



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Ciências e Engenharia – Câmpus de Itapeva

BRUNO MARCUCCI GASPAROTTO

**Dimensionamento e Análise de Viabilidade Econômica para Instalação de
Sistema de Geração de Energia Solar em Empresa Agrícola**

Itapeva - SP
2025

BRUNO MARCUCCI GASPAROTTO

Dimensionamento e Análise de Viabilidade Econômica para Instalação de Sistema de Geração de Energia Solar em Empresa Agrícola

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Conselho de Curso de Engenharia de Produção, da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciências e Engenharia, Câmpus de Itapeva, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Pita Rolle

G249d

Gasparotto, Bruno Marcucci

Dimensionamento e análise de viabilidade econômica para instalação de sistema de geração de energia solar em empresa agrícola / Bruno Marcucci Gasparotto. -- Itapeva, 2025

76 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Produção) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva

Orientador: Rodrigo Pita Rolle

1. Energia. 2. Energia solar. 3. Geração distribuída de energia elétrica. 4. Agricultura. 5. Sustentabilidade. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).



BRUNO MARCUCCI GASPAROTTO

**Dimensionamento e Análise de Viabilidade Econômica para
Instalação de Sistema de Geração de Energia Solar em Empresa
Agrícola**

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Pita Rolle
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

2º Examinador: Prof. Dr. Ricardo Ghantous Cervi
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

3º Examinador: João Paulo Cachaneski Lopes
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

Itapeva, 07/06/2025.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Eloá Aparecida Marcucci e Paulo Henrique Gasparotto pelo apoio e amor incondicional.

À minha irmã Paula Marcucci Gasparotto pela ajuda e por acreditar em mim.

Ao meu primo, Fernando Marcucci Bonella por tornar este estudo possível.

À minha amiga Gislaine Silveira pela ajuda e perseverança.

Ao meu professor orientador Rodrigo Pita Rolle pela ajuda e incentivo.

“Plante a esperança. Cultive com amor.
Colha prosperidade. Escolha a felicidade!”
(Bruno Marcucci Gasparotto).

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver o projeto de um sistema gerador de energia elétrica, conectado à rede, a fim de suprir a demanda energética de uma propriedade agrícola, localizada em Minas Gerais, utilizando-se da geração de energia fotovoltaica. A partir da análise das contas de energia elétrica de uma fazenda estabelecida na cidade de Monte Alegre de Minas estimou-se a meta de geração de energia solar a fim de suprir o consumo médio mensal da propriedade. Para o dimensionamento do sistema gerador, utilizou-se fórmulas que levam em consideração fatores como a irradiação solar, o índice de desempenho relacionado à temperatura dos módulos, temperatura ambiente, velocidade do vento, horas efetivas de Sol, a potência máxima dos painéis e o rendimento padrão de inversores e cablagens. Com a estimativa da potência total do sistema, levantou-se orçamentos de placas solares na faixa de 610 Wp para determinação do fornecedor, considerando os preços totais dos equipamentos, frete e instalação, assim como a qualidade de atendimento e suporte pós-venda. Por fim, analisou-se a viabilidade econômica para instalação do sistema fotovoltaico a partir do cálculo do payback, que apesar do alto investimento inicial, confirmou-se viável, com um retorno estimado em 15 meses após a implantação, para a utilização simultânea de 50% da energia gerada.

Palavras-chave: energia; energia solar; geração distribuída de energia elétrica; agricultura; sustentabilidade.

ABSTRACT

The objective of this work is to develop a project for a grid-connected electric power generating system to meet the energy demand of an agricultural property located in Minas Gerais, using photovoltaic energy generation. Based on the analysis of the electricity bills of a farm located in the city of Monte Alegre de Minas, the target for solar energy generation to meet the average monthly consumption of the property was estimated. To size the generating system, formulas were used that take into account factors such as solar irradiation, the performance index related to the temperature of the modules, ambient temperature, wind speed, effective hours of sunlight, the maximum power of the panels and the standard efficiency of inverters and wiring. With the estimate of the total power of the system, quotes for solar panels in the range of 610 Wp were raised to determine the supplier, considering the total prices of the equipment, freight and installation, as well as the quality of service and after-sales support. Finally, the economic viability of installing the photovoltaic system was analyzed based on the payback calculation, which despite the high initial investment, was confirmed to be viable, with an estimated return of 15 months after implementation, for the simultaneous use of 50% of the energy generated.

Keywords: energy; solar energy; distributed generation of electrical energy; agriculture; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geração de Energia Elétrica por Fonte Renovável no Mundo.....	21
Figura 2 - Geração de Energia Elétrica por Fonte Renovável no Brasil.....	21
Figura 3 – Célula de Silício Monocristalina	23
Figura 4 – Célula de Silício Policristalina	23
Figura 5 – Célula de Silício Amorfa.....	24
Figura 6 – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica.....	27
Figura 7 - Inclinação da Terra	33
Figura 8 - Comparação entre a Irradiação Solar no Brasil e na Alemanha.	34
Figura 9 - Conta de Energia do Mês de Julho de 2024	50
Figura 10 - Comparativo Mensal da Irradiação Solar para as Cidades de Prata e Monte Alegre de Minas.....	53
Figura 11 - Comparativo Mensal da Irradiação Solar para o Plano Horizontal e para o Ângulo Igual à Latitude	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Consumo Mensal de Energia Elétrica em 2024	51
Gráfico 2 – Comparativo dos Valores de Irradiação Solar pelo Inmet e Cresesb	55
Gráfico 3 – Energia Gerada pelo Sistema FV	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo e Custo Mensal de Energia Elétrica em 2024.....	51
Tabela 2 - Estações Meteorológicas Próximas às Coordenadas Geográficas da Fazenda. .	52
Tabela 3 - Valores da Irradiação Solar para 4 Diferentes Inclinações	53
Tabela 4 - Valores de T_c NOCT e η_c para Diferentes Modelos de Painéis.....	56
Tabela 5 – Cálculo da Irradiância (G).....	57
Tabela 6 – Cálculo de T_c e K para Cada Mês (i).....	58
Tabela 7 – Cálculo de H_s	58
Tabela 8 – Cálculo da Potência do Sistema (P_{max})	59
Tabela 9 – Orçamento do Fornecedor 1	60
Tabela 10 – Orçamento do Fornecedor 2	61
Tabela 11 – Composição e Quantidades dos Itens do Sistema FV	62
Tabela 12 – Orçamento Final com a Instalação Incluída.....	63
Tabela 13 – Estimativa de Geração de Energia com $P_{max} = 52,46$ kWp.....	64
Tabela 14 - Estudos 2024 com 80% de Utilização Simultânea.....	65
Tabela 15 - Instalação 18 meses com 80% de Utilização Simultânea.....	66
Tabela 16 - <i>Payback</i> com 80% de Utilização Simultânea.....	67
Tabela 17 - Instalação 18 meses com 50% de Utilização Simultânea.....	68
Tabela 18 - <i>Payback</i> com 50% de Utilização Simultânea.....	69
Tabela 19 - Custo com o Sistema FV para as contas de 2024.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Absolar	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
GD	Geração Distribuída
Cemig	Companhia Energética de Minas Gerais
Cepel	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
Cofins	Contribuição para Financiamento da Seguridade Social
Cresesb	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
FV	Fotovoltaica(o)
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IEA	Agência Internacional de Energia
IGP-M	Índice Geral de Preços – Mercado
Inmet	Instituto Nacional de Meteorologia
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
MME	Ministério de Minas e Energia
NR	Normas Regulamentadoras
PIS	Programa de Integração Social
ProGD	Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica
REN	Resolução Normativa
RTA	Reajuste Tarifário Anual
RTP	Revisão Tarifária Periódica
SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
SciELO	Scientific Electronic
SRE	Sistema de Referência Espacial
Tusd	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição

LISTA DE SÍMBOLOS

Σ	Somatório
C	Carbono
Ca	Cálcio
O(n)	Ordem de um algoritmo
m-Si	Silício monocristalino
p-Si	Silício policristalino
a-Si	Silício amorfo
CIS	Disseleneto de cobre e índio
CIGS	Disseleneto de cobre, índio e gálio
CdTe	Telureto de cádmio
$\tau\alpha$	Produto da transmitância-absortância
CPV	Célula fotovoltaica para concentração
DSSC	Células sensibilizadas por corante
Ta	Temperatura ambiente
TcNOCT	Temperatura nominal de operação da célula
TaNOCT	Temperatura ambiente nominal (condição NOCT)
G	Irradiância solar
GNOCT	Irradiância nominal (condição NOCT)
Eg	Energia diária média gerada
Hd	Horas de Sol diária
Gr	Irradiância de referência dos módulos
Vw	Velocidade do vento
η_c	Eficiência de conversão do módulo fotovoltaico
V	Volts
Hz	Hertz
W/m ²	Watt por metro quadrado
GW	Gigawatt
kWh	Quilowatt-hora
kW	Quilowatt

MW	Megawatt
km	Quilômetro
Wp	Watt-pico

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA.....	16
1.2	JUSTIFICATIVA.....	17
1.3	OBJETIVOS.....	18
1.3.1	Objetivo geral.....	18
1.3.2	Objetivos específicos.....	18
1.4	ESTRUTURA DA DOCUMENTAÇÃO.....	18
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	20
2.2	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	22
2.3	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS AO SISTEMA INTEGRADO.....	26
2.4	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL.....	27
2.5	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NA AGRICULTURA DO BRASIL.....	28
2.6	O MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	28
2.6.1	Silício cristalino.....	29
2.6.2	Silício monocristalino.....	29
2.6.3	Silício policristalino.....	29
2.7	INVERSORES.....	30
2.8	ORIENTAÇÃO DOS MÓDULOS SOLARES.....	32
2.9	DADOS ESTATÍSTICOS.....	33
2.10	NORMATIVAS.....	35
2.10.1	Cemig.....	35
2.10.2	Aneel.....	36
2.10.3	Trajetória do mercado de energia solar no Brasil.....	37
2.10.4	Regulamentação da energia solar.....	40
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	43
3.1	MATERIAL.....	43
3.2	METODOLOGIA.....	44
3.2.1	Levantamento do consumo médio mensal.....	44
3.2.2	Dimensionamento do sistema fotovoltaico.....	44
3.2.3	Escolha dos equipamentos e fornecedores.....	48
3.2.4	Análise de viabilidade econômica.....	48
4	DESENVOLVIMENTO.....	50

4.1	DADOS LEVANTADOS	50
4.2	ANÁLISE DOS DADOS.....	53
4.3	RESULTADOS.....	57
4.4	DISCUSSÕES.....	65
5	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, a humanidade tem consumido os recursos naturais do planeta de forma desenfreada para manter seu padrão energético, ignorando os graves impactos ambientais e a escassez dos mesmos.

Gore (2014, p.32), ressalta que, “a civilização humana e o ecossistema terrestre estão entrando em choque, e a crise climática é a manifestação mais proeminente, destrutiva e ameaçadora desse embate”.

A ligação do ser humano com a energia existe desde os primórdios da espécie, já que as células são compostas por combinações de átomos em movimento. A princípio, o homem gastava energia a partir de atividades corpóreas, com a prática da caça e do extrativismo natural, utilizando de ferramentas rudimentares para auxiliar na transposição do movimento de forma mais prática e diminuindo o gasto energético corporal (Capra, 1982).

A energia está presente em tudo, desde o macro espacial até o quântico, onde há movimento, há energia. Ou seja, a menos que a matéria esteja na temperatura do zero absoluto (0° Kelvin), quando as partículas ficam totalmente paradas, sempre haverá alguma energia sendo exercida. Energia é essencial e sua disponibilidade está diretamente relacionada ao desenvolvimento de um país (Souza; Almeida, 2005).

Segundo Moreira (2021), durante a crise do petróleo nos anos 70 percebeu-se que o recurso não era renovável, uma vez que o mundo todo passou por dificuldades econômicas com o aumento no preço do petróleo (cerca de 400%). Desde então, intensificaram-se as discussões sobre como lidar com a situação caso os recursos não renováveis se esgotassem. Antes da virada do milênio, já estava clara a necessidade pela busca por fontes de energia com quantidade, qualidade e disponibilidade necessárias para substituir as fontes tradicionais.

Moreira (2021) diz que, nos últimos anos a preocupação com o meio ambiente vem se tornando cada vez maior devido ao aquecimento global, e apesar de alguns governos ainda adotarem uma visão conservadora às causas ambientais, as energias renováveis vêm se tornando cada vez mais uma necessidade.

O Portal Solar (2025) afirma que, a fonte de energia renovável com maior potencial de crescimento no Brasil é a solar, principalmente por abrir a oportunidade para o morador comum produzir a sua própria energia.

O Brasil dispõe de um vasto potencial para a geração de energia solar, que vem ganhando cada vez mais espaço na matriz energética do país. Graças aos avanços tecnológicos e à queda nos custos de instalação, essa fonte renovável se consolidou como uma das opções mais viáveis e sustentáveis para a produção de eletricidade. Considerada inesgotável sob a perspectiva humana, a energia solar oferece diversas vantagens em relação às fontes convencionais, como o petróleo, o carvão e o gás natural. Além disso, segundo a Intelbras (2025), a tecnologia fotovoltaica (FV) permite levar energia a áreas remotas, sem provocar danos significativos ao meio ambiente, já que não libera poluentes atmosféricos.

As terras agrícolas representam uma parcela significativa do território nacional, comumente situadas em regiões privilegiadas pela incidência solar. O vasto espaço e as condições ambientais favoráveis na agricultura levantam uma oportunidade de investigação sobre a implementação de geradores fotovoltaicos, a fim de aproveitar da fonte inesgotável de energia fornecida pelo Sol e desta tecnologia que vem se modernizando e ganhando mais relevância no âmbito da geração de energia renovável.

1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A produção agrícola é um dos pilares da sociedade, sustentando a evolução da espécie humana desde cerca de 12 mil anos atrás, durante o período neolítico. A agricultura foi um dos principais fatores para a estabilização das comunidades, que viviam se deslocando e consumindo os recursos naturais das regiões que habitavam, procurando locais que suprissem suas necessidades básicas de sobrevivência. Essa forma de viver ficou conhecida como nômade, que está constantemente se deslocando, sem uma moradia fixa (Caffrey, 2023).

Com o desenvolvimento da civilização, as técnicas agrícolas evoluíram, proporcionando uma maior variedade de culturas e um controle sistemático do cultivo. Porém, isso não assegura total segurança para os agricultores, visto que existem

fatores que não são possíveis controlar, como a incidência solar, as chuvas, a umidade do ar e ação de pragas, que influenciam na qualidade e quantidade da produção agrícola (Freitas; Sperandio, 2018).

Para lidar com os problemas e imprevistos ambientais, se faz necessário utilizar dos recursos e conhecimentos adquiridos pela sociedade, sendo a tecnologia um dos principais meios para se obter um melhor controle e eficiência na produção de alimentos.

Atualmente, é imprescindível o uso de maquinários e tecnologias na produção agrícola, a fim de dinamizar e acelerar os processos, além de proporcionar as condições ideais para um cultivo de qualidade e controlado, reduzindo perdas provenientes de condições ambientais inadequadas ou pragas indesejadas, que afetem a produtividade.

Um recurso essencial para o funcionamento dos maquinários e tecnologias, é a energia elétrica, sendo a fonte de alimentação para o funcionamento dos processos agrícolas modernos, comumente utilizados. As empresas agrícolas despendem um elevado valor financeiro para as companhias de energia elétrica para suprir suas necessidades energéticas, um gasto que tem grande impacto em seus balanços patrimoniais (Silva; Sousa; Gomes, 2021).

Outro fator essencial para a produção agrícola é a luz solar, que proporciona a energia necessária para as plantas realizarem a fotossíntese e gerarem suas flores e frutos. Devido à necessidade de as plantações estarem localizadas em regiões com alta incidência da luz solar, origina-se a oportunidade de estudo do tema, em realizar um melhor aproveitamento das terras agrícolas, a partir da implantação de painéis solares.

1.2 JUSTIFICATIVA

Diante do crescimento populacional, dos problemas ambientais e do alto custo energético demandado na produção agrícola, origina-se a ideia do estudo, a fim de incentivar a utilização de energias renováveis e impulsionar o setor agrícola, tão abrangente e essencial para a economia brasileira.

Com o acesso às contas de energia elétrica de uma propriedade em Minas Gerais destinada à fruticultura, a qual recebe forte incidência de irradiação solar

durante o ano inteiro, identificou-se a oportunidade de uma pesquisa focalizada para averiguação da viabilidade de implantação de sistema fotovoltaico no terreno, de modo que possa também ser replicado em demais localizações.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver o projeto de um sistema gerador de energia elétrica para abastecer em sua totalidade a demanda energética de uma propriedade agrícola em Minas Gerais utilizando o recurso solar para geração de energia fotovoltaica.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estimar a geração de energia solar necessária para atender a demanda energética da propriedade em estudo;
- Dimensionar o sistema calculando sua potência total, quantidade de módulos fotovoltaicos, bem como suas especificações técnicas;
- Realizar uma pesquisa de mercado para identificar os fornecedores dos equipamentos e instalação, mais adequados para o projeto;
- Elaborar uma análise de viabilidade econômica para descobrir se o sistema é economicamente viável e determinar o tempo de retorno do investimento.

1.4 ESTRUTURA DA DOCUMENTAÇÃO

O estudo consiste, primeiramente, em uma revisão bibliográfica sobre as energias renováveis, a energia solar fotovoltaica, os sistemas FV conectados ao sistema integrado, os sistemas FV no Brasil e na agricultura, os tipos de módulos FV, os inversores, a orientação dos módulos solares, os dados estatísticos e as normativas.

