



Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas  
CECAU - Colegiado do Curso de  
Engenharia de Controle e Automação



Bruno Henrique Rodrigues Teixeira

## **Estudo de Casos Sobre a Viabilidade Econômica para a Instalação de Sistemas Fotovoltaicos**

Monografia de Graduação

Ouro Preto, 2024

Bruno Henrique Rodrigues Teixeira

# **Estudo de Casos Sobre a Viabilidade Econômica para a Instalação de Sistemas Fotovoltaicos**

Trabalho apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Universidade Federal de Ouro Preto

Orientador: Profa. Adrielle de Carvalho Santana

Ouro Preto

2024



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E  
AUTOMACAO



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Bruno Henrique Rodrigues Teixeira**

Estudo de Casos Sobre a Viabilidade Econômica para a Instalação de Sistemas Fotovoltaicos

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação

Aprovada em 17 de outubro de 2024

**Membros da banca**

Dra. Adrielle de Carvalho Santana - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. Bruno Randazzo Baroni - Convidado - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dra. Luciana Gomes Castanheira - Convidada - Universidade Federal de Ouro Preto

Adrielle de Carvalho Santana, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 21/10/2024



Documento assinado eletronicamente por **Adrielle de Carvalho Santana, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/10/2024, às 16:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0795658** e o código CRC **4936E4E0**.

# Resumo

O trabalho descreve a elaboração de dois projetos para geração de energia fotovoltaica na cidade de Paraopeba/MG, sendo um para uma instalação residencial com quatro habitantes e a outra para uma pequena sala comercial. As duas instalações pertencem ao grupo de baixa potência (grupo B). O estudo realiza a análise de consumo mensal de energia de cada instalação e, posteriormente, dimensiona o sistema de geração necessário para atender cada caso, realiza a análise dos ambientes para instalação e, finalmente, apresenta o valor do projeto para o cliente final. O estudo apresenta o cálculo do *payback* do sistema a partir da regulamentação vigente e, ao fim, o presente trabalho desenvolve uma discussão acerca da viabilidade econômica de cada caso separadamente, e ainda aponta características que proporcionaram o resultado final.

**Palavras-chaves:** projeto. *payback*. energia fotovoltaica.

# Abstract

The work describes the development of two projects for photovoltaic energy generation in the city of Paraopeba/MG, one for a residential installation with four inhabitants and the other for a small commercial space. Both installations belong to the low power group (group B). The study analyzes the monthly energy consumption of each installation and, subsequently, sizes the generation system necessary to meet each case, analyzes the environments for installation and, finally, presents the value of the project to the end customer. The study presents the calculation of the system's payback based on current regulations and, in the end, this work develops a discussion about the economic viability of each case separately, and also points out characteristics that provided the final result.

**Key-words:** project. payback. photovoltaic energy.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Efeito estufa natural à esquerda e sua transformação à direita. Fonte: Vieira (2023). . . . .	11
Figura 2 – Mapa Brasileiro de Irradiação Solar - Média Anual. Fonte: Martins et al. (2017). . . . .	15
Figura 3 – Componentes do Painel Fotovoltaico. Fonte: Solar (2024) . . . . .	20
Figura 4 – Ilustração de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede. Fonte: Teles (2017) . . . . .	22
Figura 5 – Ilustração de um Sistema Fotovoltaico com Inversor <i>String</i> . Fonte: Teles (2017) . . . . .	23
Figura 6 – Ilustração de um Sistema Fotovoltaico com Microinversores. Fonte: Teles (2017) . . . . .	23
Figura 7 – Ilustração de um Sistema Fotovoltaico com Inversor Central. Fonte: Teles (2017) . . . . .	24
Figura 8 – Ilustração de um SFI domiciliar: A-painel fotovoltaico; B-controlador de carga; C-banco de baterias; D-inversores; E-cargas c.a.; F-caixa de conexão. Fonte: PINHO e GALDINO (2014) . . . . .	24
Figura 9 – Chave seccionadora. Fonte: PINHO e GALDINO (2014) . . . . .	25
Figura 10 – Exemplos de fusíveis: (a)-fusível apropriado para arranjo fotovoltaico; (b)-fusível NH; (c)-fusível tipo faca; (d)-fusível Cartucho. Fonte: PINHO e GALDINO (2014) . . . . .	26
Figura 11 – Disjuntor monofásico, bifásico e trifásico. Fonte: PINHO e GALDINO (2014) . . . . .	26
Figura 12 – Dispositivo de Proteção contra Surto. Fonte: PINHO e GALDINO (2014)	26
Figura 13 – Curvas características: I x V em preto e P x V em azul. Fonte: Santos (2013) . . . . .	29
Figura 14 – Inclinação da Terra em relação ao Sol. Fonte: PINHO e GALDINO (2014)	32
Figura 15 – Exemplo de correção para uma declinação magnética de 20°negativos. Fonte: PINHO e GALDINO (2014) . . . . .	33
Figura 16 – Inclinação da Terra em relação ao Sol. Fonte: PINHO e GALDINO (2014)	34
Figura 17 – Índice pluviométrico e de temperatura anual para a cidade de Paraopeba/MG. Fonte: Data (2024) . . . . .	37
Figura 18 – Incidência Solar anual para a cidade de Paraopeba/MG. Fonte: Data (2024) . . . . .	37
Figura 19 – Consumo mensal e a média anual de consumo energético Instalação 01. Fonte: O autor. . . . .	38

Figura 20 – Consumo mensal e a média anual de consumo energético Instalação 02. Fonte: O autor. . . . .	38
Figura 21 – Telhado da instalação 01. Fonte: O autor. . . . .	41
Figura 22 – Módulo de Silício Policristalino Utilizado. Fonte: O autor. . . . .	42
Figura 23 – Telhado da instalação 02 (indicado pela seta). Fonte: O autor. . . . .	45
Figura 24 – Módulo de Silício Policristalino Utilizado. Fonte: O autor. . . . .	46

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Influência de taxa de disponibilidade na fatura final . . . . .	12
Tabela 2 – Potência necessária do sistema fotovoltaico . . . . .	39
Tabela 3 – Potência necessária do sistema fotovoltaico . . . . .	40
Tabela 4 – <i>Datasheet</i> dos módulos fotovoltaicos . . . . .	42
Tabela 5 – <i>Datasheet</i> do inversor de frequência do sistema . . . . .	43
Tabela 6 – <i>Datasheet</i> dos módulos fotovoltaicos . . . . .	46
Tabela 7 – <i>Datasheet</i> do inversor de frequência do sistema . . . . .	47

# Lista de abreviaturas e siglas

ANEEL	Agencia Nacional e Energia Elétrica
API	<i>Application Programming Interface</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surto
EVA	Acetato de Vinila Etileno
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
HSP	Horas de Sol Pico
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PIB	Produto Interno Bruto
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SFI	Sistema Fotovoltaico Independente
TD	Taxa de Disponibilidade
TUSD	Tarifa do Uso do Sistema de Distribuição

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização</b>	<b>10</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>12</b>
1.2.1	Objetivo Geral	12
1.2.2	Objetivos Específicos	12
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>História da Energia Solar Fotovoltaica</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Características da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil</b>	<b>14</b>
<b>2.3</b>	<b>Regulamentação Vigente</b>	<b>15</b>
2.3.1	Lei 14.300	16
<b>2.4</b>	<b>Componentes do Sistema Fotovoltaico</b>	<b>17</b>
2.4.1	Painel Solar Fotovoltaico	18
2.4.1.1	Célula Solar	18
2.4.1.2	Componentes do Painel Solar Fotovoltaico	19
2.4.1.3	Classificação do Painel Solar Fotovoltaico	20
2.4.2	O Inversor	21
2.4.2.1	Tipos de Inversores	22
2.4.2.1.1	Inversores SFCRs	22
2.4.2.1.2	Inversores SFIs	23
2.4.2.2	Influência dos Inversores no Sistema Fotovoltaico	23
2.4.3	Dispositivos de Proteção	24
2.4.3.1	Chaves Seccionadoras	25
2.4.3.2	Fusíveis	25
2.4.3.3	Disjuntores	25
2.4.3.4	Dispositivo de Proteção Contra Surto	26
2.4.4	Outros Componentes	27
2.4.4.1	Cabos Solares	27
2.4.4.2	Transformadores	27
<b>2.5</b>	<b>Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico</b>	<b>27</b>
2.5.1	Padrão de Consumo	28
2.5.2	Potência dos Módulos	28
2.5.2.1	Curvas Características	28
2.5.2.2	Irradiação e Incidência Solar	29
2.5.2.3	Sombreamento	31

2.5.2.4	Orientação dos Módulos . . . . .	32
2.5.2.5	Inclinação dos Módulos . . . . .	33
2.5.3	Cálculo do Inversor . . . . .	35
2.5.4	Payback . . . . .	35
<b>3</b>	<b>ESTUDO DE CASOS . . . . .</b>	<b>36</b>
<b>3.1</b>	<b>Descrição das propriedades . . . . .</b>	<b>36</b>
<b>3.2</b>	<b>Taxas de radiação e características geográficas . . . . .</b>	<b>36</b>
<b>3.3</b>	<b>Levantamento do consumo das propriedades . . . . .</b>	<b>36</b>
<b>3.4</b>	<b>Projetos . . . . .</b>	<b>40</b>
3.4.1	Projeto 01 . . . . .	40
3.4.1.1	Dimensionamento dos Componentes do Sistema . . . . .	40
3.4.1.1.1	Painéis: inclinação, sombreamento, quantidade de módulos . . . . .	41
3.4.1.2	Inversor . . . . .	42
3.4.1.3	Dispositivos de Proteção Contra Surtos . . . . .	43
3.4.1.4	Ligação entre os Componentes . . . . .	43
3.4.1.5	Investimento e Payback . . . . .	44
3.4.2	Projeto 02 . . . . .	45
3.4.2.1	Dimensionamento dos Componentes do Sistema . . . . .	45
3.4.2.1.1	Painéis: inclinação, sombreamento, quantidade de módulos . . . . .	45
3.4.2.2	Inversor . . . . .	47
3.4.2.3	Dispositivos de Proteção Contra Surtos . . . . .	48
3.4.2.4	Ligação entre os Componentes . . . . .	48
3.4.2.5	Investimento e Payback . . . . .	48
<b>3.5</b>	<b>Discussão . . . . .</b>	<b>49</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>50</b>
<b>4.1</b>	<b>Sugestão de projetos futuros . . . . .</b>	<b>50</b>
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>52</b>
<b>I</b>	<b>ANEXO I - MODELO MAGNÉTICO MUNDIAL . . . . .</b>	<b>54</b>
<b>II</b>	<b>ANEXO II - DIAGRAMA UNIFILAR BÁSICO . . . . .</b>	<b>55</b>

# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização

O avanço da espécie humana até o contexto observado nos dias atuais tem seu percurso acompanhado pela capacidade do homem de utilizar energia. Seja pela utilização do fogo pelos ancestrais ou por fontes alternativas desenvolvidas nos dias de hoje, a energia desempenhou e desempenha um papel fundamental para a existência da sociedade atual (BORBA; GASPAR, 2010).

O consumo de energia pela população do planeta vem aumentando gradativamente devido ao crescimento populacional e desenvolvimento tecnológico. Com o intuito de conscientizar a sociedade acerca do gasto energético exacerbado e contribuir positivamente com o meio ambiente, desde os anos 1970, são realizadas conferências mundiais em diferentes países e a temática de energia renovável é amplamente debatida em busca do desenvolvimento sustentável (FREITAS; DATHEIN, 2013).

No Brasil, o consumo energético acompanha a tendência do restante do planeta, que é de um crescimento sistemático a cada ano. Segundo Martins et al. (2017), esse aumento do consumo também é correlacionado ao crescimento do PIB nacional, pois com a melhoria da qualidade de vida de boa parte da população, aumenta também a procura por bens de consumo, serviços e amenidades. Além disso, recursos básicos como moradia, saneamento e transporte, que antes eram escassos, agora estão presentes na maioria das famílias e demandam de mais energia para serem alimentados.

Atualmente, cerca 80% de toda a energia primária necessária para o mundo é suprida pela queima de combustíveis fósseis, sejam eles carvão, petróleo, gás natural ou seus derivados. Para Borba e Gaspar (2010) apesar de representar uma fonte de prosperidade, a utilização destes combustíveis também são uma fonte de preocupação pensando no futuro, tanto pelo aspecto quantitativo relativo a durabilidade das reservas desses materiais, quanto pela sustentabilidade dos atuais padrões de utilização de combustível fóssil no longo prazo.

A queima desenfreada dos combustíveis fósseis provoca prejuízos incalculáveis para todo o planeta e os seres vivos que nele habitam. Esta ação contribui para o aquecimento global pois intensificam o efeito estufa. A partir da fumaça expelida como resultado da queima destes combustíveis, os raios solares que entram na atmosfera são impedidos de voltar para o espaço como ilustra a Figura 1. Os resultados são devastadores, como o derretimento das calotas polares, aumento do nível dos oceanos e eventos climáticos mais imprevisíveis. Buscando minimizar os efeitos a longo prazo, novas fontes de energia estão

sendo debatidas constantemente.

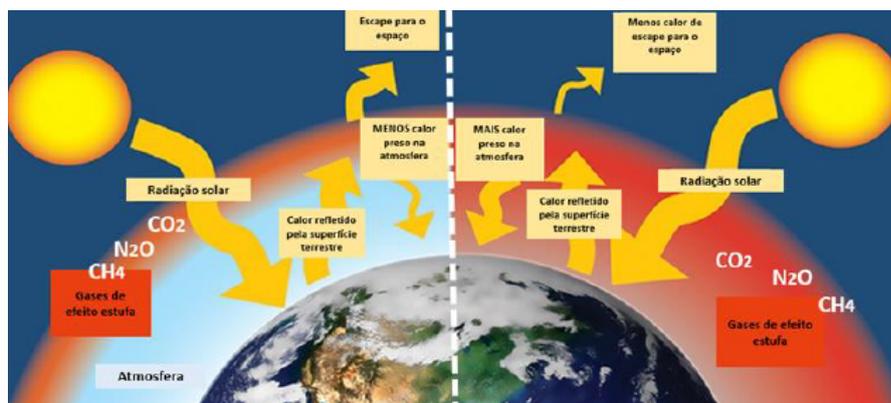


Figura 1 – Efeito estufa natural à esquerda e sua transformação à direita. Fonte: [Vieira \(2023\)](#).

