Brasil (CUSTOM MARKET INSIGHTS, 2022).



O Brasil tem realizado fortes investimentos em fontes de energia limpa, que hoje já equivalem a 84,7% da matriz elétrica nacional conforme Brasil Energia (2025). A Figura 3 demonstra a participação de cada fonte de energia na matriz energética brasileira.

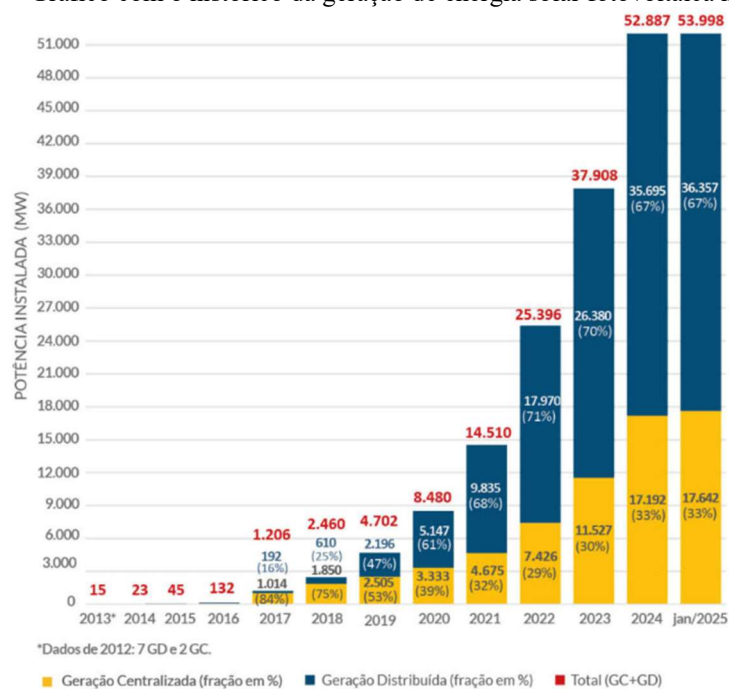
Figura 3 – Gráfico da matriz elétrica brasileira



Fonte: ABSOLAR/ANEEL (2025).

Esse cenário demonstra a força que fontes como a solar e a eólica vêm desempenhando com o avanço da tecnologia e da conscientização sobre a preservação ambiental. A Figura 4 mostra o crescimento da energia solar fotovoltaica desde 2013, um ano após a homologação da Resolução Normativa nº 482/2012, até os dias atuais, evidenciando um aumento de 3600% na capacidade de geração.

Figura 4 – Gráfico com o histórico da geração de energia solar fotovoltaica no Brasil



Fonte: ABSOLAR/ANEEL (2025).

Segundo Barbosa Filho e Azevedo (2013), o crescimento das GDs traz consigo diversos benefícios para a sociedade, para o setor elétrico e para o meio ambiente:

- A sociedade se beneficia com o aumento da confiabilidade do fornecimento, pois deixa de ficar sujeita a falhas no sistema de transmissão. Redução dos custos com manutenção e modernização oriundos das gerações centralizadas. Contribuição para a geração de emprego, desenvolvimento econômico local e diversificação da matriz energética.
- Do lado do setor elétrico, as GDs, em relação ao sistema de transmissão, diminuem os custos com as manutenções, adia altos investimentos, reduz as perdas reativas nas linhas e garante mais estabilidade dos parâmetros elétricos. Em relação ao mercado de energia, há um aumento no atendimento ao crescimento da demanda,

ampliação de participantes no setor elétrico e redução dos riscos nos planejamentos energéticos.

- Pelo meio ambiente, pode-se perceber a diminuição do uso de fontes não renováveis como o carvão e o petróleo, a redução das emissões de CO₂ e minimização da necessidade de construção de grandes instalações de geração e transmissão de energia.

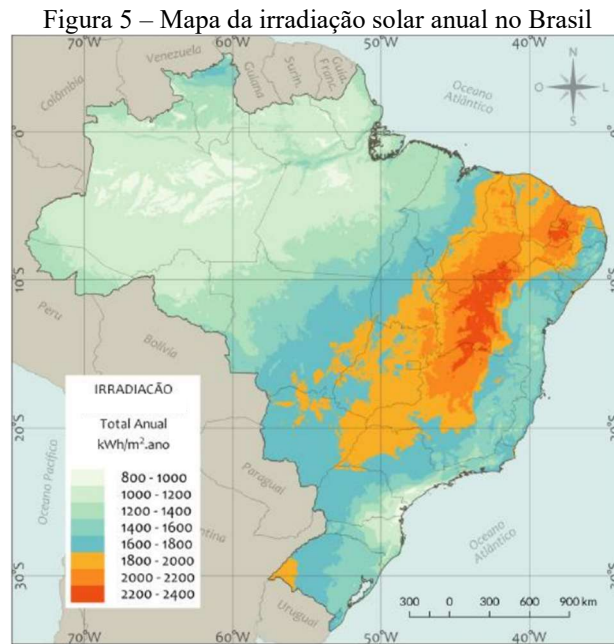
Barbosa Filho e Azevedo (2013) também elencam as desvantagens que as GDs podem apresentar, tais como: aumento da tarifa de energia em virtude da redução de receita para a conversação do sistema elétrico nacional, necessidade de maiores investimentos no sistema de distribuição para que suporte o fluxo de energia multidirecional, variação na qualidade de energia com aumento de harmônicos e variações de tensão e aumento da complexidade da manutenção do sistema de distribuição.

2.2 Irradiação solar

Para que a irradiação solar possa ser compreendida, é necessário entender primeiramente sobre a radiação solar. A radiação solar é a energia emitida pelo Sol por meio de ondas eletromagnéticas que se propagam por uma distância de, aproximadamente, 150 milhões de quilômetros até chegar no planeta Terra. Ela é percebida através da luz visível, do infravermelho e da radiação ultravioleta, que incidem sobre a terra diariamente. É estimado que, anualmente, a Terra recebe o equivalente a $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia por meio da radiação solar, porém, apenas 51% é efetivamente absorvido pela superfície, os 49% restante são perdidos por intermédio da reflexão, difusão e absorção de moléculas de oxigênio. Somente essa parcela absorvida pela superfície é suficiente para suprir 29.000 vezes o consumo global de energia em um ano (PEREIRA *et al.*, 2017). Já o termo irradiação solar é designado para representar a quantidade de radiação solar obtida em uma determinada quantidade de tempo, dado geralmente em Wh/m² (PINHO; GALDINO, 2014).

O Brasil possui um território altamente promissor para o aproveitamento de energia solar, devido à sua localização próxima à linha do Equador e à pouca variação climática ao longo do ano. Estima-se que o território brasileiro receba, em média, uma irradiação solar anual que varia entre 800 e 2.400 kWh/m², valores considerados elevados em comparação com muitos outros países. Por exemplo, a Alemanha, que investe consideravelmente em energia solar,

possui um potencial energético cerca de 40% menor que o do Brasil. Para que se possa ter esses valores de irradiação solar, são construídas estações meteorológicas que medem e monitoram a quantidade de irradiação solar incidente na superfície, fornecendo assim dados essenciais para o planejamento e a implementação de projetos de geração de energia fotovoltaica. A Figura 5 demonstra o potencial solar de cada uma das regiões do Brasil (PEREIRA *et al.*, 2017).



Fonte: PEREIRA *et al* (2017).

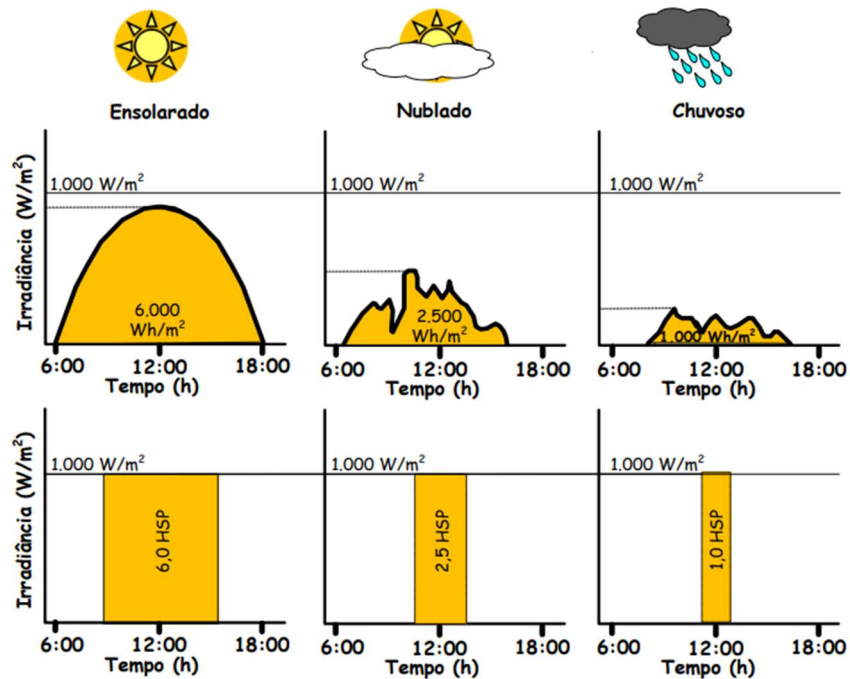
2.3 Horas de Sol a Pico

Outra informação importante é o conceito de Horas de Sol a Pico (HSP). Segundo Moura *et al* (2019), HSP compreende o número de horas por dia que a irradiação solar se mantém equivalente a 1.000 W/m^2 . Esta é uma informação necessária para o dimensionamento e eficiência de projetos fotovoltaicos, pois simplifica a análise ao desconsiderar as flutuações instantâneas da irradiação solar, fornecendo uma base consistente para estimar a geração diária de energia de um sistema fotovoltaico (MOURA, 2019).

Como ilustrado na Figura 6, a irradiância solar apresenta variações significativas ao longo do dia, influenciada por fatores como condições climáticas (presença de nuvens, umidade relativa do ar) e posição geográfica. Em dias de céu claro, a curva típica de irradiância inicia-se por volta das 6h, atinge o pico de aproximadamente 1.000 W/m^2 ao meio-dia solar e decresce gradualmente até as 18h. Utilizar no dimensionamento o valor horário da irradiância, exigiria uma quantidade maior de tempo do projetista ou a necessidade de utilizar um elevado nível de

processamento computacional. Para simplificar o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, utiliza-se as Horas de Sol a Pico (HSP). Esse método substitui a curva real por um retângulo de mesma área (energia total diária), permitindo estimar a geração energética multiplicando a potência do sistema pelas HSP locais (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 6 – Variação da irradiância durante um dia



Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014).

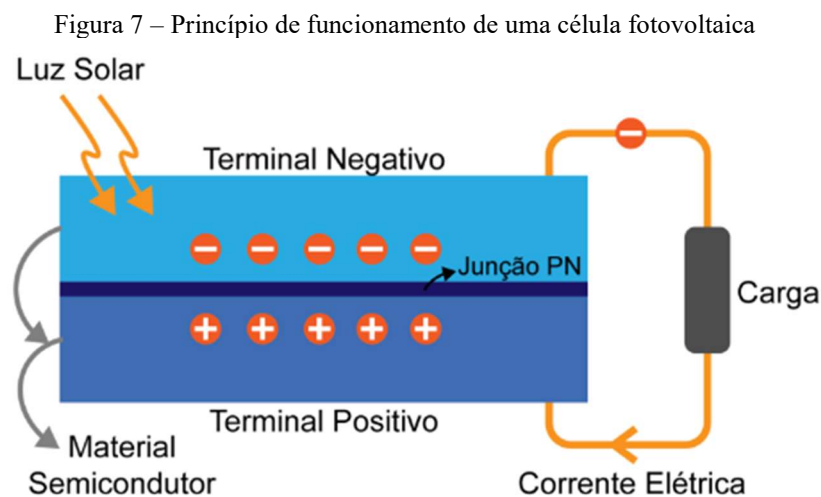
2.4 Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é o fenômeno físico que permite a conversão direta da energia solar em energia elétrica, processo realizado atualmente por meio de células fotovoltaicas. A sua descoberta remonta ao ano de 1839, quando o cientista Edmond Becquerel observou que uma fonte luminosa poderia implicar em uma diferença de potencial em eletrodos imersos em uma solução ácida. Essa descoberta pavimentou o caminho para que, em 1876, W. G. Adams e R. E. Day descobrissem que o mesmo efeito poderia ser obtido em um dispositivo de estado sólido fabricado com selênio. Entretanto, somente 110 anos após a descoberta do efeito fotovoltaico que começaram a produção de células fotovoltaicas com as características e materiais que se usam atualmente (PINHO; GALDINO, 2014).

De forma simplificada, o efeito fotovoltaico ocorre em materiais semicondutores, que possuem duas bandas de energia distintas: a banda de valência, preenchida por elétrons, e a

banda de condução, que se encontra vazia. Quando os fótons da luz solar incidem sobre o material semicondutor, eles transferem energia aos elétrons da banda de valência, promovendo-os para a banda de condução. Esse movimento de elétrons cria uma corrente elétrica e eleva a temperatura do semicondutor (PINHO; GALDINO, 2014).

Para que esse efeito ocorra de maneira eficiente nas células fotovoltaicas, é necessário que elas sejam fabricadas com diferentes tipos de semicondutores, de modo a formar uma junção P-N. A junção P-N é formada pela união de dois tipos de materiais semicondutores: um dopado com impurezas que criam excesso de portadores de carga positiva (lacunas), chamado de material tipo P, e outro dopado com impurezas que criam excesso de portadores de carga negativa (elétrons), chamado de material tipo N. Na região de contato entre os materiais P e N, ocorre a formação de uma zona de depleção, onde os elétrons do material N se recombinam com as lacunas do material P, criando um campo elétrico interno. Quando os fótons promovem elétrons para a banda de condução, o campo elétrico da junção P-N direciona os elétrons para o lado N e as lacunas para o lado P, gerando uma diferença de potencial que pode ser utilizada como fonte de energia elétrica. A Figura 7 ilustra o funcionamento de uma célula fotovoltaica (PINHO; GALDINO, 2014).