Segundamente, apresenta-se uma síntese dos materiais e métodos, com os cálculos utilizados, problemática e proposta de solução. Segue, posteriormente, o desenvolvimento com os dados levantados das contas de energia elétrica e

fatores meteorológicos, a análise dos dados, os resultados da potência estimada para o sistema FV e as discussões com a análise de viabilidade. Encerrando-se com a conclusão e as referências.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é feita uma breve fundamentação teórica para a melhor compreensão dos assuntos abordados no projeto.

2.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS

Fontes renováveis de energia são aquelas que não têm limite de disponibilidade e que provêm de recursos naturais como água, sol, vento, maré e biomassa, para produzir energia limpa e sustentável (Goldemberg *et al.*, 2008).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), algumas das fontes de energia renovável com maior desenvolvimento atualmente incluem:

a) Energia de Biomassa: Utiliza matéria orgânica de origem vegetal para gerar energia. Exemplos incluem bagaço de cana-de-açúcar, palha de arroz, óleos vegetais, entre outros.

b) Energia Eólica: Produzida por turbinas ou aerogeradores que captam a força dos ventos e a convertem em eletricidade. É mais eficiente em regiões com ventos constantes e intensos.

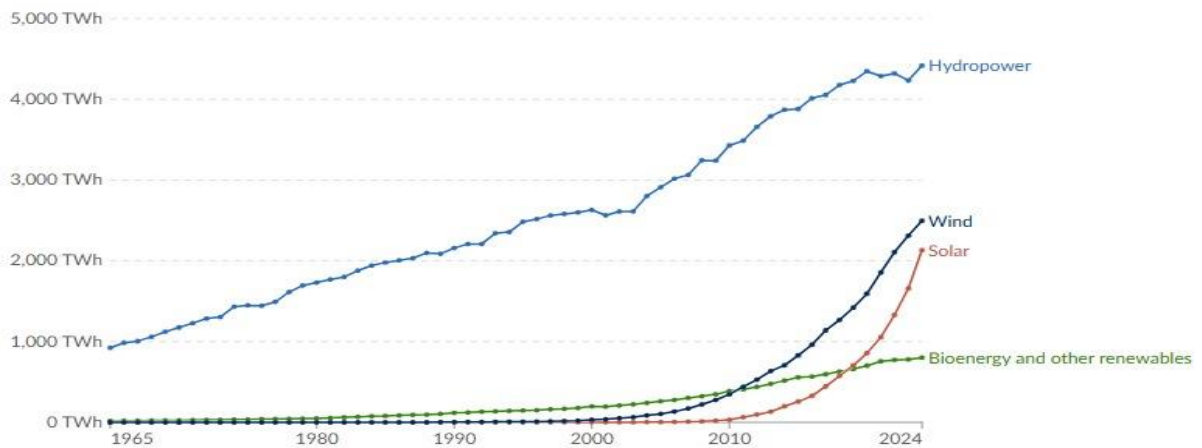
c) Energia Hidrelétrica: Resulta da força da água em movimento, especialmente em rios com desníveis. Essa energia movimenta turbinas conectadas a geradores, produzindo eletricidade.

d) Energia Solar Térmica: Utiliza coletores solares para captar a radiação solar e transformá-la em energia térmica, aquecendo a água que circula pelo sistema.

e) Energia Solar Fotovoltaica: Baseia-se na conversão direta da radiação solar em eletricidade, por meio de materiais semicondutores presentes nas células fotovoltaicas.

Na Figura 1 observa-se os índices de geração de energia para as principais fontes de energia renovável.

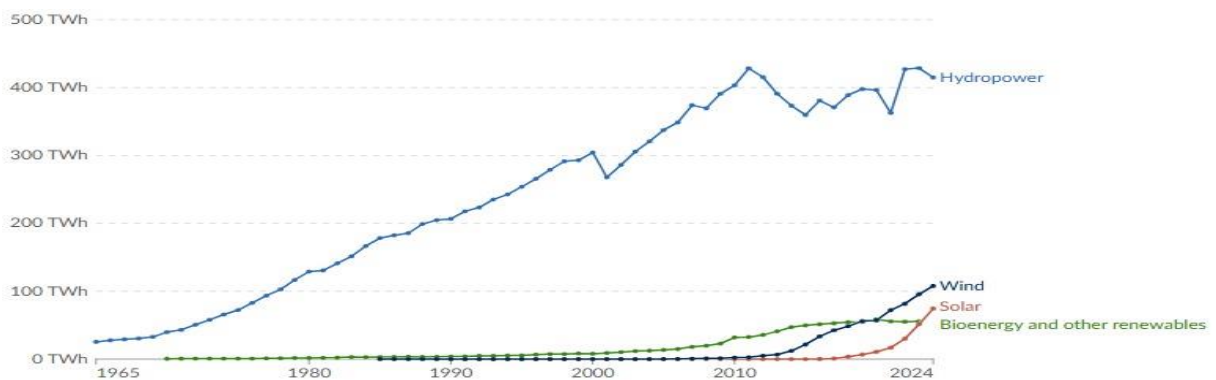
Figura 1 - Geração de Energia Elétrica por Fonte Renovável no Mundo



Fonte: Ember (2025); *Energy Institute - Statistical Review of World Energy* (2024).

A Figura 1 demonstra a evolução da geração de energia renovável no mundo. A energia hidrelétrica é a que mais se destaca, sendo amplamente utilizada desde o século passado. Enquanto os outros tipos foram impulsionados nas últimas duas décadas. A energia solar demonstra uma crescente exponencial desde o ano de 2010, ganhando cada vez mais espaço.

Figura 2 - Geração de Energia Elétrica por Fonte Renovável no Brasil



Fonte: Ember (2025); *Energy Institute - Statistical Review of World Energy* (2024).

Na Figura 2, é possível observar uma tendência similar da geração de energia solar no Brasil em comparação à Figura 1 da geração a nível mundial. A energia hidrelétrica possui grande disparidade em relação às outras fontes renováveis, devido à grande capacidade produtiva brasileira gerada em maior parte pela usina de Itaipu. Porém, observa-se uma tendência de crescimento exponencial da geração de energia

solar, a partir de 2015, ano que trouxe avanços importantes de incentivos fiscais do governo para a geração fotovoltaica (*Energy Institute*, 2024).

No Brasil, as usinas hidrelétricas suprem a maioria do consumo de energia elétrica. Contudo, tal modalidade fere o ecossistema com alagamentos próximos aos rios, mudanças no microclima ao redor das barragens, degradação do solo devido à mineração, além de alterações na qualidade do ar e na frequência de ventos e chuvas. Devido a esses fatores, buscam-se, cada vez mais, alternativas de energia que não degradem o meio ambiente e que minimizem os efeitos negativos (Custódio, 2022).

Nessa medida, fortifica-se a ideologia de que o futuro do Brasil e do planeta necessita de uma revolução energética, sendo que uma matriz elétrica renovável e sustentável apresenta benefícios sociais, econômicos e ambientais.

Com a atual legislação a respeito da compensação de energia e a favorável localização do Brasil em relação a insolação, este trabalho foi direcionado para estudo da energia fotovoltaica.

2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica consiste na conversão da radiação solar em energia elétrica por meio do chamado efeito fotovoltaico, fenômeno observado pela primeira vez em 1839 pelo físico francês Edmond Becquerel. Durante seus experimentos, Becquerel identificou o surgimento de uma diferença de potencial elétrico quando certos materiais eram expostos à luz solar (Martins; Pereira, 2015).

De acordo com o Atlas de Energia Elétrica do Brasil (2002), publicado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), apesar do termo “Energia Solar” ser utilizado principalmente para se referir a energia solar fotovoltaica e a energia solar térmica, quase todas as fontes de energia (hidráulica, biomassa, eólica, fóssil e dos mares) são também formas indiretas da energia solar. Segundo Ely e Swart (2014 *apud* Green, 2003) e Pan (2021 *apud* Green, 2003) a energia solar fotovoltaica é obtida pela conversão da luz direta provida do Sol em eletricidade.

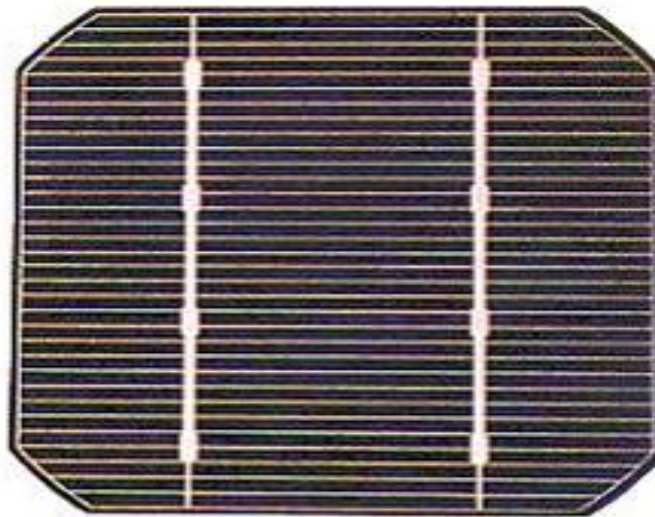
Segundo Nascimento (2004), baseando-se no relato de Edmond Becquerel em 1839, a energia solar fotovoltaica ocorre “quando nos extremos de uma estrutura de matéria semicondutora surge o aparecimento de uma diferença de potencial elétrico,

devido à incidência de luz. No processo de conversão da energia radiante em energia elétrica, a célula é a unidade fundamental”.

Até 2022 existiam três gerações da tecnologia empregada nesse recurso.

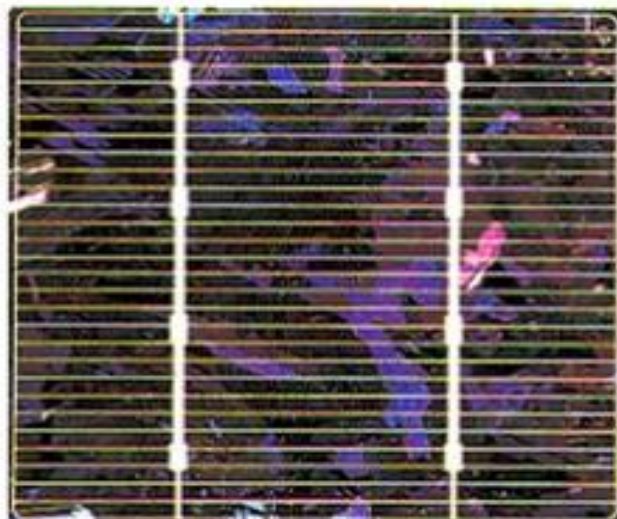
A primeira é a que representa 90% do mercado devido a sua viabilidade e consiste em duas cadeias produtivas: silício monocristalino (m-Si), conforme Figura 3, e silício policristalino (p-Si), conforme Figura 4 (*International Renewable Energy Agency – Irena, 2019*).

Figura 3 – Célula de Silício Monocristalina



Fonte: Cepel (2016).

Figura 4 – Célula de Silício Policristalina



Fonte: Cepel (2016).

A segunda geração é conhecida por filmes finos, e são três cadeias produtivas: silício amorfo (a-Si), conforme Figura 5, disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe). Possui diversas desvantagens como baixo rendimento de células e toxicidade, referente ao cádmio, o que dificulta sua difusão (Cresesb, 2014).

Figura 5 – Célula de Silício Amorfa



Fonte: Cepel (2016).

A terceira, e até 2022, última geração também é dividida em três cadeias produtivas: célula fotovoltaica multijunção e célula fotovoltaica para concentração (CPV), células sensibilizadas por corante (DSSC) e células orgânicas ou poliméricas.

Segundo Nascimento (2004), um módulo fotovoltaico é formado por um conjunto de células solares conectadas entre si em série e paralelo. Esse módulo, integrado a outros elementos como baterias, conversores e inversores, constitui um sistema de geração de energia solar. Entre as principais qualidades desse tipo de sistema, destaca-se sua elevada confiabilidade operacional. Essa característica decorre da ausência de componentes móveis, da simplicidade estrutural e da resistência a condições naturais adversas, como ventos fortes e descargas atmosféricas, o que resulta em alta disponibilidade. Quando utilizado como fonte complementar à energia elétrica tradicional, uma de suas vantagens é a contenção de falhas, já que problemas técnicos tendem a se limitar ao componente defeituoso, sem afetar significativamente o funcionamento do restante do sistema.

Para Wendling (2011), as células são fabricadas com material semicondutor, ou seja, um material com condutividade elétrica intermediária entre condutores e isolantes.

Segundo o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), o silício é o material semicondutor mais comumente utilizado na fabricação de dispositivos fotovoltaicos. Sua estrutura atômica é composta por quatro elétrons de valência, que se ligam a átomos vizinhos, formando uma rede cristalina estável. No entanto, devido à escassez de elétrons livres, o silício em estado puro apresenta baixa condutividade elétrica. Para contornar essa limitação, aplica-se a técnica de dopagem, que consiste na introdução controlada de elementos químicos como fósforo e boro na estrutura do silício.

Quando se incorporam átomos com cinco elétrons de valência, como é o caso do fósforo, um desses elétrons não encontra par na rede cristalina, ficando fracamente ligado ao núcleo do átomo original. Com uma quantidade mínima de energia térmica, esse elétron pode se desprender e migrar para a banda de condução, contribuindo para a condução elétrica. Dessa forma, o fósforo é classificado como dopante do tipo doador ou dopante do tipo n, também conhecido como impureza do tipo n (Cepel, 2016).

Quando são inseridos átomos com apenas três elétrons de valência, como o boro, na estrutura do silício, ocorre uma deficiência de elétrons para completar todas as ligações covalentes da rede cristalina. Essa ausência é chamada de “buraco” ou “lacuna”. Com a presença de uma pequena quantidade de energia térmica, um elétron de um átomo vizinho pode se mover para ocupar esse espaço vazio, promovendo o deslocamento do buraco em sentido oposto. Assim, o boro atua como um dopante aceitador de elétrons, sendo classificado como dopante do tipo p (Cepel, 2016).

Ao se dopar uma região do silício com fósforo (tipo n) e outra com boro (tipo p), forma-se uma estrutura denominada junção pn. Nessa interface, os elétrons livres da região n migram para a região p, onde encontram lacunas disponíveis e são capturados. Esse processo gera um acúmulo de cargas negativas na região p e uma escassez de elétrons na região n, o que resulta em carga positiva. A separação dessas cargas estabelece um campo elétrico interno permanente, essencial para o funcionamento das células fotovoltaicas (Cepel, 2016).

As células solares de silício são classificadas conforme a organização estrutural de seus cristais: monocristalinas, policristalinas e de silício amorfo. As células monocristalinas são fabricadas a partir de um único cristal de silício de alta pureza, o que confere maior eficiência energética, embora seu custo de produção também seja mais elevado (Cepel, 2016).

Por outro lado, as células de silício policristalino são compostas por múltiplos cristais, e sua fabricação exige um processo menos rigoroso de purificação, tornando-as mais acessíveis financeiramente. Contudo, essa simplificação resulta em uma leve redução na eficiência em comparação às monocristalinas.

Segundo o Cepel (2016), as células de silício amorfo apresentam uma estrutura desordenada e são produzidas por meio da deposição de camadas muito finas de silício sobre substratos como vidro ou metal. Esse tipo de material tem demonstrado vantagens tanto nas propriedades elétricas quanto na simplicidade do processo de fabricação.

De modo geral, as células fotovoltaicas são constituídas por materiais semicondutores capazes de converter a energia solar diretamente em eletricidade, representando uma solução tecnológica eficiente e sustentável para a geração de energia.

2.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS AO SISTEMA INTEGRADO

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica pública, também denominados sistemas *on-grid* ou *grid-tie*, são caracterizados pela geração de energia solar que é diretamente injetada na rede de distribuição da concessionária local. A eletricidade produzida pode ser consumida imediatamente no local de geração ou, caso haja produção excedente, essa energia é convertida em créditos para utilização futura (Caires, 2016).

De acordo com Caires (2016), esse tipo de sistema apresenta grande potencial, especialmente por dispensar o uso de dispositivos de armazenamento, como bancos de baterias, que geralmente elevam os custos e a complexidade da instalação. A energia excedente gerada pelos módulos fotovoltaicos é automaticamente transferida para a rede elétrica convencional.

A estrutura de um sistema *on-grid* é composta por módulos fotovoltaicos, inversores, quadros de distribuição, dispositivos de proteção e um medidor bidirecional, responsável por contabilizar tanto a energia consumida quanto a energia fornecida à rede. Além desses, há outros componentes auxiliares que garantem o bom funcionamento e a segurança da instalação (Caires, 2016).

Um sistema fotovoltaico simplificado *on-grid* pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica



Fonte: CSR Energia solar (2017).

2.4 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL

No Brasil, a legislação vigente, Lei nº 14.300 (Brasil, 2022), instituiu o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), também conhecido como sistema de créditos. Esse mecanismo permite que consumidores que possuem micro ou minigeração de energia renovável injetem na rede elétrica pública a energia excedente gerada. A distribuidora, nesse caso, atua como um meio de armazenamento, possibilitando que o excedente convertido em créditos seja utilizado posteriormente para abater o consumo em outras unidades consumidoras vinculadas ao mesmo titular. Os créditos gerados possuem validade de até 60 meses.

Conforme dados do Portal Solar (2025), aproximadamente 75% dos sistemas fotovoltaicos instalados no país pertencem ao segmento residencial, apresentando

grande diversidade em termos de potência e dimensão. Os demais 25% correspondem a sistemas aplicados nos setores comercial e industrial.