A energia solar fotovoltaica é uma alternativa forte frente ao mercado que utiliza predominantemente energia proveniente da queima de combustíveis fósseis. Devido a vários fatores, tais como baixo custo relativo para produção de energia, o crescente investimento em pesquisa e desenvolvimento para aprimorar os equipamentos, e às políticas públicas que incentivam a instalação dos sistemas, a energia fotovoltaica possui atrativos interessantes para todos os setores da comunidade que buscam desfrutar de uma fonte de energia limpa e acessível ([SANTANA et al., 2020](#)).

As políticas públicas têm um papel fundamental no desenvolvimento e popularização de novas tecnologias, pois, naturalmente, criar algo novo tem custo elevado e para que se torne viável necessita de investimentos. Segundo [Borba e Gaspar \(2010\)](#), países que introduziram políticas agressivas de investimento em energia sustentável possuem hoje um crescimento significativo da capacidade instalada de energia elétrica e atraem investimentos adicionais, fixando, assim, para seu povo, o sentimento de necessidade de avanço continuado em tecnologia.

A instalação de um sistema de geração conectado à rede na unidade consumidora de energia garante uma economia que varia de acordo com cada caso. Isso porque mesmo que o cliente consiga gerar a energia necessária para atender suas necessidades por completo, ele ainda está conectado à rede e precisa pagar à concessionária a taxa de disponibilidade para utilizar essa rede. Dessa forma, o percentual de redução da fatura de energia com um sistema de geração própria pode ser de 0% no pior caso, em que o consumo é menor que a quantidade contemplada com a taxa de disponibilidade, ou até mais de 99% em casos que o consumo é muito alto.

A Taxa de Disponibilidade (TD) aplicada pelas concessionárias de energia é uma ferramenta que assegura um pagamento mínimo dos consumidores mesmo que o consumo seja baixo. Se o cliente possui uma instalação monofásica essa taxa é referente ao valor de

30 kWh, se bifásica, 50 kWh, e caso a instalação seja trifásica, o valor é referente a 100 kWh. Todos os consumidores estão sujeitos à taxa de disponibilidade, e quanto maior for o consumo energético menor será a influência desta taxa na fatura final de cada mês com demonstra a Tabela 1.

Tabela 1 – Influência de taxa de disponibilidade na fatura final

Unidade Consumidora	Meses	Consumo (kWh)	Taxa de Disponibilidade (kWh)	Fatura (kWh)	Relação entre TD e Fatura Final
A	Abril	500	100	500	20%
A	Maior	450	100	450	22%
A	Junho	550	100	550	18%
B	Abril	250	100	250	40%
B	Maior	230	100	230	43%
B	Junho	260	100	260	38%

Assim, mesmo com todas as vantagens do sistema fotovoltaico, alguns projetos ficam inviáveis a depender da legislação que regulamenta o setor. Dessa forma, é crucial realizar um estudo da viabilidade de uma instalação fotovoltaica para assegurar ao usuário se o investimento no projeto é ou não interessante.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar dois casos para a instalação de sistemas fotovoltaicos de consumidores de baixa potência (grupo B) buscando evidenciar se as instalações em estudo terão viabilidade financeira para execução do projeto, levando em consideração a regulamentação vigente.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Apresentar o procedimento utilizado para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico.
- Dimensionar os sistemas fotovoltaicos de modo que atendam às necessidades dos clientes.
- Calcular o investimento e o *payback*, fazendo um levantamento econômico da viabilidade das soluções.
- Analisar os resultados obtidos apresentando os principais pontos que levam um sistema a ser viável e o outro não.

## 2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo, serão demonstrados conceitos e definições básicas, além de uma abordagem ampla sobre os principais temas acerca do presente estudo.

### 2.1 História da Energia Solar Fotovoltaica

A história da energia solar fotovoltaica remonta a meados do século XIX, com descobertas significativas que foram possíveis devido ao avanço científico ao longo das décadas.

Tudo começou em 1839, quando o físico francês Alexandre-Edmond Becquerel descobriu o efeito fotovoltaico. Sua observação de que certos materiais geravam uma corrente elétrica quando expostos à luz solar foi o ponto de partida para o desenvolvimento da tecnologia solar fotovoltaica ([BECQUEREL, 1839](#)).

Após mais de 100 anos, em 1953, iniciou-se uma série de revelações em torno do aumento da eficiência de conversão da célula solar. Essas descobertas foram significativas pois sugeriam uma viabilidade para a energia fotovoltaica. Estes estudos foram possíveis devido ao avanço da ciência nas áreas de purificação e dopagem de elementos, os quais possibilitaram manipular as propriedades elétricas de determinados componentes.

O cientista norte-americano Calvin Fuller realizou a dopagem de cristais de silício com gálio, transformando o material em um condutor do tipo p, nomenclatura devida à criação de cargas móveis positivas. Em seguida, o físico Gerald Pearson desenvolveu uma camada ao redor desse silício dopado com lítio, resultando em uma camada do tipo n, com cargas móveis negativas, permitindo a criação de um campo elétrico permanente devido à junção das camadas p-n. Continuando essas pesquisas, juntamente com o engenheiro Daryl Chapin, os pesquisadores mostraram que, de acordo com os testes realizados, a substituição do gálio e do lítio por arsênio e boro foi capaz de aprimorar características como a aderência entre esses elementos e a resistência de contato entre eles, facilitando sua soldagem e aumentando significativamente sua eficiência, alcançando uma taxa de conversão de 6% ([CHAPIN; FULLER; PEARSON, 1954](#)). A taxa de conversão indica a quantidade de energia solar que o painel é capaz de gerar em relação à quantidade de luz solar que incide sobre ele.

Já na década de 1960 a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) começou a usar painéis solares fotovoltaicos em suas missões espaciais, pois os painéis solares eram ideais para fornecer energia elétrica às espaçonaves, uma vez que não exigiam combustível e podiam operar de forma confiável no espaço. Na década de 1970, durante

a crise do petróleo, houve um aumento no interesse por fontes de energia alternativas, impulsionando o desenvolvimento e a adoção de sistemas solares fotovoltaicos em aplicações comerciais e residenciais.

Apesar de avanços significativos observados nas décadas de 1980 e 1990, com o aumento da eficiência e diminuição da massa de painéis fotovoltaicos, além da redução do custo de produção, foi de fato no século XXI que a popularização e difusão da tecnologia foi concretizada. No início do século a energia solar fotovoltaica experimentou um crescimento exponencial em todo o mundo, impulsionada por avanços tecnológicos, redução ainda maior de custos e preocupações com a sustentabilidade ambiental. Com o passar dos anos, grandes usinas solares foram construídas em várias partes do mundo, e a instalação de sistemas fotovoltaicos em residências e edifícios comerciais tornou-se cada vez mais comum (IEA, 2020).

A energia solar fotovoltaica evoluiu ao longo dos anos, passando de uma curiosidade científica a uma fonte de energia viável e sustentável. A história da energia solar fotovoltaica é um testemunho da capacidade de inovação e da perseverança humana na busca por soluções energéticas mais limpas e eficientes.

## 2.2 Características da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil

Por integrar grande extensão territorial e contar com a irradiação solar favorável, o Brasil possui um enorme potencial para investimento em energia fotovoltaica. Segundo Souza Cabral, Torres e Senna (2013), o país permanece a maior parte do ano com dias ensolarados, e ainda, mesmo a região sul do Brasil, que apresenta a menor irradiação solar do país (Figura 2), possui média de irradiação solar superior aos países da Europa, como a Alemanha, Espanha e Portugal, que, por sua vez, possuem as maiores médias anuais de radiação solar do continente europeu.

Minas Gerais é o estado brasileiro com maior potencial de energia fotovoltaica instalado. Um dos motivos se deve ao fato que o estado possui média de radiação solar maior que a média nacional. Outro fator que explica essa força no setor é que o território já possuía várias redes de alta tensão que cruzavam o Estado, o que diminuiu o custo para escoamento da energia gerada. Segundo Reis e Tiba (2016), Minas Gerais tem seu território coberto por 15 sub-regiões bem definidas, sendo que a região norte apresenta a maior média de radiação solar anual do estado por possuir períodos mais secos. Dentre as sub-regiões, existem diversas chapadas e planaltos que favorecem aos grandes empreendimentos com custo mais reduzido de preparação do solo. Os autores ainda citam as diversas estradas federais que cortam o estado facilitando o transporte de equipamentos fotovoltaicos.

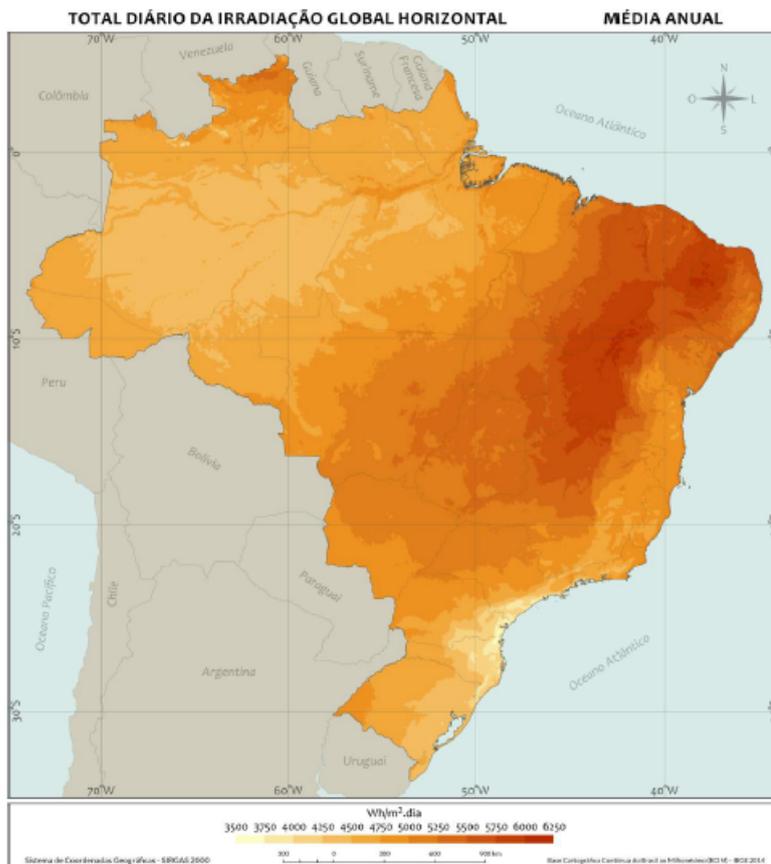


Figura 2 – Mapa Brasileiro de Irradiação Solar - Média Anual. Fonte: [Martins et al. \(2017\)](#).

## 2.3 Regulamentação Vigente

As concessionárias de energia elétrica são responsáveis pela distribuição de energia até a maioria dos comércios, residências e indústrias. Elas possuem grande importância para o setor de energia fotovoltaica quando analisados os sistemas geradores *on-grid*, pois estes sistemas não possuem baterias para armazenamento de energia e, dessa forma, precisam escoar a carga excedente pela rede de distribuição da concessionária que o atende.

Um dos grandes desafios para as concessionárias do setor elétrico do país é fazer com que sua rede de transmissão de energia consiga atender aos clientes, pois existem aqueles indivíduos que apenas consomem energia e também clientes que injetam energia na rede. Segundo a Resolução Normativa ANEEL nº482/2012, todo cliente tem o direito de gerar sua própria energia e a concessionária responsável pelo cliente deve aprimorar seu sistema de forma que esse cliente consiga fornecer o excedente de energia gerada para o sistema de distribuição. Assim, quando a geração for maior que o consumo, o saldo positivo de energia poderá ser utilizado para abater o consumo em meses subsequentes.

Dentre os sistemas de energia fotovoltaica, existem os sistemas *on-grid*, sistemas *off-grid* e os sistemas híbridos. Sistemas *on-grid* são aqueles conectados à rede de uma distribuidora de energia. Eles fornecem energia para a unidade consumidora apenas quando

há fornecimento pela rede e caso a geração seja maior que o consumo instantâneo, o excedente é injetado na rede da concessionária. Os sistemas *off-grid* funcionam de forma independente de uma distribuidora de energia. Eles geram energia enquanto houver radiação solar e armazenam parte dessa energia em baterias para abastecer a instalação quando não houver geração. Já os sistemas híbridos utilizam a rede da concessionária para injetar energia, mas também possuem baterias acopladas. Este sistema é amplamente utilizado em localidades que são atendidas por energia mas que também estão sujeitas a uma alta frequência de interrupção no fornecimento de energia pela distribuidora.

Dentre os principais componentes de um sistema fotovoltaico citam-se: o painel solar fotovoltaico, o inversor e os dispositivos de segurança.

### 2.3.1 Lei 14.300

A lei 14.300 apresenta uma norma que rege as novas instalações fotovoltaicas. Projetos homologados a partir de 2023 devem pagar a TUSD (Tarifa do Uso do Sistema de Distribuição) para cada unidade de energia injetada na rede. Essa tarifa varia de acordo com a tensão na qual o cliente é atendido: média tensão (Grupo A) ou baixa tensão (Grupo B).

A TUSD refere-se aos custos cobrados pela concessionária de energia para cobrir os gastos relacionados à operação e manutenção da rede elétrica que transporta a energia desde as centrais geradoras até as unidades consumidoras, incluindo a energia gerada por sistemas de microgeração e minigeração distribuída, como a energia solar fotovoltaica.

A nova regra reduz o valor da energia elétrica compensada. De maneira geral, a cada 1 kWh injetado na rede da concessionária o cliente teria 1 kWh de crédito durante 60 meses. Com a configuração vigente da norma atualmente, para cada 1 kWh o cliente tem de crédito 0,84 kWh e o restante deve ser pago na forma da TUSD.

A TUSD é uma tarifa paga pelos consumidores para compensar a concessionária pelos serviços de:

- **Transporte de energia:** A energia gerada (seja por grandes usinas ou por pequenos sistemas de microgeração) precisa ser transportada por uma rede extensa de distribuição até as unidades consumidoras.
- **Manutenção da rede:** A infraestrutura elétrica, como fios, transformadores e postes, precisa ser mantida, reparada e modernizada.
- **Serviços operacionais:** A concessionária precisa garantir que a rede funcione com confiabilidade e segurança, ajustando a oferta e a demanda de energia.

A Lei 14.300/2022, chamada de Marco Legal da Geração Distribuída, trouxe mudanças importantes sobre como serão aplicadas as taxas de uso da rede para consumidores com sistemas de geração distribuída (como sistemas solares).

