

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS –
CAMPUS DE GOIÂNIA
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS IV
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS MATSUOKA FARIA

DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE GERAÇÃO E
ARMAZENAMENTO OFF-GRID DE UMA PROPRIEDADE DOMICILIAR

GOIÂNIA
2025

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Lucas Matsuoka Faria

Matrícula: 20191011060386

Título do Trabalho: Dimensionamento de um sistema fotovoltaico de geração e armazenamento off-grid de uma propriedade domiciliar

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.



Documento assinado digitalmente
LUCAS MATSUOKA FARIA
Data: 06/05/2025 01:11:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Goiânia, 06/05/2025.

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

LUCAS MATSUOKA FARIA

DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE GERAÇÃO E
ARMAZENAMENTO OFF-GRID DE UMA PROPRIEDADE DOMICILIAR

TCC-2 apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Departamento de Áreas Acadêmicas IV do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – *Campus* Goiânia como requisito parcial para a obtenção de título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Ms. Paulo Sérgio Zanin Júnior

GOIÂNIA

2025

F224d Faria, Lucas Matsuoka.
Dimensionamento de um sistema fotovoltaico de geração e armazenamento off-grid de um propriedade domiciliar / Lucas Matsuoka Faria. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2025.
83 f.: il.

Orientador: Prof. Ms. Paulo Sérgio Zanin Júnior.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Bacharelado em Engenharia Elétrica, Departamento de Áreas Acadêmicas IV, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

1. Sistemas fotovoltaicos. 2. Energia solar. 3. Dimensionamento de sistemas elétricos. 4. Propriedades rurais. I. Zanin Júnior, Paulo Sérgio (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. III. Título.

CDD 621.312 44

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Alisson de Sousa Belthodo Santos CRB1/ 2.266
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

LUCAS MATSUOKA FARIA

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE GERAÇÃO
E ARMAZENAMENTO OFF-GRID DE UMA PROPRIEDADE DOMICILIAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, como parte das exigências para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista.

Goiânia, 20 de março de 2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me Paulo Sérgio Zanin Júnior
Orientador - IFG/Goiânia

Prof. Me Ubaldo Eleutério da Silva
Membro da Banca Examinadora - IFG/Goiânia

Prof. Me. Paulo César Bezerra Bastos
Membro da Banca Examinadora - IFG/Goiânia

Prof. Me Carlos Daniel de Sousa Bezerra
Membro da Banca Examinadora - IFG/Goiânia

Documento assinado eletronicamente por:

- Ubaldo Eleuterio da Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 24/03/2025 09:15:50.
- Paulo Cesar Bezerra Bastos, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 21/03/2025 12:43:33.
- Carlos Daniel de Sousa Bezerra, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 21/03/2025 08:25:58.
- Paulo Sergio Zanin Junior, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/03/2025 22:43:27.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 20/03/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 629821
Código de Autenticação: aa65640c55



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Rua 75, nº 46, Centro, GOIÂNIA / GO, CEP 74055-110
Sem Telefones cadastrados

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que em sua infinita soberania e bondade, permitiu que eu tivesse vida desde o princípio e chegasse até aqui, com a possibilidade de concluir um trabalho de conclusão de curso de bacharelado em engenharia elétrica.

Quero agradecer também a minha família, em especial meus pais, Romilton e Narita, e meus queridos avós, que sempre lutaram para que eu tivesse uma educação de qualidade e me desenvolvesse como uma pessoa melhor a cada dia.

Meu agradecimento vai também para meu querido mentor, professor e orientador Paulo Sérgio Zanin Junior, que me orientou de forma excelente na produção deste trabalho, e que serve de inspiração para mim no ramo da engenharia elétrica e na vida.

Por fim, agradeço aos meus amigos e colegas que me acompanharam durante o tempo de caminhada do curso, e ao Instituto Federal de Goiás que proporcionou as condições da minha formação.