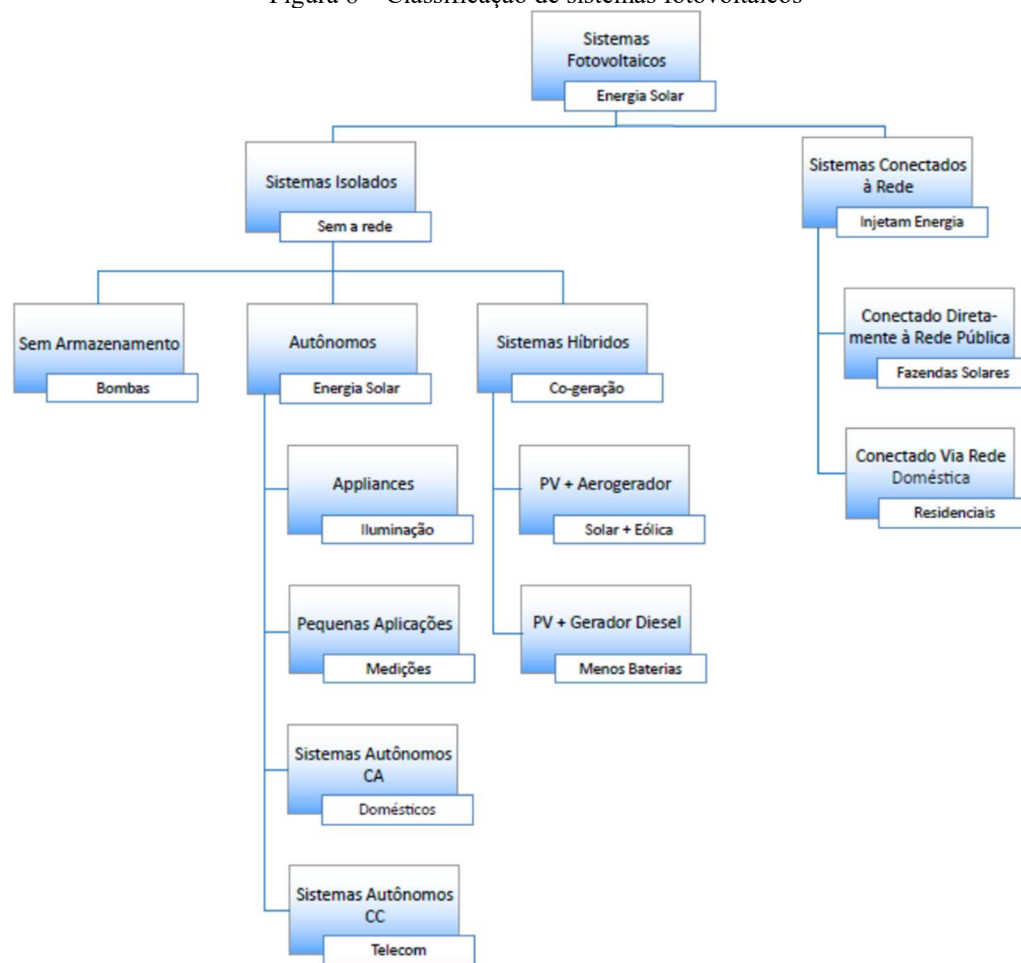
Fonte: ELETRÔNICA DE POTÊNCIA (2020).

2.5 Sistemas fotovoltaicos

Um sistema fotovoltaico é formado por diversos componentes que trabalham em conjunto para captar a energia solar e transformá-la em eletricidade. Os painéis solares são responsáveis por fazer a captação da luz do sol, enquanto o inversor converte a corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). O sistema também inclui cabos e outros dispositivos

elétricos para garantir seu funcionamento adequado e proteção. Os sistemas fotovoltaicos são classificados em duas categorias principais: sistemas isolados (Off-Grid) e sistemas conectados à rede (On-Grid). Dentro da categoria de sistemas isolados, há variações como os híbridos, os autônomos e os autônomos sem armazenamento. Já os sistemas conectados à rede podem ser integrados à rede pública ou a redes privadas, como as de residências ou empresas. A Figura 8 mostra as classes de sistemas fotovoltaicos (SANTIAGO, 2016).

Figura 8 – Classificação de sistemas fotovoltaicos



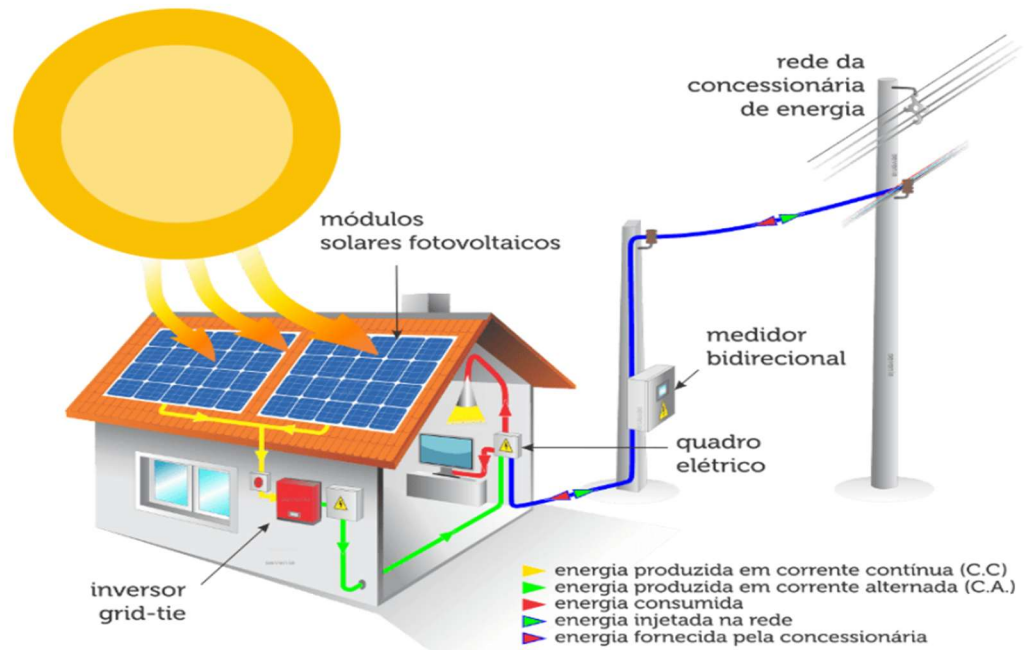
Fonte: SOUZA (2014).

Os sistemas híbridos isolados combinam a geração fotovoltaica com outras fontes de energia, como turbinas eólicas (em sistemas eólico-fotovoltaicos) ou geradores movidos a combustíveis fósseis (em sistemas diesel-fotovoltaicos), entre outras possibilidades (BARRETO *et al.*, 2008).

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (On-Grid), representados na Figura 9, são aqueles que injetam a energia gerada diretamente na rede de distribuição elétrica. Nesse tipo de sistema, toda ou em parte da energia gerada é direcionada para a rede da concessionária, que

absorve a energia, agindo como se fosse uma carga. Os principais componentes desses sistemas incluem o gerador fotovoltaico (FV), o inversor “grid tier” e o medidor de energia bidirecional. Usualmente não contam com sistema de armazenamento, se tornando assim mais baratos (SOUZA, 2014).

Figura 9 – Sistema fotovoltaico conectado à rede (On-Grid)



Fonte: SEBRAE RESPOSTAS (2020).

Os sistemas autônomos, como não estão ligados à rede elétrica, dependem de sistemas de armazenamento, como baterias, para garantir o fornecimento de energia mesmo em momentos de baixa irradiação solar. Esses sistemas geralmente são compostos por painéis fotovoltaicos, baterias, inversores e controladores de carga, que regulam e condicionam a energia gerada. O sistema Off-Grid está representado na Figura 10 (CEPEL, 2004).

Figura 10 – Sistema fotovoltaico autônomo (Off-Grid)

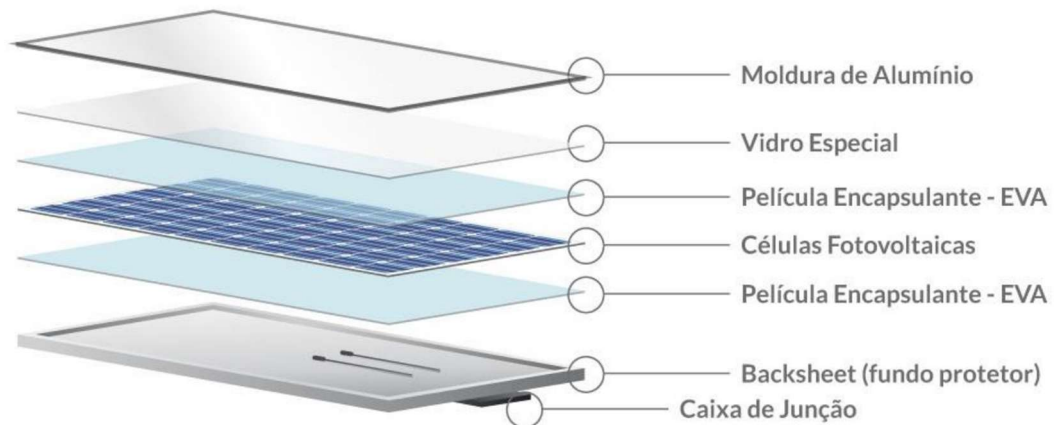


Fonte: MN&R SOLUÇÕES (2025).

2.6 Módulo fotovoltaico

O componente mais reconhecido no SFCR é o módulo fotovoltaico, também conhecido como painel solar. O módulo fotovoltaico é responsável por captar a irradiação solar e transformá-la em eletricidade, utilizando o efeito fotovoltaico. Os materiais que constituem um módulo fotovoltaico, mostrado na Figura 11, são: o vidro temperado, o encapsulante EVA, as células de silício e a estrutura de alumínio, que garantem durabilidade e eficiência ao sistema. Quando um ou mais módulos são interligados eletricamente, formam um arranjo fotovoltaico, que funciona como uma estrutura única (RUTHER, 2004).

Figura 11 – Componentes de um módulo fotovoltaico



Fonte: PHILIPI JR. *et al* (2016).

Os componentes apresentados na Figura 11 são descritos a seguir:

- 1 As células solares são em grande parte compostas por silício (Si), um material semicondutor. Sua arquitetura pode variar conforme a organização atômica do silício, classificando-se, não se limitando a apenas essas, em três categorias comuns no mercado: amorfo hidrogenado (a-Si), policristalino (Multi-si) e monocristalino.
 - Silício amorfo hidrogenado (a-Si): Desenvolvidas na década de 1980, as células de silício amorfo apresentam eficácia reduzida frente às policristalinas, porém destacam-se por técnicas de fabricação inovadoras, tais como os processos a plasma abaixo de 300°C que permitem deposição de camadas finas em materiais acessíveis (vidro, plásticos, aço). Essa abordagem viabilizou painéis flexíveis, leves e adaptáveis, com design semitransparente ou curvilíneo, que se adequaram a exigências arquitetônicas – integrando-se a telhados, fachadas e estruturas urbanas como alternativa estética e funcional. Apesar da menor conversão energética, sua produção escalável, custo competitivo e resistência a impactos ampliaram nichos de mercado, especialmente em projetos que priorizam versatilidade e integração visual. A Figura 12 apresenta um módulo fotovoltaico com células de silício amorfo (GREEN *et al.*, 2012).

Figura 12 – Módulo fotovoltaico com células de silício amorfo



Fonte: TIENDA FOTOVOLTAICA (2025).

- Silício policristalino (Multi-si): Possui eficácia energética inferior comparado a tecnologias monocristalinas, porém compensa com custo reduzido de fabricação, graças à sua estrutura cristalina menos homogênea e processos industriais simplificados. Sua produção envolve métodos como a solidificação controlada de silício fundido em moldes ou a aplicação de filmes através de técnicas de deposição química ou imersão em substratos. A Figura 13 apresenta um módulo fotovoltaico com células policristalinas (GREEN *et al.*, 2012).

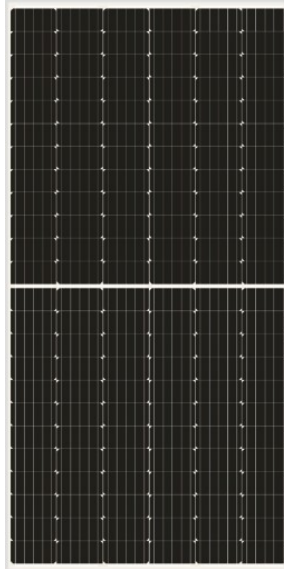
Figura 13 – Módulo fotovoltaico com células policristalinas



Fonte: MERCADO LIVRE (2025).

- Silício monocristalino (Mono-si): Se destacam pela eficiência superior na conversão fotovoltaica, resultado direto de sua estrutura cristalina homogênea. Seu processo de fabricação, contudo, demanda técnicas avançadas, como o método Czochralski, no qual cristais de silício ultrapuro (pureza acima de 99,99%) são formados por solidificação controlada em atmosferas inertes, com taxas de crescimento extremamente lentas. Essa complexidade operacional, aliada à necessidade de matérias-primas de alta pureza, eleva seu custo. A Figura 14 apresenta um módulo fotovoltaico com células monocristalinas (GREEN *et al.*, 2012).

Figura 14 – Módulo fotovoltaico com células monocristalinas



Fonte: SOLAVISTA ENERGY (2025).

- 2 A moldura de alumínio, ilustrado na Figura 15, desempenha um papel crítico na integridade dos módulos fotovoltaicos, pois confere rigidez estrutural ao sistema, protegendo as células e camadas internas – sensíveis a impactos mecânicos – durante etapas críticas como manuseio, transporte e fixação em superfícies, além de prevenir deformações. Sua resistência à corrosão e às intempéries contribui para prolongar a vida útil do módulo, mantendo a estabilidade dimensional mesmo sob variações térmicas ou cargas externas (SOLIENS, 2019).

Figura 15 – Moldura de alumínio



Fonte: PORTAL SOLAR (2025).

- 3 O vidro especial consiste em um componente transparente submetido a tratamento térmico específico, com espessura entre 3,2 e 4,0 milímetros. Sua camada superficial é composta por elementos antirreflexivos que minimizam a dispersão da irradiação incidente, potencializando a transmissão fotônica e elevando a eficiência na conversão energética (SOLIENS, 2019).
- 4 A película encapsulante (EVA) trata-se de um filme polimérico termoadesivo, composto por etileno-acetato de vinila (EVA – Ethylene Vinyl Acetate). Sua finalidade é proporcionar proteção eficaz às células fotovoltaicas contra degradação induzida por radiação ultravioleta, variações térmicas intensas e exposição à umidade. Paralelamente, sua estrutura translúcida preserva a permeabilidade da luz visível, garantindo a transmissão óptica ideal para ativação das células, o que sustenta o desempenho contínuo do sistema. A Figura 16 ilustra uma película encapsulante (SOLIENS, 2019).