Consumidores que já tinham sistemas instalados até janeiro de 2023 (ou que solicitaram a conexão até essa data) continuarão a seguir as regras antigas até 2045, ou seja, não pagam pela TUSD sobre a energia que injetam e compensam.

Novos consumidores (aqueles que instalaram sistemas após janeiro de 2023) entram em um período de transição. Eles passarão a pagar gradualmente uma parcela da TUSD, até que, a partir de 2029, as novas regras estejam completamente implementadas. As regras para os novos consumidores estão divididas basicamente em três grupos de energia a partir de 2023:

- **Energia consumida diretamente da rede:** Os consumidores continuarão a pagar a tarifa completa, que inclui a energia consumida (TE) e a TUSD correspondente ao transporte dessa energia pela rede.
- **Energia injetada na rede (excedente):** Os consumidores começarão a pagar uma parte da TUSD sobre a energia que injetam e, posteriormente, compensam. Inicialmente, eles pagarão uma fração dessa tarifa, e essa fração aumentará ao longo dos anos.
- **Energia gerada e consumida no local (sem uso da rede):** A energia gerada e consumida instantaneamente dentro da própria unidade consumidora (como durante o dia) continua livre de tarifas, já que não há uso da rede nesse processo.

A lei 14.300, por outro lado, aumentou os custos mensais para as unidades geradoras fotovoltaicas. Em projetos para atendimento de instalações residenciais que, por sua vez, consomem pouca energia, o *payback* teve um aumento médio no Brasil em cerca de 10 meses. Por essa razão, especialistas divergem sobre a legalidade do preceito para impor esta cobrança sobre os clientes a respeito do uso do sistema de distribuição de energia das concessionárias.

## 2.4 Componentes do Sistema Fotovoltaico

O funcionamento adequado do sistema fotovoltaico é dependente de diversos componentes, alguns mais, outros menos influentes para geração esperada de energia. Para dimensionamento do sistema é necessário conhecer a taxa de irradiação solar da região, média de consumo de energia mensal das instalações, inclinação e sombreamento da superfície de instalação e as características geográficas locais como latitude, longitude e norte geográfico.

### 2.4.1 Painel Solar Fotovoltaico

Os painéis fotovoltaicos são os responsáveis por transformar a energia luminosa proveniente do sol em eletricidade. Desde as primeiras pesquisas sobre o efeito fotovoltaico e as células fotovoltaicas no século XIX, até os dias atuais, o princípio de funcionamento é o mesmo, no qual elementos geram energia ao serem expostos à luz solar.

A célula fotovoltaica utiliza o efeito fotovoltaico para gerar eletricidade. Baseia-se na propriedade de certos materiais existentes na natureza, denominados semicondutores, de possuírem uma banda de valência totalmente preenchida com elétrons e uma banda de condução totalmente vazia a temperaturas muito baixas. Quando os fótons da luz solar na faixa do espectro de radiação visível incidem sobre este material, excitam elétrons da banda de valência enviando-os à banda de condução. A energia presente nos fótons é transferida para os átomos, liberando estes elétrons com alta energia. Uma barreira, que serve como uma camada antirrefletora, consegue impedir que estes elétrons retornem a sua posição anterior, podendo-se direcioná-los para um circuito elétrico, gerando uma tensão e uma corrente elétrica ([NASCIMENTO, 2020](#)).

Uma única célula solar não é capaz de converter energia suficiente para as aplicações reais, por isso é necessário que haja um arranjo entre várias células, formando os painéis fotovoltaicos, que convertem a luz do sol diretamente em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Como é comentado no item 2.1, a descoberta deste efeito é atribuída a Alexandre-Edmond Becquerel em 1839, mas foi somente na segunda metade do século XX que a tecnologia se desenvolveu significativamente para uso comercial e residencial. Cada painel tem um número de células fotovoltaicas específicas para chegar à corrente e tensão necessários durante a atuação do equipamento. No fim, os arranjos fotovoltaicos são compostos de módulos fotovoltaicos combinados a fim de conseguir medições que atendam às necessidades da instalação.

A eficiência dos painéis fotovoltaicos representa a relação entre a potência elétrica produzida pelo módulo fotovoltaico e a potência de energia solar incidente sobre a superfície do mesmo, especificando o quão efetivo é o processo de conversão de energia solar em energia elétrica. Esse índice tem aumentado ao longo dos anos, com pesquisas constantes na área. Segundo o Laboratório Nacional de Energia Renovável dos Estados Unidos (NREL), a eficiência recorde para células solares de silício monocristalino em laboratório ultrapassou 26% ([GREEN et al., 2021](#)). Para os painéis comerciais, a eficiência média varia entre 15% e 20%.

#### 2.4.1.1 Célula Solar

Atualmente, os painéis fotovoltaicos disponíveis no mercado podem conter várias categorias de células solares, mas os dois tipos predominantes são as células de silício

monocristalino e policristalino.

Existem diversos elementos no mercado que são utilizados como matéria prima dos painéis fotovoltaicos, mas a maior parte deles, são compostos por silício. Segundo (TEIXEIRA; RAMOS; AGUIAR, 2021) existem três tipos de silício empregados na indústria fotovoltaica, o silício policristalino, o silício monocristalino e o silício amorfo.

O silício monocristalino tem uma estrutura molecular bem definida, possui maior grau de pureza e atinge maiores eficiências, porém seu custo é mais elevado pois seu processo de produção é mais demorado. Ao contrário do silício monocristalino, o silício policristalino tem uma estrutura menos homogênea e, por consequência, sua eficiência é mais baixa, porém, o processo de fabricação é mais simples, o que diminui os custos.

Após o desenvolvimento das células de silício monocristalino e policristalino mencionadas anteriormente, também conhecidas como células de primeira geração, surgiram as chamadas células de segunda geração. Estas foram concebidas com o objetivo de reduzir o consumo de silício na produção, devido à sua exigência de purificação intensa, que demanda altos custos energéticos, de insumos e de tempo. Estas células são denominadas “filme fino”. Entre as tecnologias desenvolvidas para produzir esses filmes, destacam-se o Silício Amorfo (a-Si), o Disseleneto de Cobre e Índio (CIS), o Telurieto de Cádmio (CdTe) e o Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio (CIGS).

O Silício Amorfo (a-Si) é o mais comum desta geração. Ele é capaz de absorver e converter iluminação difusa, sendo muito utilizado na eletrônica profissional, aplicado em produtos como calculadoras, relógios, entre outros. Estes dispositivos podem operar em ambientes internos, dispensando a exposição direta à luz solar. O silício amorfo tem uma eficiência de conversão cerca de 5% menor do que as células de primeira geração, no entanto, seu custo de produção é consideravelmente mais baixo. Estima-se que em menos de uma década após o surgimento dessas células, os custos tenham caído de 80 dólares por Watt pico (Wp) para cerca de 12 dólares por Watt pico (Wp) (PUPIN, 2019).

Esses filmes finos têm a vantagem de serem maleáveis e leves, podendo ser construídos em uma variedade de formas e áreas. As outras formas de filme fino mencionadas podem apresentar eficiências superiores para o mesmo custo de produção, mas têm a desvantagem de incluir metais pesados em sua composição, como o cádmio, o que limita sua produção.

#### 2.4.1.2 Componentes do Painel Solar Fotovoltaico

Devido à exposição ambiental, os painéis solares estão sujeitos a diversos tipos de desgaste e deterioração, que podem reduzir sua vida útil ou danificá-los, prejudicando seu funcionamento ideal. Para lidar com esses problemas, os módulos solares são encapsulados em uma estrutura mecânica, conforme ilustrado na Figura 3. As células solares são

envolvidas por uma camada de Acetato de Vinila Etileno (EVA) na parte frontal e traseira. Esse polímero age como isolante, não reflete a luz solar e suporta condições extremas de temperatura, umidade e choque mecânico, protegendo as conexões das células contra vibrações ou impactos.

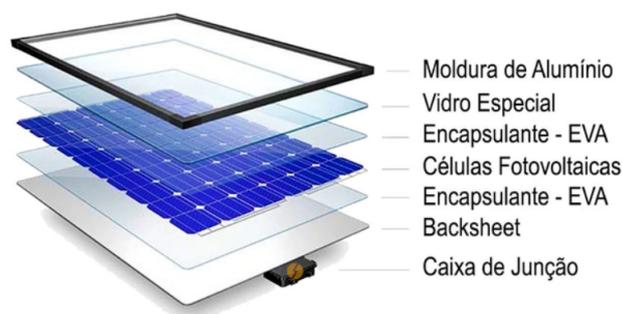


Figura 3 – Componentes do Painel Fotovoltaico. Fonte: Solar (2024)

Acima da camada de EVA, é aplicado um vidro temperado resistente a choques mecânicos, como granizo e detritos, garantindo maior durabilidade ao painel. Além disso, o vidro possui propriedades antirreflexo para assegurar que toda a luz solar incidente seja direcionada às células.

Na parte traseira do módulo encontra-se o Backsheet, um isolante elétrico que protege contra umidade e entrada de gases. Esse material pode ser fabricado a partir de diferentes tipos de polímeros ou plásticos.

Ao redor de toda essa estrutura está o quadro ou armação do módulo, feito de alumínio, que protege e confere rigidez mecânica ao produto final.

Por fim, há a caixa de junção, responsável por conectar todas as células e ligá-las às células do próximo módulo. Portanto, essa caixa deve ser protegida e resistente às condições climáticas adversas.

As caixas de junção já vêm equipadas com cabos e conectores especiais, sendo comum o uso dos conectores MC4, para interligar os painéis solares durante sua instalação no telhado. É recomendado que as caixas de junção possuam pelo menos um grau de proteção IP65, mas o ideal é que tenham o grau IP67 (selado contra poeira e resistente à água). Isso garantirá uma maior durabilidade do painel solar, prevenindo corrosões e assegurando sua longevidade.

#### 2.4.1.3 Classificação do Painel Solar Fotovoltaico

As características dos módulos fotovoltaicos podem ser indicadas e atestadas a partir de classificações de instituições voltadas para o teste de sistemas fotovoltaicos.

Uma das classificações mais encontradas no mercado diz respeito a classificação Tier 1, 2 e 3. Essas classificações são feitas por agências financeiras e não indicam diretamente a qualidade técnica dos painéis, mas sim a robustez financeira e a capacidade de fabricação da empresa. No entanto, empresas Tier 1 tendem a fabricar painéis de alta qualidade.

As empresas classificadas como Tier 1 são fabricantes com forte capacidade financeira e histórico sólido. Seus produtos são amplamente usados em grandes projetos de energia. Eles geralmente têm grande controle sobre a cadeia de produção. As empresas classificadas como Tier 2 são fabricantes menores, com menos controle da produção, mas ainda com uma reputação razoável. São mais comuns em mercados regionais. Já as empresas classificadas como Tier 3, são fabricantes muito pequenos, muitas vezes produzindo painéis sob encomenda ou para uso local. A qualidade pode ser mais inconsistente.

Um outro quesito importante no momento de seleção dos módulos para um sistema fotovoltaico está relacionado às certificações. Certificações são fundamentais para garantir a qualidade dos módulos solares. Entre as mais relevantes estão:

- **IEC 61215:** Certifica a confiabilidade dos módulos ao longo do tempo, através de testes de resistência a fatores climáticos, como calor, frio e umidade.
- **IEC 61730:** Garante a segurança dos módulos em termos elétricos e mecânicos.
- **ISO 9001:** Certifica que o processo de fabricação segue padrões de qualidade.

### 2.4.2 O Inversor

Os inversores fotovoltaicos funcionam conforme o princípio básico da conversão de energia. A energia gerada pelos módulos fotovoltaicos é em corrente contínua. No entanto, a maioria dos dispositivos elétricos e a rede elétrica operam com corrente alternada. Portanto, os inversores desempenham o papel crucial de converter a corrente contínua dos painéis em corrente alternada compatível com a demanda do usuário ou para a injeção dessa energia na rede da concessionária.

Estes inversores devem ser aprovados pela avaliação de conformidade do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) para que não ofereçam risco para o sistema elétrico da concessionária quanto para os equipamentos atendidos pela rede elétrica.

Informações detalhadas do inversor, presentes no *datasheet* do mesmo, devem ser informadas à concessionária durante a solicitação do Parecer de Acesso de Obras para análise e adaptação do ponto de conexão caso necessário.

### 2.4.2.1 Tipos de Inversores

Segundo (PINHO; GALDINO, 2014), os inversores fotovoltaicos podem ser categorizados de acordo com sua aplicação: sistemas fotovoltaicos isolados (SFIs) e sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCRs). Os inversores destinados a SFIs e SFCRs compartilham o mesmo princípio de funcionamento, distinguindo-se, no entanto, na medida em que os inversores para SFCRs devem incorporar configurações de comutação específicas para atender aos requisitos de segurança e qualidade de energia estabelecidos pelas concessionárias.

#### 2.4.2.1.1 Inversores SFCRs

Os inversores utilizados nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede, também conhecidos como sistemas *on grid* (Figura 4), são aqueles que irão injetar uma parte ou o total da energia gerada e não consumida, instantaneamente, na rede de distribuição da concessionária de energia.

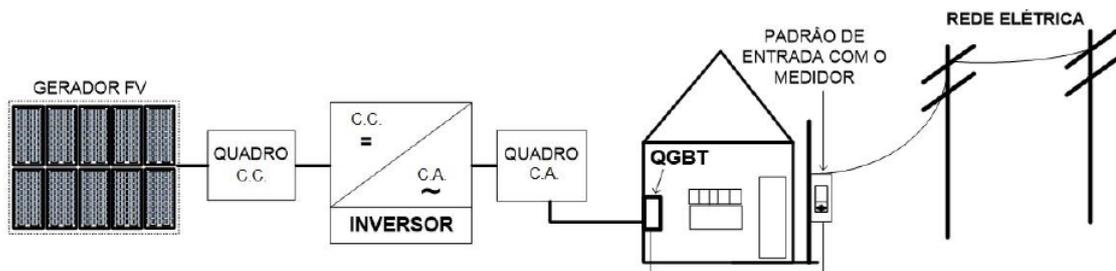


Figura 4 – Ilustração de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede. Fonte: Teles (2017)

Os inversores destes sistemas, ainda podem ser classificados quanto ao seu princípio de funcionamento como:

**Inversores de *String*:** são projetados para lidar com várias *strings* de painéis solares conectadas em série conforme ilustrado na Figura 5. São ideais para sistemas de tamanho médio a grande.