RESUMO

A presente pesquisa trata-se de um estudo sobre o dimensionamento de um sistema fotovoltaico off-grid para uma propriedade domiciliar. A partir desse estudo, almeja-se obter o dimensionamento e a otimização do sistema para as condições apresentadas, analisar se esse dimensionamento supre o exigido do sistema e discutir possibilidades a partir dos resultados. A pesquisa foi aplicada por meio da modelagem de carga de uma unidade consumidora arbitrária e do desenvolvimento e a operação de um código na linguagem de programação Python que realiza o dimensionamento ótimo do sistema para cada cenário, a partir do método simplex. Foram selecionados 3 cenários de tensões de operação diferentes para as análises e discussões. De acordo com os resultados obtidos, é possível afirmar que o código eficientemente realiza o dimensionamento ótimo do sistema. Por fim, os objetivos do estudo foram compreendidos a partir dos resultados e das discussões abordadas, a fim de apresentar novas possibilidades para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos off-grid.

Palavras-chave: Dimensionamento; Otimização; Fotovoltaico; Simplex.

ABSTRACT

This research focuses on the sizing of an off-grid photovoltaic system for a household property. The aim is to achieve the optimal sizing of the system under the presented conditions, evaluate whether the sizing meets the system's requirements, and discuss possibilities based on the results. The study was conducted through the load modeling of a consumer unit and the development and operation of a Python programming language code that performs the optimal system sizing using the simplex method. Three operating voltage scenarios were selected for analysis and discussion. Based on the results obtained, it is possible to affirm that the code efficiently performs the optimal sizing of the system. Finally, the study objectives were achieved through the results and discussions, aiming to present new possibilities for off-grid photovoltaic system sizing.

Keywords: Sizing; Optimization; Photovoltaic; Simplex.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curvas típicas de efeito da profundidade de descarga e da temperatura na vida útil da bateria.....	20
Figura 2- Capacidade de uma bateria Chumbo-ácido em função da taxa de descarga, referenciada à capacidade em C/20	22
Figura 3- Esquema de um SFI domiciliar.....	23
Figura 4 - Esquemas de ligação e chaveamento de um controlador de carga.	28
Figura 5 - Curva $P \times V$	30
Figura 6 - Curva $I \times V$ em temperatura fixa de 25°C.....	31
Figura 7 - Curva $I \times V$ para temperaturas diferentes.	32
Figura 8 - Movimento de Terra ao redor do Sol.....	35
Figura 9 - Declinação Solar.	35
Figura 10 - Ilustração dos ângulos da posição do Sol em relação ao plano horizontal.	38
Figura 11 – Orientação de uma superfície inclinada em relação ao mesmo plano.	38
Figura 12 - Dados e gráfico de irradiação solar na localidade escolhida.	41
Figura 13 - Tipos de inversores de acordo com o tipo de funcionamento.....	42
Figura 14 - Curva de carga do cenário principal.	54
Figura 15 - Arranjo fotovoltaico em 12V.....	60
Figura 16 - Simulação do armazenamento do banco de baterias em 12V.....	61
Figura 17 - Simulação da produção/carga em 12V.	61
Figura 18 - Descarga da bateria em função do tempo em 12V.	63
Figura 19 - Arranjo fotovoltaico em 24V.....	65
Figura 20 - Simulação da produção/carga em 24V.	66
Figura 21 - Simulação do armazenamento do banco de baterias em 24V.....	66
Figura 22 - Descarga da bateria em função do tempo em 24V.	67
Figura 23 - Arranjo fotovoltaico em 48V.....	68
Figura 24 - Simulação da produção/carga em 48V.	69
Figura 25 - Simulação do armazenamento do banco de baterias em 48V.....	69
Figura 26 - Descarga da bateria em função do tempo em 48V.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características de uma bateria estacionária chumbo ácido.	16
Tabela 2 - Especificações do módulo Tiger Neo N-Type 72HL4-BDV 550-580 Watt retiradas do datasheet.	31
Tabela 3 - Dados técnicos que constam na etiqueta do módulo.	33
Tabela 4 - Dados técnicos adicionais que podem constar na folha de dados do módulo.	34
Tabela 5 - Unidades para a radiação solar e fatores de conversão.	36
Tabela 6 – Primeiro formato da tabela simplex.	48
Tabela 7 – Primeira iteração da tabela simplex.	49
Tabela 8 – Segunda e última iteração da tabela simplex.	49
Tabela 9 - Resultados para 12V.	59
Tabela 10 - Resultados para 24V.	64
Tabela 11 - Resultados para 48V.	67
Tabela 12 - Comparativo dos 3 cenários.	71