Figura 16 – Película encapsulante (EVA)



Fonte: PORTAL SOLAR (2025).

- 5 O fundo protetor (BackSheet) é composto por uma estrutura laminada clara (Figura 17), posicionada na face traseira do módulo fotovoltaico. Seu objetivo é garantir a integridade

estrutural dos elementos internos do painel, particularmente as células solares, mediante a criação de uma barreira dielétrica que previne fugas de corrente e degradação ambiental. Além disso, sua tonalidade reflexiva contribui para a dissipação térmica, otimizando a estabilidade operacional do sistema (SOLIENS, 2019).

Figura 17 – Película encapsulante (EVA)



Fonte: PORTAL SOLAR (2025).

- 6 A caixa de junção (Figura 18) é considerado um "gabinete" que fica na parte posterior do painel solar onde as strings (células fotovoltaicas interconectadas em série) estão conectadas eletricamente. Dentro da caixa existem diodos de by-pass que vão garantir a segurança e o bom funcionamento do painel solar. As caixas de junção possuem cabos e conectores especiais (geralmente utilizam os conectores MC4 ou MC3) que serão utilizados para interconectar os painéis solares quando instalados (SOLIENS, 2019).

Figura 18 – Caixa de Junção

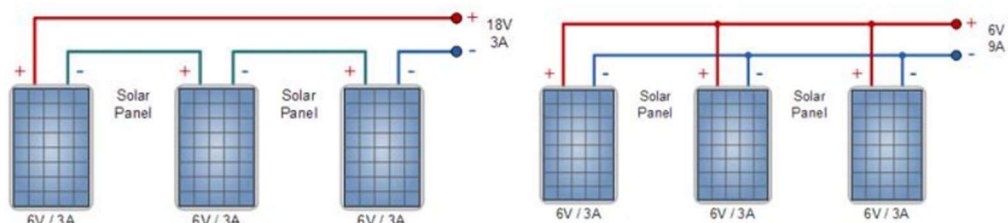


Fonte: PORTAL SOLAR (2025).

Os painéis solares possuem versatilidade em relação à onde podem ser instalados, a escolha do local para instalação dos painéis fotovoltaicos varia conforme a quantidade de módulos, a disponibilidade de espaço e o propósito do sistema. Em residências, os painéis fotovoltaicos são comumente instalados no telhado, o que evita a ocupação de áreas úteis destinadas aos moradores. Além disso, a instalação no telhado permite um melhor aproveitamento da irradiação solar, já que essa área geralmente está livre de sombreamentos e, geralmente, possui uma inclinação que favorece a captação de luz solar. Em casos onde o telhado não é viável, os painéis podem ser instalados em estruturas no solo, desde que haja espaço suficiente e condições adequadas de insolação (RUTHER, 2004).

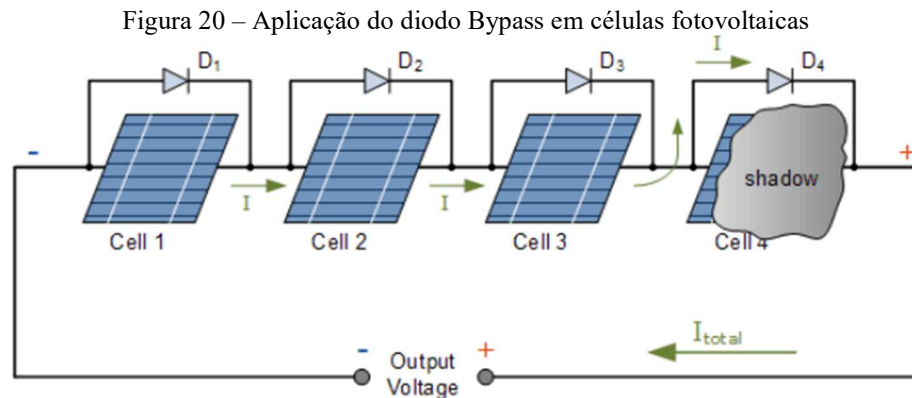
Para maximizar a eficiência do conjunto, os módulos podem ser associados em série ou em paralelo, conforme os requisitos técnicos e o propósito da instalação. No primeiro caso, a conexão em série eleva a tensão total pela soma dos valores individuais de cada unidade, preservando a corrente em um patamar único. Em contraste, a ligação paralela mantém a tensão constante em todo o sistema, mas acumula as correntes de cada painel, conforme exemplificado na Figura 19. Portanto, a definição da topologia ideal depende diretamente do entendimento claro das demandas operacionais do projeto (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 19 – Arranjos dos módulos fotovoltaicos



Fonte: ALTERNATIVE ENERGY TUTORIALS (2025).

Quando a superfície de um painel fotovoltaico é parcialmente obstruída seja por sombras, sujeira ou objetos, a redução na incidência luminosa provoca desequilíbrio no fluxo energético, limitando a corrente total do circuito. Essa condição induz o surgimento de pontos de sobreaquecimento (*hotspots*) em células específicas, comprometendo sua integridade física e podendo causar danos irreversíveis, como deformação do encapsulante (EVA) ou ruptura de conexões internas. Para neutralizar esse risco, diodos *Bypass* (Figura 20) são instalados em paralelo com grupos de células. Esses componentes redirecionam a corrente elétrica ao contornar as seções sombreadas, evitando que operem em polarização reversa e dissipem energia excessiva.



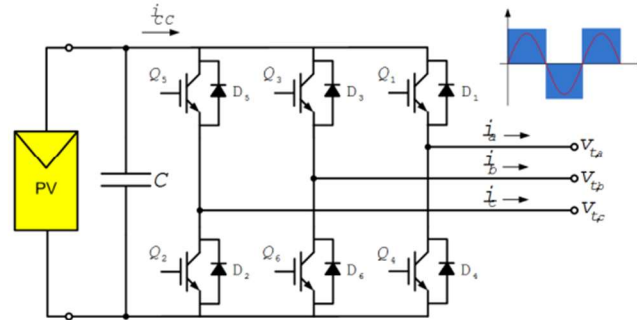
Fonte: ALTERNATIVE ENERGY TUTORIALS (2025).

2.7 Inversor fotovoltaico

O inversor fotovoltaico é um componente fundamental nos sistemas de energia solar. Ele converte a eletricidade em corrente contínua (CC), gerada pelos painéis fotovoltaicos, em corrente alternada (CA) com formato de onda senoidal. Essa adaptação é necessária porque a rede elétrica e os aparelhos domésticos funcionam exclusivamente com CA. Internamente, o equipamento usa circuitos eletrônicos com transistores IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistors*), que atuam como interruptores ultrarrápidos. Ao ligar e desligar de forma sincronizada, esses componentes reorganizam a corrente elétrica, transformando pulsos de CC em uma onda contínua e estável, pronta para abastecer residências ou ser injetada na rede de distribuição (PINHO; GALDINO, 2014).

A conversão elétrica ocorre por meio de um mecanismo preciso. Os transistores IGBT recebem sinais elétricos que determinam o momento exato de conduzir ou interromper a corrente. Esses pulsos controlados modificam gradualmente a tensão elétrica, criando uma curva suave e regular. O resultado é uma energia idêntica à fornecida pelas concessionárias, compatível com geladeiras, computadores e outros dispositivos. Dessa forma, o inversor não só torna viável o uso da eletricidade solar no dia a dia, mas também harmoniza sua produção com as exigências técnicas da instalação elétrica convencional. O funcionamento do inversor fotovoltaico está ilustrado na Figura 21 (PINHO; GALDINO, 2014).

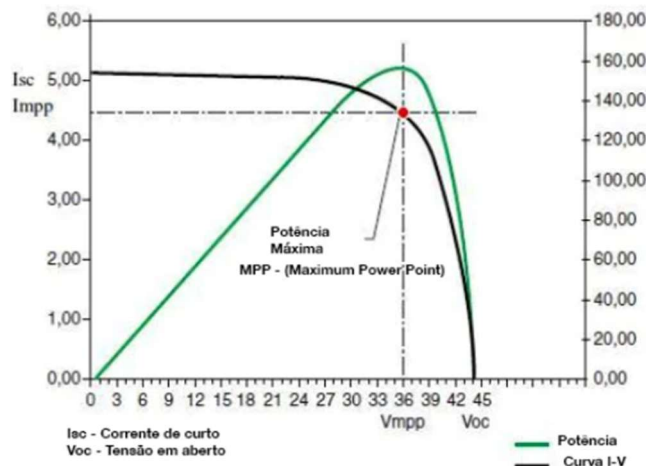
Figura 21 – Funcionamento de um inversor fotovoltaico



Fonte: ALMEIDA (2011).

Além de transformar a energia de corrente contínua (CC) em alternada (CA), o inversor fotovoltaico em sistemas solares tem uma peça chave: o MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), ou rastreador de potência máxima. Esse mecanismo busca o ponto exato onde a multiplicação entre tensão e corrente gera a maior potência possível. A tensão, por exemplo, sobe até um pico e depois cai, enquanto a corrente aumenta até certo ponto e só decai depois que a tensão atinge seu máximo. O MPPT, conforme Figura 22, entra justamente para "pegar" esse momento ideal antes que a potência comece a cair, garantindo que a energia gerada não seja desperdiçada. É como se ele ajustasse o sistema em tempo real para extrair o máximo dos painéis, mesmo com variações de luz ou temperatura (NAZ, 2025).

Figura 22 – Gráfico com o máximo Ponto de Potência



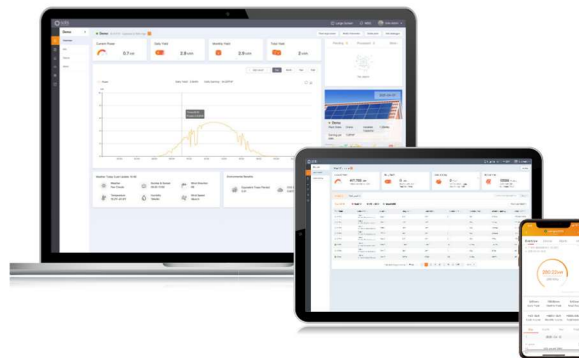
Fonte: SOLFACIL (2025).

O inversor fotovoltaico conectado à rede, também chamado de “grid tie”, trabalha em tempo real com o sistema da concessionária, usando um recurso chamado anti-ilhamento (*anti-islanding*). O anti-ilhamento funciona como um "desligamento de emergência" automático quando houver queda de energia por parte da concessionária. Isso evita que o sistema

fotovoltaico continue injetando eletricidade na rede durante uma falha, protegendo os técnicos que fazem reparos e impedindo danos aos equipamentos. Quando a geração dos painéis solares é maior que o consumo da casa ou empresa, o excesso vai direto para rede elétrica, gerando créditos energéticos para o usuário. Por outro lado, se a produção dos painéis não cobre a demanda (em dias nublados, por exemplo), a rede pública completa o restante. À noite, quando não há geração solar, o inversor, de forma automática, desliga completamente para evitar desperdício e só religa quando os painéis voltarem a captar luz. Quando a rede da concessionária se normaliza após uma queda, o inversor reconecta o sistema em segundos, garantindo que a energia solar volte a ser usada sem interrupções (SANTOS; BRENDA, 2020).

A tecnologia atual, dos inversores fotovoltaicos, nos permite acompanhar a geração de energia e os parâmetros elétricos através de aplicativos no celular ou em computadores. Dessa forma, mesmo a distância o usuário consegue ver como está o desempenho do sistema, identificando quedas de produção ou sinais de falhas. A Figura 23 mostra um exemplo de um monitoramento de um sistema fotovoltaico.

Figura 23 – Aplicativo para monitoramento do sistema fotovoltaico



Fonte: SOLIS (2024).

2.8 Proteções e String Box

Os dispositivos de proteção são obrigatórios para garantir a segurança do sistema. Os dispositivos mais comuns são os disjuntores, protetores contra surtos (DPS) e os fusíveis. Os disjuntores desligam automaticamente o circuito em situações de curto-circuito ou sobrecarga, evitando danos. Eles são ajustados para uma corrente específica, calculada com base nas características da instalação, e possuem classes (B, C, D) que definem sua velocidade de atuação conforme o tipo de carga conectada (CAMARGO, 2017).

Já o DPS age contra picos repentinos de tensão, como os causados por raios. Conectado em paralelo ao circuito, ele absorve essas sobretensões antes que afetem os equipamentos. A Figura 24 mostra um exemplo, com especificações como tensão máxima suportada (até 1000 V em CC) e corrente de descarga (45 kA), valores adequados para residências. Diferente do disjuntor, que interrompe o fluxo, o DPS redireciona a energia excedente para o aterramento (CAMARGO, 2017).

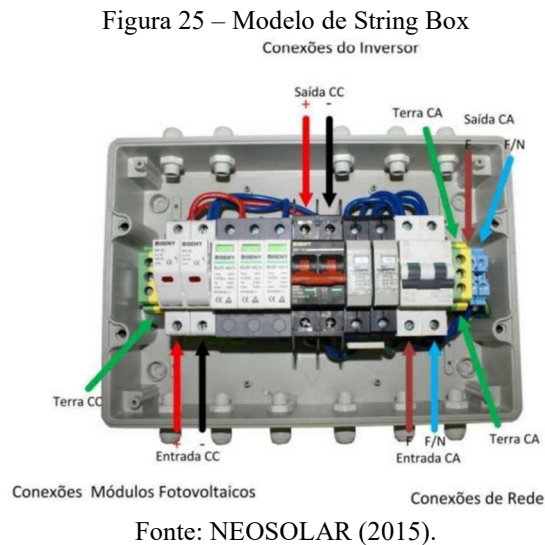
Figura 24 – Dispositivo de proteção contra surtos (DPS)



Fonte: TUPAN (2025).

Em alguns projetos, também são usados fusíveis como camada extra de proteção. Eles queimam quando a corrente ultrapassa certo limite, interrompendo o circuito. O tempo de resposta depende da intensidade da corrente: quanto maior, mais rápido o fusível derrete, graças ao calor gerado pela resistência do material (efeito Joule) (CAMARGO, 2017).