A capacidade instalada da energia solar no Brasil, somando as modalidades de Geração Distribuída (GD) e centralizada, atinge um total de 15.310 megawatts (MW) (Torres; Sauaia; Koloszuk, 2024).

2.5 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NA AGRICULTURA DO BRASIL

No contexto brasileiro, o uso de sistemas fotovoltaicos no setor agrícola tem ganhado destaque, apresentando-se como uma alternativa cada vez mais viável e estratégica. A energia solar pode ser aplicada em diversas fases do processo produtivo rural, abrangendo desde o acionamento de sistemas de irrigação e bombeamento de água até o fornecimento de energia elétrica para atividades como a pecuária leiteira e a avicultura. Essa aplicação contribui significativamente para a redução de custos operacionais e para o aumento da eficiência energética nas propriedades (Costa; Schneider, 2019).

Além disso, o avanço dessa tecnologia tem favorecido o desenvolvimento de iniciativas voltadas à agrovoltaica, uma abordagem que integra a geração de energia solar com o cultivo agrícola no mesmo espaço físico. Esse modelo possibilita o uso simultâneo do terreno para produção de alimentos e geração de energia, promovendo maior aproveitamento da área e benefícios ambientais e econômicos para o produtor rural (Martins; Costa; Almeida, 2021).

2.6 O MÓDULO FOTOVOLTAICO

Segundo Villalva e Gazoli (2012), o crescente interesse por fontes de energia alternativas, com menor impacto ambiental, tem impulsionado o desenvolvimento contínuo de pesquisas voltadas à criação de células fotovoltaicas que sejam simultaneamente mais eficientes e economicamente acessíveis. O silício foi o primeiro material semicondutor empregado na fabricação dessas células e, até os dias atuais, permanece como o mais utilizado no mercado. Isso se deve tanto à maturidade tecnológica associada ao seu uso quanto à sua ampla disponibilidade e baixo custo.

Já Ramanujam *et al.* (2020) destaca que, além do silício, outros materiais considerados menos convencionais também vêm sendo objeto de estudo e progresso significativo em nível internacional. Entre esses, destacam-se o CdTe e o CIGS, que apresentam potencial promissor para aplicação em tecnologias fotovoltaicas alternativas.

2.6.1 Silício cristalino

De acordo com o Fraunhofer-Gesellschaft (2022) as tecnologias do silício cristalino corresponderam a 94,9% do mercado mundial em 2020. Segundo Pinho e Galdino (2014) é utilizado o silício ultrapuro que recebe esse nome por ter altíssimo grau de pureza, acima de 99,9999%, em sua fabricação.

2.6.2 Silício monocristalino

De acordo com o Fraunhofer-Gesellschaft (2022), os painéis solares fabricados com esse tipo de material podem alcançar uma eficiência máxima de até 26,7%. Conforme explicam Pinho e Galdino (2014), essas células são compostas por uma estrutura cristalina única e contínua em todo o seu volume, o que contribui para sua alta performance.

Visualmente, essas células apresentam coloração azul escura ou preta, com aspecto uniforme. No entanto, apesar da elevada eficiência, sua produção envolve custos significativos, além de apresentar fragilidade mecânica e uma elevada taxa de perda de material durante o processo de fabricação Neris (2021).

2.6.3 Silício policristalino

Segundo Neris (2021), essa tecnologia representa a opção mais amplamente utilizada no mercado atualmente, principalmente devido ao seu custo inferior em comparação às células fabricadas com silício monocristalino. Conhecidos também como módulos polissilício, esses painéis são produzidos a partir do corte de células

formadas por cristais de silício com múltiplas faces e distribuição irregular, o que lhes confere uma aparência semelhante a vidro fragmentado.

Conforme Fraunhofer-Gesellschaft (2022), esses módulos alcançam uma eficiência máxima de 24,4%. Embora esse índice seja inferior ao das células monocristalinas, o menor custo de fabricação torna essa tecnologia atrativa do ponto de vista comercial, especialmente para aplicações que demandam maior viabilidade econômica.

2.7 INVERSORES

O inversor de tensão, também chamado de conversor CC/CA, é o equipamento responsável por transformar a corrente contínua gerada pelos painéis solares em corrente alternada, forma utilizada pela maioria dos equipamentos elétricos atualmente. Essa conversão ocorre por meio de um processo de chaveamento que inverte o sentido da corrente. Existem diferentes técnicas para essa conversão, as quais influenciam diretamente na qualidade e na forma da onda elétrica fornecida à carga (Neto *et al.*, 2009).

A escolha do inversor depende de algumas características técnicas do sistema, como: tipo de conexão (isolado ou conectado à rede), tensão de entrada (corrente contínua), tensão de saída (corrente alternada), frequência, potência nominal, capacidade de surto e distorção harmônica. No Brasil, a rede elétrica opera com tensões de 127 volts (V) ou 220 V e frequência de 60 hertz (Hz) (Neto *et al.*, 2009).

A potência nominal de um inversor é aquela que ele consegue fornecer de forma contínua, enquanto a capacidade de surto representa a potência máxima suportada por curtos períodos, algo essencial em aplicações com motores ou equipamentos que exigem mais energia na partida (Villalva; Gazolla, 2011).

Os inversores mais modernos atingem eficiências superiores a 90%. Essa eficiência é medida pela razão entre a potência de saída por corrente alternada (CA) e a potência de entrada por corrente contínua (CC), sendo chamada de eficiência de conversão (Blasques *et al.*, 2008).

Segundo a Neosolar (2013), outro fator importante é o tipo de forma de onda que o inversor gera. As mais comuns são:

- a) Onda quadrada: simples e de baixo custo, porém indicada apenas para aplicações pequenas e sem sensibilidade à forma da onda;
- b) Onda senoidal modificada: mais acessível, é uma forma intermediária entre a quadrada e a senoidal, adequada para cargas leves e equipamentos com controles simples;
- c) Onda senoidal pura: apresenta uma forma de onda praticamente idêntica à da rede elétrica, sendo ideal para qualquer tipo de aparelho. Apesar de mais cara, essa tecnologia tem se tornado cada vez mais acessível.

Os inversores podem ser monofásicos ou trifásicos, de acordo com o porte da instalação. Em sistemas maiores, é possível combinar inversores monofásicos, desde que sejam respeitadas as condições técnicas de instalação (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019).

Quanto à aplicação, os inversores podem ser (Cresesb, 2014):

- a) Para sistemas isolados: mais flexíveis quanto à forma de onda, porém exigem alta capacidade de surto, pois não contam com suporte da rede em momentos de sobrecarga;
- b) Para sistemas conectados à rede (*grid-tie*): precisam gerar uma onda senoidal compatível com a da concessionária e se sincronizar com a frequência da rede. Em caso de falhas ou desligamentos da rede, o inversor é desligado automaticamente por segurança (Neosolar, 2013).

Nesse contexto, destaca-se o microinversor, dispositivo conectado individualmente a cada painel solar. Ele oferece vantagens como maior eficiência, vida útil prolongada, facilidade de instalação e manutenção, além de maior modularidade (Neosolar, 2013).

Para injetar energia excedente na rede elétrica, o inversor deve estar ligado ao quadro geral da instalação. Medidores bidirecionais, também chamados de “medidores inteligentes”, registram tanto a energia consumida quanto a injetada na rede, permitindo o uso de créditos energéticos válidos por até 36 meses (Neosolar, 2013).

Existe ainda o inversor/carregador, que, além de converter a corrente, também recarrega as baterias a partir de uma fonte de corrente alternada. Esse tipo de equipamento reduz o desgaste das baterias, possibilita o uso de bancos menores e

garante o funcionamento de motores mesmo em caso de descarga total (Neosolar, 2013).

Por fim, há inversores do tipo *plug and play*, também chamados de *grid-tie* com conexão direta à tomada, que podem ser conectados diretamente a um ponto de energia da residência. Simples de usar, esses inversores ajustam automaticamente a tensão e a frequência da energia, sendo ideais para instalações pequenas, com todas as proteções necessárias para operar de forma segura junto à rede elétrica (Neosolar, 2013).

2.8 ORIENTAÇÃO DOS MÓDULOS SOLARES

A orientação ideal dos módulos solares está diretamente relacionada à irradiância solar disponível no local da instalação. De acordo com o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (Cresesb, 2022), irradiância solar é definida como a quantidade de energia que incide sobre uma determinada superfície em um intervalo de tempo específico, podendo ser de uma hora ou de um dia. Essa grandeza é utilizada para mensurar a radiação solar e sua unidade de medida é o watt por metro quadrado (W/m^2).

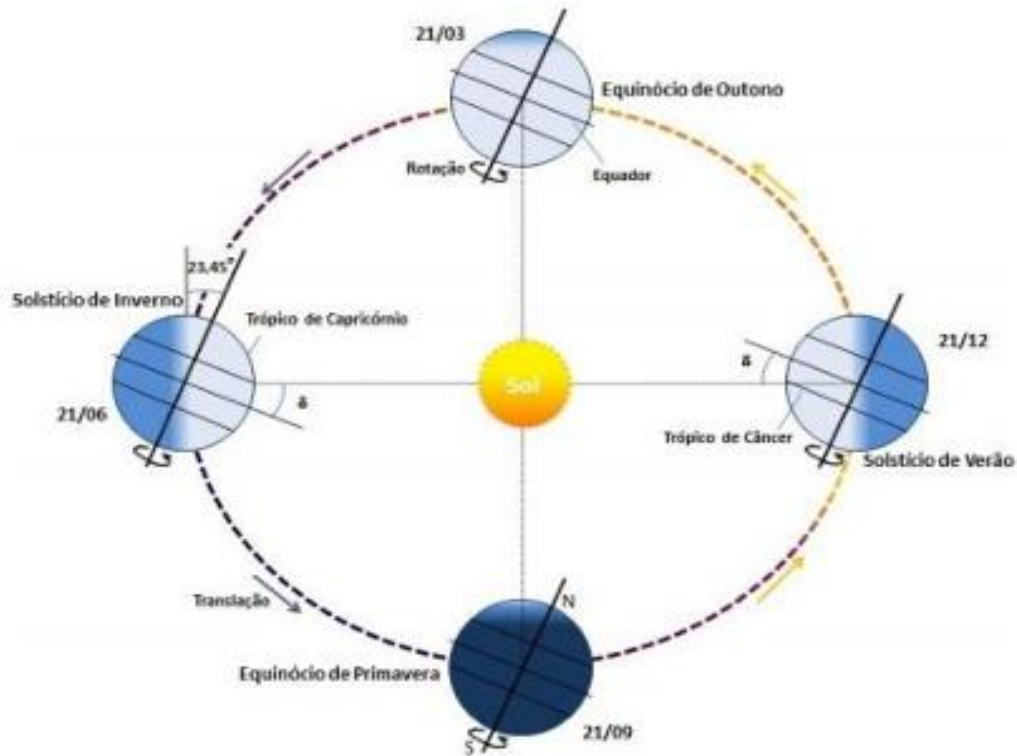
Segundo Villalva e Gazoli (2012), a Terra leva aproximadamente 365 dias e 6 horas para completar uma volta ao redor do Sol, movimento conhecido como translação. Já o movimento de rotação, no qual o planeta gira em torno de seu próprio eixo, ocorre em 24 horas. O eixo terrestre apresenta uma inclinação de cerca de $23,5^\circ$ em relação ao plano de sua órbita. Essa inclinação é responsável pela variação na incidência solar entre os hemisférios ao longo do ano.

Esse fenômeno explica por que, nas regiões mais distantes do equador, a distribuição da luz solar ao longo do ano é desigual: os dias são mais longos no verão e mais curtos no inverno. Tal variação influencia diretamente o desempenho dos sistemas fotovoltaicos, tornando essencial o correto posicionamento dos módulos solares para maximizar o aproveitamento da energia solar disponível em cada estação (Villalva; Gazoli, 2012).

O ângulo dos raios solares com relação ao plano do Equador é chamado de declinação solar. Esse ângulo varia de acordo com o dia do ano devido a posição do Sol e a inclinação da órbita da Terra (Cresesb, 2014).

A Figura 7 ilustra a órbita da Terra com sua inclinação.

Figura 7 - Inclinação da Terra



Fonte: Pinho e Galdino (2024).

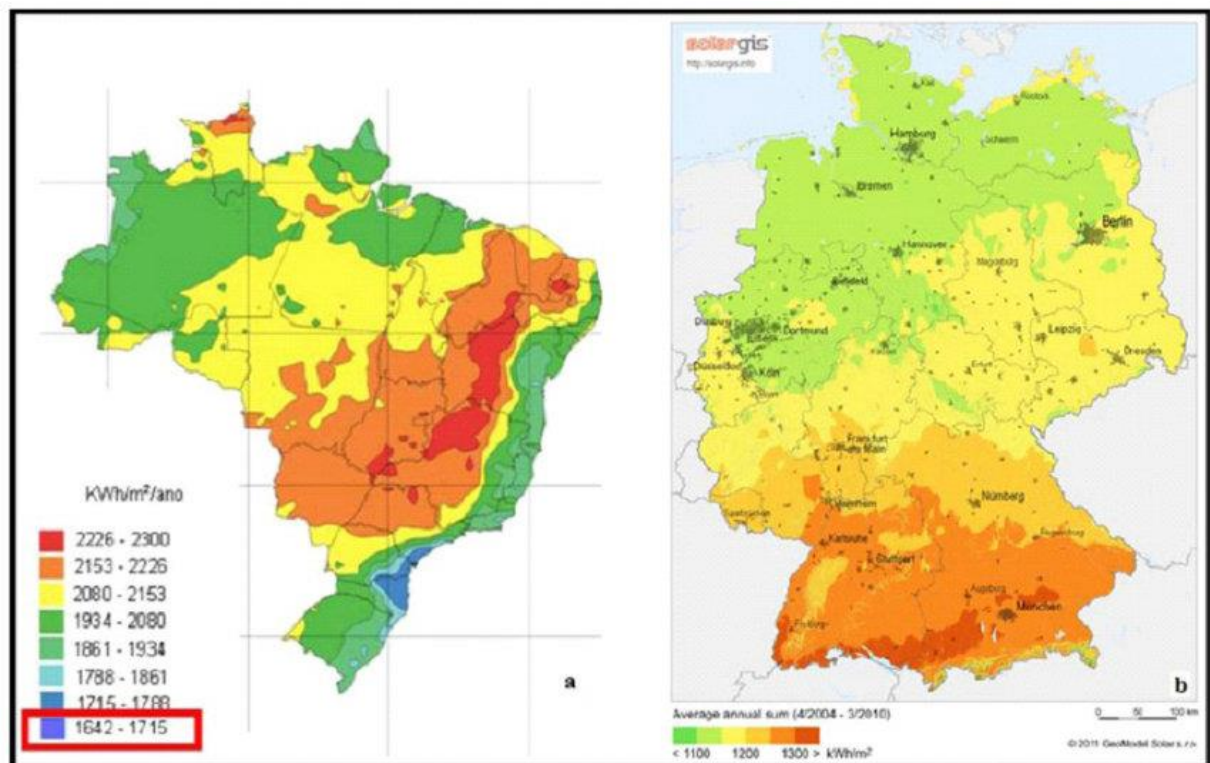
2.9 DADOS ESTATÍSTICOS

A energia solar fotovoltaica tem ganhado destaque global como uma das principais formas de GD, impulsionada pela busca por sustentabilidade, segurança energética e redução de impactos ambientais. Países como Japão, Alemanha e Estados Unidos lideram esse movimento, investindo em políticas públicas, incentivos fiscais e inovação tecnológica. O Japão tornou-se referência ao ampliar significativamente sua capacidade instalada desde 2013. A Alemanha busca atingir 100% de energia renovável até 2050. Já os EUA consolidaram um mercado robusto com financiamento acessível e geração de empregos (Portal Solar, 2025).

Em escala global, a capacidade instalada de energia solar cresceu de 20 Gigawatts (GW) em 2010 para estimados 142 GW em 2020, com destaque para China, EUA e países europeus. A Agência Internacional de Energia (IEA) destacou que, mesmo durante a crise provocada pela pandemia de COVID-19, a energia solar

foi a única fonte que manteve crescimento, reforçando seu papel essencial na transição energética mundial. Com a redução de custos e o surgimento de novos mercados, especialmente na América Latina, Oriente Médio e Sudeste Asiático, a expectativa é de expansão contínua da energia solar nas próximas décadas (Portal Solar, 2025).

Figura 8 - Comparação entre a Irradiação Solar no Brasil e na Alemanha.



Fonte: Salamoni e Ruther (2007).

A Alemanha é considerada o país da Europa que mais produz energia fotovoltaica do mundo. Conforme observa-se na Figura 8, no Brasil, os estados que apresentam menores níveis, possuem índices de irradiação solar 40% superior ao melhor ponto de isolamento dentro da Alemanha e assim, nota-se o potencial do Brasil em relação a outros países.

Embora o Brasil tenha maior extensão territorial e incidência solar, o consumo energético por habitante na Alemanha é quase o dobro, e suas tarifas residenciais são aproximadamente 30% mais altas. Isso possibilita ao governo alemão arrecadar mais recursos para os programas de incentivo. Em 2006, por exemplo, cerca de 3% da tarifa de energia residencial foram destinados à promoção das energias renováveis, o que resultou em aproximadamente 8,8 bilhões de euros arrecadados. Se o Brasil

adotasse percentual semelhante, poderia levantar cerca de 3 bilhões de euros apenas com consumidores residenciais de classe média (Souza, 2014).