**Microinversores:** Cada painel solar é equipado com um microinversor como ilustra a Figura 6, o que permite o máximo de eficiência em condições de sombreamento e monitoramento individualizado do desempenho de cada painel.

**Inversores Centrais:** Utilizados em grandes usinas solares, esses inversores são responsáveis por converter a energia de múltiplas fileiras de painéis em corrente alternada como ilustra a Figura 7.

**Inversores Híbridos:** Além da conversão de energia solar, esses inversores podem trabalhar em conjunto com baterias para armazenamento de energia, permitindo a utilização da energia solar durante a noite ou em períodos de baixa irradiação solar. Uma vez que as

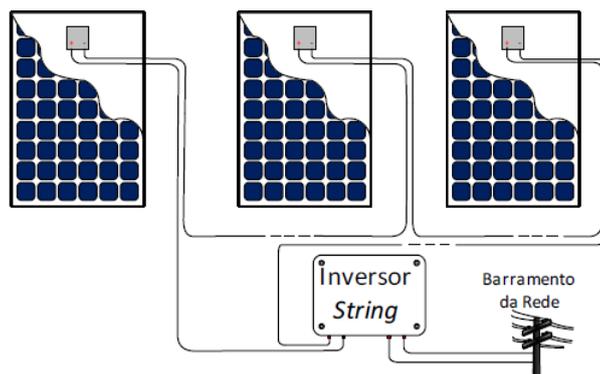


Figura 5 – Ilustração de um Sistema Fotovoltaico com Inversor *String*. Fonte: Teles (2017)

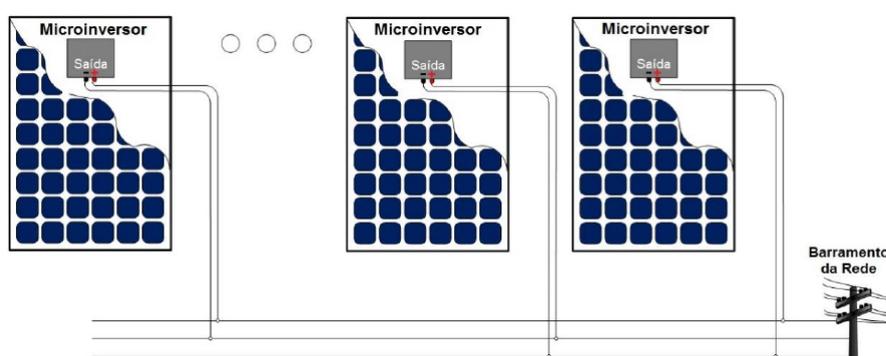


Figura 6 – Ilustração de um Sistema Fotovoltaico com Microinversores. Fonte: Teles (2017)

baterias do sistema estão carregadas, o inversor passará a injetar a energia sobressalente na rede.

#### 2.4.2.1.2 Inversores SFIs

Os inversores utilizados nos sistemas fotovoltaicos independentes, também conhecidos como sistemas *off grid*, são aqueles que irão injetar o total da energia gerada e não consumida instantaneamente, no conjunto de baterias para armazenamento de carga. A Figura 8 ilustra esse tipo de inversor em um sistema *off grid*.

#### 2.4.2.2 Influência dos Inversores no Sistema Fotovoltaico

Os inversores, atualmente, representam o maior custo dentre todos os equipamentos fotovoltaicos, chegando a 50% do valor total do sistema instalado.

Dessa forma, os inversores desempenham um papel crucial na eficiência e no desempenho global dos sistemas fotovoltaicos. Uma escolha adequada do tipo e capacidade do inversor pode maximizar a produção de energia solar e otimizar a relação custo-benefício do sistema. Além disso, inversores de alta qualidade oferecem recursos avançados de monitoramento e diagnóstico, facilitando a manutenção e garantindo a longevidade do sistema.

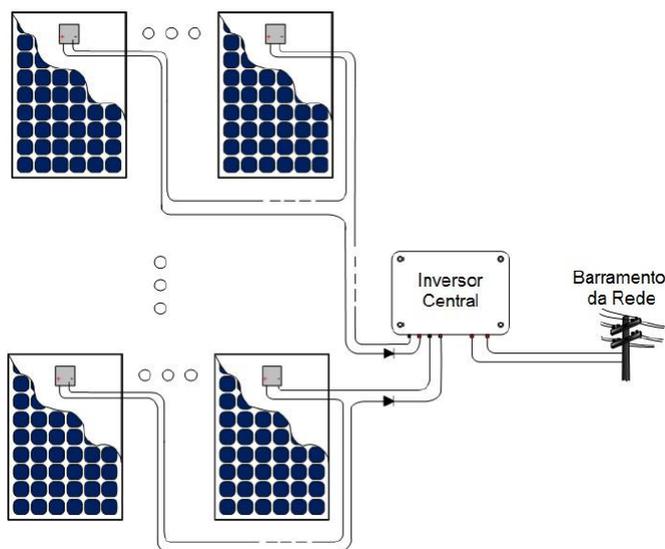


Figura 7 – Ilustração de um Sistema Fotovoltaico com Inversor Central. Fonte: Teles (2017)

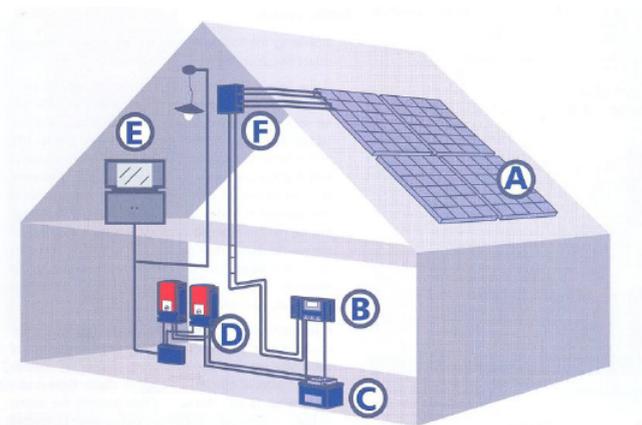


Figura 8 – Ilustração de um SFI domiciliar: A-painel fotovoltaico; B-controlador de carga; C-banco de baterias; D-inversores; E-cargas c.a.; F-caixa de conexão. Fonte: PINHO e GALDINO (2014)

É importante para o sistema que o inversor dissipe o mínimo de energia possível, seja ela em forma de calor ou consumo do próprio equipamento. Para isso, existem normas de instalação que favorecem a ventilação do inversor e também mecanismos nos aparelhos que os deixam em *standby* enquanto não há geração de energia. Portanto, é primordial verificar a eficiência do inversor antes de escolher o sistema pois, para modelos diferentes, a eficiência também diverge.

### 2.4.3 Dispositivos de Proteção

Os sistemas fotovoltaicos possuem sistemas de proteção assim como qualquer outro sistema elétrico. Dessa forma, os principais dispositivos utilizados para proteger pessoas e equipamentos são as chaves, os fusíveis, os disjuntores e os dispositivos de proteção contra

surto(PINHO; GALDINO, 2014).

#### 2.4.3.1 Chaves Seccionadoras

As chaves seccionadoras, como as ilustradas na Figura 9 são projetadas para fornecer um método seguro de desconexão, garantindo que o circuito seja interrompido de forma confiável, especialmente em situações de emergência ou quando é necessário isolar um equipamento elétrico para manutenção.

Sua função principal é permitir a abertura e o fechamento de circuitos elétricos sob carga normal, bem como isolar equipamentos elétricos para manutenção ou reparo. Elas também podem ser usadas para proteger contra sobrecargas, curtos-circuitos e outros problemas elétricos, ao cortar completamente a energia para um circuito quando necessário.



Figura 9 – Chave seccionadora. Fonte: PINHO e GALDINO (2014)

#### 2.4.3.2 Fusíveis

Os fusíveis, ilustrados na Figura 10, são dispositivos elétricos de proteção projetados para interromper a corrente elétrica quando ocorre uma sobrecarga ou curto-circuito em um circuito elétrico. Sua função principal é proteger os equipamentos e circuitos elétricos contra danos causados por correntes excessivas, prevenindo incêndios e outros riscos à segurança.

Quando a corrente elétrica que passa pelo fusível excede seu limite nominal, o fusível aquece e, eventualmente, funde-se, interrompendo assim o fluxo de corrente e protegendo o circuito. Isso evita danos aos equipamentos conectados e previne riscos de incêndio.

Os fusíveis são componentes essenciais em sistemas elétricos residenciais, comerciais e industriais, e são utilizados em uma ampla variedade de dispositivos, desde simples aparelhos eletrônicos até grandes sistemas industriais de distribuição de energia.

#### 2.4.3.3 Disjuntores

Os disjuntores, ilustrados na Figura 11, são dispositivos elétricos de proteção projetados para interromper o fluxo de corrente elétrica em um circuito quando ocorrem condições anormais, como sobrecarga ou curto-circuito. Sua função principal é garantir a segurança dos equipamentos elétricos e das instalações, bem como proteger contra incêndios causados por correntes elétricas excessivas.



Figura 10 – Exemplos de fusíveis: (a)-fusível apropriado para arranjo fotovoltaico; (b)-fusível NH; (c)-fusível tipo faca; (d)-fusível Cartucho. Fonte: PINHO e GALDINO (2014)



Figura 11 – Disjuntor monofásico, bifásico e trifásico. Fonte: PINHO e GALDINO (2014)

O dispositivo atua em função dos níveis de corrente elétrica que atravessa a instalação, ou seja, em caso de sobrecarga o aparelho desarma e interrompe o funcionamento de toda a rede, impedindo danos ao próprio circuito e aos eletrônicos nele conectados.

Além de proteger contra sobrecargas e curtos-circuitos, os disjuntores também servem como interruptores de controle que permitem ligar e desligar o circuito manualmente. Ao contrário dos fusíveis, que precisam ser substituídos após serem acionados, os disjuntores podem ser rearmados após terem sido desligados devido a uma condição anormal. Isso os torna mais convenientes e econômicos a longo prazo.

#### 2.4.3.4 Dispositivo de Proteção Contra Surto

Problemas com eletricidade podem gerar diversos prejuízos em todas as áreas, e na energia solar fotovoltaica é necessário ter essa atenção contra os surtos elétricos. Os dispositivos de proteção contra surto (DPS) são equipamentos que detectam e desviam rapidamente o surto de tensão para o sistema de aterramento, de modo que o disjuntor sequer consegue perceber a fuga. Um DPS é ilustrado na Figura 12.



Figura 12 – Dispositivo de Proteção contra Surto. Fonte: PINHO e GALDINO (2014)

Eles são ligados ao inversor de frequência, ao quadro de proteção da rede elétrica e se liga também ao cabos fotovoltaicos das placas. Por fim, DPS são essenciais para manutenção do sistema fotovoltaico como um todo, garantindo a longevidade e o retorno financeiro.

## 2.4.4 Outros Componentes

Incluídos no sistema existem dezenas de itens que pode variar de acordo com as características de cada usina. Mesmo de forma menos significativa, eles podem influenciar na geração de energia elétrica e por isso todos devem atender às normas vigentes.

### 2.4.4.1 Cabos Solares

Os módulos solares convencionais são fornecidos com cabos já instalados na sua caixa de junção, sendo necessário apenas o kit de engate rápido (geralmente o conector MC4) para fazer a conexão dos módulos com outros cabos.

Os cabos necessariamente são compostos por materiais não inflamáveis, de cores padronizadas, bitolas para a máxima tensão do sistema e ainda ser capazes de suportar intempéries.

### 2.4.4.2 Transformadores

Os transformadores de potência, também chamados de trafos, são utilizados em sistemas fotovoltaicos em que a tensão de saída do inversor de frequência, é maior que a tensão utilizada. Assim, será necessário utilizar um transformador em dois casos:

i) O sistema fotovoltaico conectado à rede, possui tensão de alimentação da concessionária divergente à gerada, dessa forma a tensão deve ser adequada ao fornecimento da rede;

ii) Os equipamentos para os quais o sistema fotovoltaico independente gera energia, possuem tensão nominal de funcionamento divergente daquela gerada.

Os trafos são instalados próximos aos inversores e sua potência, medida em KVA, deve ser maior que a potência do inversor de frequência para evitar danos elétricos.

## 2.5 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico

O dimensionamento do sistema fotovoltaico é realizado a partir da individualidade de cada caso. Isso se deve ao fato de que diversas variáveis são consideradas para a idealização de um projeto.

### 2.5.1 Padrão de Consumo

Nos casos residenciais convencionais, o projeto para geração de energia que atenda ao consumo da instalação é obtido pela análise da fatura de energia, emitida da pela concessionária do local em que o sistema será instalado.

O padrão de consumo da instalação é obtido pela média aritmética,  $\bar{x}$ , do consumo nos últimos 12 meses, conforme a Equação 2.1:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.1)$$

em que:

$\bar{x}$  é a média de consumo nos últimos 12 meses;

$n$  é o número de meses analisados (12);

$x_i$  é o consumo em cada mês  $i$ .

Segundo a Resolução Normativa 1.000/2021, a fatura de energia elétrica deve conter, de forma clara e objetiva, o histórico de consumo da instalação. Isso possibilita encontrar o consumo médio mensal de determinado local.

Essa média é assertiva pois abrange a sazonalidade anual e sua possível interferência no padrão de consumo do local. O valor calculado pode ser acrescido de uma porcentagem para obter margem de erro com o resultado final ou caso o imóvel tenha o projeto de ter novos equipamentos que utilizarão da energia gerada.

Caso o projeto seja realizado em uma instalação nova, uma estimativa pode ser realizada a partir da potência dos equipamentos que serão utilizados na instalação.

### 2.5.2 Potência dos Módulos

A potência dos módulos necessária para atender ao consumo médio do sistema é definida pela quantidade de energia (kWh) gerada com a irradiação do local de instalação.

A modelagem pode ser feita com o auxílio de *softwares* como, por exemplo, o PV\*SOL, o qual retorna a potência necessária para gerar a energia.

#### 2.5.2.1 Curvas Características

Os módulos fotovoltaicos convertem a energia da luz solar em eletricidade. Para analisar e compreender seu desempenho, utiliza-se as curvas características que relacionam a corrente (I) e a tensão (V) geradas pelo módulo sob diferentes condições de iluminação e carga. As principais curvas características são a curva I-V (corrente versus tensão) e a curva P-V (potência versus tensão).