Na String Box é reunido todos os dispositivos de proteção citados acima. Ela funciona como um invólucro no qual conjuntos de painéis solares são conectados em paralelo ao inversor fotovoltaico, servindo como ponto central para proteção e controle do sistema fotovoltaico, além de conectar os cabos. Dentro dela, os circuitos de corrente alternada (CA) e contínua (CC) são separados e identificados, evitando misturas perigosas nos cabos durante manutenções. A Figura 25 mostra um modelo típico, com chaves seccionadoras pra desligar circuitos, fusíveis e disjuntores que acionam em caso de sobrecarga e DPS que protegem contra raios ou picos de energia.



2.9 Medidor de energia bidirecional

Em SFCR, o medidor bidirecional (Figura 26) é um dispositivo essencial para sistemas solares, pois registra tanto a energia consumida da rede quanto a gerada e injetada nela. O medidor bidirecional utiliza sensores capazes de identificar a direção do fluxo energético, essa detecção é feita por meio de sensores de efeito Hall ou shunt resistivos, que medem a intensidade e a polaridade da corrente. Quando os painéis solares produzem mais energia do que o imóvel consome, a corrente inverte seu sentido, gerando um sinal elétrico negativo nos sensores. Essa variação é convertida em dados que indicam o excedente enviado à rede, enquanto correntes positivas representam o consumo tradicional (OLIVEIRA, 2016).

Esses sensores são integrados a um sistema de processamento que calcula em tempo real o saldo entre energia consumida e injetada. Esse sistema garante que a concessionária, através do Sistema de Compensação de Energia (SCEE), calcule o excedente de forma precisa. Além disso, os dados são transmitidos para plataformas digitais (Figura 23), permitindo ao usuário monitorar detalhes como picos de geração e horários de maior consumo (OLIVEIRA, 2016).

Figura 26 – Funcionamento de um medidor bidirecional



Fonte: SOLFACIL (2024).

2.10 Sistema de Compensação de Energia Elétrica

O Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), regulado pela Lei 14.300/2022 e pela Resolução Normativa 1.059/2023 da ANEEL, permite que consumidores gerem energia renovável (como a fotovoltaica) e troquem excedentes com a rede elétrica. A legislação atual divide a geração distribuída em microgeração (até 75 kW) e minigeração (75 kW a 5 MW), com créditos válidos por 60 meses (5 anos). O funcionamento do SCEE baseia-se na compensação de créditos: quando os painéis solares produzem mais energia do que o imóvel consome, o excedente é injetado na rede, gerando créditos que abatem o consumo em períodos de baixa produção. Esses créditos podem ser usados na mesma unidade, em outras do mesmo titular (CPF/CNPJ) ou em condomínios, desde que cadastradas (ANEEL, 2016).

Para integrar o SCEE, a unidade consumidora deve solicitar acesso à rede, aprovar projetos técnicos e passar por vistoria da concessionária. Após homologação, o sistema fotovoltaico começa a gerar créditos, que expiram em 5 anos se não utilizados. Esse modelo democratiza o acesso à energia renovável, reduz custos e diminui a dependência de fontes poluentes.

3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Este capítulo tem como objetivo apresentar a teoria e os cálculos utilizados para dimensionar o sistema fotovoltaico, visando suprir as necessidades de energia elétrica ao longo dos próximos anos e atender a possíveis aumentos de até 20% no consumo energético do cliente. O dimensionamento seguirá as orientações estabelecidas na Resolução Normativa ANEEL nº 1.000/2021 e na Seção 3.7 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST).

O cliente foco deste estudo de caso é uma unidade consumidora residencial, situada no município de Barcarena, no estado do Pará, atendida pela concessionária Equatorial Energia. A residência possui uma estrutura civil adequada para suportar o sistema fotovoltaico. O telhado é do tipo duas águas, com área total de 89,01 m² (sendo 44,50 m² em cada lado), e é composto por telhas de fibrocimento do tipo ondulada. O cliente encontra-se em condições favoráveis para o máximo rendimento do sistema, uma vez que um dos lados do telhado está voltado para o norte (no hemisfério Sul o sol nasce no Leste, sobe se inclinando ao Norte e se põe no Oeste), e não há pontos de sombreamento nas proximidades.

Conforme Pino e Galdino (2014), para dimensionar o sistema fotovoltaico, é necessário definir e levantar as seguintes informações: irradiação solar local, levantamento do consumo de energia, definição e dimensionamento dos módulos solares e dimensionamento e definição do inversor. Com base nessas informações, será possível mensurar o potencial de geração do sistema, tanto mensal quanto anual.

3.1 Irradiação solar local

A primeira etapa para o dimensionamento do projeto fotovoltaico consiste em definir o potencial energético da região de onde a unidade consumidora está situada. Com base na localização do cliente, verificou-se que ele se encontra nas seguintes coordenadas geográficas: latitude -1,527877 e longitude -48,684297.

Ao inserir essas coordenadas no site da CRESESB – Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sergio de S. Brito, é possível definir, por meio do banco de dados “SunData v3.0”, a irradiação solar diária mensal no município de Barcarena, indicando a inclinação ideal e os meses com a menor e a maior incidência de energia solar. O site em questão é uma importante fonte de consulta para projetistas e engenheiros, pois conta com um banco de

dados preciso e atualizado, administrado pelo CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, em conjunto com o MME – Ministério de Minas e Energia. Conforme os dados da Figura 27, a inclinação ideal dos painéis fotovoltaicos para maximizar a irradiação solar anual em Barcarena (PA) é de 3° em relação ao Norte geográfico (longitude) e 10° de inclinação em relação ao plano horizontal (latitude). Essa configuração resulta em um melhor aproveitamento, com uma irradiação média anual de 4,88 kWh/m².dia. Verifica-se setembro apresentando a maior incidência solar (pico de geração) e janeiro a menor.

Figura 27 – Quadro com a irradiação solar diária no município de Barcarena

Estação: Barcarena
Município: Barcarena , PA - BRASIL
Latitude: 1,501° S
Longitude: 48,649° O
Distância do ponto de ref. (1,527877° S; 48,684297° O) :4,9 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	4,43	4,43	4,49	4,60	4,73	4,95	5,05	5,30	5,39	5,25	5,16	4,70	4,87	,96
✓	Ângulo igual a latitude	2° N	4,38	4,40	4,48	4,63	4,79	5,03	5,13	5,34	5,39	5,22	5,10	4,64	4,88	1,01
✓	Maior média anual	3° N	4,35	4,38	4,48	4,64	4,81	5,06	5,16	5,36	5,40	5,20	5,07	4,61	4,88	1,04
✓	Maior mínimo mensal	5° S	4,54	4,49	4,49	4,52	4,57	4,74	4,85	5,16	5,34	5,30	5,29	4,85	4,85	,86

Fonte: CRESESB (2025).

O valor indicado de maior média anual (igual a 4,88) corresponde às Horas de Sol a Pico (HSP) médias ao longo do ano, pois representa o número médio de horas em que a radiação solar se encontra com o valor de 1 kW/m².dia. Saber o valor médio da HSP é fundamental para definir a potência total do sistema fotovoltaico, pois, segundo Galdino e Pinho (2014), ela indica o comportamento das condições climáticas e atmosféricas na região. Esse parâmetro é indispensável para a definição da eficiência energética do sistema e da quantidade de módulos necessários para atender à unidade consumidora em estudo.

3.2 Levantamento do consumo de energia

A segunda etapa consiste em identificar a quantidade de energia mensal necessária para manter as atividades da unidade consumidora. Para isso, foi solicitado o envio da última fatura de energia (Anexo A). Ao analisar o documento, é possível extrair diversas informações importantes tanto para o dimensionamento quanto para a análise econômica do projeto fotovoltaico. Tais informações incluem: o histórico de consumo de energia nos últimos 12 meses, o tipo de ligação da residência, a modalidade tarifária e o valor da tarifa no período de emissão da fatura. A Figura 28 sintetiza todos esses dados.

Figura 28 – Quadro com os dados levantados da conta de energia

Localidade	Barcarena/PA
Classe	Residencial pleno
Modalidade tarifária	B1
Tipo de ligação	Bifásico
Tarifa com tributos por kWh (taxa convencional)	R\$ 1,277477
HISTÓRICO DOS ÚLTIMOS 12 MESES (kWh/mês)	
AGO/23	323
SET/23	381
OUT/23	399
NOV/23	475
DEZ/23	354
JAN/24	344
FEV/24	340
MAR/24	317
ABR/24	358
MAI/24	417
JUN/24	511
JUL/24	532
TOTAL	4.751
MÉDIA	396

Fonte: AUTOR (2025).

Esse cliente paga, em média, R\$ 600,76 (com encargos e impostos) por mês na fatura de energia. Conforme Pinho e Galdino (2014), o consumo total apresentado não reflete precisamente a quantidade utilizada pela unidade consumidora, pois a concessionária incrementa uma taxa de disponibilidade mínima conforme o tipo de ligação: 30 kWh para monofásico, 50 kWh para bifásico e 100 kWh para trifásico. Descontando as taxas de disponibilidade do consumo médio do Quadro 1, o valor do consumo médio real será de 346 kWh/mês. Além de encontrar o consumo médio real, é necessário calcular o consumo médio real diário em Wh/dia. Para isso, será utilizada a Equação 1:

$$C_{md} = \frac{C_{mm}}{30} * 1000 \quad (1)$$

Sendo:

C_{md} : consumo médio diário (Wh/dia)

C_{mm} : consumo médio mensal (kWh/mês)

Substituindo os valores na Equação 1:

$$C_{md} = \frac{346}{30} * 1000 = 11.533,33 \text{ Wh/dia}$$

3.3 Definição e dimensionamento dos módulos fotovoltaicos

A terceira etapa consiste em calcular a potência total do sistema fotovoltaico, definir qual será o painel solar utilizado, a quantidade necessária e a área total dos módulos para que a geração seja superior à energia consumida. Segundo Pinho e Galdino (2014), a potência de um microgerador solar pode ser definida pela Equação 2:

$$P_{FV} = \frac{C_{md}}{\frac{TD}{HSP_m}} \quad (2)$$

Sendo:

P_{FV} : potência de pico da unidade geradora (Wp)

C_{md} : consumo médio diário de energia (Wh/dia)

HSP_m : Horas de Sol a Pico média diária anual (h)

TD : fator de performance do sistema

O fator de performance do sistema relaciona o desempenho real com o desempenho teórico máximo. O desempenho real é uma variável que sofre interferências de diversos fatores, como sombreamentos, temperatura do ambiente, sujeira nos painéis, descasamentos entre as placas, resistências nos cabos elétricos, entre outros. Portanto, para efeito deste estudo, será considerado que o sistema fotovoltaico terá um rendimento, conforme convenções, de 80%,

sendo 20% de perdas totais. De posse das informações de consumo médio diário em Wh/dia e das Horas de Sol a Pico médio diário anual em h, pode-se, por meio da Equação 2, calcular a quantidade necessária em Wp para satisfazer a demanda de energia elétrica da unidade consumidora.

$$P_{FV} = \frac{\frac{11.533,33}{0,8}}{4,88} = 2.954,23 \text{ Wp}$$

Mesmo o cliente indicando que não pretende fazer expansão da sua carga instalada e consumo de energia nos próximos anos, é fundamental garantir uma margem maior de geração para casos em que o cliente mude de ideia ou para suprir meses de menor irradiação solar. Portanto, para esse sistema, será considerada uma margem de 20% no valor da potência calculada pela Equação 2. A Equação 3 demonstra o resultado:

$$P_{FVE} = P_{FV} * 1,2 = 3.545,07 \text{ Wp} \quad (3)$$

Sendo:

P_{FVE} : potência de pico da unidade geradora com expansão (Wp)

Para a definição do módulo fotovoltaico que será utilizado no sistema, diversos fatores precisam ser considerados como: custos, eficiência do módulo, tecnologia das células, potência nominal, garantias e etc. Para este estudo, foi selecionado o painel solar do modelo Jinko JKM555M-72HL4 TIGER NEO (manual disponível no Anexo B), do tipo silício monocristalino, com potência de 555 Wp e eficiência de 21,48%, que se destaca no mercado por seu alto desempenho em condições reais de operação, pela relevância de sua marca e pela tecnologia avançada. A Figura 29 demonstra as características do módulo.

Pode-se utilizar a Equação 4 para calcular a quantidade de módulos necessários para o sistema fotovoltaico (FOTAIC, 2022):

$$N_{módulos} = \frac{P_{FVE}}{P_{módulo}} \quad (4)$$

Sendo:

$N_{módulos}$: número de módulos solares

$P_{módulo}$: potência de pico máximo do módulo (Wp)

Portanto, da Equação 4, tem-se:

$$N_{módulos} = \frac{3.545,07}{555} = 6,38 \text{ módulos}$$

Com o objetivo de garantir a eficiência do sistema fotovoltaico e aumentar sua autonomia, serão considerados 7 painéis solares.

Figura 29 – Especificações do módulo fotovoltaico

SPECIFICATIONS										
Module Type	JKM540M-72HL4		JKM545M-72HL4		JKM550M-72HL4		JKM555M-72HL4		JKM560M-72HL4	
	JKM540M-72HL4-V	JKM545M-72HL4-V	JKM545M-72HL4-V	JKM550M-72HL4-V	JKM550M-72HL4-V	JKM555M-72HL4-V	JKM555M-72HL4-V	JKM560M-72HL4-V	JKM560M-72HL4-V	JKM560M-72HL4-V
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	540Wp	402Wp	545Wp	405Wp	550Wp	409Wp	555Wp	413Wp	560Wp	417Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	40.70V	38.08V	40.80V	38.25V	40.90V	38.42V	40.99V	38.59V	41.09V	38.69V
Maximum Power Current (Imp)	13.27A	10.55A	13.36A	10.60A	13.45A	10.65A	13.54A	10.70A	13.63A	10.77A
Open-circuit Voltage (Voc)	49.42V	46.65V	49.52V	46.74V	49.62V	46.84V	49.72V	46.93V	49.82V	47.02V
Short-circuit Current (Isc)	13.85A	11.19A	13.94A	11.26A	14.03A	11.33A	14.12A	11.40A	14.21A	11.48A
Module Efficiency STC (%)	20.90%		21.10%		21.29%		21.48%		21.68%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1000/1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	25A									
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									

*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

Fonte: JINKO SOLAR (2025)

Deve-se verificar se os painéis possuem a possibilidade de serem instalados no lado voltado para o norte, garantindo a máxima eficiência para o sistema. As dimensões dos painéis, conforme o manual, são: 2278 × 1134 × 35 mm. Portanto, a área de cada módulo é de 2,58 m². Multiplicando esse valor pela quantidade total de painéis solares, tem-se que a área necessária para comportar todos os módulos fotovoltaicos será de 18,06 m². Sendo a área total de cada lado do telhado é igual a 44,5 m², confirma-se que o telhado voltado para o norte possui espaço suficiente para comportar os 7 painéis solares.