Segundo Severino e Oliveira (2010), o Brasil possui o privilégio de ser o único país que recebe a quantidade de mais de 3000 horas de brilho solar por ano no mundo. Sendo a região Nordeste do país conta com uma incidência média diária entre 4,5 a 6 quilowatts-hora (kWh). Devido a essa quantidade de energia solar, o Brasil pode ser considerado um dos países que possui maior capacidade solar do planeta.

2.10 NORMATIVAS

Toda propriedade que consome energia elétrica é vinculada à determinada companhia de energia, que atua como distribuidora, concessionária e permissionária, responsável pela transmissão, controle e custeio (ANEEL, 2021).

A companhia regente na região de estudo é a Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig), responsável pelas medições e cobranças da conta de energia da propriedade estudada.

2.10.1 Cemig

A Cemig, por intermédio de suas controladas e coligadas de transmissão de energia elétrica, opera uma rede de transmissão de mais 5.000 quilômetros (km). É um dos maiores grupos de transmissão de energia do País (Cemig, 2024).

Esse sistema de transmissão é responsável pelo transporte dos grandes blocos de energia desde os grandes centros geradores até os centros consumidores, viabilizando, por meio das subestações de transmissão espalhadas pelas diversas regiões da área de concessão, o atendimento aos sistemas de subtransmissão e distribuição (ONS, 2023).

A Cemig transmite a energia gerada em suas usinas e a energia comprada de Itaipu, do Sistema Interligado e de outras fontes. A Cemig Distribuição S.A. (ou Cemig D) é um dos maiores distribuidores de energia elétrica do Brasil em extensão de rede, atendendo aproximadamente 96% do Estado de Minas Gerais (Cemig, 2024).

A tarifa cobrada nas contas de energia é definida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), organização estatal vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), a qual regula o setor elétrico no Brasil, a partir da Resolução Homologatória N°3.328, de 21 de maio de 2024.

2.10.2 Aneel

O preço da energia elétrica é calculado uma vez ao ano pela ANEEL para garantir à população o fornecimento de energia e proporcionar recursos suficientes para manter as atividades das empresas do setor. Os valores são calculados pela ANEEL em dois tipos de processos: Revisão Tarifária Periódica (RTP) e Reajuste Tarifário Anual (RTA) (ANEEL, 2023).

A RTP ocorre, em média, a cada 5 anos e nela são definidos: o custo eficiente da distribuição (Parcela B), as metas de qualidade e de perdas de energia e os componentes do Fator X para o ciclo tarifário (ANEEL, 2023).

Já o processo de RTA é mais simples e acontece sempre no ano em que não há RTP. Nesse processo, é atualizada a Parcela B pelo índice de inflação estabelecida no contrato do Índice Geral de Preços – Mercado (IGP-M) ou do Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) menos o fator X (IGP-M/IPCA – Fator X). Em ambos os casos são repassados os custos com compra e transmissão de energia e os encargos setoriais que custeiam políticas públicas estabelecidas por meio de leis e decretos (ANEEL, 2023).

O fator x é um índice criado pela ANEEL que converte em descontos na tarifa parte dos ganhos da distribuidora com produtividade e aumento de mercado, para uma conta mais justa (ANEEL, 2023).

Segundo a ANEEL (2023), em 2015 foi implantado o sistema das bandeiras tarifárias, que sinaliza os custos reais da geração de energia elétrica no momento do consumo, para uma utilização mais consciente do consumidor. Antes das bandeiras, as variações nos custos eram repassadas até um ano depois, no reajuste tarifário seguinte. As bandeiras utilizadas são:

- a) Bandeira verde: condições favoráveis de geração de energia. A tarifa não sofre nenhum acréscimo;

- b) Bandeira amarela: condições de geração menos favoráveis. A tarifa sofre acréscimo de R\$ 0,01885 para cada kWh consumido;
- c) Bandeira vermelha - Patamar 1: condições mais custosas de geração. A tarifa sofre acréscimo de R\$ 0,04463 para cada kWh consumido;
- d) Bandeira vermelha - Patamar 2: condições ainda mais custosas de geração. A tarifa sofre acréscimo de R\$ 0,07877 para cada kWh consumido.

2.10.3 Trajetória do mercado de energia solar no Brasil

Linha cronológica dos principais marcos da evolução da geração de energia solar no Brasil (Torres; Sauaia; Koloszuk, 2024).

- a) 2010 - Publicação ANEEL nº015/2010 - redução das barreiras para instalação da GD utilizando-se fontes renováveis de energia no Brasil;
- b) 2011 - Portaria do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) nº004/2011 e a Chamada Pública nº013/2011 - Regras fundamentais e conhecimentos para subsidiar decisões sobre a operação da GD de energia fotovoltaica no Brasil;
- c) 2012 - Publicação da Resolução Normativa (REN) 482/2021 - Nascimento do SCEE;
- d) 2013 - Fundação da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Absolar) - Desenvolvimento do mercado de GD solar fotovoltaica;
- e) 2014 - Primeiro leilão de energia fotovoltaica a nível nacional;
- f) 2015 (abril) - Publicação do convênio do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) nº16/2015, autorizando a isenção de impostos estaduais sobre a energia injetada;

- g) 2015 (outubro) - Lei nº13.169/2015 - Isenção dos tributos federais do Programa de Integração Social (PIS) e da Contribuição para Financiamento da Seguridade Social (Cofins) sobre a energia injetada para os projetos de GD;
- h) 2015 (dezembro) - Portaria 538/2015 - Criação do Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProDG). O MME instituiu o programa com o objetivo de expandir e fortalecer as iniciativas de incentivo à geração de energia elétrica pelos próprios consumidores, com ênfase em fontes renováveis, especialmente a energia solar fotovoltaica;
- i) 2018 (maio) - A ANEEL abre a Consulta Pública nº010/2018 para revisão das regras sobre a GD solar fotovoltaica no Brasil;
- j) 2019 (junho) - GD solar fotovoltaica atinge 1 GW de capacidade instalada;
- k) 2019 (agosto) - Todos os estados brasileiros concedem a isenção fiscal estadual para o SCEE, segundo o convênio ICMS 16/2015;
- l) 2020 - GD solar fotovoltaica atinge 4 GW de capacidade instalada;
- m) 2022 - Energia solar atinge 20 GW de capacidade instalada no Brasil;
- n) 2022 (janeiro) - Lei 14.300 (Lei da Geração Distribuída):

A Lei nº 14.300/2022 (Brasil, 2022) estabelece normas para a energia solar no país, incluindo a taxação e as regras para GD. Conhecida como Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída, regula a geração de energia elétrica por consumidores (como residências, empresas e cooperativas) a partir de fontes renováveis conectadas à rede de distribuição. A seguir, apresenta-se um resumo dos principais pontos da lei:

I) Definições Importantes:

- Microgeração distribuída: geração com potência ≤ 75 quilowatts (kW);
- Minigeração distribuída: geração entre 75 kW e 5 MW (para fontes despacháveis) ou 3 MW (não despacháveis);
- Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) que permite que o excedente de energia gerada seja usado como crédito para abater consumo futuro;
- Geração compartilhada que permite que vários consumidores (consórcios, cooperativas, condomínios) se beneficiem da energia gerada por uma unidade.

II) Acesso e Conexão:

- Concessionárias são obrigadas a atender pedidos de acesso à rede para sistemas de GD;
- ANEEL deve criar um formulário padrão para pedidos;
- Exige-se garantia de fiel cumprimento (2,5% ou 5% do investimento) para projetos maiores que 500 kW;
- É proibida a comercialização ou transferência indevida de pareceres de acesso.

III) Custos e Investimentos:

- Os custos de conexão devem seguir critérios técnicos mínimos e de menor custo;
- A distribuidora arca com custos relacionados à microgeração;
- Para minigeração, o consumidor arca com custos de medição e obras específicas;
- O consumidor pode escolher tensão diferente, assumindo os custos.

IV) Compensação de Energia:

- Podem aderir ao SCEE consumidores com geração local ou remota, múltiplas unidades ou geração compartilhada;
- Energia excedente vira crédito e pode ser usada:
 - Na mesma unidade;

- Em outras unidades do mesmo titular;
- Em unidades do mesmo empreendimento ou consórcio.
- Créditos expiram em 60 meses e não geram compensação após esse prazo.

v) Tarifas e Regras Fiscais:

- A partir do fim do período de transição (Art. 26 e 27), novos consumidores do SCEE estarão sujeitos a tarifas com componentes tarifárias adicionais, conforme regulação da ANEEL;
- O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e a ANEEL definirão os custos e benefícios econômicos da GD;
- Bandeiras tarifárias só se aplicam ao consumo líquido (sem considerar energia compensada).

A manutenção das regras dos projetos/instalações já existentes será feita até 2045. A regra de transição dos novos projetos será de 7 anos. Os encargos da ANEEL serão cobrados dos usuários de GD só depois de 2029. A cobrança da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (Tusd) do fio B, de 28%, referente à energia gerada e injetada na rede, será feita com aumentos graduais de 15% em 2023, 30% em 2024, 45% em 2025, 60% em 2026, 75% em 2027, 90% em 2028 e 100% em 2029.

2.10.4 Regulamentação da energia solar

A instalação de um sistema de energia solar envolve normas regulamentadoras e de segurança que variam com a complexidade do projeto e o tamanho do sistema. A homologação para implantação de sistema gerador é ratificada pela companhia vigente do local, no caso a Cemig. As normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e as Normas Regulamentadoras (NR) são essenciais para garantir a qualidade e segurança do sistema.

Principais normas segundo a Cemig (2023):

- a) ABNT NBR 16240: estabelece diretrizes para a segurança em serviços envolvendo eletricidade, incluindo instalações de sistemas fotovoltaicos. Abrange a qualificação dos profissionais, o gerenciamento de riscos elétricos e a implementação de sistemas de proteção adequados;
- b) ABNT NBR 16690: define os critérios de projeto para instalações elétricas em arranjos fotovoltaicos, abrangendo aspectos como proteção contra descargas atmosféricas, dimensionamento de condutores, dispositivos de proteção e manobra, sistemas de aterramento e equipotencialização, conforme informações do Portal Potência;
- c) ABNT NBR 17193: atua como referência técnica para assegurar a conformidade e segurança das instalações fotovoltaicas, ainda que sua adoção não seja obrigatória por lei;
- d) NR 10: norma regulamentadora que estabelece os requisitos de segurança e medidas preventivas para proteger a saúde dos trabalhadores que atuam em instalações elétricas, como os profissionais responsáveis pela instalação de sistemas de energia solar;
- e) ABNT NBR 5419-1: define os critérios para sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, como raios, com foco na integridade de estruturas e equipamentos elétricos;
- f) ABNT NBR 16384: fornece orientações técnicas para a análise de acidentes envolvendo sistemas fotovoltaicos, considerando variáveis como condições físicas, falhas de componentes e outros fatores associados;
- g) ABNT NBR 5410: estabelece as diretrizes para instalações elétricas de baixa tensão, assegurando a segurança, o bom funcionamento e a qualidade das instalações;
- h) ABNT NBR 10899: apresenta a terminologia técnica específica da energia solar fotovoltaica, promovendo a padronização da comunicação no setor;
- i) ABNT NBR 16149: trata das características técnicas da interface de conexão entre sistemas fotovoltaicos e a rede de distribuição elétrica;
- j) ABNT NBR 16274: define os requisitos mínimos para a documentação, os ensaios de comissionamento, as inspeções e a avaliação de desempenho de

sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Esta norma consolidou-se como o principal referencial técnico no Brasil para o comissionamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

A norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 16274 (ABNT, 2014), abrange três áreas fundamentais:

- Documentação: especifica os dados e registros mínimos que devem ser entregues após a instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede;
- Verificação: estabelece os requisitos mínimos para inspeções e ensaios de comissionamento, com base em verificações iniciais ou periódicas;
- Avaliação de desempenho: define os procedimentos mínimos para análise do desempenho operacional do sistema após seu início de funcionamento.

É importante consultar um profissional especializado, como instaladores certificados de sistemas fotovoltaicos, para obter um orçamento preciso e adequado às suas necessidades e para garantir que a instalação seja realizada de acordo com as normas de segurança e regulamentações vigentes.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo destina-se à constatação do material de pesquisa e metodologia utilizada para o desenvolvimento do estudo, a partir dos objetivos estabelecidos.

O trabalho caracteriza-se como uma análise de desenvolvimento de projeto, com pesquisa do tipo aplicada, quantitativa e documental.

3.1 MATERIAL

As informações para embasamento teórico do trabalho foram obtidas por meio de uma pesquisa bibliográfica, onde foram selecionados artigos científicos, TCCs, teses e dissertações, utilizando-se das bases de dados da *Scientific Electronic* (SciELO) e Google acadêmico, além de sites governamentais e institucionais como os da ANEEL, Cemig e Portal Solar. Foram utilizados os seguintes descritores: irradiação solar, energia solar, dimensionamento de sistema fotovoltaico, geração de energia na agricultura, placas solares, *payback*, geração distribuída, normas e leis da geração de energia, entre outros.

Para o desenvolvimento do projeto, utilizou-se das fontes de dados e ferramentas a seguir:

- a) Contas de energia elétrica da propriedade, mensuradas pela Cemig (histórico de consumo mensal);
- b) Localização (latitude e longitude) da propriedade;
- c) Dados climáticos da região (irradiação solar, temperatura ambiente, velocidade do vento), utilizando-se de bases de dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) e do Cresesb, gerido pela Eletrobras Cepel do MME, pela seção *SunData* v 3.0, fonte de dados gerada a partir de 17 anos de imagens capturadas via satélite por todo o território brasileiro.
- d) Ferramentas de cálculo (Excel e calculadora) para o dimensionamento a partir de planilhas, tabelas, gráficos e fórmulas técnicas;
- e) Cotações/orçamentos de fornecedores e instalador.

3.2 METODOLOGIA

O processo metodológico adotado envolveu 4 etapas, especificadas nas seções a seguir.

3.2.1 Levantamento do consumo médio mensal

Analizou-se as contas de energia da propriedade no ano de 2024 para estabelecer a média de consumo mensal.

Definiu-se a meta de geração de energia solar, como a média de consumo mensal.

3.2.2 Dimensionamento do sistema fotovoltaico

Utilização de fórmulas técnicas para determinação da quantidade necessária de módulos fotovoltaicos, a partir da potência total necessária para o sistema FV.

Consideraram-se fatores como irradiação solar local, temperatura dos módulos, perdas por temperatura dos módulos FV, eficiência dos inversores, cablagens e perdas no sistema elétrico, entre outros.

Para a definição das fórmulas de dimensionamento do sistema fotovoltaico, realizou-se uma pesquisa para determinar a equação mais consistente e completa, considerando fatores climáticos locais e índices de desempenho.

Segundo Carneiro (2009), o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos é calculado a partir da equação 1.

Cálculo diário ideal:

$$E(\text{dia, real}) = K(i) * Hs(i) * P_{\text{max}} \quad (1)$$

Considerando:

- $E (W * \text{horas})$ = energia fornecida pelo sistema FV = meta de geração mensal;

- $H_s(i)$ = número de horas efetivas de Sol para um dia do mês i ;
- P_{max} = potência máxima FV em Watt-pico (Wp);
- $K(t,i)$ = Fator de correção de temperatura referente à temperatura do módulo para o mês i .

Para o cálculo real acrescenta-se PR, conforme equação 2.

Cálculo diário real:

$$E(\text{dia, real}) = PR * [K(i) * H_s(i) * P_{max}] \quad (2)$$

Sendo $PR = \eta(\text{inversor}) * F_c$ (índice de desempenho de um sistema FT, que depende do rendimento do inversor e das perdas de energia nas cablagens).

Referenciais comumente adotados: $\eta(\text{inversor}) = 0,90$; $F_c = 0,97$. Sendo assim, $PR = \eta(\text{inversor}) * F_c = 0,90 * 0,97 = 0,873$.

Para o cálculo mensal acrescenta-se $n(i)$, conforme equação 3.

Cálculo mensal real:

$$E(\text{mês, real}) = PR * [K(t,i) * n(i) * H_s(i) * P_{max}] \quad (3)$$

Sendo $n(i)$ = número de dias do mês.

Para mensurar a potência do sistema, isola-se P_{max} , conforme equação 4:

$$P_{max} = E(\text{mês, real}) / [K(t,i) * n(i) * H_s(i) * PR] \quad (4)$$

Para determinar $K(t,i)$ utiliza-se a equação 5:

$$K(t,i) = [1 - 0,005 * (T_m - 25)] \quad (5)$$

Sendo T_m = Temperatura média do módulo.

A temperatura média do módulo descreve-se segundo a equação 6:

$$T_m = [\sum (d_m, i=1) T_c (d_m)] / d_m \quad (6)$$

Sendo T_c = temperatura da célula fotovoltaica.

Considera-se T_m como a média de todas as temperaturas de cada célula. Porém como as células possuem temperaturas constantes em todo o módulo, então adota-se $T_c = T_m$.

Ex.: para o mês de abril a temperatura média do módulo Shell SM 100-12 em Porto é de 30,3°C. O fator de correção de temperatura é igual a $K(t,i) = [1 - 0,005 * (30,3 - 25)] = 0,974$.

Segundo Yang (2018), a equação que mais aproxima-se dos dados reais de temperatura de uma célula FV é a proposta por Duffie e Beckman (2013), possuindo o menor erro médio (5,20%) dentre 9 equações estudadas.