LISTA DE SIGLAS

AGM	Absorbed Glass Matt – Vidro Absorvido Fosco
ANEEL	Agência Nacional de Engenharia Elétrica
BMS	Battery Management System - Sistema de Gerenciamento da Bateria
CRESCESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
DOD	Depth of Discharge – Profundidade de Descarga
FLA	Flooded Lead Acid - Chumbo Ácido Inundado
FVLA	Free Vented Lead Acid - Chumbo Ácido de Ventilação Livre
HSP	Horas de Sol Pleno
HVD	High Voltage Disconnection – Desconexão por Alta Tensão
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor - Transistor Bipolar de Porta Isolada
LVD	Low Voltage Disconnection - Desconexão por Baixa Tensão
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor - Transistor de Efeito de Campo de Metal-Óxido-Semicondutor
MPPT	Maximum Power Point Tracking – Rastreamento de Ponto Máximo de Potência
OPVZ	Ortsfest Panzerplatte Verschlussen – Placa de Armadura Fixa Fechada
PWM	Pulse Width Modulation - Modulação por Largura de Pulso
SCR	Silicon Controlled Rectifier – Retificador Controlado de Silício
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede
SFI	Sistema Fotovoltaico Isolado
SOC	State of Charge – Estado de Carga
STC	Standard Test Conditions – Condições Padrão de Teste
THD	Total Harmonic Distortion – Distorção Harmônica Total
TRIAC	Triode for Alternating Current – Triodo para Corrente Alternada
VLA	Vented Lead Acid - Chumbo Ácido Ventilado
VLRA	Valve Regulated Lead Acid - Chumbo Ácido Regulado à Válvula

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. Justificativa	12
1.2. Objetivos.....	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1. Baterias	14
2.1.1 Chumbo-ácido	15
2.1.2 Íon-Lítio.....	16
2.2. Baterias recarregáveis.....	17
2.3. Profundidade de descarga	19
2.4. Eficiência	20
2.5. Capacidade.....	20
2.1.6. Temperatura.....	21
2.7. Densidade de energia.....	21
2.8. Taxa de carga (C-rate)	21
2.3. Controlador de carga	22
2.3.1 Funções de um controlador de carga	23
2.3.2. Detalhamento dos parâmetros e funções de um controlador de carga	25
2.2.3 Tipos de controladores de carga	26
2.3 Pannel fotovoltaico.....	29
2.3.3. Identificação das características elétricas dos módulos.....	32
2.3.4. Geometria Sol Terra	34
2.3.5. Tipos de painéis fotovoltaicos	39
2.5. Obtenção de dados de irradiação solar	40
2.5. Inversor.....	41
2.5.1. Classificação dos inversores.....	42
2.5.2. Inversores comutados pela rede (para SFCR)	42
2.5.3 Inversores auto comutados	43
2.5.4 Características dos inversores.....	43
2.6. Modelagem de carga.....	45
3. METODOLOGIA.....	47
3.1 Otimização linear e método simplex	47
3.2 Biblioteca PuLP Python.....	50
3.3 Criação e implementação do código.....	50
3.4. Variáveis e constantes	53

3.5. Modelagem da curva de carga	54
3.6. Função Objetivo	56
3.7. Restrições.....	56
3.8. Resolução do código.....	58
3.9. Análise comportamental do sistema	58
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
4.1 Cenário Base com 12V	59
4.2 Cenário Base com 24V	64
4.3. Cenário Base com 48V	67
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um importante recurso para a melhoria da qualidade de vida do homem rural, tanto para o uso domiciliar quanto para o processo produtivo, sendo de extrema importância o fornecimento ininterrupto desse recurso para o proprietário do campo [1].

O acesso à energia elétrica em propriedades rurais é um desafio no Brasil, dada a complexidade do sistema elétrico brasileiro e de seus processos para gerar, transmitir e distribuir energia aos consumidores [2].

Essa limitação, no percurso histórico, geralmente é associada à distância entre os principais centros consumidores de energia elétrica e as famílias residentes de propriedades rurais, ao custo elevado da extensão da rede de distribuição, à concepção ideológica de que essas famílias consomem uma menor quantidade de eletricidade e à limitada renda familiar para comprar infraestrutura para o fornecimento do serviço [3].