3.4 Definição e dimensionamento do inversor fotovoltaico

Segundo Pinho e Galdino (2014), o correto dimensionamento do inversor deve levar em consideração a potência do gerador fotovoltaico, as características elétricas e ambientais do sistema fotovoltaico, a credibilidade do fabricante, as garantias do produto, sua capacidade produzida acumulada e a facilidade de encontrar assistências técnicas na região. A definição da potência do inversor deve ser feita por meio do fator de dimensionamento de inversores (FDI), conforme a Equação 5. O FDI é um parâmetro essencial para evitar que o inversor seja subdimensionado, o que ajusta o seu Seguimento do Ponto de Potência Máxima (SPPM) de forma a limitar a potência do gerador solar, conseqüentemente aumentando as perdas de geração de energia, ou superdimensionado, o que pode causar aumento dos custos do projeto e na perda de eficiência do inversor.

$$FDI = \frac{P_{Nca}}{P_{FV}} \quad (5)$$

Sendo:

FDI : fator de dimensionamento do inversor

P_{Nca} : potência nominal do inversor em CA (W)

P_{FV} : potência de pico total dos módulos fotovoltaicos (Wp)

Portanto, conforme Pinho e Galdino (2014), o FDI deve ser definido por meio de diversos cálculos (condições do ambiente, como temperatura e radiação solar, inclinação e orientação dos módulos, entre outros), de forma a encontrar o melhor custo-benefício. Como o foco deste estudo não é demonstrar como esse cálculo deve ser feito, considera-se o que as literaturas recomendam: 0,75 para o limite inferior e 1,05 para o limite superior. Logo, pode-se reescrever a Equação 6 da seguinte forma:

$$FDI * P_{FV} = P_{Nca} \quad (6)$$

$$0,75 * P_{FV} < P_{Nca} < P_{FV} * 1,05$$

Considerando o arredondamento feito nas quantidades de módulos necessários para o correto dimensionamento do sistema, o potencial de geração será determinado pela Equação 7:

$$P_{FV} = N_{módulos} * P_{FVE} \quad (7)$$

$$P_{FV} = 7 * 555$$

$$P_{FV} = 3.885 \text{ Wp}$$

Substituindo na Equação 6:

$$0,75 * 3.885 < P_{Nca} < 3.885 * 1,05$$

$$2.913,75 \text{ W} < P_{Nca} < 4.079,25 \text{ W}$$

Com base nesses parâmetros, o inversor escolhido será o Growatt MIC-3000TL-X (manual disponível no Anexo C), que tem como potência nominal de saída CA igual a 3 kWp, conforme a Figura 30.

Figura 30 – Especificações do inversor

Ficha de dados		MIC 3000TL-X
Dados de entrada		
Máxima potência fotovoltaica recomendada (para módulo STC)		4200W
Máxima tensão CC		550V
Tensão de partida		80V
Faixa de tensão MPPT/Tensão nominal		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		3000W
Potência aparente máxima de CA		3000VA
Máxima corrente de saída		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		97.6%
Euro-eta		97.1%

Fonte: GROWATT (2025).

Com a definição do inversor e dos painéis solares, os principais componentes do sistema já estão dimensionados.

3.5 Geração mensal e anual

Com os valores da irradiância solar diária mês a mês e com a potência de pico total dos módulos, pode-se ter uma estimativa de quanto será a geração mensal e anual desse sistema fotovoltaico. Conforme Messenger e Ventre (2010), a geração mensal e anual de energia em

sistemas fotovoltaicos pode ser calculada pelas Equações 8 e 9, respectivamente. A Tabela 2 ilustra esses valores.

$$E_{mês} = P_{FV} * TD * HSP * n_{mês} \quad (8)$$

$$E_{ano} = P_{FV} * TD * HSP_m * 365 \quad (9)$$

Tabela 2 – Estimativa de geração, em kWh, mensal e anual

Mês	Dias ($n_{mês}$)	Potência do gerador fotovoltaico (kW)	HSP (h)	Eficiência do sistema 80 % (TD)	Energia mensal gerada (kWh)
Janeiro	31	3,885	4,35	0,80	419,11
Fevereiro	28	3,885	4,38	0,80	381,16
Março	31	3,885	4,48	0,80	431,63
Abril	30	3,885	4,64	0,80	432,63
Maio	31	3,885	4,81	0,80	463,43
Junho	30	3,885	5,06	0,80	471,79
Julho	31	3,885	5,16	0,80	497,15
Agosto	31	3,885	5,36	0,80	516,42
Setembro	30	3,885	5,40	0,80	503,49
Outubro	31	3,885	5,20	0,80	501,01
Novembro	30	3,885	5,07	0,80	472,72
Dezembro	31	3,885	4,61	0,80	444,16
Total gerado nos 12 meses do ano (kWh)					5.534,75

Fonte: AUTOR (2025).

Portanto, será esperado que, anualmente, o sistema fotovoltaico gere 5.534,75 kWh. Esse valor sofrerá variação devido a diversos fatores, tais como condições climáticas do ano, frequência e qualidade das manutenções, entre outros. Dessa forma, conforme o manual do fabricante, é esperado que, até o final da vida útil dos painéis (25 anos), o sistema já tenha perdido 20% da sua capacidade de geração.

4 ANÁLISE ECONÔMICA

Este capítulo visa analisar a viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico conectado à rede que pode ser determinada por meio da análise do tempo de retorno do investimento (*payback*). Esse cálculo considera a relação entre a energia gerada pelo sistema e os custos envolvidos, incluindo despesas iniciais de instalação e manutenção ao longo de sua vida útil. No presente estudo, adotou-se um horizonte temporal de 25 anos, alinhado à garantia linear do fabricante Jinko Solar, que assegura um rendimento mínimo de 84% da capacidade original do sistema durante esse período (detalhes disponíveis no Anexo B).

Conforme Guiducci (2012), o cálculo do *payback* de um investimento pode ser realizado por meio da análise do fluxo de caixa, que representa as entradas e saídas financeiras ao longo do tempo, permitindo identificar períodos de saldo positivo ou negativo. No caso de um sistema fotovoltaico, as entradas correspondem à economia gerada pela redução no consumo de energia elétrica da rede convencional, enquanto as saídas englobam os custos iniciais de instalação e as despesas periódicas de manutenção ou troca de componentes. Para definir esse fluxo, é necessário levantar três elementos principais: o investimento total requerido, a geração anual de energia do sistema, e o valor da tarifa de energia vigente, que determina a economia mensal.

4.1 Investimento total requerido

O investimento total requerido necessário para implantação do sistema fotovoltaico abrange três itens principais: custo inicial de instalação, custos de manutenção preventiva e troca do inversor. Embora haja uma percepção comum de que sistemas fotovoltaicos dispensam manutenção, é essencial alocar recursos periódicos para garantir que o sistema opere com eficiência máxima.

4.1.1 Investimento inicial

O custo inicial de instalação refere-se aos gastos necessários para a implantação física e homologação do sistema. Esse valor corresponde à soma de dois componentes:

- 1 Custos com componentes físicos: além dos painéis solares e do inversor fotovoltaico, incluem-se acessórios de fixação, string box de proteção e cabos elétricos, os quais demandam dimensionamento adequado para garantir segurança à unidade consumidora, ao sistema e eficiência na geração de energia. Diante disso, o mercado disponibiliza kits pré-dimensionados com todos os equipamentos necessários, conforme especificações técnicas do projeto. O kit selecionado (Tabela 3) totaliza R\$ 7.699,40, valor obtido por meio de cotação com o melhor custo-benefício.

Tabela 3 – Kit fotovoltaico

Componentes	Quantidade	Valor
PAINEL JINKO 555 Wp JKM555M-72HL4 TIGER NEO	7	4.432,16
Inversor Solar On Grid Growatt Mic3000tl-x 3kw Monofasico 220v 1mppt	1	1.799,91
STRING BOX CLAMPER Solar SB 1040V 20A 2E/1S PC	1	469,00
PERFIL SUPORTE SMART 2,40M	7	259,95
GRAMPO INTERMEDIARIO SMART	10	53,23
GRAMPO TERMINAL SMART	8	36,53
PARAFUSO PRISIONEIRO M10X200 (FIBROMADEIRA)	12	125,86
JUNCAO U DO PERFIL	4	43,16
CABO VERMELHO 4MM2	60	222,06
CABO PRETO 4MM2	60	222,03
KIT CONECTOR 2 PARES	2	35,51
Total		7.699,40

Fonte: AUTOR (2025).

- 2 Custo com serviços: detalhadas na Tabela 4, englobam projeto, instalação e homologação, totalizando R\$ 2.694,79.

Tabela 4 – Serviços

Serviço	Valor
Projeto do sistema fotovoltaico	538,95
Instalação do sistema fotovoltaico	1.847,85
Homologação com a concessionária	307,97
Total	2.694,79

Fonte: AUTOR (2025).

A consolidação desses valores é apresentada na Tabela 5, que sintetiza o investimento inicial total necessário para viabilizar o SFCR. Ressalta-se que é importante a qualidade dos componentes e a expertise da equipe de instalação para minimizar custos futuros com reparos ou substituições prematuras de equipamentos.

Tabela 5 – Investimento inicial total

Itens	Valor (R\$)
Kit fotovoltaico	7.699,40
Serviços para instalação e homologação	2.694,79
Total	10.394,19

Fonte: AUTOR (2025).

O investimento inicial para a implantação do SFCR será de R\$ 10.394,19. Considerando que a unidade consumidora possui recursos financeiros reservados para fazer um investimento imediato, tem-se como melhor opção a realização do pagamento integral à vista, eliminando custos adicionais vinculados a financiamentos. Essa estratégia evita encargos financeiros, como juros e taxas administrativas, que podem elevar o desembolso total em até 100% do valor inicial. Além disso, a liquidação imediata do custo exclui variáveis associadas a riscos de mercado e flutuações nas taxas de crédito.

4.1.2 Manutenções

A manutenção preventiva abrange atividades periódicas como a limpeza dos módulos (para remoção de folhas, galhos e fezes de aves), higienização do inversor, verificação do aperto das conexões elétricas e inspeção de componentes mecânicos (PORTAL SOLAR; 2025). Embora tais intervenções possam ser executadas pelo proprietário, recomenda-se a contratação de profissionais qualificados, tanto para garantir a segurança quanto para preservar a eficiência do sistema, já que práticas inadequadas podem reduzir a geração energética em até 15% (PINHO; GALDINO, 2014). Conforme Liberty Energia (2025), o custo anual de manutenção corresponde a aproximadamente 0,5% do investimento inicial (que corresponde a R\$ 51,97/ano neste estudo), valor referencial que pode variar conforme condições ambientais e a complexidade do sistema. Optou-se por manter esse custo fixo, sem reajustes pelo Índice de Preços ao Consumido Amplo — IPCA, em linha com a abordagem conservadora adotada por Guiducci (2012) para simplificar a análise de viabilidade econômica.

4.1.3 Troca do inversor

O inversor é um componente crítico do sistema fotovoltaico. Embora os painéis solares tenham uma vida útil de 25 a 30 anos, o inversor geralmente requer substituição após 10 a 15 anos, devido ao desgaste natural de seus componentes eletrônicos e às condições de operação (PINHO; GALDINO, 2014). A sua vida útil é influenciada por diversos fatores, como as condições de temperatura e umidade, qualidade da energia elétrica da rede, qualidade do equipamento e outros aspectos relacionados ao uso e manutenção. Portanto, considerando o cenário mais pessimista, será considerado que o inversor precisará ser substituído a cada 10 anos. Atualmente, o preço do inversor está em torno de R\$ 1.799,91. No entanto, para estimar os custos de substituição em 10 anos e 20 anos, será necessário considerar o impacto da inflação. Para isso, será utilizada a Equação 10 (BLANK; TARQUIN, 2018):

$$F = P * (1 + i)^n \quad (10)$$

Sendo:

F : valor futuro (R\$)

P : valor atual (R\$)

i : taxa de inflação (%/ano)

n : período (em anos)

A taxa de inflação considerada será o acumulado dos últimos 12 meses do IPCA, conformes dados fornecidos pelo IBGE e disponibilizados pelo site DEBIT (2025). Com base no mês de referência de fevereiro de 2025, a taxa acumulada foi de 5,05%. Assim, para o cenário de 10 anos, tem-se:

$$F_{10 \text{ anos}} = 1.799,91 * \left(1 + \frac{5,05}{100}\right)^{10}$$

$$F_{10 \text{ anos}} = R\$ 2.945,85$$

E para o cenário de 20 anos, tem-se:

$$F_{20 \text{ anos}} = 1.799,91 * \left(1 + \frac{5,05}{100}\right)^{20}$$

$$F_{20 \text{ anos}} = R\$ 4.821,38$$

Logo, o custo estimado para a substituição do inversor será de R\$ 2.945,85 após 10 anos e R\$ 4.821,38 após 20 anos.

4.1.4 Resultado

De posse das informações referentes aos investimentos necessários para instalação e conservação do sistema fotovoltaico, a Tabela 6 sintetiza os custos ao longo de 25 anos, que corresponde à vida útil dos módulos. Essa análise considera a geração intermitente de energia do sistema ao longo desse período.

Tabela 6 – Investimento total requerido

Ano	Investimento inicial	Manutenções	Troca do inversor	Total
0	10.394,19	0,00	0,00	10.394,19
1	0,00	51,97	0,00	51,97
2	0,00	51,97	0,00	51,97
3	0,00	51,97	0,00	51,97
4	0,00	51,97	0,00	51,97
5	0,00	51,97	0,00	51,97
6	0,00	51,97	0,00	51,97
7	0,00	51,97	0,00	51,97
8	0,00	51,97	0,00	51,97
9	0,00	51,97	0,00	51,97
10	0,00	51,97	2.945,85	2.997,82
11	0,00	51,97	0,00	51,97
12	0,00	51,97	0,00	51,97
13	0,00	51,97	0,00	51,97
14	0,00	51,97	0,00	51,97
15	0,00	51,97	0,00	51,97
16	0,00	51,97	0,00	51,97
17	0,00	51,97	0,00	51,97
18	0,00	51,97	0,00	51,97
19	0,00	51,97	0,00	51,97
20	0,00	51,97	4.821,38	4.873,35
21	0,00	51,97	0,00	51,97
22	0,00	51,97	0,00	51,97
23	0,00	51,97	0,00	51,97
24	0,00	51,97	0,00	51,97
25	0,00	51,97	0,00	51,97
Total	10.394,19	1.299,25	7.767,23	19.460,67

Fonte: AUTOR (2025).