A curva I-V é a representação gráfica da corrente gerada por um módulo fotovoltaico em função da tensão. Essa curva é fundamental para entender como o módulo opera sob diferentes condições de carga e iluminação.

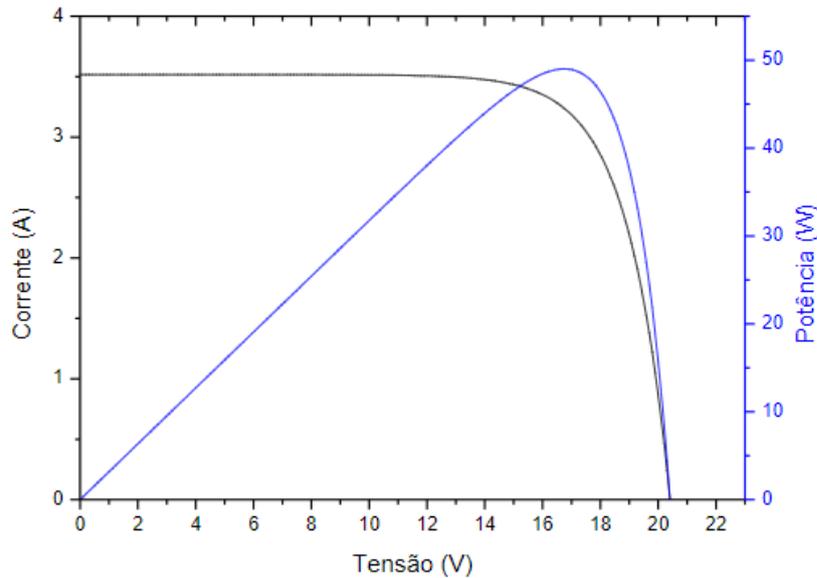


Figura 13 – Curvas características: I x V em preto e P x V em azul. Fonte: Santos (2013)

A curva P-V é derivada da curva I-V e representa a potência gerada pelo módulo em função da tensão. Esta curva ajuda a identificar o ponto de máxima potência ( $P_{mp}$ ).

A curva P-V geralmente tem um pico onde a potência é máxima. Antes do pico, a potência aumenta com a tensão, e após o pico, a potência diminui com o aumento da tensão, como é apresentado na Figura 13.

As curvas características I-V e P-V dos módulos fotovoltaicos são ferramentas essenciais para compreender e otimizar o desempenho dos sistemas solares. Elas fornecem informações críticas sobre a capacidade de geração de corrente, a tensão máxima disponível, e a potência máxima que pode ser obtida. Fatores como irradiância solar, temperatura e sombreamento têm impactos significativos nessas curvas, e a análise detalhada delas é fundamental para o dimensionamento, a operação eficiente e a manutenção de sistemas fotovoltaicos.

### 2.5.2.2 Irradiação e Incidência Solar

A irradiância é a potência da radiação solar que atinge uma superfície específica por unidade de área. Em outras palavras, é a quantidade de energia solar que incide em um determinado ponto, medida por metro quadrado. A irradiância é expressa em watts por metro quadrado ( $W/m^2$ ).

A irradiância varia de acordo com fatores como o horário do dia (ela é maior ao meio-dia e menor durante a manhã e o final da tarde), condições climáticas (em dias ensolarados, é maior; em dias nublados, é menor), inclinação da superfície (painéis solares inclinados corretamente recebem mais irradiância), posição geográfica (regiões mais próximas do equador recebem mais irradiância).

Incidência solar se refere ao ângulo ou à maneira como os raios solares atingem uma superfície. Está relacionada à direção e à intensidade com que a luz do sol chega em um ponto, mas não mede a quantidade de energia em si.

A incidência solar depende principalmente da posição do sol no céu, que varia conforme a latitude (inclinação dos raios solares muda de acordo com a posição geográfica, locais mais próximos ao equador têm raios solares mais perpendiculares), hora do dia (Ao amanhecer e ao entardecer, o ângulo de incidência é mais inclinado, o que resulta em menor intensidade de radiação solar, enquanto ao meio-dia, o ângulo de incidência é mais perpendicular, resultando em maior intensidade) e a inclinação da superfície (incidência solar é maior quando a superfície está diretamente perpendicular aos raios solares, maximizando a captura de energia).

A radiação solar que atinge a superfície varia tanto no espaço quanto no tempo, influenciada pelos movimentos do planeta, com ciclos diários e sazonais bem definidos. Além disso, a radiação é impactada por fatores atmosféricos, como a presença de poluentes, mudanças na nebulosidade e a concentração de aerossóis. Isso exige que os instrumentos utilizados tenham a sensibilidade necessária para captar todas essas variações e um tempo de resposta menor do que a menor variação que se deseja monitorar.

O modelo BRASIL-SR é um modelo físico desenvolvido para estimar a radiação solar incidente na superfície terrestre, com foco no território brasileiro. Ele foi criado para atender à necessidade de informações mais precisas sobre a disponibilidade de radiação solar em diferentes regiões do Brasil, essencial para aplicações em energia solar, meteorologia, agricultura, entre outras.

Segundo [Martins et al. \(2017\)](#), o modelo BRASIL-SR utiliza informações obtidas por satélites geoestacionários, como o GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), em combinação com dados meteorológicos de superfície. Esses dados incluem informações sobre a cobertura de nuvens, a umidade atmosférica, o conteúdo de vapor d'água e outros fatores que afetam a transmissão da radiação solar.

Alguns bancos de dados confiáveis, públicos e que utilizam esta metodologia podem ser encontrados no portal do Ministério de Minas e Energia do Governo Federal.

### 2.5.2.3 Sombreamento

O sombreamento ocorre quando objetos como árvores, edifícios, ou até mesmo sujeira e detritos, bloqueiam a luz solar de atingir as células solares. Esse bloqueio pode ser parcial ou total e tem um impacto significativo na eficiência e na saída de energia dos painéis fotovoltaicos.

Quando uma parte do painel solar é sombreada, a produção de energia da célula afetada diminui. Como as células solares em um painel são conectadas em série, a corrente elétrica gerada por elas é determinada pela célula com a menor corrente. Portanto, mesmo um pequeno sombreamento pode reduzir significativamente a produção de energia do painel inteiro.

O sombreamento pode causar o efeito de ponto quente nas células solares. Quando uma célula é sombreada, ela pode começar a aquecer mais do que as outras células não sombreadas, pois a corrente que passa por ela é dissipada na forma de calor. Isso pode danificar permanentemente a célula e reduzir ainda mais a eficiência do painel.

Nos sistemas de corrente contínua (CC), o sombreamento pode ter um efeito mais pronunciado, pois todos os painéis de um mesmo *string* precisam operar com a mesma corrente. Já em sistemas de corrente alternada (CA), com microinversores, o impacto pode ser mitigado, pois cada painel opera de forma independente.

Para minimizar os efeitos do sombreamento, diversas técnicas podem ser aplicadas:

- **Otimização do Layout do Sistema de Posicionamento Estratégico:** Colocar os painéis solares de maneira a evitar áreas que possam ser sombreadas durante o dia.
- **Inclinação e Orientação:** Ajustar a inclinação e a orientação dos painéis para maximizar a exposição solar.
- **Uso de Microinversores:** Permitem que cada painel opere de forma independente, reduzindo o impacto do sombreamento em todo o sistema.
- **Otimizadores de Potência:** Dispositivos que otimizam a saída de cada painel individualmente, minimizando as perdas causadas pelo sombreamento.
- **Manutenção Regular e Limpeza:** Manter os painéis livres de sujeira, folhas e outros detritos que possam causar sombreamento parcial.
- **Monitoramento:** Utilizar sistemas de monitoramento para identificar rapidamente áreas sombreadas e tomar medidas corretivas.

O sombreamento pode ter um impacto significativo na eficiência e na produção de energia de sistemas fotovoltaicos. Entender e mitigar os efeitos do sombreamento

é crucial para maximizar a eficiência dos painéis solares e garantir uma produção de energia sustentável e eficaz. Com técnicas adequadas de posicionamento, uso de tecnologias como microinversores e manutenção regular, os efeitos do sombreamento podem ser significativamente reduzidos.

#### 2.5.2.4 Orientação dos Módulos

Em geral, para uma operação adequada e eficiente, os módulos fotovoltaicos devem estar orientados em direção à linha do equador, como ilustrado na Figura 14. Nas instalações do hemisfério sul, a face dos módulos fotovoltaicos deve estar orientada em direção ao norte verdadeiro.

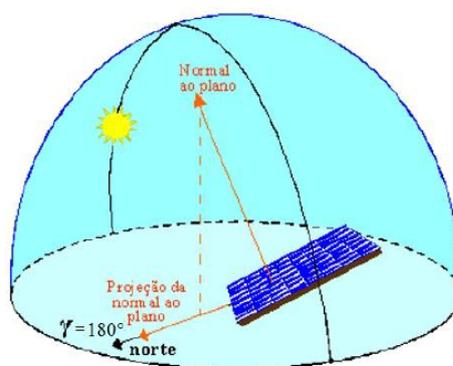


Figura 14 – Inclinação da Terra em relação ao Sol. Fonte: PINHO e GALDINO (2014)

Na maioria dos locais, a direção do norte verdadeiro (ou sul verdadeiro) não coincide com o norte magnético (ou sul magnético) indicado pela bússola, como ilustrado na Figura 15. Neste caso, é necessário ser feita a correção do referencial magnético. Para tal, usa-se a Declinação Magnética do local de instalação, a qual pode ser obtida facilmente através de mapas e programas computacionais disponibilizados por diversos organismos.

A declinação magnética em uma determinada área mudará lentamente ao longo do tempo, possivelmente de 2 até 25 graus a cada cem anos ou mais, dependendo de quão longe dos polos magnéticos ela está. O movimento complexo do fluido no núcleo externo da Terra (a região metálica derretida que fica de 2.800 a 5.000 km abaixo da superfície da Terra) faz com que o campo magnético mude lentamente com o tempo. Essa mudança é conhecida como variação secular.

Devido à variação secular, os valores de declinação mostrados em cartas topográficas, marítimas e aeronáuticas antigas precisam ser atualizados para que sejam usados sem grandes erros. Infelizmente, as correções de mudanças anuais fornecidas na maioria desses mapas não podem ser aplicadas de forma confiável se os mapas tiverem mais do que alguns anos, pois a variação secular também muda com o tempo de maneira imprevisível.

Alguns modelos matemáticos conseguem oferecer em um formato gráfico, usando a API do Google Maps, a declinação computada para qualquer lugar na Terra. (Anexo I)

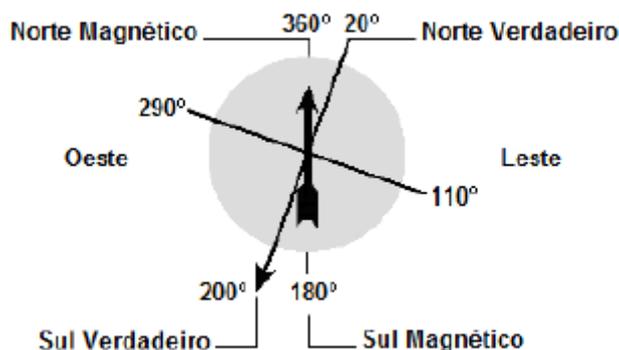


Figura 15 – Exemplo de correção para uma declinação magnética de 20° negativos. Fonte: PINHO e GALDINO (2014)

#### 2.5.2.5 Inclinação dos Módulos

A energia fotovoltaica é gerada a partir da conversão da luz solar em eletricidade, um processo diretamente afetado por fatores astronômicos e geográficos. Um dos aspectos mais importantes a considerar na eficiência dessa conversão é a inclinação da Terra em relação ao Sol. A inclinação do eixo terrestre e os movimentos da Terra ao redor do Sol desempenham um papel crucial na intensidade e na distribuição da radiação solar recebida em diferentes pontos do planeta ao longo do ano.

O eixo de rotação da Terra é inclinado em aproximadamente 23,45 graus em relação ao plano da órbita ao redor do Sol (plano da eclíptica). Este ângulo, denominado Declinação Solar (gama) é positivo ao norte e negativo ao sul do Equador, como representado pela Figura 16. Além disso, é responsável pela ocorrência das estações do ano, pois determina como os raios solares incidem sobre a superfície terrestre em diferentes latitudes ao longo dos 12 meses.

Durante o verão em um hemisfério, aquele hemisfério está inclinado na direção do Sol, recebendo maior quantidade de radiação solar. No inverno, o hemisfério está inclinado para longe do Sol, recebendo menos radiação. Essa variação na incidência solar afeta diretamente a quantidade de energia que pode ser captada por sistemas fotovoltaicos.

A latitude de uma localidade influencia a quantidade de radiação solar recebida ao longo do ano e, conseqüentemente, o desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Em regiões próximas ao equador, onde o Sol está mais próximo do zênite durante o ano todo, a variação sazonal na quantidade de energia solar é menos significativa. Em contrapartida, nas regiões de alta latitude (mais próximo dos polos), a diferença na incidência solar entre verão e inverno é acentuada.

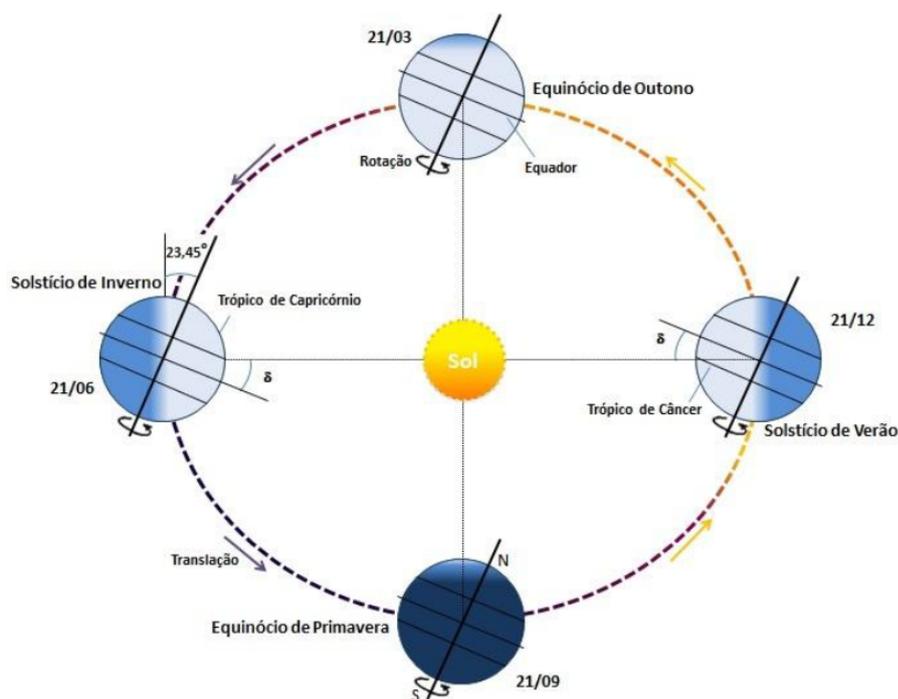


Figura 16 – Inclinação da Terra em relação ao Sol. Fonte: PINHO e GALDINO (2014)

Em sistemas mais avançados, como os de rastreamento solar (*trackers*), o movimento dos painéis segue o movimento do Sol ao longo do dia e do ano, ajustando automaticamente a inclinação e o ângulo, o que melhora significativamente a eficiência do sistema, especialmente em regiões de alta variação sazonal.