O meio rural sofre com recorrentes falhas relacionadas à eletricidade, como a escassez de serviço e fornecimento em regiões remotas, a dependência da concessionária, que pode atrapalhar o consumidor no seu desempenho energético, e as constantes quedas energéticas. São inúmeras as causas dos problemas, que vão desde a rede que não pode suportar a carga de energia até a falta de manutenção da mesma, prejudicando a interação com o processo energético [4].

O sistema de geração e armazenamento off-grid é estudado neste trabalho como uma ferramenta possível para auxiliar o processo energético dos meios rurais e remotos. É uma tecnologia que consiste em um sistema de geração fotovoltaica isolada ou parcialmente isolada da rede de distribuição da concessionária, dependendo de acumuladores de cargas (baterias) e inversores para seu funcionamento correto. O sistema garante a independência e estabilidade no fornecimento de energia elétrica e é uma das opções mais limpas e seguras de se gerar energia elétrica [5].

1.1. Justificativa

O Brasil é dotado de uma matriz energética constituída em grande parte de fontes renováveis, o que eleva o país como um dos mais ricos em recursos renováveis e extremamente apto ao desenvolvimento de geração e utilização de energia elétrica a partir desses recursos [6]. De acordo com dados da Agência Nacional de Engenharia Elétrica (ANEEL) 83,44% da geração de energia do país é considerada renovável [7].

Dito isso, a produção de energia elétrica por meio da geração fotovoltaica torna-se propensa ao cenário brasileiro, por apresentar diversos benefícios como a interação sustentável com o meio ambiente, o baixo custo de manutenção em relação aos outros tipos de geração e o fato de ser uma fonte renovável [8].

A geração distribuída fotovoltaica se apresenta como uma possibilidade interessante ao brasileiro, apresentando a capacidade ao consumidor de produzir e gerar sua própria energia, reduzindo a sobrecarga das regiões conectadas ao Sistema Interligado Nacional e possibilitando o acesso à energia elétrica em regiões carentes de estrutura que não possuem acesso ao sistema ou a outras fontes de geração de energia. A ANEEL afirma também que no ano de 2022 o Brasil ultrapassou a marca de 10 GW de potência instalada em micro e minigeração distribuída de energia elétrica, o que significa um quantitativo para abastecer aproximadamente 5 milhões de unidades residenciais brasileiras [7].

Os sistemas fotovoltaicos off-grid são sistemas que contribuem para a independência energética do consumidor do sistema de rede elétrica, tanto em ocasiões que os custos são muito elevados para a distribuidora, quanto para o consumidor que deseja se manter independente [5].

Em decorrência desse cenário, a tecnologia fotovoltaica de sistemas off-grid se faz presente como uma importante alternativa que permite ao consumidor gerar determinada independência na produção e consumo de energia elétrica, sendo uma tecnologia de fácil acesso e implementação simples quando comparado com outras formas de geração [5].

1.2. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste em realizar e analisar o dimensionamento de um sistema off-grid de uma propriedade rural, que consiste no processo de cálculo e especificação técnica dos componentes necessários para atender a demanda energética do local de instalação.

Os objetivos específicos consistem em:

- Estudo do comportamento do sistema, que poderá ser aplicado em outros parâmetros de situações similares;
- Modelagem completa do sistema, com os parâmetros de maior importância para o funcionamento.

1.3 Estrutura do trabalho

A estrutura deste trabalho está elaborada da seguinte forma: no capítulo 2 está disposto todo o referencial teórico necessário para a compreensão do trabalho, de forma que são apresentadas as definições e especificações de um sistema fotovoltaico off-grid e seus componentes, juntamente com as definições da modelagem de carga. No capítulo 3 está disposta a metodologia utilizada, a introdução do método de otimização linear simplex, elaboração da curva de carga do consumidor e elaboração do código que realiza o dimensionamento. No capítulo 4, os resultados, a partir de 3 cenários de diferentes voltagens de operação, e as discussões possíveis a partir do obtido. Por fim, no capítulo 5 estão as considerações finais do estudo, concluindo as discussões de cada tópico do trabalho.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentadas todas as fundamentações teóricas necessárias para o entendimento e compreensão deste trabalho.