Conforme a Tabela 6, o investimento total requerido necessário para o sistema fotovoltaico ao longo de 25 anos é estimado em R\$ 19.460,67. Esse valor é uma projeção conservadora e não inclui custos adicionais decorrentes de eventos imprevisíveis, como queima de módulos, quebras ou furtos.

4.2 Geração de energia total estimada

Segundo Ruther (2004), diversos fatores impactam o desempenho energético de um sistema fotovoltaico, sendo a flutuação da irradiação solar local o elemento mais significativo. Dessa forma, estimar a capacidade de geração ao longo de um período prolongado, como os 25 anos que são foco desse estudo, se transforma em uma tarefa de previsão. Portanto, será necessário considerar que não haverá variações na irradiação solar local ao longo de tempo. No entanto, é importante considerar a perda de eficiência dos módulos fotovoltaicos ao longo dos anos.

De acordo com o fabricante dos módulos fotovoltaicos (Jinko Solar), os painéis solares possuem uma perda de eficiência de 0,55% ao ano, com uma perda inicial de 2% no primeiro ano. Isso significa que, após 25 anos, é esperado que o sistema mantenha uma eficiência mínima de 84,8% em relação à sua capacidade original de geração. Para calcular a geração anual, considerando essa perda de eficiência, utiliza-se a Equação 11:

$$E_{ano_n} = 0,98 * E_{ano} * \left(1 - \frac{0,55}{100}\right)^{n-1} \quad (11)$$

Sendo:

E_{ano_n} : geração de energia no ano n (kWh)

A Tabela 7 apresenta a geração anual estimada ao longo dos 25 anos de vida útil do sistema, considerando a perda de eficiência anual de 0,55%.

Tabela 7 – Geração estimada ao longo de 25 anos

Ano	Redução de eficiência (%)	Geração de energia anual (kWh)
1	2,00	5.424,06
2	0,55	5.394,22
3	0,55	5.364,55
4	0,55	5.335,05
5	0,55	5.305,71
6	0,55	5.276,53
7	0,55	5.247,50
8	0,55	5.218,64
9	0,55	5.189,94
10	0,55	5.161,40
11	0,55	5.133,01
12	0,55	5.104,78
13	0,55	5.076,70
14	0,55	5.048,78
15	0,55	5.021,01
16	0,55	4.993,39
17	0,55	4.965,93
18	0,55	4.938,62
19	0,55	4.911,46
20	0,55	4.884,44
21	0,55	4.857,58
22	0,55	4.830,86
23	0,55	4.804,29
24	0,55	4.777,87
25	0,55	4.751,59
Total	15,20	127.017,91

Fonte: AUTOR (2025).

Conforme a Tabela 7, estima-se que, ao longo dos 25 anos de vida útil dos painéis solares, o sistema gere um total de 127.017,91 kWh.

4.3 Tarifa de energia elétrica

A tarifa de energia elétrica é um elemento fundamental para entender a viabilidade econômica do sistema fotovoltaico, pois é um dos itens necessário para se encontrar a receita do projeto. Ela representa o valor pago pelo consumidor por cada quilowatt-hora (kWh) consumido da rede elétrica convencional. A economia gerada pelo sistema fotovoltaico está relacionada ao valor da tarifa, uma vez que a energia gerada pelo sistema reduz o consumo da rede e gera créditos de energia para futuras compensações, consequentemente resultando em uma redução na conta de energia.

A tarifa de energia elétrica para a unidade consumidora residencial em estudo é de R\$ 1,277477 por kWh, conforme indicado na fatura de energia referente ao mês de julho de 2024 (Anexo A). Esse valor já inclui os tributos aplicáveis, mas não contempla outras taxas, como a Taxa de Iluminação Pública (TIP) e a Taxa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD), que são cobradas separadamente na fatura. Como a tarifa de energia elétrica não é estática e tende a aumentar ao longo dos anos devido a fatores como inflação, custos de operação e manutenção das concessionárias, e investimentos em infraestrutura, será necessário contemplar reajustes anuais. Esses reajustes são realizados através de Resoluções Homologatórias que a ANEEL publica anualmente ou conforme necessidade. As Concessionárias de energia adequam as tarifas de energia elétrica em atendimento as resoluções e dimensionam o efeito médio ao consumidor que será sentido nas faturas de energia. Para efeito deste estudo, a projeção da tarifa considera um cenário idealizado com reajustes fixos anualmente, baseado na média dos últimos dez reajustes realizados (Tabela 8), sem incluir eventos disruptivos ou alterações regulatórias não previstas.

Tabela 8 – Histórico dos dez últimos reajustes tarifários

Ano	Ato regulatório	Efeito médio ao consumidor
2015	Resolução Homologatória nº 1.930, de 04/08/2015	7,47%
2016	Resolução Homologatória nº 2.117, de 02/08/2016	7,55%
2017	Resolução Homologatória nº 2.284, de 31/07/2017	7,19%
2018	Resolução Homologatória nº 2.433, de 07/08/2018	11,75%
2019	Resolução Homologatória nº 2.588, de 06/08/2019	0,69%
2020	Resolução Homologatória nº 2.750, de 06/08/2020	2,68%
2021	Resolução Homologatória nº 2.920, de 07/08/2021	9,01%
2022	Resolução Homologatória nº 3.092, de 07/08/2022	15,12%
2023	Resolução Homologatória nº 3.243, de 17/08/2023	11,07%
2024	Resolução Homologatória nº 3.371, de 06/08/2024	-3,23%
	Média	6,93%

Fonte: Adaptado de EQUATORIAL ENERGIA (2025).

Portanto, para este estudo, será considerado um reajuste anual de 6,93% na tarifa de energia ao longo dos 25 anos de análise. Pode-se adaptar a equação definida por Blank e Tarquin (2018) para o cálculo do valor futuro, resultando na Equação 12 que calcula o valor da tarifa anual.

$$T_n = T_0 * (1 + i)^n \quad (12)$$

Sendo:

T_n : Tarifa do ano n (R\$/kWh)

T_0 : Tarifa do primeiro ano (R\$/kWh)

A taxa de inflação para esse caso, será o reajuste anual de 6,93%. O resultado da Equação 12 está discriminado na Tabela 9.

Tabela 9 – Projeção da tarifa de energia ao longo de 25 anos

Ano	Reajuste acumulado (%)	Tarifa de energia elétrica com reajuste (R\$/kWh)
0	0,00	1,277477
1	6,93	1,366006
2	14,34	1,460670
3	22,26	1,561895
4	30,74	1,670134
5	39,80	1,785874
6	49,48	1,909636
7	59,84	2,041973
8	70,92	2,183482
9	82,77	2,334797
10	95,43	2,496599
11	108,98	2,669613
12	123,46	2,854617
13	138,94	3,052442
14	155,50	3,263977
15	173,21	3,490170
16	192,14	3,732039
17	212,39	3,990669
18	234,04	4,267223
19	257,18	4,562941
20	281,94	4,879153
21	308,40	5,217278
22	336,71	5,578836
23	366,97	5,965449
24	399,33	6,378854
25	433,94	6,820909

Fonte: AUTOR (2025).

Com base nos resultados obtidos, é possível projetar o fluxo de caixa e calcular o *payback*. É importante ressaltar os resultados considera um cenário idealizado, com premissas otimistas como reajuste tarifário anual de 6,93% (derivado da média histórica dos últimos dez anos) e ausência de eventos climáticos extremos. Entretanto, visando ampliar a robustez da avaliação, o estudo incorpora uma análise com um cenário mais conservador, no qual o reajuste tarifário anual é reduzido para 3,45%. Essa abordagem permite comparar como variações nas premissas econômicas, políticas e sociais podem influenciar a atratividade do investimento.

4.4 Fluxo de caixa e *payback*

Com as informações da geração de energia anual, projeção da tarifa de energia elétrica e os investimentos necessários para instalação e conservação do sistema fotovoltaico, pode-se definir o fluxo de caixa e o tempo de retorno do investimento (*payback*) que essa unidade consumidora terá pelo período de análise de 25 anos.

4.4.1 Cálculo do fluxo de caixa

O fluxo de caixa é o resultado da diferença entre as receitas geradas pela economia de energia e os custos associados ao sistema fotovoltaico. A receita anual é determinada pela geração de energia do sistema multiplicada pela tarifa de energia elétrica vigente em cada ano. Já os custos incluem o investimento inicial, as despesas de manutenção preventiva e a substituição do inversor após 10 e 20 anos. A Equação 13 demonstra o cálculo do fluxo de caixa.

$$FC_n = \sum_1^n RC_n - \sum_1^n IR_n \quad (13)$$

Sendo:

FC_n : fluxo de caixa no ano n (R\$)

RC_n : receita no ano n (R\$)

IR_n : investimento requerido no ano n (R\$)

Para efeitos de simplificação desse trabalho, a receita, calculada pela Equação 14, tem como premissa que toda a energia gerada pelo sistema fotovoltaico será consumida instantaneamente pelo cliente, não havendo assim a criação de créditos de energia. A necessidade de estabelecer essa simplificação é proveniente da complexidade de estimar a quantidade de créditos que a unidade consumidora irá gerar e compensar anualmente. Esse processo implica diretamente na receita, pois a tarifa para a compensação de energia é 25% menor que a tarifa de energia para o consumo ativo da rede (PORTAL SOLAR, 2025).

$$RC_n = E_{ano_n} * T_n \quad (14)$$

4.4.2 Resultados do fluxo de caixa

A Tabela 10 sintetiza o resultado do fluxo de caixa anual ao longo dos 25 anos de vida útil do SFCR. Como pode ser observado, o fluxo de caixa se torna positivo já no segundo ano de geração de energia do sistema, indicando que o investimento começa a gerar retorno financeiro a partir desse ponto. Ao final do período de análise, o saldo acumulado atinge o valor de R\$ 407.167,82, demonstrando a viabilidade econômica do projeto. Contudo, é importante destacar que os resultados não indicam a eliminação total das faturas de energia, uma vez que custos inerentes à conexão com a rede (como a taxa de disponibilidade da rede e iluminação pública) e tributos obrigatórios continuarão a ser cobrados pela concessionária, independentemente da geração do sistema fotovoltaico.

Tabela 10 – Fluxo de caixa no período de 25 anos

Ano	Geração de energia anual (kWh)	Projeção da tarifa de energia	Receita anual (R\$)	Investimento requerido anual (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)
0	0,00	1,277477	0,00	10.394,19	-10.394,19
1	5.424,06	1,3660062	7.409,30	51,97	-3.036,86
2	5.394,22	1,4606704	7.879,18	51,97	4.790,35
3	5.364,55	1,5618948	8.378,86	51,97	13.117,24
4	5.335,05	1,6701342	8.910,25	51,97	21.975,52
5	5.305,71	1,7858744	9.475,33	51,97	31.398,88
6	5.276,53	1,9096355	10.076,25	51,97	41.423,16
7	5.247,50	2,0419733	10.715,25	51,97	52.086,44
8	5.218,64	2,1834820	11.394,81	51,97	63.429,28
9	5.189,94	2,3347973	12.117,46	51,97	75.494,77
10	5.161,40	2,4965988	12.885,95	2.997,82	85.382,89
11	5.133,01	2,6696131	13.703,15	51,97	99.034,08
12	5.104,78	2,8546173	14.572,19	51,97	113.554,30
13	5.076,70	3,0524423	15.496,33	51,97	128.998,66
14	5.048,78	3,2639765	16.479,10	51,97	145.425,79
15	5.021,01	3,4901701	17.524,18	51,97	162.898,00
16	4.993,39	3,7320389	18.635,53	51,97	181.481,56
17	4.965,93	3,9906692	19.817,38	51,97	201.246,97
18	4.938,62	4,2672225	21.074,19	51,97	222.269,19
19	4.911,46	4,5629411	22.410,70	51,97	244.627,92
20	4.884,44	4,8791529	23.831,93	4.873,35	263.586,50
21	4.857,58	5,2172782	25.343,35	51,97	288.877,88
22	4.830,86	5,5788356	26.950,57	51,97	315.776,48
23	4.804,29	5,9654489	28.659,75	51,97	344.384,26
24	4.777,87	6,3788545	30.477,34	51,97	374.809,63
25	4.751,59	6,8209091	32.410,16	51,97	407.167,82
Total	127.017,91		426.628,49	19.460,67	

Fonte: AUTOR (2025).

4.4.3 Análise do *payback*

O *payback* é o tempo necessário para que o investimento inicial no sistema fotovoltaico seja recuperado. No caso deste sistema fotovoltaico, o *payback* ocorre no segundo ano de operação, quando o fluxo de caixa acumulado se torna positivo. Isso representa que partir do segundo ano a unidade consumidora poderá ter um retorno financeiro em relação ao investimento realizado. A Figura 31 ilustra o fluxo de caixa e *payback*.



Fonte: AUTOR (2025).

Ao final dos 25 anos, o sistema fotovoltaico gera uma economia acumulada de R\$ 407.167,82, o que representa um excelente retorno em relação ao investimento inicial de R\$ 10.394,19. Esse valor é 22 vezes maior que o custo total do sistema, demonstrando a alta rentabilidade do projeto.

4.5 Outras métricas financeiras

Além da análise do fluxo de caixa e do *payback*, outras métricas financeiras podem ser utilizadas para avaliar a viabilidade econômica do sistema fotovoltaico. Entre elas, destacam-se o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR), que permitem uma análise mais robusta do retorno financeiro do investimento ao longo do tempo.