Embora a inclinação da Terra seja um fator natural e imutável, o projeto de sistemas fotovoltaicos pode mitigar seus impactos. A escolha da inclinação ideal dos painéis em relação à latitude local, combinada com tecnologias de rastreamento solar, permite adaptar os sistemas às variações sazonais de maneira eficiente.

Além disso, o estudo do comportamento solar ao longo do ano é essencial para prever a produção de energia e garantir que o sistema fotovoltaico seja dimensionado corretamente para atender às demandas energéticas em diferentes períodos do ano.

Por fim, a inclinação dos módulos fotovoltaicos refere-se ao ângulo em que os painéis solares são instalados em relação ao solo. Esse ângulo é crucial para maximizar a quantidade de luz solar que incide sobre os painéis ao longo do dia e ao longo do ano.

Em países como o Brasil, que está majoritariamente localizado em baixas latitudes, os sistemas fotovoltaicos podem manter uma inclinação fixa ao longo do ano com pequenas perdas de eficiência. Já em países de latitudes mais elevadas, como Canadá ou Noruega, ajustes sazonais na inclinação dos painéis são altamente recomendados para otimizar a captação de energia.

Para a autolimpeza dos painéis com as chuvas, recomenda-se que sejam instalados a pelo menos 10° de inclinação. Na prática muitas instalações acabam por desconsiderar ou aproximar o cálculo da inclinação pois são colocados em estruturas já existentes, como telhados.

### 2.5.3 Cálculo do Inversor

O inversor possui limites de configuração nos quais ele pode trabalhar sem danificar o sistema. O equipamento possui limites de *overload* e *underload* aceitáveis para a potência dos módulos do sistema.

Cada modelo de inversor possui um limite de configuração respectivo e não é recomendado dimensioná-lo fora dos padrões determinados.

### 2.5.4 Payback

O *payback* é um indicador que mostra em quanto tempo o capital investido será recuperado pelo investidor. No caso da energia solar, ele é encontrado quando o valor do investimento realizado no início é retornado apenas com a economia ao gerar a própria energia.

## 3 Estudo de Casos

### 3.1 Descrição das propriedades

O estudo dos casos foi realizado a partir de dados relativos ao consumo de energia de duas diferentes instalações: 01 e 02. A instalação 01 é uma residência de 4 pessoas e a instalação 02 é uma sala comercial. As duas instalações localizadas no município de Paraopeba/MG e abastecidas pela rede de distribuição de energia da CEMIG.

O responsável pelas propriedades entrou em contato com a empresa em busca de um sistema de geração de energia fotovoltaica que atenda as instalações. Nesta situação foi elaborado um estudo de caso individual para análise da viabilidade econômica da instalação de um sistema.

O estudo de caso possui uma grande importância pois, levando em conta os critérios de uma determinada instalação, pode não ser economicamente viável o investimento em um sistema de geração própria.

### 3.2 Taxas de radiação e características geográficas

O município de Paraopeba está localizado na região central do estado de Minas Gerais. A temperatura média anual é de 22,1°C com uma pluviosidade média anual de 1244 mm. A variação pluviométrica e da temperatura pode ser encontrada no gráfico da Figura 17. Os fatores climáticos podem interferir no índice de insolação e temperatura dos componentes do sistema.

Segundo CRESESB (2024), os dois meses que possuem as maiores taxas incidência solar são fevereiro e janeiro respectivamente e a menor taxa no mês de junho com 4,17 horas de sol pleno como ilustrado na Figura 18.

### 3.3 Levantamento do consumo das propriedades

A maneira mais comum e assertiva de dimensionar o consumo da instalação, leva em consideração o histórico de consumo anual emitido pela distribuidora de energia na conta de energia elétrica. Os dados levantados para o período de Janeiro de 2023 até Dezembro de 2023, relativos as propriedade em questão, constam nas Figuras 19 e 20.

De acordo com a média anual, o mês cuja potência do sistema teria que ser máxima seria o mês de Janeiro na instalação 01 e Julho na instalação 02.

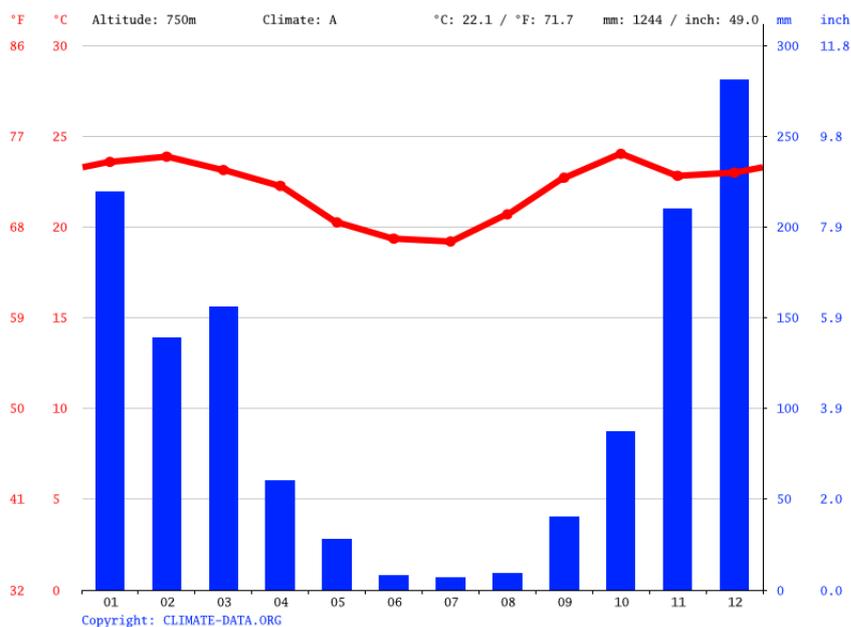


Figura 17 – Índice pluviométrico e de temperatura anual para a cidade de Paraopeba/MG. Fonte: [Data \(2024\)](#)

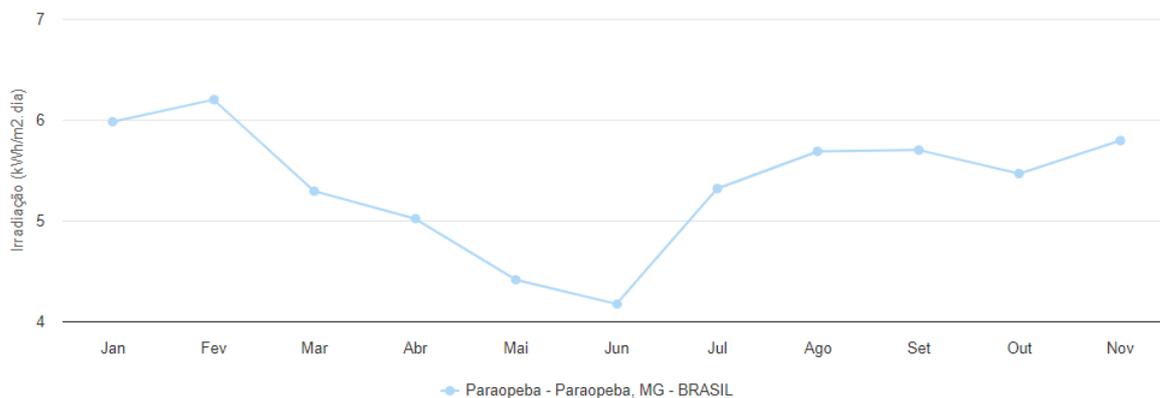


Figura 18 – Incidência Solar anual para a cidade de Paraopeba/MG. Fonte: [Data \(2024\)](#)

Ao longo do ano, além da variação solar, o consumo tende a variar de acordo com a sazonalidade climática. A utilização de equipamentos elétricos de alta potência, em relação aos equipamentos da instalação, têm grande influência no consumo energético ao fim do mês. Dessa forma, os chuveiros podem ter grande impacto nos períodos mais frios, que é quando estão ligados em potência máxima. De maneira inversa, eletroeletrônicos com função de resfriamento, como os refrigeradores e os condicionadores de ar, possuem maior consumo em períodos mais quentes do ano.

A distribuidora em ambos os casos é a CEMIG, a tarifa vigente segundo a regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estipula um valor mínimo pela instalação que custeia a transmissão e a distribuição, além dos encargos, tributos e taxa de iluminação pública. Essa taxa mínima é aplicada a propriedades que consumam até

30kWh/mês em sistemas monofásicos, 50 kWh/mês em sistemas bifásicos e 100kWh/mês em sistemas trifásicos.

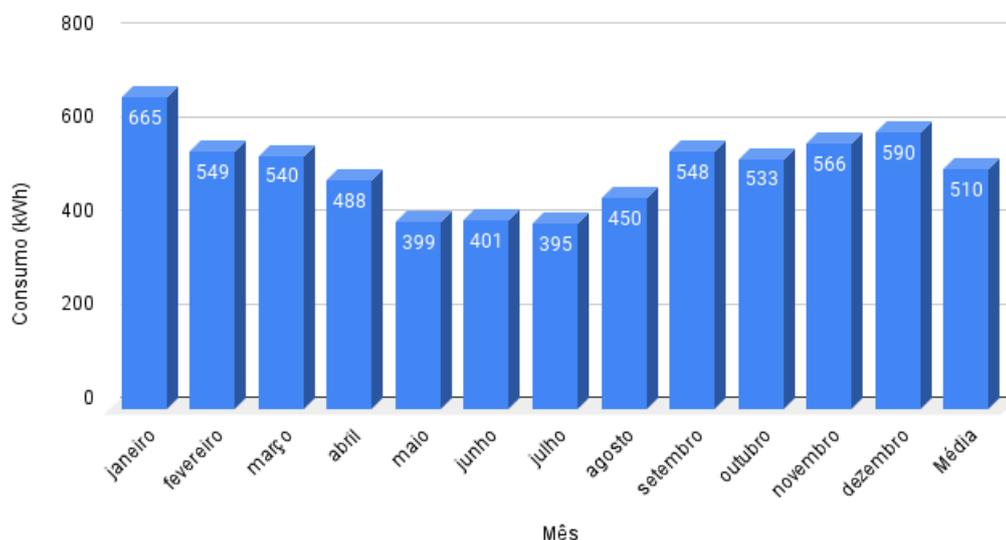


Figura 19 – Consumo mensal e a média anual de consumo energético Instalação 01. Fonte: O autor.

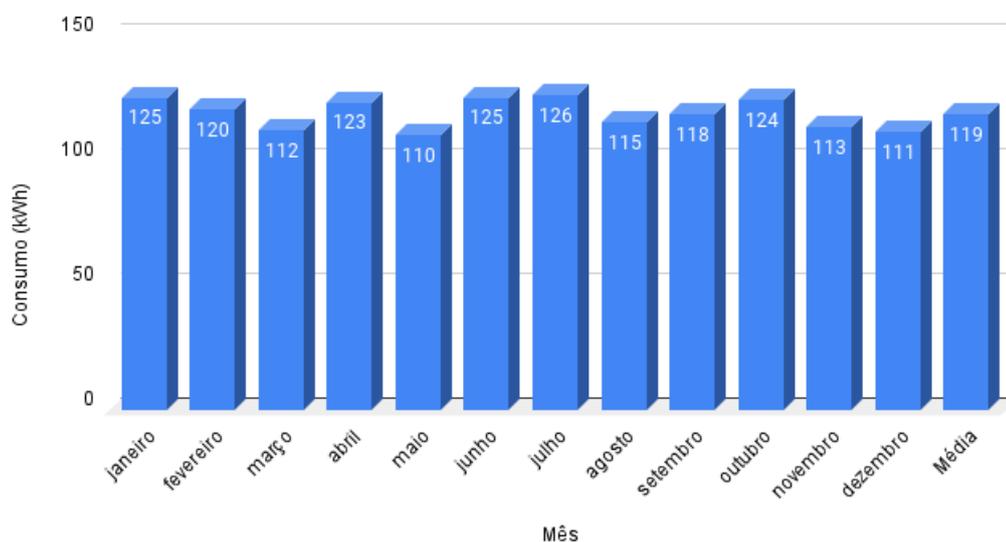


Figura 20 – Consumo mensal e a média anual de consumo energético Instalação 02. Fonte: O autor.

Considerando que essa energia fornecida já é contabilizada no valor mensal da conta de luz, na prática podemos dimensionar o sistema para que produza apenas o consumo que ultrapassa o valor mínimo. Ainda, quando o sistema fotovoltaico fornece para a rede uma energia superior ao consumo mensal, o crédito fica na fatura pelos próximos 60 meses (CEMIG, 2021).

O consumo médio mensal durante o ano foi de aproximadamente 510 kWh para a instalação 01 e 119 kWh/mês para a instalação 02, considerando que as duas instalações são bifásicas e subtraindo os 50 kWh da taxa mínima, o sistema poderia ser dimensionado para suprir 460 e 69 kWh/mês respectivamente. Dessa forma, dividindo o consumo médio mensal por 30, obtemos o consumo médio diário de 17,01 e 3,95 kWh/dia respectivamente.

Segundo PINHO e GALDINO (2014), a potência do sistema fotovoltaico é dada pela Equação 3.1:

$$P_m = \max_{i=1}^{12} \left( \frac{L_i}{HSP_i * Red_1 * Red_2} \right) \quad (3.1)$$

Em que:

$P_m$  (Wp) é a potência do sistema fotovoltaico;

$L_i$  (Wh/dia) é a energia consumida no mês  $i$ ;

$HSP_i$  (h/dia) são as horas de sol pleno do mês  $i$ ;

$Red_1$  (%) é o fator de redução da potência dos módulos, podendo ser considerado 0,75 para painéis de silício cristalino (c-Si).