Um sistema fotovoltaico autônomo geralmente é composto de um conjunto de placas fotovoltaicas, uma bateria, um controlador de carga, e, de acordo com a aplicação, um inversor de tensão contínua para tensão alternada [9].

Os módulos fotovoltaicos realizam a produção de energia na forma de tensão e corrente contínua e em aplicações que tem como referência tensão alternada é necessário converter essa energia em tensão e corrente alternadas por meio do inversor [9].

Em sistemas modelados com baterias, há a necessidade de um controlador de carga, que é um carregador específico de bateria para soluções fotovoltaicas. O controlador é usado para controlar a vida útil da bateria e controlar sua carga, fornecendo proteção contra descargas excessivas ou sobrecargas. Alguns controladores possuem ainda o Maximum Power Point Tracking – rastreamento de ponto máximo de potência (MPPT), recurso utilizado para maximizar a produção de energia do painel fotovoltaico [9].

2.1. Baterias

As baterias eletroquímicas são essenciais como forma de armazenamento de energia elétrica em sistemas fotovoltaicos autônomos, devido a sua capacidade de transformar diretamente a energia elétrica em energia potencial química e posteriormente converter, também de forma direta, a energia potencial química em energia elétrica [10].

As baterias, também chamadas de acumuladores químicos, são divididas em dois grupos: o primeiro grupo denominado baterias primárias, composto por dispositivos eletroquímicos que, uma vez esgotados os reagentes que produzem a energia elétrica, são descartados, por não poderem ser recarregados; o segundo grupo denominado baterias secundárias, composto por dispositivos que podem ser recarregados e regenerados por meio da aplicação de corrente elétrica em seus terminais, que reverte às reações responsáveis pela geração de energia elétrica.

Os sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica fazem o uso de acumuladores secundários, ou seja, baterias recarregáveis. Entre os mais diversos tipos de baterias secundárias, as mais comuns são as de níquel-cádmio, chumbo-ácido e íon-lítio [10].

2.1.1 Chumbo-ácido

A bateria de chumbo-ácido, inventada por Planté em 1859, apresentava inicialmente diferenças construtivas em relação às versões contemporâneas, embora compartilhassem a mesma base eletroquímica. As primeiras células eram compostas por placas planas de chumbo sólido puro.

As baterias de chumbo-ácido são atualmente a opção de armazenamento de energia mais econômica por watt-hora (Wh) disponível no mercado para aplicações em sistemas fotovoltaicos. Hoje em dia, essas baterias são constituídas com dióxido de chumbo (PbO_2) como material ativo na placa catódica e chumbo metálico (Pb) em uma estrutura porosa altamente reativa, conhecida como chumbo esponjoso, como material ativo na placa anódica. Essas placas são imersas em uma solução diluída de ácido sulfúrico (H_2SO_4), que serve como eletrólito e geralmente consiste em uma mistura de 27-37% de ácido sulfúrico e 73-63% de água em volume [11].

A bateria de chumbo-ácido utiliza ácido sulfúrico em solução aquosa, que se dissocia em íons. Durante a descarga, as placas da bateria igualam-se quimicamente, transformando-se em sulfato de chumbo. Isso pode causar o desprendimento de material ativo e sedimentação, levando ao curto-circuito e inutilização da bateria [11].

A densidade energética teórica da bateria é cerca de 167 Wh/kg, mas na prática varia de 20 a 40 Wh/kg. Durante a carga, podem ocorrer reações secundárias que produzem gases como oxigênio e hidrogênio, o que pode levar à perda de água. Algumas baterias controlam essas reações para evitar perdas [11].

As reações de autodescarga acontecem nas placas negativas da bateria, e a taxa de autodescarga depende da idade e da temperatura da bateria. A resistência interna e a tensão em aberto da bateria variam com a temperatura e o estado de carga [11].

As baterias de chumbo-ácido têm placas positivas e negativas intercaladas com um eletrólito entre elas. A adição de elementos como antimônio e cálcio nas placas afeta as propriedades das baterias. O tipo de bateria mais adequado para sistemas fotovoltaicos isolados é o de liga de chumbo-cálcio nas placas positivas, embora outros tipos também sejam utilizados [11].