4.5.1 Valor Presente Líquido

Segundo Silva e Fontes (2005), o VPL é um dos mecanismos financeiros mais eficientes para avaliar a viabilidade econômica de investimentos, pois representa o montante dos valores descontado do fluxo de caixa futuros. Esses valores são descontados a uma taxa que reflete o custo de oportunidade do capital. O VPL é importante para a tomada de decisão em investimentos, pois define parâmetros para definir a viabilidade de um projeto. Um VPL positivo indica que o projeto é viável, enquanto um VPL negativo sugere que o investimento não é economicamente atrativo. O cálculo do VPL é definido pela Equação 15:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+i)^t} - C_0 \quad (15)$$

Sendo:

F_t : fluxo no período t (R\$)

i : taxa mínima de atratividade (%), que reflete o custo de oportunidade de capital

t : período de tempo

C_0 : investimento inicial (R\$)

O fluxo é definido pela Equação 16:

$$F_t = RC_n - IR_n \quad (16)$$

Foi considerado, para esse estudo, uma taxa mínima de atratividade igual a 13,25% ao ano, que corresponde a Taxa Selic (Sistema de Liquidação e Custódia) vigente em 2025, conforme dados do Banco Central do Brasil (SANTANDER, 2025). A taxa SELIC é amplamente utilizada como referência para o custo de oportunidade do capital no Brasil, pois representa a taxa básica de juros da economia. Aplicando os valores do fluxo através da Equação 15, o VPL do sistema fotovoltaico é calculado como:

$$VPL = \sum_{t=1}^{25} \frac{F_t}{(1+0,1325)^t} - 10.394,19$$

O resultado do cálculo do VPL é R\$ 84.049,83, indicando que o projeto é altamente viável. Esse resultado positivo reforça a atratividade do sistema fotovoltaico, demonstrando que ele irá gerar valor econômico para a unidade consumidora ao longo de sua vida útil.

4.5.2 Taxa Interna de Retorno

A Taxa Interna de Retorno é outro mecanismo financeiro usado para analisar a atratividade de um investimento. Basicamente, a TIR é a taxa de juros que torna o VPL igual a zero. Portanto, se o TIR for maior que a taxa mínima de atratividade, que para esse estudo é a taxa SELIC vigente (13,25%), significa que o projeto é rentável (PEREIRA, ALMEIDA, 2012). A TIR pode ser calculado através da Equação 17:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} - C_0 = 0 \quad (17)$$

Segundo Gitman (2012), o cálculo manual necessita de técnicas complexas, como tentativa e erro com testes de diversas taxas de descontos. O objetivo é encontrar a taxa que fará com que o VPL seja igual ao investimento inicial. Portanto, para esse estudo, será utilizada a ferramenta Excel para efetuar os cálculos necessários. A Figura 32 demonstra como esse processo pode ser feito no Excel.

Figura 32 – Forma de calcular a TIR no Excel

	A	B	C
1	DETERMINAÇÃO DA TAXA INTERNA DE RETORNO		
2		Fluxo de caixa no final do ano	
3	Ano	Projeto A	Projeto B
4	0	\$ (42.000)	\$ (45.000)
5	1	\$ 14.000	\$ 28.000
6	2	\$ 14.000	\$ 12.000
7	3	\$ 14.000	\$ 10.000
8	4	\$ 14.000	\$ 10.000
9	5	\$ 14.000	\$ 10.000
10	TIR	19,9%	21,7%
11	Projeto escolhido		Projeto B
<p>O conteúdo da célula B10 é =IRR(B4:B9). Copie o conteúdo da célula B10 para a célula C10. O conteúdo da célula C11 é =IF(B10>C10,B3,C3).</p>			

Fonte: GITMAN (2025).

O resultado da Taxa Interna de Retorno para esse projeto é de 77,10% ao ano. Como a Taxa Mínima de Atratividade é de 13,25%, então pode-se reafirmar que o investimento é atrativo. Além disso, a TIR reforça a conclusão obtida com o VPL (R\$ 84.049,83) e o *payback* (2 anos), confirmando que o sistema fotovoltaico não apenas recupera o investimento inicial em um curto período, mas também gera um retorno financeiro expressivo ao longo de sua vida útil.

4.6 Análise para o cenário conservador

Este caso considera um cenário mais pessimista, e adota o valor do reajuste da tarifa de energia igual a 3,45%. Este valor é a metade da média histórica dos 10 últimos anos. Neste caso, a tarifa de energia evolui de R\$ 1,277477/kWh para 2,9827/kWh em 25 anos. O sistema fotovoltaico mantém *payback* de 2 anos (igual ao cenário original), com receita total de R\$ 257.301,54 e fluxo de caixa acumulado de R\$ 237.840,87 no período. O VPL de R\$ 58.959,40 (taxa de desconto de 13,25%) e a TIR de 71,27% comprovam viabilidade econômica, mesmo com premissas conservadoras. Comparado ao cenário original (reajuste de 6,93%), o retorno financeiro é menor, mas ainda altamente atrativo, superando a Selic e gerando economia acumulada 30 vezes maior que o investimento inicial (R\$ 10.394,19). Além dos benefícios financeiros, o sistema evita a emissão de CO₂ em 25 anos, alinhando-se à sustentabilidade e reduzindo custos energéticos para a sociedade. Portanto, mesmo em condições menos

favoráveis, o projeto mantém atratividade econômica e ambiental, reforçando a relevância da energia solar como alternativa estratégica.

5 CONCLUSÃO

O presente Trabalho de Conclusão teve como objetivo dimensionar e analisar a viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede no município de Barcarena (PA), região que apresenta as tarifas de energia elétrica mais elevadas do país. A partir de dados da unidade consumidora e de conhecimentos técnicos, foi possível projetar um sistema composto por sete módulos monocristalinos de 555 Wp, um inversor de 3 kW, capaz de gerar 5.534,75 kWh/ano. A análise econômica, considerando um horizonte de 25 anos, revelou o tempo de retorno do investimento (*payback*) de 2 anos, o Valor Presente Líquido (VPL) de R\$ 84.049,83 e Taxa Interna de Retorno (TIR) de 77,10% para um cenário ideal de reajustes tarifários e condições ambientais, comprovando a viabilidade econômica do investimento. O estudo também analisa um cenário mais conservador, demonstrando a consistência nos resultados.

Os resultados evidenciam a viabilidade técnica e econômica de sistemas fotovoltaicos conectados à rede para residências em Barcarena (PA), alinhando-se às diretrizes de transição energética e sustentabilidade. Nota-se ainda um avanço expressivo no tempo de retorno do investimento (*payback*) desses sistemas no Brasil. Conforme Ribeiro (2016), em 2016, um SFCR residencial com investimento inicial de R\$ 11.100,00 permitia a instalação de um sistema de 1,275 kWp, resultando em um custo inicial de R\$ 8.705,88 por kWp. Na ocasião, o *payback* estimado era de 7 anos. Em comparação, o projeto atual apresenta um custo inicial de R\$ 2.675,00 por kWp, equivalente a uma redução de 69% em relação ao valor de 2016. Quanto ao retorno do investimento, o período diminuiu de 7 para 2 anos, uma queda de 71%. Esses dados ilustram a evolução técnica e a redução de custos dos sistemas fotovoltaicos ao longo dos anos.

No entanto, é válido reiterar as limitações inerentes ao trabalho, como a desconsideração do impacto de créditos energéticos (considerando consumo integral da geração) e a adoção de taxas fixas de inflação e reajuste tarifário, que podem subestimar ou superestimar cenários futuros. A ausência de análises detalhadas sobre variações climáticas extremas ou degradação acelerada de componentes também merece atenção em pesquisas subsequentes.

Como recomendações, sugere-se a expansão do estudo para outras localidades do Pará com diferentes perfis de irradiação solar, a incorporação de baterias para sistemas híbridos, analisar o impacto da cobrança do fio B (taxa com o uso do sistema elétrico) e a avaliação de políticas públicas que incentivem a adoção de energia solar em comunidades de baixa renda.

Por fim, este trabalho serve para demonstrar que a transição para fontes renováveis não é apenas ambientalmente necessária, mas economicamente vantajosa.

REFERÊNCIAS

- VIAN, Ângelo. **Energia Solar: Fundamentos, Tecnologia e Aplicações**. São Paulo: Editora Blücher, 2021. E-book. ISBN 9786555500592. Disponível em: https://www.blucher.com.br/energia-solar-fundamentos-tecnologia-e-aplicacoes_9786555500592. Acesso em: 18 mar. 2025.
- COSTA, Andrelise Cardoso *et al.* **Energia solar fotovoltaica: uma alternativa viável?** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n. 9, p. 72637-72656, set. 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/download/17385/14114>. Acesso em: 18 mar. 2025.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2024 - Ano Base 2023. Rio de Janeiro, 2024**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2025.
- PORTO, Jadson Luís Rebelo; TOSTES, José Alberto; GOMES, Andréa Figueiredo. **De apagão a apagado: ensaios sobre a questão energética amapaense**. 1. ed. Maringá: Uniedusul, 2021.
- PORTAL SOLAR. **Confirma o ranking das tarifas de energia mais caras do Brasil em 2024**. 2024. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/mercado/consumidor/confirma-o-ranking-das-tarifas-de-energia-mais-caras-do-brasil-em-2024>. Acesso em: 19 mar. 2025.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria Nacional de Energia Elétrica. Departamento de Políticas Setoriais. **Informativo Tarifário do Setor Elétrico: ano 2023**. Brasília, DF: MME, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/secretaria-nacional-energia-eletrica/publicacoes/informativo-setor-eletrico/informativo-tarifario-do-setor-eletrico-1o-semester-2024.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2025.
- CUSTOM MARKET INSIGHTS. **[Latest] Global Distributed Energy Generation Market Size/Share Worth USD 932.34 Billion by 2030 at a 16.5% CAGR**. Sandy, UT: Custom Market Insights, 2022. Disponível em: <https://www.custommarketinsights.com/report/distributed-energy-generation-market/>. Acesso em: 19 mar. 2025.
- IEI, International Energy Initiative - Brasil. **Geração Distribuída e Eficiência Energética: reflexões para o setor elétrico de hoje e do futuro**. 1. ed. Campinas: IEI Brasil, 2018. p. 208-214. Disponível em: <https://iei-brasil.org/wp-content/uploads/2018/01/Gera%C3%A7%C3%A3o-distribu%C3%ADa-e-efici%C3%Aancia-energ%C3%A9tica-Reflex%C3%B5es-para-o-setor-el%C3%A9trico-de-hoje-e-do-futuro.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2025.
- ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. **Distributed generation: a definition**. Electric Power Systems Research, [S. l.], v. 57, n. 3, p. 195-204, abr. 2001.

ABSOLAR - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. 2025. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 13 mar. 2025.

BRASIL ENERGIA. **Perspectivas de 2025 para o setor elétrico brasileiro**. 2025. Disponível em: <https://brasilenergia.com.br/energia/perspectivas-de-2025-para-o-setor-eletrico-brasileiro>. Acesso em: 14 mar. 2025.

RIBEIRO, Amarolina. **O que é matriz energética?**; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/geografia/o-que-e-matriz-energetica.htm>. Acesso em: 14 mar. 2025.

BARBOSA FILHO, Wilson Pereira; AZEVEDO, Abílio César Soares. **Geração Distribuída: Vantagens e Desvantagens**. 2013. Disponível em: https://feam.br/documents/d/feam/artigo_gd-pdf. Acesso em: 14 mar. 2025.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80 p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>. Acesso em: 14 mar. 2025.

MOURA, T. P.; ALCÓCER, J. C. A.; PINTO, O. R. O.; DOMINGOS, L. T. 2019. **Geração de energia fotovoltaica: análise comparativa entre redenção no Brasil e Maputo em Moçambique**. Enciclopédia Biosfera. Vol. 16, n. 29. 2344-2359p. Disponível em: ttp://dx.doi.org/10.18677/EnciBio_2019A179. Acesso em: 11 mar. 2025.

ELETRÔNICA DE POTÊNCIA. **Célula Fotovoltaica**. Eletrônica de Potência, 2020. Disponível em: <https://eletronicadepotencia.com/celula-fotovoltaica/>. Acesso em: 12 mar. 2025.

SANTIAGO, José Valdir Júnior. **Guia de energia solar fotovoltaica: aplicação nas micro e pequenas empresas**. Cuiabá: Sebrae, 2016. 19 p. Disponível em: [http://sustentabilidade.sebrae.com.br/Sustentabilidade/Para%20sua%20empresa/Publica%C3%A7%C3%B5es/Guias%20e%20manuais/Guia%20de%20energia%20solar%20fotovoltaica_15x21cm%20fechado%20\(2\).pdf](http://sustentabilidade.sebrae.com.br/Sustentabilidade/Para%20sua%20empresa/Publica%C3%A7%C3%B5es/Guias%20e%20manuais/Guia%20de%20energia%20solar%20fotovoltaica_15x21cm%20fechado%20(2).pdf). Acesso em: 14 mar. 2025.

SOUZA, Ronilson Di. **Os sistemas de energia solar fotovoltaica: Livro digital de introdução aos sistemas solares**. [S. l.]: Bluesol Energia Solar, 2014. 114 p. Disponível em: <https://programaintegradoronline.com.br/wpcontent/uploads/2016/03/Livro-Digital-de-Introdu%C3%A7%C3%A3o-aos-Sistemas-Solares-novo.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2025.

BARRETO, Eduardo José Fagundes *et al.* **Tecnologias de energias renováveis: sistemas híbridos, pequenos aproveitamentos hidroelétricos, combustão e gasificação de biomassa sólida, biodiesel e óleo vegetal in natura**. [S. l.]: Ministério de Minas e Energia (MME), 2008.

GTES – Grupo de Trabalho de Energia Solar. **Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESESB, 2014. 530 p.

MN&R SOLUÇÕES. **Sistemas Solares Isolados (*Off-Grid*)**. MN&R Soluções, 2025. Disponível em: <https://mnrsolucoes.com.br/sistemas-solares-isolados-off-grid/>. Acesso em: 15 mar. 2025.

SEBRAE RESPOSTAS. **Energia solar: qual a diferença entre sistemas *On-Grid* e *Off-Grid*?**. Sebrae Respostas, 2023. Disponível em: <https://respostas.sebrae.com.br/energia-solar-qual-a-diferenca-entre-sistemas-on-grid-e-off-grid/>. Acesso em: 15 mar. 2025.

PHILIPPI, A.; REIS, L. B. **Energia e sustentabilidade**. São Paulo: Editora Manole, 2016. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=cmz-zwEACAAJ>. Acesso em: 15 mar. 2025.

GREEN, M. A.; EMERY K.; HISHIKAWA Y.; WARTA W.; DUNLOP, E. D. **Solar cell efficiency tables (version 39)**. Prog. Photovolt: Res. Appl., v. 20, p. 12-20, 2012.