Calcula-se a temperatura da célula FV conforme equação 7:

$$T_c = T_a + [(G / G_{NOCT}) * (9,5 / 5,7 + 3,8.V_w) * (T_{cNOCT} - T_{aNOCT}) * (1 - \eta_c / (\tau\alpha))] \quad (7)$$

Considerando:

- T_a = Temperatura ambiente em °C;
- G = Irradiância total em W/m²;
- T_{cNOCT} = Temperatura de operação nominal na célula fotovoltaica, fornecida pelo fabricante do módulo FV, em °C;
- T_{aNOCT} = Temperatura ambiente de acordo com o Sistema de Referência Espacial (SRE), fixada em 20°C;
- G_{NOCT} = Irradiância total segundo o SRE, fixada em 800 W/m²;
- V_w = Velocidade do vento em m/s;
- η_c = Eficiência de conversão do módulo descrito em sua folha de dados;
- $\tau\alpha$ = Produto da transmitância-absortância, valor exato desconhecido, porém estimado em 0,9.

Para o cálculo da temperatura média das células fotovoltaicas na região de estudo, foram utilizadas constantes pré-estabelecidas pela literatura, assim como dados meteorológicos da região e valores especificados na descrição técnica dos modelos de placas solares.

Para o levantamento de T_a (temperatura ambiente) e de V_w (velocidade do vento), utilizou-se os registros, hora a hora, fornecidos pela Inmet para a cidade de Uberlândia no ano de 2024.

Visto que o Inmet não possui registros para a cidade de Monte Alegre de Minas, optou-se pelos dados de Uberlândia, cidade mais próxima (69 km de distância) em relação à localidade do estudo, com as devidas medições.

Para o cálculo das médias mensais, tanto de T_a , quanto de V_w , foram somados os valores registrados durante o dia (horário de funcionamento das placas solares) e divididos pelos números de registros, de cada mês.

A fim de validação dos valores referentes à irradiação solar na região fornecidos pelo Cresesb, foram somados os registros da radiação global medidos pela Inmet, em kJ/m^2 , e calculada a média da irradiação solar diária ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$) para cada mês. Para o cálculo utilizou-se a quantidade média de horas de Sol diárias para cada mês.

Após comparativo, optou-se pela utilização da fonte de dados de irradiação solar da Cresesb.

Para o cálculo da irradiância, utiliza-se a equação 8.

Cálculo da irradiância:

$$G = (E_g \cdot 1000) / H_d \quad (8)$$

Sendo:

- E_g = média de energia diária gerada em $\text{Wh/m}^2 \cdot \text{dia}$;
- H_d = horas de Sol para um dia, em média.

Para o cálculo do número de horas efetivas de Sol para um dia do mês i [$H_s(i)$], utiliza-se a equação 9.

Cálculo de $H_s(i)$:

$$Hs(i) = E_g / G_r \quad (9)$$

Sendo:

- E_g = média de energia diária gerada em Wh/m²*dia;
- G_r = irradiância solar de referência das placas (1000 W/m²).

3.2.3 Escolha dos equipamentos e fornecedores

Foi realizada uma pesquisa de mercado para escolha dos painéis solares e demais equipamentos no estado de Minas Gerais.

Para determinação da quantidade de módulos, deve-se P_{max} do sistema pela potência individual do modelo de placa solar de cada fornecedor.

Analizou-se os orçamentos com base em custo total, frete, instalação, suporte técnico e garantia.

3.2.4 Análise de viabilidade econômica

Calculou-se a economia mensal esperada e estimativa de *payback* (tempo de retorno), considerando as utilizações simultâneas da energia gerada em 80% e 50%.

Somados o custo da T_{usd} pela energia injetada com o custo de disponibilidade, obtêm-se o custo mensal com a instalação do sistema fotovoltaico, conforme equação 10:

$$C_{fv} = E_{inj} * T_{usd} * P_{unit} + C_{disp} \quad (10)$$

Considerando:

- C_{fv} = custo mensal com o sistema FV em R\$;
- E_{inj} = energia injetada na rede elétrica em kWh/mês;
- T_{usd} = tarifa T_{usd} em %;
- P_{uni} = preço unitário médio em R\$/kWh;
- C_{disp} = custo de disponibilidade.

Para o cálculo do *payback*, efetua-se a somatória mensal da diferença entre o novo custo estimado com o sistema FV para cada mês, em relação à média do custo

de energia elétrica da propriedade, até atingir o valor do investimento inicial de R\$96.963,00, conforme equação 11:

$$ECO = \sum (\text{meses}, i=1) C_{real} - C_{fv} \quad (11)$$

Sendo:

- ECO = somatória da economia mensal;
- C_{real} = média do custo de energia elétrica mensal da propriedade = R\$7636,58,00.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 DADOS LEVANTADOS

Com a colaboração do proprietário da empresa agrícola, obteve-se as contas de energia elétrica do ano de 2024 para a fazenda de maior incidência solar.

Segue, na Figura 9, exemplo da conta de energia do mês de julho de 2024.

Figura 9 - Conta de Energia do Mês de Julho de 2024

CEMIG CEMIG DISTRIBUIÇÃO S.A. CNPJ 06.981.180/0001-18 / INSC. ESTADUAL 062.322138.0087.
AV. BARBACENA, 1200 - 17º ANDAR - ALA 1 - BAIRRO SANTO AGOSTINHO
CEP: 30190-131 - BELO HORIZONTE - MG.

TARIFA SOCIAL DE ENERGIA ELÉTRICA - TSEE FOI CRIADA PELA LEI Nº 19.439, DE 28 DE ABRIL DE 2002

Referente a JUL/2024		Vencimento 11/10/2024	Valor a pagar (R\$) 12.526,21
--------------------------------	--	---------------------------------	---

AREA RURAL
MONTE ALEGRE DE MINAS, MG
CPF: [REDACTED]

Nº DO CLIENTE: [REDACTED] Nº DA INSTALAÇÃO: [REDACTED]

Data de emissão 29/07/2024
Consulte pela Chave de Acesso em:
<http://www.sped.fazenda.mg.gov.br/spedmg/h3e>
chave de acesso: [REDACTED]

Classe	Subclasse	Modalidade Tarifária	Data de Leitura
Rural Trifásico	Agropecuária Rural	Convencional B2	Anterior: 27/06, Atual: 29/07, Nº de dias: 32, Próxima: 29/08

Valores Faturados									
Item da fatura	Unid.	Quant.	Preço Unit. R\$	Valor R\$	ICMS/COFINS	Base Calc. ICMS	Alíquota ICMS	ICMS	Tarifa unit.
Energia Elétrica	kWh	12.040	1,04038479	12.526,21	437,56	12.526,21	18,00	2.254,71	0,81677281
TOTAL				12.526,21	437,56	12.526,21		2.254,71	
Bandeira Amarela - Já incluído no valor a pagar				261,96					

MANIFESTADO ☒
TES: 029 CC: [REDACTED]
NATUREZA: [REDACTED]
DT. ENTRADA: [REDACTED]
VISTO: [REDACTED]

Reavio de Contas Vencidas / Débito Anterior		Informações Técnicas			
		Tipo de Medição	Medição	Leitura Anterior	Leitura Atual
		Energia kWh		13.943	14.244
				Constante de Multiplicação	Consumo kWh
				40	12.040

Informações Gerais			
Tarifa vigente conforme Res Anel nº 3.328, de 21/05/2024. Pela legislação tributária, os descontos a que se refere o Decreto Federal 7.891/13 também integram a base de cálculo do ICMS, PASEP e COFINS. O pagamento desta conta não quita débitos anteriores. Para estes, estão sujeitas penalidades legais vigentes (multas) e/ou atualização financeira (juros) baseadas no vencimento das mesmas. CEMIG AGRO - ATENDIMENTO RURAL: 08007216600. Faturamento pela média. É dever do consumidor manter os dados cadastrais sempre atualizados e informar alterações da atividade exercida no local. JUN/24 Band. Verde - JUL/24 Band. Amarela			

Histórico do Consumo			
Mês/Ano	Consumo kWh	Média kWh/Ano	Dias
JUL/24	12.040	376,25	32
JUN/24	0	0,00	30
MAI/24	12.760	440,00	29
ABR/24	0	0,00	30
MAR/24	12.280	438,57	28
FEV/24	0	0,00	29
JAN/24	11.560	350,30	33
DEZ/23	11.120	383,44	29
NOV/23	68.120	2.270,65	30
OUT/23	6.760	204,84	33
SET/23	6.720	231,72	29
AGO/23	7.580	232,72	33
JUL/23	7.560	260,68	29

Reservado ao Fisco		
Base de cálculo (R\$)	Alíquota (%)	Valor (R\$)
ICMS	18,00	2.254,71
PASEP	0,76	78,06
COFINS	3,50	359,50

Fale com CEMIG: 116 - CEMIG Torpedo 29810 - Ouvidoria CEMIG: 0800 726 3838 - Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL - Telefone: 167 - Ligação gratuita de telefones fixos e móveis.

Código de Débito Automático	Instalação	Vencimento	Total a Pagar
[REDACTED]	[REDACTED]	11/10/2024	R\$12.526,21

Julho/2024

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para alguns meses não há registro devido a falta de medição, de modo a acumular o montante de consumo para o mês seguinte, conforme observa-se na Tabela 1.

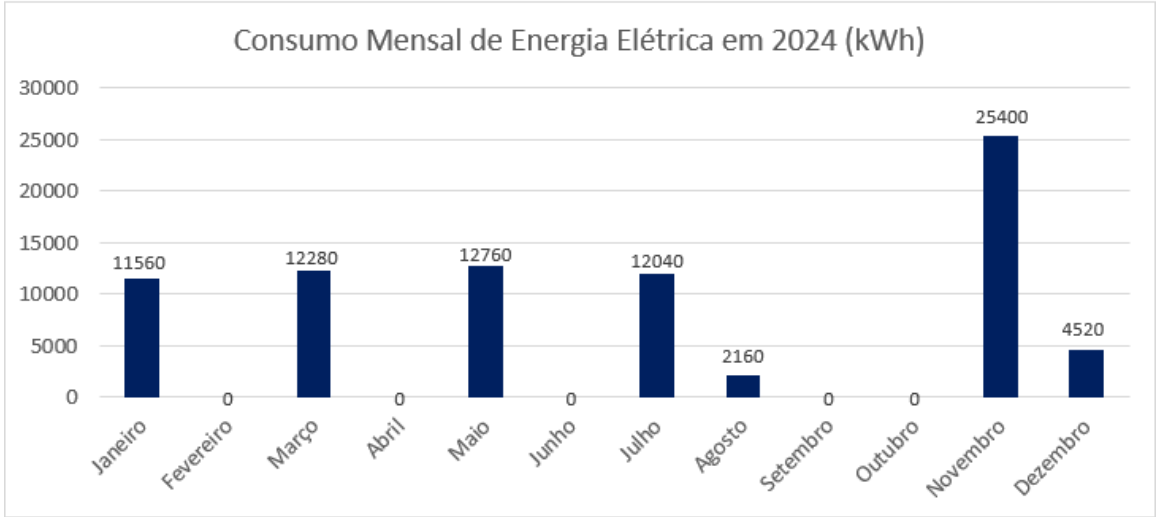
Tabela 1 – Consumo e Custo Mensal de Energia Elétrica em 2024

Mês	Consumo (kWh)	Preço (R\$)	Preço Unitário (R\$/kWh)
Janeiro	11560	R\$ 11.044,77	0,96
Fevereiro	0		
Março	12280	R\$ 11.850,89	0,96
Abril	0		
Maio	12760		
Junho	0	R\$ 83,38	
Julho	12040	R\$ 12.526,21	1,04
Agosto	2160	R\$ 2.197,58	1,02
Setembro	0	R\$ 86,79	
Outubro	0	R\$ 90,30	
Novembro	25400	R\$ 26.288,91	1,03
Dezembro	4520	R\$ 4.560,42	1,01
Total Anual	80720	R\$ 68.729,25	0,85
Média Anual	6726,67	R\$ 7.636,58	1,14

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Conforme Gráfico 1, constata-se, para melhor visualização, o consumo mês a mês de energia elétrica da fazenda em 2024.

Gráfico 1 – Consumo Mensal de Energia Elétrica em 2024



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A partir da localização da fazenda, fornecida pelo proprietário, identificou-se pelo *Google Maps*, a latitude e longitude equivalentes, a fim de levantar os dados referentes à radiação solar incidente na região.

Utilizou-se o site da Cresesb, para mensurar os dados de irradiação local, pela seção SunData v 3.0. Considerou-se a Latitude = 19,020303° S e Longitude = 49,00546° O.

Visto que a propriedade se localiza entre as cidades de Prata e Monte Alegre de Minas, o SunData forneceu dados referentes às duas cidades, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Estações Meteorológicas Próximas às Coordenadas Geográficas da Fazenda.

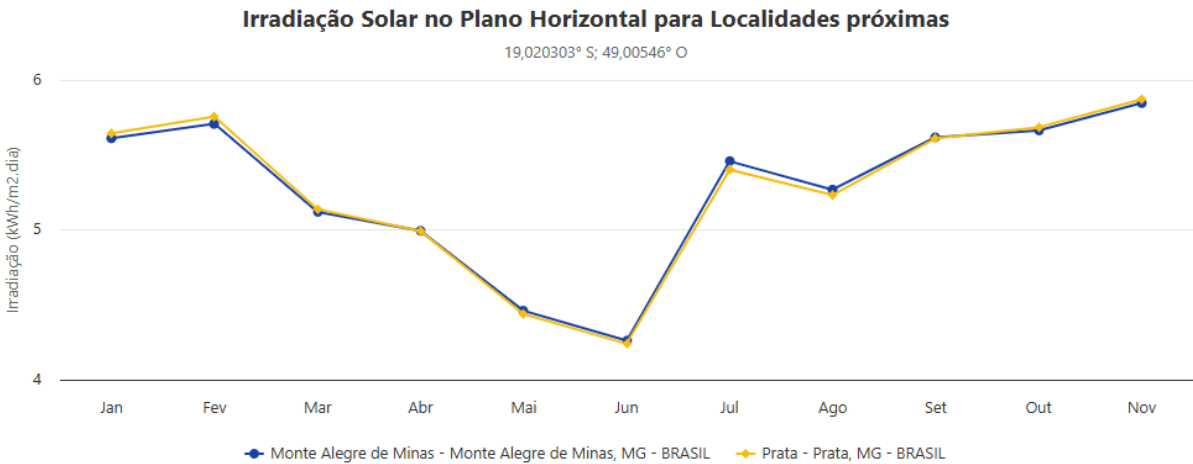
#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m ² dia]																
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
1	Monte Alegre de Minas	Monte Alegre de Minas	MG	BRASIL	19° S	49,049° O	5,1	5,61	5,71	5,12	4,99	4,46	4,26	4,49	5,46	5,27	5,62	5,66	5,85	5,21	1,58
2	Monte Alegre de Minas	Monte Alegre de Minas	MG	BRASIL	19° S	48,949° O	6,4	5,6	5,74	5,07	4,95	4,45	4,25	4,49	5,48	5,28	5,59	5,64	5,79	5,19	1,55
3	Prata	Prata	MG	BRASIL	19,101° S	49,049° O	10,1	5,64	5,76	5,14	4,99	4,44	4,24	4,46	5,4	5,23	5,61	5,68	5,87	5,21	1,63

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para utilização de dados mais próximos à região de estudo, optou-se pela primeira opção, da estação de Monte Alegre de Minas, localizada a 5,1 km das coordenadas fornecidas.

Vale ressaltar que apesar de pequenas variações ao decorrer dos meses, como é possível observar na Figura 10, ambas as estações possuem a mesma média diária de irradiação solar, estimada em 5,21 kWh/m²*dia, para o período de 1 ano.

Figura 10 - Comparativo Mensal da Irradiação Solar para as Cidades de Prata e Monte Alegre de Minas.



Fonte: Cresesb - Potencial Solar - Sundata v 3.0 (2025).

Além dos dados de irradiação solar para o plano horizontal (inclinação igual a 0°N), o SunData fornece os valores para mais três diferentes ângulos de incidência da radiação solar.

- a) Ângulo igual à latitude;
- b) Ângulo com a maior média anual;
- c) Ângulo com a menor média anual.

A partir da Tabela 3, foi possível comparar os valores mensais e a média anual para as 4 diferentes inclinações.