$Red_2$  (%) é o fator de redução da potência devido as perdas do sistema (fiação, controlador, etc), sendo recomendado a utilização do valor de 0,9.

Para a instalação 01, o sistema inicial com 4,9 kWp seria o mais indicado como apresentado na Tabela 2. Já para a instalação 02 o sistema mais indicado seria o de 1,2 kWp, como apresentado na Tabela 3. Essas sugestões estão de acordo com a ideia inicial do cliente pois seria mais econômico para o consumidor e manteria a conta em um valor reduzido.

Tabela 2 – Potência necessária do sistema fotovoltaico

Instalação 01 - Residencial			
Mês	Consumo kWh/dia	HSP (h/dia)	Pm (Wp)
janeiro	17,01	5,98	4214,32
fevereiro	17,01	6,2	4064,78
março	17,01	5,29	4764,02
abril	17,01	5,02	5020,25
maio	17,01	4,41	5714,66
junho	17,01	4,17	6043,56
julho	17,01	4,53	5563,28
agosto	17,01	5,32	4737,15
setembro	17,01	5,69	4429,11
outubro	17,01	5,7	4421,34
novembro	17,01	5,47	4607,25
dezembro	17,01	5,79	4352,62
Média anual			4827,69

A geração mensal dos meses que produzem mais do que o consumo, apesar de trazer créditos à conta para o mês que não é o suficiente, não é um valor que retorna em dinheiro. Por isso, calculando pelo mês crítico sem considerar o consumo anual na prática, sobredimensionaria o sistema, o que seria mais dispendioso e não traria nenhum benefício a mais enquanto o sistema proposto não teve como objetivo final a produção de um excedente para utilização futura em outros aparelhos.

Tabela 3 – Potência necessária do sistema fotovoltaico

Instalação 02 - Comercial			
Mês	Consumo kWh/dia	HSP	Pm (Wp)
janeiro	3,95	5,98	978,57
fevereiro	3,95	6,20	943,85
março	3,95	5,29	1106,21
abril	3,95	5,02	1165,71
maio	3,95	4,41	1326,95
junho	3,95	4,17	1403,32
julho	3,95	4,53	1291,80
agosto	3,95	5,32	1099,97
setembro	3,95	5,69	1028,44
outubro	3,95	5,70	1026,64
novembro	3,95	5,47	1069,81
dezembro	3,95	5,79	1010,68
Média anual			1121,00

## 3.4 Projetos

Os projetos foram produzidos de forma que cada qual atendesse à necessidade da instalação relacionada e foi realizado levando em conta os componentes de melhor custo benefício desde que sejam certificados e módulos Tier A, como citado no item 2.4.1.3.

### 3.4.1 Projeto 01

O projeto 01 está relacionado à residência com quatro pessoas cuja instalação é bifásica e atendida pela distribuidora CEMIG.

#### 3.4.1.1 Dimensionamento dos Componentes do Sistema

Dadas as características da região e a média de consumo mensal das instalações, o dimensionamento do projeto foi realizado de forma a otimizar os custos, tempo de instalação, necessidade de manutenção, dentre outras características.

#### 3.4.1.1.1 Painéis: inclinação, sombreamento, quantidade de módulos

As coordenadas encontradas para a residência sendo a latitude  $19^{\circ}16'5''S$  e a longitude  $44^{\circ}23'5''O$ .

Segundo PINHO e GALDINO (2014) pequenas variações na inclinação não resultam em grandes mudanças na energia gerada anualmente e a inclinação do gerador fotovoltaico pode estar dentro de  $10^{\circ}$  em torno da latitude do local. Ou seja, para a projeto 01 a inclinação deverá estar contida entre  $09^{\circ}16'56''$  e  $29^{\circ}16'56''$ .

Considerando que a inclinação da superfície do telhado da instalação é de  $15^{\circ}$  em direção ao norte, como demonstrado pela Figura 21, foi constatado que não seria necessário a utilização de materiais para inclinação dos módulos, pois a inclinação do telhado seria suficientemente aceitável para produção de energia e também para a autolimpeza dos módulos pela ação da água da chuva. Dessa forma, foi utilizado apenas materiais de fixação dos painéis solares paralelamente ao telhado.



Figura 21 – Telhado da instalação 01. Fonte: O autor.

A residência em estudo possui algumas árvores que podem vir a interferir no sombreamento das placas solares caso não seja mantido o ciclo de poda das mesmas. Para o presente estudo, não foi considerado o sombreamento pelas árvores, pois as ramas ainda não estavam em altura que pudessem interferir na produção de energia. De qualquer modo, o responsável pela unidade consumidora foi instruído acerca das melhores formas de manter o sistema com a geração indicada no projeto inicial.

Para o sistema foi selecionado o módulo de Silício Policristalino (p-Si), ilustrado na Figura 22. Durante muito tempo, este modelo foi preterido frente aos modelos de Silício Monocristalino (m-Si) devido à diferença de eficiência entre os sistemas, porém, com o avanço científico e no desenvolvimento de tecnologia que proporcionou maior eficiência ao p-Si, este se tornou mais vantajoso devido ao custo menor para aquisição.

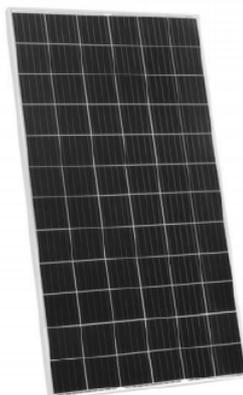


Figura 22 – Módulo de Silício Policristalino Utilizado. Fonte: O autor.

O painel com melhor custo benefício encontrado no mercado foi o de 540Wp, cujos dados técnicos estão detalhados na Tabela 4. Considerando a necessidade de 4,9 kWp, seriam necessárias 9 placas para atender à instalação correspondente.

Tabela 4 – *Datasheet* dos módulos fotovoltaicos

Potência-pico máxima (Pmax)	530 W
Tolerância de potência	0~+1,3%
Tensão em máxima potência (Vmpp)	41,80 V
Corrente em máxima potência (Impp)	12,68 A
Tensão em circuito aberto (Voc)	49,34 V
Corrente de curto-circuito (Isc)	13,41 A
Temperatura nominal de funcionamento (NOCT)	45 +/- 2 °C
Coefficiente de temperatura Pmax	-0,35 % / °C
Coefficiente de temperatura Voc	-0,28 % / °C
Coefficiente de temperatura Isc	-0,048 % / °C
Dimensões	2230 x 1134 x 30 mm
Peso	32,70 kg
Temperatura de operação	-40 ~+85 °C

#### 3.4.1.2 Inversor

Neste caso foi utilizado um inversor de 4kW, que, por sua vez, possui eficiência de 96%.

É comum sobredimensionar a potência dos painéis em relação ao inversor. Isso é chamado de *oversizing* e pode variar em até 40% da potência nominal do inversor. Isso significa que um sistema de 4,9 kWp poderia usar um inversor de 4 kW sem problemas, especialmente em regiões onde as condições de pico de irradiância solar são menos frequentes, como na região do estudo.

Todas as recomendações foram indicadas pelo fabricante conforme a Tabela 5. Uma

instalação além, ou aquém da recomendada, resulta na perda de garantia dos equipamentos pelos fabricantes. Dessa forma, é primordial manter o projeto de acordo com as instruções.

Tabela 5 – *Datasheet* do inversor de frequência do sistema

Parâmetros de entrada CC - SG4K-D	
Máxima potência CC (kW)	6.0
Máxima corrente de entrada	20 A
Máxima tensão de entrada	600V
Tensão de partida	120,0 V
Faixa de tensão MPPT	90 V a 560 V
Máxima corrente de curto-circuito	18/18A
Número de entradas CC	2+2
Parâmetros de saída CA - SG4K-D	
Potencia nominal de saída	4.000 W
Máxima corrente de saída	20 A
Tensão nominal	230 V
Tensão de trabalho	180 a 276 V
Conexão com a rede	220V / 230V
Frequência	45/65 Hz
Fator de potencia	0.99
Fator de distorção harmônica	<3%
Parâmetros Gerais SG4K-D	
Dimensões	390 x 360 x 133 mm
Peso	11,5 Kg
Grau de proteção	IP 65
Consumo noturno	<1 W
Faixa de temperatura de operação	-30 -+ 60 C

#### 3.4.1.3 Dispositivos de Proteção Contra Surtos

Para o referido sistema foi utilizado um Disjuntor Geral Termomagnético, com dois Polos, pois o sistema é bifásico, de 20 A. Também foram utilizados dois Dispositivo de Proteção contra Surto, um para cada fase do sistema.

#### 3.4.1.4 Ligação entre os Componentes

De acordo com os dados de entrada do inversor, tem-se que a tensão em circuito aberto dos painéis não pode exceder a 360V e a corrente não pode exceder a 24A. Para calcular o arranjo fotovoltaico compatível com essas características optando por ligá-los em série ou em paralelo, divide-se a tensão de entrada do inversor pela tensão de cada um dos módulos para os painéis em série e dividimos a corrente pela corrente de curto circuito para o cálculo de quantos módulos podem ser conectados em paralelo. A tensão em circuito aberto dos módulos é de 46,65V. Assim, tem-se:

$$\text{Numero de paineis em serie} = \frac{\text{Tenso de entrada do inversor}}{\text{Tenso em circuito aberto do modulo}}$$

$$\text{Numero de paineis em serie} = \frac{360}{46,65} = 7,7$$

Já para o cálculo de quantos painéis podem ficar em paralelo, tem-se:

$$\text{Numero de paineis em paralelo} = \frac{\text{Corrente de entrada do inversor}}{\text{Corrente em circuito aberto do modulo}}$$

$$\text{Numero de paineis em paralelo} = \frac{24}{11,19} = 2,14$$

Neste caso, poderia fazer até duas linhas (*strings*) paralelas, dividindo assim o número de painéis.

O inversor utilizado possui duas entradas distintas para as *strings*, são os chamados MPPT, dessa forma foi possível utilizar duas *strings* com número de módulos solares divergentes. Em casos em que o inversor possui apenas um MPPT, essas *strings* devem conter mesmo número de módulos para serem conectadas em paralelo.

Uma vez que a arquitetura do telhado permitiu fazer a instalação dos 5 painéis solares em série em uma *string* e 4 painéis solares em série em uma segunda *string*, esta foi a solução escolhida pela equipe de projetos. A tensão e a corrente dos 9 módulos, ligados em 2 strings, será respectivamente de 233,25V e 11,19A no MPPT 1, e 186,60V e 11,19A no MPPT 2.

O diagrama unifilar básico do sistema foi criado e está disponível no Anexo II.

#### 3.4.1.5 Investimento e Payback

O cálculo do investimento proposto pelo projeto, levou em conta o custo do empreendimento, a vida útil do sistema junto com o valor de manutenção e a economia na conta de luz considerando a prospecção da tarifa de energia para os próximos anos e o custo da TUSD (Tarifa do Uso do Sistema de Distribuição).

A empresa responsável pelo projeto oferece como produto final o sistema instalado. Dessa forma, no presente estudo de caso será tratado o valor fechado do empreendimento, que compreende os equipamentos, projetos, homologação perante a concessionária e instalação do sistema. A proposta de investimento inicial da empresa para realização do Projeto foi de R\$20.885,00.

A vida útil considerada para as placas é em torno de 25 anos, e o inversor pode durar aproximadamente até 15 anos. Isso leva à adição de R\$4.379,00 de manutenção ao longo de 20 anos, considerando a substituição do inversor. Em 20 anos o custo com o sistema é em torno de 25 mil reais.

Com previsão de economia de cerca de 330 reais por mês, o *payback* se daria em torno de 6,3 anos.

### 3.4.2 Projeto 02

O projeto 02 está relacionado à sala comercial cuja instalação é bifásica e atendida pela distribuidora CEMIG.

#### 3.4.2.1 Dimensionamento dos Componentes do Sistema

Dadas as características da região e a média de consumo mensal da instalação, o dimensionamento do projeto foi realizado de forma a otimizar os custos, tempo de instalação, necessidade de manutenção, dentre outras características.

##### 3.4.2.1.1 Painéis: inclinação, sombreamento, quantidade de módulos

As coordenadas encontradas para a residência sendo a latitude  $19^{\circ}16'58.0''S$   $44^{\circ}24'01.1''O$ .

A cobertura se trata de uma laje plana como ilustrado na Figura 23. Um estudo foi realizado para analisar resistência da laje ao peso de uma estrutura fotovoltaica e foi constatado que a estrutura atual seria suficiente para a instalação dos equipamentos.

Para instalação em laje, é utilizada uma estrutura para a inclinação dos painéis solares, o que pode aumentar o investimento inicial do sistema. Por outro lado, a estrutura fornece a possibilidade de organizar os painéis na posição ideal de forma a maximizar a geração de energia.



Figura 23 – Telhado da instalação 02 (indicado pela seta). Fonte: O autor.

A residência em estudo possui algumas árvores que podem vir a interferir no sombreamento das placas solares caso não seja mantido o ciclo de poda das mesmas. Para

o presente estudo, não foi considerado o sombreamento pelas árvores, pois as ramas ainda não estavam em altura que pudessem interferir na produção de energia. De qualquer modo, o responsável pela unidade consumidora foi instruído acerca das melhores formas de manter o sistema com a geração indicada no projeto inicial.

Para o sistema foi selecionado o módulo de Silício Policristalino (p-Si), representado pela Figura 24. Durante muito tempo, este modelo foi preterido frente aos modelos de Silício Monocristalino (m-Si) devido à diferença de eficiência entre os sistemas, porém, com o avanço científico e no desenvolvimento de tecnologia que proporcionou maior eficiência ao p-Si, este se tornou mais vantajoso devido ao custo menor para aquisição.

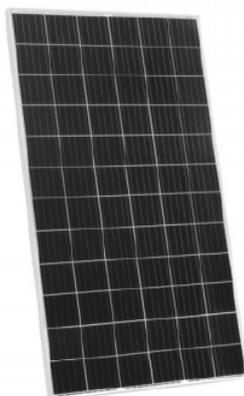


Figura 24 – Módulo de Silício Policristalino Utilizado. Fonte: O autor.

O painel com melhor custo benefício encontrado no mercado foi o de 540Wp, cujos dados técnicos estão detalhados na Tabela 6. Considerando a necessidade de 1,2 kWp, seriam necessárias 3 placas para atender à instalação correspondente.