TIENDA FOTOVOLTAICA. **Panel solar de silicio amorfo 12V/6Wp**. Tienda Fotovoltaica, 2025. Disponível em: <https://www.tiendafotovoltaica.es/Panel-solar-de-silicio-amorfo-12V/6Wp>. Acesso em: 16 mar. 2025.

MERCADO LIVRE. **Módulo 270W 60 Células Policristalino**. Mercado Livre, 2025. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-911798156-modulo-270w-60-celulas-policristalino-_JM. Acesso em: 16 mar. 2025.

SOLAVISTA ENERGY. **Painel solar monocristalino e policristalino**. Solavista Energy, 2025. Disponível em: <https://www.solavistaenergy.com.br/painel-solar-monocristalino-e-policristalino>. Acesso em: 16 mar. 2025.

SOLIENS Virtual Academy. **Fundamentos da Energia Solar Fotovoltaica**. 2023. Disponível em: pdfcoffee.com/fundamentos-de-energia-solar-fotovoltaica-soliens-va-pdf-free.pdf. Acesso em: 16 mar. 2025.

PORTAL SOLAR. **Passo a Passo da Fabricação do Painel Solar**. Portal Solar, 2025. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>. Acesso em: 16 mar. 2025.

ALTERNATIVE ENERGY TUTORIALS. **Photovoltaic Panel**. *Alternative Energy Tutorials*, 2025. Disponível em: <https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/photovoltaic-panel.html>. Acesso em: 16 mar. 2025.

ALMEIDA, P. M. de. **Condicionamento da Energia Solar Fotovoltaica para Sistemas Interligados à Rede Elétrica**. [S. l.]: Universidade Federal de Juiz de Fora-LABSOLAR, 2011.

SOLFACIL. **A Importância do MPP para um Sistema Fotovoltaico**. Solfacil, 2025. Disponível em: <https://blog.solfacil.com.br/energia-solar/a-importancia-do-mpp-para-um-sistema-fotovoltaico/>. Acesso em: 17 mar. 2025.

NAZ. **All About Maximum Power Point Tracking (MPPT) Solar Charge Controllers**. solar-electric.com, 2025. Disponível em: <https://www.solar-electric.com/learning-center/batteries-and-charging/mppt-solar-charge-controllers.html>. Acesso em: 17 mar. 2025.

SANTOS, F. H. S.; BRENDA, J. F. D. **Análise da viabilidade de projetos de geração de energia fotovoltaica no Norte de Minas Gerais considerando aspectos de qualidade da energia elétrica.** 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/344906733>. Acesso em: 18 mar. 2025.

SOLIS. SolisCloud: **Plataforma de monitoramento Solis para sistemas fotovoltaicos de nova geração.** Versão 1.7, 2024. Disponível em: https://www.solisinverters.com/manuals/SolisCloud_BRA_V1,7_202408.pdf. Acesso em: 18 mar. 2025.

TUPAN. **Disjuntor DPS Unipolar 45KA 275V.** Tupan, 2025. Disponível em: <https://www.tupan.com.br/disjuntor-dps-unipolar-45ka-275v-tramontina--ref-57700035-968558-33>. Acesso em: 18 mar. 2025.

CAMARGO, L. T. **Projeto de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica.** 2017. 34 p. Universidade Estadual de Londrina, UEL, PR.

VINTURINI, M. **Entenda as Especificações Básicas - String Box.** Canal Solar, 2019. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/entenda-as-especificacoes-basicas-string-box/>. Acesso em: 18 mar. 2025.

NEOSOLAR. **Engenharia reversa de uma stringbox.** Neosolar, 2015. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/forum/component/kunena/7-Instala%C3%A7%C3%A3o-de-Sistemas-GridTie/464-engenharia-reversa-de-uma-stringbox>. Acesso em: 18 mar. 2025.

OLIVEIRA, Felipe de. **Projeto de um subsistema para transferência de carga para usinas de microgeração fotovoltaica.** 2016. 82 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade de Santa Cruz do Sul, UNISC, Santa Cruz do Sul.

SOLFACIL. **Qual a Diferença entre o Medidor Convencional e o Bidirecional?.** Solfacil, 2024. Disponível em: <https://blog.solfacil.com.br/energia-solar/qual-diferenca-entre-medidor-convencional-e-bidirecional/>. Acesso em: 18 mar. 2025.

ANEEL. **Micro e minigeração distribuída:** sistema de compensação de energia elétrica. 2. ed. Brasília, DF, maio 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa Nº 1000**, de 07 de dezembro de 2021. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica e dá outras providências. Brasil: ANEEL, 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>. Acesso em: 25 fev. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa Nº 687**, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Brasil: ANEEL, 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2025.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Cepel, 2014.

FOTAIC, Energia Solar. **Manual de energia solar**. 1 ed. Fortaleza, 2017. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/368330602/Fotaic-O-Manual-Da-Energia-Solar>. Acesso em: 28 fev. 2025.

GRUPO EQUATORIAL DE ENERGIA. **NT.001.EQTL Fornecimento de Energia Elétrica em Baixa Tensão**, 2024. Disponível em: <https://ma.equatorialenergia.com.br/wp-content/uploads/2025/01/NT.00001.EQTL-08-Fornecimento-de-Energia-Eletrica-em-Baixa-Tensao.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2025.

GRUPO EQUATORIAL DE ENERGIA. **NT.020.EQTL Conexão de Micro e Minigeração Distribuída ao Sistema de Distribuição**, 2024. Disponível em: <https://ma.equatorialenergia.com.br/wp-content/uploads/2024/11/NT.00020.EQTL-05-Conexao-de-Micro-e-Minigerao-Distribuida-ao-Sistema-de-Distribuicao.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2025.

GUIDUCCI, R. do C. N.; LIMA FILHO, J. R. de; MOTA, M. M. (Ed.). **Viabilidade econômica de sistemas de produção agropecuários: metodologia e estudos de caso**. Brasília, DF: Embrapa, 2012.

BLANK, Leland; TARQUIN, Anthony. **Engenharia Econômica**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2018.

LIBERTY ENERGIA. **Quanto custa a manutenção em energia solar?**, 2025. Disponível em: <https://www.libertyenergia.eco.br/quanto-custa-a-manutencao-em-energia-solar/>. Acesso em: 10 mar. 2025.

PORTAL SOLAR. **Tudo sobre a manutenção do painel solar**, 2025. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/tudo-sobre-a-manutencao-do-painel-solar>. Acesso em: 11 mar. 2025.

DEBIT. **IPCA - Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo**, 2025. Disponível em: <https://www.debit.com.br/tabelas/ipca-indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplo>. Acesso em: 11 mar. 2025.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. [S. l.]: LABSOLAR, 2004. ISBN 85-87583-04-2. Disponível em: <https://acervo.uniarp.edu.br/?livro=edificios-solares-fotovoltaicos-o-potencial-da-geracaosolar-fotovoltaica-integrada-a-edificacoes-urbanas-e-interligada>. Acesso em: 09 mar. 2025.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 3.371**, de 24 de janeiro de 2024. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 24 jan. 2024. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20243371ti.pdf>. Acesso em: 09 mar. 2025.

EQUATORIAL ENERGIA. **Valor de tarifas e serviços**. 2025. Disponível em: <https://pa.equatorialenergia.com.br/informacoes-gerais/valor-de-tarifas-e-servicos/>. Acesso em: 18 de mar. 2025.

SILVA, M. L.; FONTES, A. A. **Discussão sobre os critérios de avaliação econômica: Valor Presente Líquido (VPL), Valor Anual Equivalente (VAE) e Valor Esperado da Terra (VET)**. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 29, n. 6, p. 931-936, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/7jJ8FVfdNrBwBq9kSdP4sBg/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 11 mar. 2025.

SANTANDER. **Taxa Selic hoje: entenda o que é e como funciona**. Blog Santander, 2025. Disponível em: <https://www.santander.com.br/blog/taxa-selic-hoje#:~:text=A%20Taxa%20Selic%20hoje%20est%C3%A1,sendo%20o%20quarto%20aumentado%20consecutivo>. Acesso em: 07 de mar. 2025.

PEREIRA, Warley Augusto; ALMEIDA, Lindomar S. **Método Manual Para Cálculo da Taxa Interna de Retorno**, 2012. [S. l.: s. n.].

GITMAN, Lawrence J. **Princípios da administração financeira**. 12. ed. São Paulo: Person Prentice Hall, 2010.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

PORTAL SOLAR. **Créditos de energia solar: como funciona a compensação de energia solar?**, 2025. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/creditos-energia-solar>. Acesso em: 18 mar. 2025.

RIBEIRO, Raylla Pereira. **Estudo de caso: dimensionamento de um sistema fotovoltaico residencial**. 2016. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá.

ANEXO B – MANUAL DO MÓDULO FOTOVOLTAICO JINKO JKM555M-72HL4 TIGER NEO (PARTE 1)

www.jinkosolar.com



Tiger Pro 72HC 540-560 Watt

MONO-FACIAL MODULE

P-Type

Positive power tolerance of 0~+3%

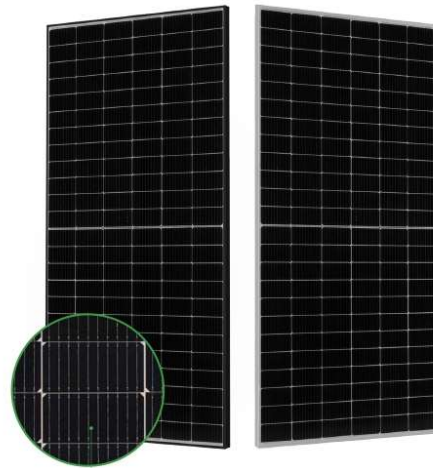
IEC61215(2016), IEC61730(2016)

ISO9001:2015: Quality Management System

ISO14001:2015: Environment Management System

ISO45001:2018

Occupational health and safety management systems



MBB HC Technology

Key Features



Multi Busbar Technology

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



Reduced Hot Spot Loss

Optimized electrical design and lower operating current for reduced hot spot loss and better temperature coefficient.



Longer Life-time Power Yield

0.55% annual power degradation and 25 year linear power warranty.



Durability Against Extreme Environmental Conditions

High salt mist and ammonia resistance.



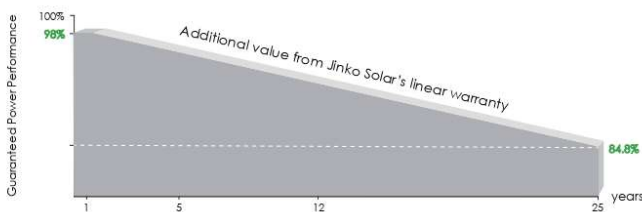
Enhanced Mechanical Load

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



POSITIVE QUALITY™
Continuous Quality Assurance

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY



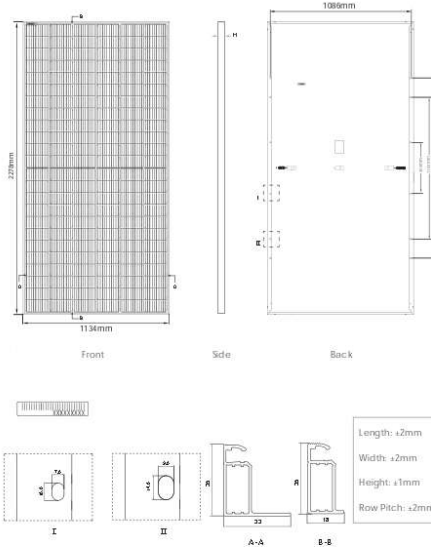
12 Year Product Warranty

25 Year Linear Power Warranty

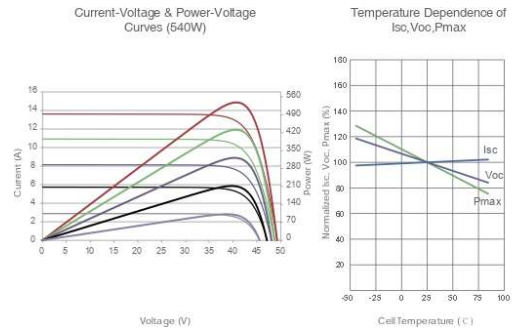
0.55% Annual Degradation Over 25 years

ANEXO B – MANUAL DO MÓDULO FOTOVOLTAICO JINKO JKM555M-72HL4 TIGER NEO (PARTE 2)

Engineering Drawings



Electrical Performance & Temperature Dependence



Mechanical Characteristics

Cell Type	P type Mono-crystalline
No. of cells	144 (6×24)
Dimensions	2278×1134×35mm (89.53×44.65×1.38 inch)
Weight	28 kg (61.73 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 (+): 400mm , (-): 200mm or Customized Length

Packaging Configuration

(Two pallets – One stack)
31pcs/pallets, 62pcs/stack, 620pcs/ 40HQ Container

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM540M-72HL4		JKM545M-72HL4		JKM550M-72HL4		JKM555M-72HL4		JKM560M-72HL4	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	540Wp	402Wp	545Wp	405Wp	550Wp	409Wp	555Wp	413Wp	560Wp	417Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	40.70V	38.08V	40.80V	38.25V	40.90V	38.42V	40.99V	38.59V	41.09V	38.69V
Maximum Power Current (Imp)	13.27A	10.55A	13.36A	10.60A	13.45A	10.65A	13.54A	10.70A	13.63A	10.77A
Open-circuit Voltage (Voc)	49.42V	46.65V	49.52V	46.74V	49.62V	46.84V	49.72V	46.93V	49.82V	47.02V
Short-circuit Current (Isc)	13.85A	11.19A	13.94A	11.26A	14.03A	11.33A	14.12A	11.40A	14.21A	11.48A
Module Efficiency STC (%)	20.90%		21.10%		21.29%		21.48%		21.68%	
Operating Temperature(°C)	-40°C ~ +85°C									
Maximum system voltage	1000/1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	25A									
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									

*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 C – MANUAL DO INVERSOR GROWATT MIC3000TL-X (PARTE 1)

MIC 1000~3000TL-X

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



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

Growatt
powering tomorrow

www.ginverter.com

ANEXO C – MANUAL DO INVERSOR GROWATT MIC3000TL-X (PARTE 2)

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 MPPT	13A				
Máxima corrente curto-circuito por trackers MPPT	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 ± 9Hz				
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 naturno	< 0.5 W				
Topologia	Sem transformador				
Resfriamento	Convecção 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, CEI0-21, 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					