Tabela 3 - Valores da Irradiação Solar para 4 Diferentes Inclinações

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média [kWh/m² dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
1	Plano Horizontal	0° N	5,61	5,71	5,12	4,99	4,46	4,26	4,49	5,46	5,27	5,62	5,66	5,85	5,21	1,58
2	Ângulo igual a latitude	19° N	5,13	5,46	5,21	5,51	5,31	5,3	5,5	6,3	5,53	5,48	5,23	5,27	5,44	1,17
3	Maior Média Anual	20° N	5,1	5,43	5,2	5,53	5,35	5,35	5,54	6,33	5,53	5,46	5,2	5,23	5,44	1,23
4	Maior Mínimo Mensal	17° N	5,2	5,5	5,22	5,48	5,24	5,21	5,41	6,24	5,53	5,51	5,3	5,35	5,43	1,04

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.2 ANÁLISE DOS DADOS

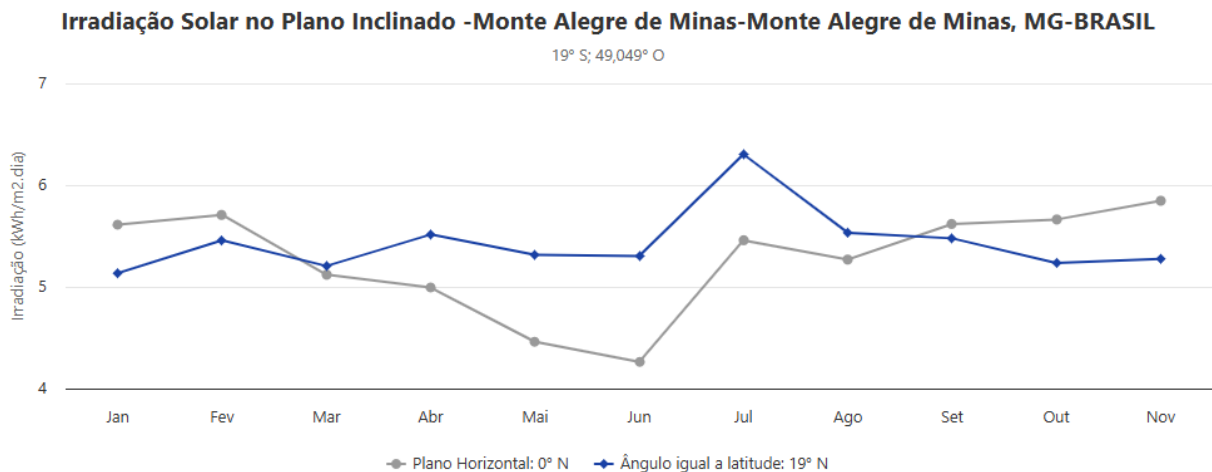
Após análise dos valores mensais e média anual para cada inclinação, foi decidido pela utilização dos dados referentes ao ângulo igual à latitude (19°N),

inclinação a qual é normalmente aplicada nas instalações dos sistemas fotovoltaicos, para melhor adequação à inclinação dos raios solares ao decorrer de todo o ano.

Segundo o Cresesb (2014), a conversão dos valores de irradiação solar do plano horizontal para o plano inclinado foi calculada pelo método de Liu & Jordan (1962), complementado por Klein (1977).

Os valores médios de irradiação para os ângulos 19°N e 20°N são iguais, estimados em 5,44 kWh/m²*dia, com pequenas oscilações ao longo do ano. Porém, ao comparar as irradiações do ângulo horizontal em relação ao ângulo da latitude, é possível observar a diferença no aproveitamento da incidência dos raios solares a partir da inclinação adequada na instalação das placas fotovoltaicas, conforme observa-se na Figura 11.

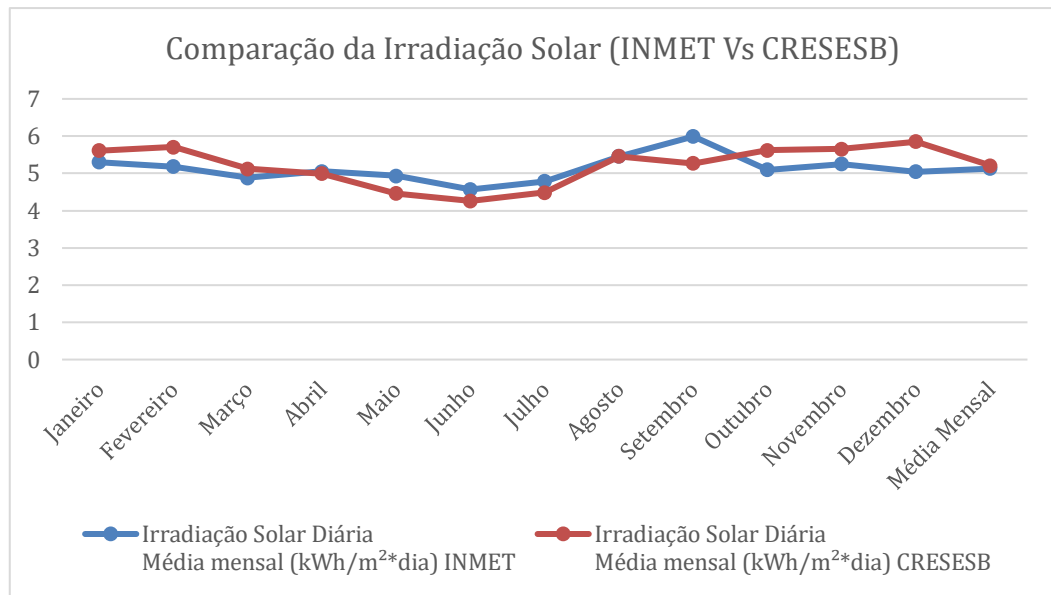
Figura 11 - Comparativo Mensal da Irradiação Solar para o Plano Horizontal e para o Ângulo Igual à Latitude



Fonte: Cresesb - Potencial Solar - Sundata v 3.0 (2025).

No gráfico 2, abaixo, é possível verificar a proximidade entre os valores encontrados pelas diferentes fontes de pesquisa para a irradiação solar média, com pequenas variações mensais, mas que na média anual resultaram em valores próximos, sendo a média do Inmet = 5,13 kWh/m²*dia e a do Cresesb = 5,21 kWh/m²*dia.

Gráfico 2 – Comparativo dos Valores de Irradiação Solar pelo Inmet e Cresesb



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Optou-se pela utilização da fonte de medições de irradiação solar do Cresesb devido a 3 fatores: dados de irradiação solar específicos para a cidade de estudo (Monte Alegre de Minas), contemplação de maior amostragem de dados (17 anos de imagens de satélite), possibilitando previsões mais seguras para os anos futuros e fornecimento de dados para os planos inclinados, auxiliando na comparação entre a ação do Sol para diferentes posicionamentos dos painéis solares e na obtenção dos dados a serem utilizados para a inclinação igual à latitude.

Para os valores de T_{cNOCT} (temperatura de operação nominal da célula fotovoltaica) e η_c (eficiência de conversão do módulo), referentes às especificações técnicas dos painéis solares, optou-se pela utilização de valores fixos para o cálculo, visto que as variações são pequenas para cada um dos modelos de placas, com interferência mínima na fórmula utilizada para o cálculo do fator de correção de temperatura.

Na Tabela 4 constam os modelos de diferentes fornecedores e seus respectivos valores para T_{cNOCT} e η_c .

Tabela 4 - Valores de TcNOCT e η_c para Diferentes Modelos de Painéis

Modelo do painel solar	TcNOCT (°C)	η (% de eficiência)
WPV 550-555 HMM1 (WEG)	45	21,3
ELG585 - M665NCB (ELGIN)	43	22,6
ELG585 - M72HEP (ELGIN)	45	22,65
ELG585 - M72HCH (ELGIN)	45	22,65
ELG570W-M72HRM bifacial (ELGIN)	45	22,06
610Wp Topcon-Sunova-55-610 (Neosolar)	45	22,6
LF350P6-72 (EMPALUX)	45	21,2
Canadian C56W-555MS (EVOLUSOM)	41	21,6
ZNSHINE 550W (SGV solar)	45	21,52
JA solar JAM 72530-550/MR (PHB)	45	21,3
Média	44,4	21,948

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O TcNOCT é inversamente proporcional ao fator de correção K(i). Quanto maior for a temperatura nominal da célula fotovoltaica, menor será o K(i), proporcionando um menor rendimento. Como a maioria dos módulos possuem TcNOCT = 45°C e nenhum modelo passou deste valor, utilizou-se 45°C para os cálculos.

Quanto à eficiência dos módulos (η_c), obteve-se uma média de 21,9% entre os diferentes modelos. Como η_c é diretamente proporcional à K(i), optou-se um valor mais conservador de 21% de eficiência, visto que nenhum dos modelos pesquisados possui um rendimento abaixo. Desta forma, evitando cálculos superestimados.

A partir dos dados de irradiação solar diária para 19°N levantados pelo Cresesb, realizou-se o cálculo da irradiância, conforme Tabela 5, utilizando-se da equação 8.

Tabela 5 – Cálculo da Irradiância (G)

Mês (i)	Irradiação Solar Diária Média mensal para 19°N Eg (kWh/m ² *dia)	Horas de Sol p/ 1 dia do mês i em média Hd	Irradiância G (W/m ²)
Janeiro	5.13	13.10	391.60
Fevereiro	5.46	12.70	429.92
Março	5.21	12.18	427.75
Abril	5.51	11.66	472.56
Maio	5.31	11.23	472.84
Junho	5.30	11.03	480.51
Julho	5.50	11.14	493.72
Agosto	6.30	11.51	547.35
Setembro	5.53	12.00	460.83
Outubro	5.48	12.53	437.35
Novembro	5.23	13.00	402.31
Dezembro	5.27	13.23	398.34
Média Anual	5.44	12.11	449.29

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.3 RESULTADOS

Após definidas as constantes $T_{cNOCT} = 45^{\circ}\text{C}$, $T_{aNOCT} = 20^{\circ}\text{C}$, $G_{NOCT} = 800 \text{ W/m}^2$, $\tau\alpha = 0,9$ e $\eta_c = 0,21$, aplicou-se a equação 7, para o cálculo da temperatura das células fotovoltaicas (T_c) de cada mês(i).

Com os resultados obtidos de T_c , utilizou-se da equação 5 para determinar o fator de correção de temperatura K.

Observam-se, na Tabela 6, os resultados de T_c e de K.

Tabela 6 – Cálculo de Tc e K para Cada Mês (i)

Mês (i)	Média mensal da temperatura Ta (°C)	Irradiância G (W/m ²)	Média mensal da velocidade do vento Vw (m/s)	Temperatura da célula Tc (°C)	Fator de correção de temperatura K
Janeiro	26.12	391.60	1.62	33.64	0.9568
Fevereiro	26.18	429.92	1.76	34.09	0.9545
Março	26.66	427.75	1.63	34.85	0.9508
Abril	26.75	472.56	1.84	35.23	0.9489
Maio	25.90	472.84	1.71	34.71	0.9514
Junho	24.64	480.51	1.86	33.21	0.9589
Julho	24.79	493.72	1.79	33.79	0.9561
Agosto	25.15	547.35	2.11	34.22	0.9539
Setembro	29.79	460.83	2.16	37.33	0.9383
Outubro	27.09	437.35	1.91	34.77	0.9511
Novembro	25.14	402.31	2.01	32.00	0.9650
Dezembro	25.66	398.34	1.75	32.99	0.9600
Média Anual	26.16	449.29	1.85	34.20	0.9540

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para calcular o valor de Horas de Sol a 1000W/m², converteu-se Eg de kWh para Wh e, então utilizou-se a equação 9, conforme cálculos detalhados na Tabela 7.

Tabela 7 – Cálculo de Hs

Mês (i)	Irradiação Solar Diária Média mensal para 19°N Eg (kWh/m ² *dia)	Irradiação Solar Diária Média mensal para 19°N Eg*1000 (Wh/m ² *dia)	Radiação solar de referência dos painéis Gr (W/m ²)	Horas de Sol a 1000 W/m ² Hs
Janeiro	5.13	5130	1000	5.13
Fevereiro	5.46	5460	1000	5.46
Março	5.21	5210	1000	5.21
Abril	5.51	5510	1000	5.51
Maio	5.31	5310	1000	5.31
Junho	5.30	5300	1000	5.30
Julho	5.50	5500	1000	5.50
Agosto	6.30	6300	1000	6.30
Setembro	5.53	5530	1000	5.53
Outubro	5.48	5480	1000	5.48
Novembro	5.23	5230	1000	5.23
Dezembro	5.27	5270	1000	5.27
Média Anual	5.44	5440	1000	5.44

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Definidas as variáveis a serem utilizadas para o cálculo da potência do sistema FV (Pmax) e considerando as constantes PR = 0,873 e E = 6726,66 kWh/mês (meta de geração = média mensal do consumo), aplicou-se a equação 4.

Apresenta-se na tabela 8 o resultado da potência estimada para o sistema FV.

Tabela 8 – Cálculo da Potência do Sistema (Pmax)

Mês (i)	Horas de Sol a 1000 W/m ² Hs	Número de dias do mês i N(i)	Fator de correção de temperatura K	Potência do sistema FV Pmax (kWp)	Potência do sistema FV (Wp)
Janeiro	5.13	31	0.9568	50.64	50637.85
Fevereiro	5.46	29	0.9545	50.98	50979.78
Março	5.21	31	0.9508	50.18	50178.35
Abril	5.51	30	0.9489	49.13	49126.07
Maio	5.31	31	0.9514	49.20	49197.70
Junho	5.30	30	0.9589	50.54	50536.10
Julho	5.50	31	0.9561	47.27	47268.56
Agosto	6.30	31	0.9539	41.36	41360.34
Setembro	5.53	30	0.9383	49.50	49496.72
Outubro	5.48	31	0.9511	47.69	47687.59
Novembro	5.23	30	0.9650	50.89	50890.76
Dezembro	5.27	31	0.9600	49.13	49128.17
Média Anual	5.44	366	0.9540	48.87	48874.00

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com a determinação da potência estimada para o sistema, realizou-se uma pesquisa de mercado para o levantamento de preços dos painéis solares e de seus equipamentos complementares.

Para a busca de fornecedores optou-se pelo estudo de mercado em Minas Gerais, estado da propriedade, a fim de facilitar o processo de frete.

Após contatos efetivos por ligação com 3 diferentes fornecedores, confirmou-se a vantagem de compra de painéis solares de alta potência, na faixa dos 600W, visto que possuem melhor custo benefício em relação às placas de menor potência e de não haver impedimentos quanto ao dimensionamento da área de instalação por tratar-se de propriedade rural, de modo a facilitar a alocação do sistema FV.

Depois de inúmeras tentativas, identificou-se um padrão de ligações não atendidas por diversos fornecedores e alguns que atenderam não forneciam painéis para o sistema *on-grid* ou então não deram sequência com o atendimento completo até o envio do orçamento.

Obteve-se 2 orçamentos de diferentes fornecedores, um de Itapeva – MG e outro de Contagem – MG, para painéis de 610W e 700W.

Para o cálculo da quantidade de painéis necessários, dividiu-se Pmax do sistema pelo valor de Pmax de cada placa solar.

Para o fornecedor da placa de 610W estimou-se 81 painéis. Porém, foi oferecido orçamento de 4 kits de 21 painéis, 3 fileiras de 7, orçando-se assim 84 painéis. Segue, a seguir, preço final com desconto, conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Orçamento do Fornecedor 1

Código	Item	Un.	Qtd.	Preço Unit. (R\$)	Aliq. ICMS	Aliq. IPI	MVA ICMS ST	Desc (R\$)	Preço Total (R\$)
24982	GERADOR SOLAR ON GRID 13,0KWP-OS 10,0KW LS KI		4	14000	0%	0%	0%	0	56.000,00
20981	ESTRUTURA SOLO P/ 4 PAINEIS P. MASTER REV.	UN	21	800	18%	0%	0%	0	16.800,00
20628	KIT GRAMPO CENTRAL MID CLAMP (6UND) REV	UN	21	50	18%	0%	0%	0	1.050,00
20631	KIT GRAMPO FINAL END CLAMP (4UND) REV	UN	21	50	18%	0%	0%	0	1.050,00
20987	KIT PARAFUSOS MARTELO M8 - IND	UN	42	6	18%	0%	0%	0	252,00
Valor Total (R\$)									75.152,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A primeira linha do orçamento referente aos kits, refere-se aos itens descritos:

- a. 84x Paine Solar Fotovoltaico 610W - Sunova 610-66MDH-G11
- b. 4x Inversor *String* - Livoltek GT1-10K5T2
- c. 12x *Stringbox* Neosolar 2x1 1000V 25A IP65
- d. 24x Par Conector MC4
- e. 480 metros de Cabo (preto)

Descrição do orçamento:

- a. Configuração: 3 MPPT's - Ligação: 7 painéis em série por MPPT
- b) 4x Kits de Energia Solar *On Grid* - 12,81kWp (24982)
- c) Geração de Energia: até 6.148kWh/mês
- d) Potência do Kit Gerador: 51,24kWp
- e) Estrutura: Solo

Vale ressaltar que o item *Stringbox* é composto pelo sistema de proteção, disjuntor e DPS.

Para o fornecedor da placa de 700W estimou-se 73 painéis. Segue, abaixo, preço final com desconto, conforme Tabela 10.

Tabela 10 – Orçamento do Fornecedor 2

Item	Qtd.	Preço Unit. (R\$)	Preço Total (R\$)
GERADOR SOLAR SUN 21 GGT de 51,1 kWp (Grid Tie)			
PAR DE CONECTORES MC4 PARA CABOS 4MM A 6MM SATUBLI	6	15,98	95,88
NAC IND LF VM - CABO SOLAR FLEXIVEL 6MM 1,8KV VERMELHO LAFEVER	100	6,99	699,00
NAC IND LF PT - CABO SOLAR FLEXIVEL 6MM 1,8KV PRETO LAFEVER	100	6,99	699,00
NAC GT320K D - INVERSOR GT 20,0KW 380V TRIFÁSICO 3MPPT C/WIFI LIVOLTEK	2	4450	8.900,00
NAC ZY700G12HNB 132 - PAINEL SOLAR 700W HJT HALF-CELL BIFACIAL VMP 41,7 MAX 1500V RENE PV	73	810,09	59.136,57
FRETE			4.655,67
IPI			-
DESCONTO PAGAMENTO À VISTA (7%)			(4.867,13)
		Valor Total (R\$)	69.318,99

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A princípio, o orçamento 2 do fornecedor de Contagem parece mais vantajoso devido ao preço de R\$69.318,99, contra R\$75.152,00 do fornecedor 1 de Itapeva. Entretanto, no segundo orçamento não estão inclusas as estruturas de suporte dos painéis.