Tabela 6 – *Datasheet* dos módulos fotovoltaicos

Potência-pico máxima (Pmax)	530 W
Tolerância de potência	0~+1,3%
Tensão em máxima potência (Vmpp)	41,80 V
Corrente em máxima potência (Impp)	12,68 A
Tensão em circuito aberto (Voc)	49,34 V
Corrente de curto-circuito (Isc)	13,41 A
Temperatura nominal de funcionamento (NOCT)	45 +/- 2 °C
Coefficiente de temperatura Pmax	-0,35 % / °C
Coefficiente de temperatura Voc	-0,28 % / °C
Coefficiente de temperatura Isc	-0,048 % / °C
Dimensões	2230 x 1134 x 30 mm
Peso	32,70 kg
Temperatura de operação	-40 ~+85 °C

### 3.4.2.2 Inversor

Neste caso foi utilizado um inversor de 2kW, que, por sua vez, possui eficiência de 96%.

É comum subdimensionar a potência dos painéis em relação ao inversor. Isso é chamado de *undersizing* e pode variar em até 40% da potência nominal do inversor. Isso significa que um sistema de 1,6 kWp poderia usar um inversor de 2 kW sem problemas, especialmente em regiões onde as condições de pico de irradiância solar são menos frequentes, como na região do estudo.

Outra situação em que o subdimensionamento do inversor é comum é quando o cliente deseja instalar mais painéis solares posteriormente visando um aumento na energia gerada pelo sistema fotovoltaico. Isso se dá pela necessidade de suprir o consumo energético de algum novo equipamento que não estava presente no projeto inicial.

Todas as recomendações foram indicadas pelo fabricante de acordo com a Tabela 7. Uma instalação além, ou aquém da recomendada resulta na perda de garantia dos equipamentos pelos fabricantes. Dessa forma, é primordial manter o projeto de acordo com as instruções.

Tabela 7 – *Datasheet* do inversor de frequência do sistema

Parâmetros de entrada CC - SG2K-S	
Máxima potência CC (kW)	3,0
Máxima corrente de entrada	15 A
Máxima tensão de entrada	600V
Tensão de partida	120,0 V
Faixa de tensão MPPT	90 V a 560 V
Máxima corrente de curto-circuito	15/15A
Número de entradas CC	1
Parâmetros de saída CA - SG2K-S	
Potencia nominal de saída	2.000 W
Máxima corrente de saída	9,1 A
Tensão nominal	230 V
Tensão de trabalho	176 a 276 V
Conexão com a rede	220V / 230V
Frequência	55/65 Hz
Fator de potencia	0.99
Fator de distorção harmônica	<3%
Parâmetros Gerais SG2K-S	
Dimensões	300 x 370 x 125 mm
Peso	8,5 Kg
Grau de proteção	IP 65
Consumo noturno	<1 W
Faixa de temperatura de operação	-25 a + 60 °C

### 3.4.2.3 Dispositivos de Proteção Contra Surtos

Para o referido sistema foi utilizado um Disjuntor Geral Termomagnético, com dois Polos, pois o sistema é bifásico, de 20 A; e também foram utilizados dois Dispositivo de Proteção contra Surto, um para cada fase do sistema.

### 3.4.2.4 Ligação entre os Componentes

De acordo com os dados de entrada do inversor, tem-se que a tensão em circuito aberto dos painéis não pode exceder a 360V e a corrente não pode exceder a 15A. Para calcular o arranjo fotovoltaico compatível com essas características optando por liga-los em série ou em paralelo, divide-se a tensão de entrada do inversor pela tensão de cada um dos módulos para os painéis em série e divide-se a corrente pela corrente de curto circuito para o cálculo de quantos módulos podem ser conectados em paralelo. A tensão em circuito aberto dos módulos é de 46,65V. Assim, tem-se que:

$$\text{Numero de paineis em serie} = \frac{\text{Tenso de entrada do inversor}}{\text{Tenso em circuito aberto do modulo}}$$

$$\text{Numero de paineis em serie} = \frac{360}{46,65} = 7,7$$

Já para o cálculo de quantos painéis podem ficar em paralelo, tem-se:

$$\text{Numero de paineis em paralelo} = \frac{\text{Corrente de entrada do inversor}}{\text{Corrente em circuito aberto do modulo}}$$

$$\text{Numero de paineis em paralelo} = \frac{15}{11,19} = 1,34$$

Neste caso, poderia ser feita apenas uma linha (*string*) com todos os módulos que foram projetados para o sistema.

Uma vez que a arquitetura do telhado permitiu fazer a instalação dos 3 painéis solares em série em uma *string*, esta foi a solução escolhida pela equipe de projetos. A tensão e a corrente dos 3 módulos ligados em série será respectivamente de 139,95V e 11,19A .

### 3.4.2.5 Investimento e Payback

O cálculo do investimento proposto pelo projeto, levou em conta o custo do empreendimento, a vida útil do sistema junto com o valor de manutenção e a economia na conta de luz considerando a prospecção da tarifa de energia para os próximos anos e o custo da TUSD.

A empresa responsável pelo projeto oferece como produto final o sistema instalado. Dessa forma, no presente estudo de caso será tratado o valor fechado do empreendimento,

que compreende os equipamento, projetos, homologação perante a concessionária e instalação do sistema. A proposta de investimento inicial da empresa para realização do Projeto foi de R\$9.500,00.

A vida útil considerada para as placas é em torno de 25 anos, o inversor aproximadamente pode durar até 15 anos. O que nos leva a adicionar R\$2.459,00 de manutenção ao longo de 20 anos, considerando a substituição do inversor. Em 20 anos o custo com o sistema é em torno de 12 mil reais.

Com previsão de economia de cerca de 30 reais por mês, o *payback* se daria em torno de 27,8 anos. Este período de *payback* coincidiria com a vida útil do sistema citado. É possível comparar com o período no qual a TUSD não seria custeada ao consumidor, neste caso o tempo de *payback* seria em torno de 15 anos.

### 3.5 Discussão

A partir do presente estudo, identificou-se que podem ocorrer ocasiões em que projetos de sistemas fotovoltaicos não sejam economicamente viáveis de serem executados. Observou-se que o Projeto 02 não seria viável para execução pois o período de retorno do investimento (*payback*) seria maior que a vida útil prevista do próprio sistema devido ao fato de que a nova norma aumenta o custo total do sistema. Dessa maneira, o trabalho exalta a importância da análise assertiva dos ambientes em que os projetos serão instalados visando demonstrar, de maneira esclarecedora, o custo-benefício para o cliente final.

A lei 14.300 reduz o estímulo da população para implementação de sistemas fotovoltaicos residenciais e comerciais. O consumidor deveria ser menos taxado para aumentar o incentivo na utilização de energia proveniente de fontes limpas, diversificar a matriz energética nacional e aumentar a segurança energética do país em períodos de seca.

## 4 Conclusão

O foco do trabalho consistiu em analisar a viabilidade econômica da instalação de dois sistemas fotovoltaicos em meio a um ambiente de reformulação da legislação que rege o sistema nacional de geração distribuída. O sistema proposto obteve sucesso em dimensionar um sistema fotovoltaico a fim de atender a demanda de cada uma das instalações citadas. O projeto de instalação foi idealizado para diminuir o gasto mensal com energia e também atender à curiosidade de indivíduos que buscam entender a viabilidade do sistema fotovoltaico.

O principal critério buscado pelas pessoas que vislumbram a instalação de um sistema fotovoltaico em seu imóvel é o fato de de custear parte da conta perante a concessionária e estagnar o preço do kWh ao longo dos próximos anos, perante a ameaça de um grande aumento inflacionário. A partir do proposto, chegou-se à conclusão que o sistema na instalação 01 seria viável mesmo com a implementação da TUSD na tarifa, porém a instalação 02 ficaria inviável.

É notável que a homologação da nova legislação terá impacto maior nas instalações cujo consumo seja relativamente baixo, proporcionando até mesmo a inviabilidade da instalação dos sistemas fotovoltaicos nestes casos.

Conclui-se que a adoção da energia solar fotovoltaica apresenta um elevado potencial e tende a expandir-se significativamente na matriz energética nacional nos próximos anos, acompanhando a tendência de crescimento global. Os custos de implementação têm se tornado progressivamente mais acessíveis, enquanto os avanços tecnológicos aprimoram a eficiência dos equipamentos e o mercado disponibiliza diversas opções de financiamento, oferecidas tanto por instituições financeiras quanto por empresas privadas especializadas no segmento. Dessa forma, configura-se como uma excelente alternativa para a diversificação das fontes de energia no Brasil, merecendo ser fomentada pois caso o setor mantenha seu ritmo de expansão nos anos vindouros, contribuirá para a geração de empregos e para a rentabilidade econômica.

### 4.1 Sugestão de projetos futuros

Como sugestão de projetos futuros, pode-se criar uma relação de influência da implementação da TUSD em sistemas fotovoltaicos, encontrando assim um limite inferior de consumo de energia no qual a instalação de sistemas seja ou não recomendado.

Para projetos futuros podem ser utilizados *softwares* como o PVWatts que possui precisão maior que a fórmula 3.1 para o cálculo da potência da instalação necessária para

atender a demanda da instalação.

O cálculo realizado pelo trabalho foi simplificado para apresentar para o cliente final a viabilidade financeira do projeto. Para projetos futuros devem ser considerados para o cálculo do *payback* a taxa de iluminação pública, o rendimento que o investimento teria caso fosse aplicado em poupança ou em outras carteiras de investimento e a previsão de aumento da conta de energia de acordo com a inflação. Ainda para o cálculo do *payback*, pode ser utilizado a ferramenta *System Advisor Model* para resultados mais assertivos.

# Referências

- BECQUEREL, Alexandre-Edmond. Memoire sur les Effets Electriques Produits sous l'Influence des Rayons Solaires. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de L'Academie des Sciences*, v. 9, p. 561–567, 1839. Disponível em: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1570572699975814144>. Citado 1 vez na página 13.
- BORBA, Maria Cristina Vidal; GASPAR, Neide Ferreira. Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho. *Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências*, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 10, 11.
- CEMIG. *Cartilha de Micro Geração Distribuída*. 2021. P. 52. Citado 1 vez na página 38.
- CHAPIN, Daryl M; FULLER, Calvin S; PEARSON, Gerald L. A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. *Journal of applied physics*, v. 25, n. 5, p. 676, 1954. Citado 1 vez na página 13.
- CRESESB. *Potencial Solar*. 2024. Disponível em: [cresesb.cepel.br](https://cresesb.cepel.br). Citado 1 vez na página 36.
- DATA, Climate. *Data and graphs for weather and climate in Paraopeba*. 2024. Disponível em: [en.climate-data.org/south-america/brazil/minas-gerais/paraopeba-176007/](https://en.climate-data.org/south-america/brazil/minas-gerais/paraopeba-176007/). Citado 0 vez na página 37.
- FREITAS, Giovana Souza; DATHEIN, Ricardo. As energias renováveis no Brasil: uma avaliação acerca das implicações para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental. *Nexos Econômicos*, v. 7, n. 1, p. 71–94, 2013. Citado 1 vez na página 10.
- GREEN, Martin et al. Solar cell efficiency tables (version 57). *Progress in photovoltaics: research and applications*, Wiley Online Library, v. 29, n. 1, p. 3–15, 2021. Citado 1 vez na página 18.
- IEA. Renewables 2020. Analysis and forecast to 2025. *IEA Publications*, p. 172, 2020. Citado 1 vez na página 14.
- MARTINS, Fernando Ramos et al. Atlas brasileiro de energia solar 2. Inpe, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 10, 15, 30.
- NASCIMENTO, Francisleile Lima. Painel solar fotovoltaica como energia alternativa e sustentável para o estado de roraima-rr. *Boletim de Conjuntura (BOCA)*, v. 1, n. 3, p. 25–34, 2020. Citado 1 vez na página 18.
- PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Atonio. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. first: CEPEL CRESESB, 2014. v. 1. Citado 4 vezes nas páginas 22, 24–26, 32–34, 39, 41.

- PUPIN, Priscila Carvalho. Avaliação dos impactos ambientais da produção de painéis fotovoltaicos através de análise de ciclo de vida. IEM-Instituto de Engenharia Mecânica, 2019. Citado 1 vez na página 19.
- REIS, RJ d; TIBA, C. Atlas Solarimétrico de Minas Gerais-Volume II. *Belo Horizonte: Editora Fu*, 2016. Citado 1 vez na página 14.
- SANTANA, Julie Catherine Siqueira et al. O uso e produção da energia limpa como método de preservação ambiental sustentável. *Epitaya E-books*, v. 1, n. 12, p. 99–111, 2020. Citado 1 vez na página 11.
- SANTOS, José Airton Azevedo dos. MODELO COMPUTACIONAL PARA GERAÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS. *Ciência & Tecnologia*, v. 5, n. 1, 2013. Citado 0 vez na página 29.
- SOLAR, Portal. *Placas fotovoltaicas: tudo o que você precisa saber*. 2024. Disponível em: [www.portalsolar.com.br/placas-fotovoltaicas](http://www.portalsolar.com.br/placas-fotovoltaicas). Citado 0 vez na página 20.
- SOUZA CABRAL, Isabelle de; TORRES, Adriana Cazalgrandi; SENNA, Pedro Rocha. *ENERGIA SOLAR-ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE BRASIL E ALEMANHA*. 2013. Citado 1 vez na página 14.
- TEIXEIRA, Marco Antonio Casadei; RAMOS, Heidy Rodriguez; AGUIAR, AO. Perspectivas de Novos Materiais Alternativos ao Silício para a produção de Células Solares Fotovoltaicas: Uma Revisão Sistemática da Literatura. *Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades*, v. 9, n. 71, p. 48–62, 2021. Citado 1 vez na página 19.
- TELES, Mailson Borges. Avaliação operacional das diferentes arquiteturas de interligação de geradores fotovoltaicos à rede elétrica. Universidade Federal do Pará, 2017. Citado 0 vez nas páginas 22–24.
- VIEIRA, Luiz Bruno. *Análise de emissões de gases de efeito estufa dos resíduos sólidos urbanos do município de Florianópolis a partir da proposição de cenários de valorização de resíduos*. 2023. Tese (Doutorado). Citado 0 vez na página 11.

# I Anexo I - Modelo Magnético Mundial

**US/UK World Magnetic Model - Epoch 2015.0**  
**Main Field Declination (D)**