A fim de analisar o custo-benefício relacionado ao preço dos painéis e suas respectivas potências, foram realizados os cálculos abaixo:

Placa de 610W:

$$R\$56.000,00 / 84 = R\$666,66$$

$$R\$666,66 / 610W = R\$1,093/W$$

Placa de 700W:

$$R\$810,09 / 700W = R\$1,157/W$$

Nota-se que a placa de 610W do fornecedor de Itapeva – MG possui um menor custo por W, além de estarem inclusos neste valor os itens que compõe o kit, como o inversor, stringbox, conectores e cabos, que estão relacionados a parte no orçamento 2.

Outro fator importante é quanto ao frete, o qual é oferecido gratuitamente pelo primeiro fornecedor.

Visto que ambos não oferecem o serviço de instalação do sistema, questionou-se quanto a indicações de profissionais do setor. Desta forma, em contato com uma empresa de instalação de painéis solares do Rio de Janeiro, foram apresentados ambos os orçamentos para análise e levantamento do preço final contendo todos os equipamentos necessários, juntamente com o custo de instalação.

O instalador foi conivente quanto à análise de melhor custo benefício para o orçamento das placas de 610W, apenas com um adendo sobre a aquisição de outro modelo para os inversores e a substituição da utilização das estruturas de suporte oferecidas pelo fornecedor por uma estrutura de fixação em blocos de concreto, construída no momento da instalação, de modo a reduzir o preço e para obter-se uma sustentação com maior durabilidade.

Além disso, após análise do consumo mensal, sugeriu-se, a adição de mais 2 placas fotovoltaicas, a fim de garantir a geração energética suficiente para o consumo mensal da propriedade.

Na Tabela 11 consta, a lista de equipamentos que compõe o sistema fotovoltaico, com a adequação às duas placas adicionadas, a mudança do modelo dos 4 inversores por 2 inversores de 25 kWp e a substituição do suporte pela instalação dos blocos de concreto.

Tabela 11 – Composição e Quantidades dos Itens do Sistema FV

Equipamento	Quantidade	Unidade
Módulo fotovoltaico de 310W de potência, Monocristalino Halfcell Bifacial. Certificação INMETRO.	86	un
Inversor Solar trifásico 25kWp 220V 4MPPT DEYE, sungrow, Canadian ou outros e Wi-fi / LAN, Monitoramento à nível de módulo, Certificação INMETRO	2	un
Conectores MC4 Para cabos 6MM	172	un
String Box Solar CA Quadro Energia + Dps + disjuntor	2	un
Cabo Solar 6MM até 1800V CC verde	500	m
Cabo Solar 6MM até 1800V CC preto	500	m
Cabo Solar 6MM até 1800V CC vermelho	500	m
Suporte para instalação em bloco de concreto para 86 painéis solares	87	un

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na Tabela 12 constata-se o preço final de implantação do sistema FV com todos os dispositivos, mão de obra e serviços adicionais incluídos.

Tabela 12 – Orçamento Final com a Instalação Incluída

Item	Composição	Valor (R\$)
Área disponível para instalação das placas	<i>Área de instalação: 260 m²</i> <i>Perímetro do terreno: 90 metros</i> <i>Área útil total: 300 m²</i>	
Composição do Kit Fotovoltaico	<i>86 Placas Solares de 610W</i> <i>02 Inversores de 25 kWp</i> <i>90 Estruturas de Fixação em Blocos de concreto</i>	
	Total	70.500,00
Componentes Elétricos Incluídos	<i>Disjuntores, Cabos, DPS (Dispositivos de Proteção contra Surtos)</i> <i>Medidores, Conectores, Caixas de Proteção e Barramentos</i>	
	Total	8.000,00
Mão de Obra Especializada e Serviços Adicionais	<i>Instalação completa com equipe técnica qualificada</i> <i>Seguro de instalação e equipamentos</i> <i>Manutenção preventiva e suporte técnico</i> <i>Homologação do sistema junto à Celesc</i> <i>Monitoramento do sistema</i>	
		18.463,00
Investimento Total no Projeto	Total	96.963,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O investimento inicial levantado para o desenvolvimento do projeto é de R\$96.963,00. Nota-se que além do serviço de instalação, a empresa oferece todo o suporte para a homologação de instalação junto à Cemig, certificando-se das normas técnicas e especificações requeridas na região, com equipe técnica qualificada, atendimento personalizado de pós-venda, manutenção preventiva, além de oferecer garantia que cobre qualquer tipo de adversidade que possa ocorrer, como falhas, danos aos equipamentos, fatores climáticos, como chuva de granizos, de forma a estender a durabilidade e eficiência da geração de energia fotovoltaica.

Após definição da potência total do sistema, estimada em 52,46 kWp, utilizou-se a equação 3, para calcular a energia gerada para cada mês, conforme Tabela 13.

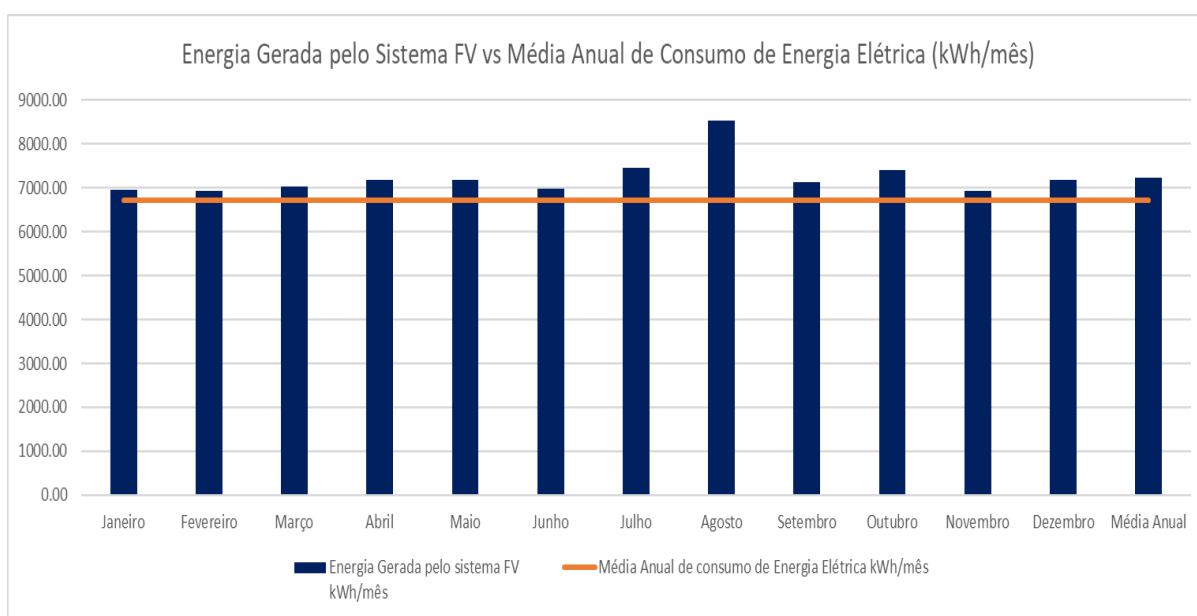
Tabela 13 – Estimativa de Geração de Energia com Pmax = 52,46 kWp

Mês (i)	Horas de Sol a 1000 W/m ² Hs	Número de dias do mês i N(i)	Fator de correção de temperatura K	PR (desempenho Inversor+cablagens)	Potência do sistema FV Pmax (kWp)	Energia Gerada kWh/mês
Janeiro	5.13	31	0.9568	0.873	52.46	6968.72
Fevereiro	5.46	29	0.9545	0.873	52.46	6921.98
Março	5.21	31	0.9508	0.873	52.46	7032.53
Abril	5.51	30	0.9489	0.873	52.46	7183.17
Mai	5.31	31	0.9514	0.873	52.46	7172.71
Junho	5.30	30	0.9589	0.873	52.46	6982.75
Julho	5.50	31	0.9561	0.873	52.46	7465.45
Agosto	6.30	31	0.9539	0.873	52.46	8531.87
Setembro	5.53	30	0.9383	0.873	52.46	7129.38
Outubro	5.48	31	0.9511	0.873	52.46	7399.85
Novembro	5.23	30	0.9650	0.873	52.46	6934.09
Dezembro	5.27	31	0.9600	0.873	52.46	7182.86
Média Anual	5.44	366	0.9540	0.873	52.46	7242.11

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No Gráfico 3, é realizada uma comparação entre a estimativa de geração de energia e a média de consumo mensal do ano de 2024.

Gráfico 3 – Energia Gerada pelo Sistema FV



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Nota-se que para todos os meses do ano, a energia fotovoltaica gerada com o sistema de 52,46 kWp supera à média consumida, de modo que parte da energia gerada será injetada na rede elétrica.

4.4 DISCUSSÕES

Para realizar o cálculo do *payback*, o tempo de retorno ao investimento, primeiramente realizou-se um estudo do custo mensal para o ano de 2024 caso a empresa já tivesse o sistema FV instalado, utilizando a fórmula 10, conforme Tabela 14.

Tabela 14 - Estudos 2024 com 80% de Utilização Simultânea

Ano Base	Mês (i)	Energia Gerada pelo sistema FV (kWh/mês)	Média Anual de consumo de Energia Elétrica (kWh/mês)	80% da Média Anual do consumo	Energia Injetada na Rede Elétrica (kWh/mês)	Preço Unitário Médio (base de cálculo 2024) (R\$/kWh)	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição TUSD	Custo de uso do Fio B (R\$)	Custo de Disponibilidade (para sistema trifásico 100kWh/R\$)	Custo Total (R\$)
Estudo feito em 2024	Janeiro	6968.72	6726.67	5381.33	1587.39	1.14	0.08	151.38	113.53	264.90
	Fevereiro	6921.98	6726.67	5381.33	1540.64	1.14	0.08	146.92	113.53	260.45
	Março	7032.53	6726.67	5381.33	1651.20	1.14	0.08	157.46	113.53	270.99
	Abril	7183.17	6726.67	5381.33	1801.84	1.14	0.08	171.83	113.53	285.36
	Maio	7172.71	6726.67	5381.33	1791.38	1.14	0.08	170.83	113.53	284.36
	Junho	6982.75	6726.67	5381.33	1601.42	1.14	0.08	152.72	113.53	266.24
	Julho	7465.45	6726.67	5381.33	2084.11	1.14	0.08	198.75	113.53	312.27
	Agosto	8531.87	6726.67	5381.33	3150.53	1.14	0.08	300.44	113.53	413.97
	Setembro	7129.38	6726.67	5381.33	1748.05	1.14	0.08	166.70	113.53	280.23
	Outubro	7399.85	6726.67	5381.33	2018.52	1.14	0.08	192.49	113.53	306.02
	Novembro	6934.09	6726.67	5381.33	1552.75	1.14	0.08	148.07	113.53	261.60
	Dezembro	7182.86	6726.67	5381.33	1801.53	1.14	0.08	171.80	113.53	285.33
	Média Anual	7242.11	6726.67	5381.33	1860.78	1.14	0.08	177.45	113.53	290.98

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Considerou-se a utilização de 80% da energia gerada concomitantemente, sendo 20% da energia injetada na rede elétrica. Isso ocorre devido às flutuações de consumo mês a mês, com situações em que o consumo seja abaixo da média, injetando maior quantidade de energia na rede, consequentemente pagando a taxa TUSD do fio B.

Os 80% do consumo são subtraídos do total de energia gerada, obtendo-se a quantidade de energia injetada na rede.

Como a energia solar consumida não gera custo, considera-se na conta de energia apenas o custo de disponibilidade e a porcentagem TUSD em cima do preço tarifário, multiplicado pela energia injetada que será posteriormente utilizada pela fazenda em meses de maior consumo ou até mesmo utilizada como crédito em outras instalações do proprietário.

Somados o custo da TUSD pela energia injetada com o custo de disponibilidade, obtêm-se o custo mensal com a instalação do sistema fotovoltaico.

Na Tabela 15, aplicou-se a mesma lógica do estudo da Tabela 14, utilizando a fórmula 10, a partir do mês de julho de 2025 até dezembro de 2026, simulando uma futura instalação.

Tabela 15 - Instalação 18 meses com 80% de Utilização Simultânea

Simulação da instalação para os próximos 18 meses										
Ano Base	Mês (j)	Energia Gerada pelo sistema FV (kWh/mês)	Média Anual de consumo de Energia Elétrica (kWh/mês)	80% da Média Anual do consumo	Energia Injetada na Rede Elétrica (kWh/mês)	Preço Unitário Médio (base de cálculo 2024) (R\$/kWh)	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição TUSD	Custo de uso do Fio B (R\$)	Custo de Disponibilidade (para sistema trifásico 100kWh/R\$)	Custo Total (R\$)
2025	Julho	7465.45	6726.67	5381.33	2084.11	1.14	0.126	298.12	113.53	411.65
	Agosto	8531.87	6726.67	5381.33	3150.53	1.14	0.126	450.66	113.53	564.19
	Setembro	7129.38	6726.67	5381.33	1748.05	1.14	0.126	250.05	113.53	363.57
	Outubro	7399.85	6726.67	5381.33	2018.52	1.14	0.126	288.74	113.53	402.26
	Novembro	6934.09	6726.67	5381.33	1552.75	1.14	0.126	222.11	113.53	335.64
	Dezembro	7182.86	6726.67	5381.33	1801.53	1.14	0.126	257.70	113.53	371.23
2026	Janeiro	6968.72	6726.67	5381.33	1587.39	1.14	0.168	302.75	113.53	416.28
	Fevereiro	6921.98	6726.67	5381.33	1540.64	1.14	0.168	293.84	113.53	407.37
	Março	7032.53	6726.67	5381.33	1651.20	1.14	0.168	314.93	113.53	428.45
	Abril	7183.17	6726.67	5381.33	1801.84	1.14	0.168	343.66	113.53	457.18
	Mai	7172.71	6726.67	5381.33	1791.38	1.14	0.168	341.66	113.53	455.19
	Junho	6982.75	6726.67	5381.33	1601.42	1.14	0.168	305.43	113.53	418.96
	Julho	7465.45	6726.67	5381.33	2084.11	1.14	0.168	397.49	113.53	511.02
	Agosto	8531.87	6726.67	5381.33	3150.53	1.14	0.168	600.89	113.53	714.41
	Setembro	7129.38	6726.67	5381.33	1748.05	1.14	0.168	333.40	113.53	446.92
	Outubro	7399.85	6726.67	5381.33	2018.52	1.14	0.168	384.98	113.53	498.51
	Novembro	6934.09	6726.67	5381.33	1552.75	1.14	0.168	296.15	113.53	409.68
	Dezembro	7182.86	6726.67	5381.33	1801.53	1.14	0.168	343.60	113.53	457.12

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Nota-se que a taxa TUSD é alterada ano a ano devido ao aumento gradual que atingirá o valor máximo de 28% em 2029.

Na Tabela 16 é realizada a estimativa do *payback*, aplicando-se a equação 11.

Tabela 16 - Payback com 80% de Utilização Simultânea

	Ano Base	Mês (i)		Custo Anual	Custo Anual com	Economia Estimada	Economia
			(i)	Médio sem sistema FV (R\$)	sistema FV (R\$)	(R\$)	Acumulada
Simulação da instalação para os próximos 18 meses	2025	Julho	1	7636.58	411.65	7224.94	7224.94
		Agosto	2	7636.58	564.19	7072.39	14297.33
		Setembro	3	7636.58	363.57	7273.01	21570.34
		Outubro	4	7636.58	402.26	7234.32	28804.66
		Novembro	5	7636.58	335.64	7300.94	36105.60
		Dezembro	6	7636.58	371.23	7265.36	43370.96
	2026	Janeiro	7	7636.58	416.28	7220.30	50591.26
		Fevereiro	8	7636.58	407.37	7229.22	57820.48
		Março	9	7636.58	428.45	7208.13	65028.61
		Abril	10	7636.58	457.18	7179.40	72208.01
		Mai	11	7636.58	455.19	7181.40	79389.40
		Junho	12	7636.58	418.96	7217.63	86607.03
		Julho	13	7636.58	511.02	7125.56	93732.59
		Agosto	14	7636.58	714.41	6922.17	100654.76
		Setembro	15	7636.58	446.92	7189.66	107844.42
		Outubro	16	7636.58	498.51	7138.07	114982.49
		Novembro	17	7636.58	409.68	7226.91	122209.40
		Dezembro	18	7636.58	457.12	7179.46	129388.86

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Ao realizar a soma acumulada da economia mensal a partir de julho de 2024, determinou-se o período de 14 meses após a instalação do sistema para recuperar o montante financeiro utilizado no investimento total do projeto, no valor de R\$96.963,00.

Na Tabela 17, realizou-se nova simulação com 50% da energia solar gerada, visto a imprevisibilidade de consumo elétrico, podendo ter um alto consumo em um dia e baixo consumo em outro, devido principalmente aos períodos com a necessidade de irrigação da plantação, que varia de acordo com os fatores pluviais.

Tabela 17 - Instalação 18 meses com 50% de Utilização Simultânea

Ano Base Fonte:		Energia Gerada pelo sistema FV (kWh/mês)	Média Anual de consumo de Energia Elétrica (kWh/mês)	50% da Média Anual do consumo	Energia Injetada na Rede Elétrica (kWh/mês)	Preço Unitário Médio (base de cálculo 2024) (R\$/kWh)	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição TUSD	Custo de uso do Fio B (R\$)	Custo de Disponibilidade (para sistema trifásico 100kWh/R\$)	Custo Total com sistema FV (R\$)	
Simulação da instalação para os próximos 18 meses	2025	Julho	7465.45	6726.67	3363.33	4102.11	1.14	0.126	586.78	113.53	700.31
		Agosto	8531.87	6726.67	3363.33	5168.53	1.14	0.126	739.33	113.53	852.85
		Setembro	7129.38	6726.67	3363.33	3766.05	1.14	0.126	538.71	113.53	652.24
		Outubro	7399.85	6726.67	3363.33	4036.52	1.14	0.126	577.40	113.53	690.93
		Novembro	6934.09	6726.67	3363.33	3570.75	1.14	0.126	510.77	113.53	624.30
		Dezembro	7182.86	6726.67	3363.33	3819.53	1.14	0.126	546.36	113.53	659.89
	2026	Janeiro	6968.72	6726.67	3363.33	3605.39	1.14	0.168	687.64	113.53	801.17
		Fevereiro	6921.98	6726.67	3363.33	3558.64	1.14	0.168	678.72	113.53	792.25
		Março	7032.53	6726.67	3363.33	3669.20	1.14	0.168	699.81	113.53	813.34
		Abril	7183.17	6726.67	3363.33	3819.84	1.14	0.168	728.54	113.53	842.07
		Mai	7172.71	6726.67	3363.33	3809.38	1.14	0.168	726.55	113.53	840.07
		Junho	6982.75	6726.67	3363.33	3619.42	1.14	0.168	690.31	113.53	803.84
Julho		7465.45	6726.67	3363.33	4102.11	1.14	0.168	782.38	113.53	895.90	
Agosto		8531.87	6726.67	3363.33	5168.53	1.14	0.168	985.77	113.53	1099.30	
Setembro		7129.38	6726.67	3363.33	3766.05	1.14	0.168	718.28	113.53	831.81	
Outubro		7399.85	6726.67	3363.33	4036.52	1.14	0.168	769.87	113.53	883.39	
Novembro		6934.09	6726.67	3363.33	3570.75	1.14	0.168	681.03	113.53	794.56	
Dezembro		7182.86	6726.67	3363.33	3819.53	1.14	0.168	728.48	113.53	842.01	

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na Tabela 18, encontra-se o *payback* estimado com o fator de 50% de energia injetada na rede.

Tabela 18 - *Payback* com 50% de Utilização Simultânea

Ano Base		Mês (i)	(i)	Custo Anual Médio sem sistema FV (R\$)	Custo Anual com sistema FV (R\$)	Economia Estimada (R\$)	Economia Acumulada
Simulação da instalação para os próximos 18 meses	2025	Julho	1	7636.58	700.31	6936.27	6936.27
		Agosto	2	7636.58	852.85	6783.73	13720.00
		Setembro	3	7636.58	652.24	6984.35	20704.35
		Outubro	4	7636.58	690.93	6945.66	27650.00
		Novembro	5	7636.58	624.30	7012.28	34662.29
		Dezembro	6	7636.58	659.89	6976.70	41638.98
	2026	Janeiro	7	7636.58	801.17	6835.42	48474.40
		Fevereiro	8	7636.58	792.25	6844.33	55318.73
		Março	9	7636.58	813.34	6823.25	62141.98
		Abril	10	7636.58	842.07	6794.52	68936.49
		Maio	11	7636.58	840.07	6796.51	75733.01
		Junho	12	7636.58	803.84	6832.74	82565.75
		Julho	13	7636.58	895.90	6740.68	89306.43
		Agosto	14	7636.58	1099.30	6537.29	95843.71
		Setembro	15	7636.58	831.81	6804.78	102648.49
		Outubro	16	7636.58	883.39	6753.19	109401.68
		Novembro	17	7636.58	794.56	6842.02	116243.70
		Dezembro	18	7636.58	842.01	6794.57	123038.28

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

É notável o fato de o tempo de *payback* ser de 15 meses, apenas 1 mês a mais em relação às contas utilizando o fator de 20% do consumo médio injetado na rede elétrica. Isso se deve ao fato de os custos com as contas de energia após a instalação do sistema FV serem consideravelmente baixos em relação ao habitual.

Para o fator de 80% de utilização da energia média consumida, a porcentagem média de economia nas contas de energia elétrica é de 94,1%, enquanto que para o fator de 50% da energia injetada na rede a economia média é de 89,5%.

Considerando o consumo real mês a mês e alocando o consumo acumulado dos meses nos quais não foram realizadas as medições, observa-se na Tabela 19, o custo de energia e os créditos que seriam gerados no ano de 2024, que poderiam ser utilizados em meses futuros com a alta demanda.

Tabela 19 - Custo com o Sistema FV para as contas de 2024

Mês (i)	Energia Gerada pelo sistema FV (kWh/mês)	Consumo de Energia Elétrica Real 2024 (kWh/mês)	Energia Injetada na Rede Elétrica (kWh/mês)	Preço Unitário Médio (base de cálculo 2024) (R\$/kWh)	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição TUSD	Custo de uso do Fio B (R\$)	Custo de Disponibilidade (para sistema trifásico 100kWh/R\$)	Custo Total (R\$)
Janeiro	6968,72	11560	-4591,28	0,96	-	-	-	4386,65
Fevereiro	6921,98	6140	781,98	1,14	0,08	74,57	113,53	188,10
Março	7032,53	6140	892,53	0,96	0,08	71,87	95,86	167,74
Abril	7183,17	6380	803,17	1,14	0,08	76,59	113,53	190,12
Mai	7172,71	6380	792,71	1,14	0,08	75,60	113,53	189,12
Junho	6982,75	6020	962,75	1,14	0,08	91,81	113,53	205,34
Julho	7465,45	6020	1445,45	1,04	0,08	126,32	104,04	230,36
Agosto	8531,87	2160	6371,87	1,02	0,08	544,55	101,74	646,29
Reserva			12050,46					
Setembro	7129,38	8467	-1337,62	1,14	0,08	127,56	113,53	241,09
Outubro	7399,85	8467	-1067,15	1,14	0,08	101,77	113,53	215,29
Novembro	6934,09	8467	-1532,91	1,03	0,08	133,27	103,50	236,77
Reserva			8112,77					
Dezembro	7182,86	4520	2662,86	1,01	0,08	225,68	100,89	326,58
Média Anual	7242,11	6726,67	515,45	1,14	0,08	49,15	113,53	601,95

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Devido ao alto consumo de janeiro de 2024 e por ainda não haver créditos disponíveis, para este mês teria uma pequena economia, porém a partir do mês de fevereiro já seriam reduzidos os custos, conforme simulado nas simulações anteriores. Para os meses de setembro, outubro e novembro, que demandaram uma quantidade maior do que a de energia gerada, pôde-se utilizar dos créditos reservados nos meses anteriores, confirmando a viabilidade do projeto e reiterando a escolha de instalar um sistema com uma potência ligeiramente acima da estimada para a média de consumo.

Além de reduzir significativamente o gasto com energia elétrica para a propriedade estudada, os créditos gerados também podem auxiliar na redução das contas de energia de outras instalações do proprietário, podendo proporcionar a certificação do selo por utilização de energia renovável para a produção/cultivo de seus produtos.

O auxílio na redução dos custos energéticos, proporciona uma melhor gestão econômica para os agricultores e a economia proporcionada pelo sistema FV pode até mesmo ser revertida em tecnologias de controle e manutenção, utilizando-se da própria energia gerada, a fim de melhorar a eficiência produtiva.

5 CONCLUSÃO

Utilizando-se fórmulas de dimensionamento do sistema FV que levam em consideração diversos fatores meteorológicos locais e dados técnicos das placas solares, foi possível obter resultados consistentes e específicos para a região da propriedade, de modo coerente com os estimados pelos fornecedores.

De acordo com o cálculo do dimensionamento do sistema FV, a potência necessária para suprir a demanda energética média da propriedade é de 48,87 kWp. Considerando o fornecedor, tecnologia e serviço de instalação mais viáveis para a implantação do projeto, quantificou-se a compra de 86 painéis solares de 610W com seus devidos componentes, sistema o qual atinge a potência nominal de 52,46 kWp, com uma capacidade média de geração de energia solar de 7242,11 kWh/mês, superando o consumo médio mensal de 6726,67 kWh/mês da fazenda no ano de 2024.

Ao estimar a economia nas contas de energia elétrica com uma possível instalação deste sistema FV constatou-se a recuperação do investimento inicial após 15 meses de utilização da energia solar gerada para uma incidência de consumo simultâneo de pelo menos 50%, e um retorno em 14 meses para a utilização simultânea de 80%. Além disso, confirmou-se a viabilidade do superdimensionamento para a utilização dos créditos em meses de maior demanda energética ou até mesmo para abater nos custos de outras instalações do proprietário.

Os resultados obtidos indicam, apesar do alto investimento inicial, que a tecnologia fotovoltaica representa uma excelente oportunidade de economia para as empresas, ao contribuir para a redução de custos operacionais e, ao mesmo tempo, favorecer a preservação ambiental por meio da transição energética.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (BRASIL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília, 2002. 199 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Bandeiras Tarifárias**: como funciona. Brasília: ANEEL, 2023. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias>. Acesso em: 30 maio 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Entendendo a tarifa**. Brasília: ANEEL, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas/entenda-a-tarifa>. Acesso em: 30 maio 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Glossário**: conheça o glossário de energia elétrica. Brasília: ANEEL, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/glossario>. Acesso em: 30 maio 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Brasília, 2012. 14 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 1000, de 7 de dezembro de 2021**. Estabelece as regras de prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica. Brasília: ANEEL, 2021. 39 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16690**: Instalações elétricas de sistemas fotovoltaicos — Requisitos de projeto e instalação. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br>. Acesso em: 30 maio 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14724**: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6024**: informação e documentação: numeração progressiva das seções de um documento: apresentação. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6027**: informação e documentação: sumário: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6028**: informação e documentação: resumo, resenha e resenha crítica: apresentação. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16690**: Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BRASIL. **Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022**. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm. Acesso em: 08 jul. 2025.

CAFFREY, C. **Neolithic Revolution**. In: EBSCO Research Starters, 2023. Disponível em: <https://www.ebsco.com/research-starters/agriculture-and-agribusiness/neolithic-revolution>. Acesso em: 30 maio 2025.

CAIRES, G. L. R. **Análise de viabilidade de um sistema fotovoltaico para a demanda do Pesqueiro Kanoa**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/bitstream/prefix/2864/1/GermanoLimaRodriguesCaires.pdf>. Acesso em: 10 maio 2025.

CAPRA, F. **O ponto de mutação**: a ciência, a sociedade e a cultura emergente. São Paulo: Cultrix, 1982.

CARNEIRO, J. **Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos**. Guimarães: Universidade do Minho, 2009. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16965/1/DIMENSIONAMENTO%20DE%20SISTEMAS%20FOTOVOLTAICOS.pdf>. Acesso em: 21 maio 2025.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Atlas solarimétrico do Brasil (2000)**. Rio de Janeiro: Cresesb, 2014. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=&cid=2>. Acesso em: 16 maio 2025.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (Brasil). **Mini e microgeração distribuída**. Belo Horizonte: Cemig, 2023. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/mini-e-microgeracao-distribuida/>. Acesso em: 30 maio 2025.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (Brasil). **Relatório de Sustentabilidade 2023**. Belo Horizonte: Cemig, 2024. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/relatorio/relatorio-anual-de-sustentabilidade-2023/>. Acesso em: 30 maio 2025.

COSTA, R. S.; SCHNEIDER, R. C. de S. Potencial de uso da energia solar fotovoltaica no meio rural: uma revisão. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 27, n. 4, p. 355-365, 2019.

CUSTÓDIO, D. *et al.* **Usinas hidrelétricas e seus impactos ambientais**. Guarulhos: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2023**: Ano base 2022. Rio de Janeiro: EPE, 2023.

ENERGY INSTITUTE. **Statistical Review of World Energy 2024**. London: Energy Institute, 2024. Disponível em: <https://www.energyinst.org>. Acesso em: 30 maio 2025.

FREITAS, M. A. V.; SPERANDIO, D. Agricultura e meio ambiente: desafios e perspectivas. **Revista de Desenvolvimento Sustentável**, v. 5, n. 2, p. 45-60, 2018.

GLOBAL SOLAR ATLAS. **Direct normal irradiation**. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/support/faq>. Acesso em: 10 maio 2025.

GOLDEMBERG, J. *et al.* **Energia**: usos, impactos e alternativas. 2. ed. São Paulo: Edusp, 2008.

GORE, A. **Nossa escolha**: um plano para solucionar a crise climática. [Our choice: a plan to solve the climate crisis]. Barueri, SP: Manole, 2014.

GREEN, M. **Third generation photovoltaics**: advanced solar energy conversion. Berlin: Springer-Verlag, 2003.

INTELBRAS. **Energia solar e sustentabilidade**: benefícios para o meio ambiente e o seu bolso. São José, SC: Intelbras, 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Future of Solar Photovoltaic**: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects. Abu Dhabi: IRENA, 2019.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Metodologia do trabalho científico**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1986.

MARTINS, A. P. L.; COSTA, A. P. R.; ALMEIDA, A. S. Agrovoltáicos: uma revisão sobre a integração de geração de energia solar e produção agrícola. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 10, n. 2, p. 218-230, 2021.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. Energia solar no Brasil: panorama atual e perspectivas. **Revista Brasileira de Energia**, v. 21, n. 1, p. 63-87, 2015.

MORALES, E. A. M. **Técnicas de propagação de ondas na estimativa de propriedades mecânicas de painéis OSB**. 2006. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. doi:10.11606/T.88.2006.tde-28022007-105842.

MOREIRA, J. R. S. *et al.* **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021. 481 p.

NASCIMENTO, C. A. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. 2004. 21 f. Monografia (Especialização) - Curso de Pós-Graduação Lato-Sensu em Fontes Alternativas de Energia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

NEOSOLAR. **Inversores ou conversores**. Disponível em: <http://www.neosolar.com.br/aprenda>. Acesso em: 19 maio 2025.

NEOSOLAR. **Painel solar fotovoltaico Yingli 20Wp.** Disponível em: <http://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-yingli-yl020p-17b-1-6-20wp.html>. Acesso em: 19 maio 2025.

NEOSOLAR. **Inversor Unitron iVolt - 400W / 12Vcc / 115Vac / 60Hz.** Disponível em: <http://www.neosolar.com.br/loja/inversor-unitron-ivolt-400w-12vcc-115vac-60hz.html>. Acesso em: 19 maio 2025.

NEOSOLAR. **Bateria estacionária 220Ah-240Ah.** Disponível em: <http://www.neosolar.com.br/loja/bateria-estacionaria-freedom-df4001-240ah-220ah.html>. Acesso em: 19 maio 2025.

NEOSOLAR. **Painel fotovoltaico de 240Wp.** Disponível em: <http://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-yingli-yl240p-29b-240wp.html>. Acesso em: 19 maio 2025.

NEOSOLAR. **Controlador de carga MPPT Epsolar Tracer-4210RN 40A 12/24V.** Disponível em: <http://www.neosolar.com.br/loja/controlador-de-carga-mppt-epsolar-tracer-4210rn-40a-12-24v.html>. Acesso em: 19 maio 2025.

NERIS, Alessandra. O que são painéis monocristalinos e quais são suas vantagens? *In: Blog Aldo Solar*, [Maringá, PR], 7 de abril de 2021. Disponível em: <https://www.aldo.com.br/blog/o-que-sao-paineis-monocristalinos-e-quais-sao-suas-vantagens/>. Acesso em: 12 maio 2025.

NETO, A. F. C. P.; ALMEIDA, M. P. **Desenvolvimento de controladores de carga para sistemas fotovoltaicos autônomos.** 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2009. 98 f.

OLIVEIRA NETTO, A. A. de. **Metodologia da pesquisa científica:** guia prático para apresentação de trabalhos acadêmicos. 2. ed. rev. e atual. Florianópolis: Visual Books, 2006.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: Cepel/Cresesb, 2014. 529 p.

SILVA, M. A.; SOUSA, F. A.; GOMES, A. C. Consumo de energia elétrica na agropecuária: impactos econômicos e ambientais. **Revista Brasileira de Energia**, v. 27, n. 2, p. 85-101, 2021.

SOUZA, L. M. **Energia solar estudo comparativo entre brasil e alemanha.** SlideShare. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/slideshow/energia-solar-estudo-comparativo-entre-brasil-e-alemanha/33577645>. Acesso em: 28 nov 2025.

SOUZA, M.; ALMEIDA, E. M. S. **Energia e desenvolvimento:** desafios para o século XXI. Rio de Janeiro: Garamond, 2005.

TORRES, M.; SAUAIA, R.; KOLOSZUK, R. . **A evolução tecnológica fotovoltaica e seus benefícios ao Brasil.** São Paulo: Absolar, 2024. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/artigos/a-evolucao-tecnologica-fotovoltaica-e-seus-beneficios-ao-brasil/>. Acesso em: 16 maio 2025.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações: sistemas isolados e conectados à rede**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2012. 224 p.

VILLALVA, M. G.; GAZOLLA, M. F. Fundamentos de energia solar fotovoltaica. **Revista Eletrônica Energia e Meio Ambiente**, v. 1, n. 1, p. 1-23, 2011.

WEDLING, M. **Semicondutores**. Guaratinguetá: Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Disponível em: <http://www2.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/1---semicondutores.pdf>. Acesso em: 10 maio 2025.

YANG, R. L. **Estimação da temperatura em células fotovoltaicas para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em Curitiba**. Curitiba: UTFPR, 2018. Disponível em: https://utfpr-ct-static-content.s3.amazonaws.com/labens.ct.utfpr.edu.br/wp-content/uploads/2018/11/Estimacao_da_temperatura_em_celulas_fotovoltaicas_para_sistemas_fotovoltaicos_conectados_a_rede_eletrica_em_Curitiba_VF.pdf. Acesso em: 23 maio 2025.