Os sistemas fotovoltaicos isolados costumam utilizar baterias de chumbo-ácido projetadas especificamente para essa finalidade, conhecidas como baterias solares ou fotovoltaicas. No contexto brasileiro, historicamente, as baterias mais comuns para essa aplicação são as baterias sem manutenção com placas positivas feitas de liga de chumbo-cálcio. Elas guardam semelhança com as baterias automotivas, embora não sejam idênticas. Além

disso, foram empregadas baterias seladas com eletrólito absorvido e baterias abertas com placas positivas contendo uma liga de baixo antimônio, embora em menor escala [11].

Mais recentemente, no mercado brasileiro, as baterias de chumbo-ácido estacionárias com placas tubulares, conhecidas como OPzS e agm, também têm ganhado espaço nesse segmento, oferecendo alternativas para sistemas fotovoltaicos isolados [11].

A Tabela 1 representa as principais características de uma bateria estacionária de chumbo-ácido.

Tabela 1 - Principais características de uma bateria estacionária chumbo ácido.

Capacidade de carga	
Tempo de carga	Capacidade em 25°C
10 horas	200Ah
20 horas	220Ah
100 horas	240Ah
Tensão de flutuação	
13,2 V a 13,8 V (em 25°C)	
Tensão de carga	
14,4 V a 15,5 V (em 25°C)	
Coeficiente de compensação de temperatura	
-0,033 V/°C	

Fonte: [9].

2.1.2 Íon-Lítio

As baterias de íon de lítio (Li-íon) são conhecidas por suas altas densidades energéticas, variando entre 80 à 150 Wh/kg, e são amplamente empregadas em dispositivos eletrônicos portáteis, como câmeras, laptops, celulares, e até mesmo em veículos elétricos. Esta tecnologia é considerada promissora e continua a ser alvo de desenvolvimentos contínuos [11].

A operação de uma célula de Li-íon pode ser descrita pela seguinte reação eletroquímica:



Nessa reação, o cátodo é composto por uma substância contendo lítio (Li), geralmente na forma LiMO_2 , onde M representa um metal de transição, frequentemente Ni, Co e Mn. O cátodo produz íons de lítio durante a descarga. O ânodo, conhecido como Cn, é normalmente feito de carbono e tem a capacidade de receber e armazenar íons de lítio. Pode até mesmo

assumir a forma de uma estrutura denominada fulereno ou C60 [11].

As baterias de Li-íon possuem diversas vantagens, incluindo uma alta tensão nominal que pode atingir 3,5V, o que geralmente leva à utilização de quatro células em série para formar um bloco de 12V. Além disso, elas possuem alta densidade energética, não sofrem do chamado “efeito memória”, suportam altas taxas de carga e descarga, têm um tempo de carga reduzido e uma baixa taxa de autodescarga [11].

Por exemplo, um modelo de bateria de LiFePO₄ (fosfato de lítio-ferro) com uma densidade energética de cerca de 84Wh/kg pode suportar taxas de carga/descarga de $\frac{1}{3}$, equivalente a 20 minutos (muito superiores às taxas típicas em sistemas fotovoltaicos) e ter uma vida cíclica de 3000 ciclos com uma profundidade de descarga de 80% [11].

Os avanços contínuos nas formulações químicas e materiais, incluindo o uso de nanotecnologias e materiais nanoestruturados, continuam a impulsionar o desenvolvimento das baterias de Li-íon [11].

No entanto, é importante mencionar que o uso de baterias de Li-íon requer um rigoroso controle e sistemas de segurança, incluindo proteção contra sobrecarga, descarga excessiva, sobrecorrente, curto-circuito, altas temperaturas e tensões elevadas. As baterias de Li-íon apresentam riscos de explosão ou incêndio, portanto, exigem controladores sofisticados chamados de Sistemas de Gerenciamento de Bateria (BMS - Battery Management System). Para aplicações em sistemas fotovoltaicos, onde as taxas de carga/descarga são mais baixas, é possível utilizar um BMS menos sofisticado [11].

Apesar das muitas vantagens, o custo inicial das baterias de Li-íon ainda representa um obstáculo para sua adoção generalizada em sistemas fotovoltaicos isolados, embora haja pesquisas e estudos em andamento no Brasil para superar esse desafio [11].

2.2. Baterias recarregáveis

Como visto anteriormente, baterias recarregáveis apresentam determinada constituição química que permite reações reversíveis. De acordo com a aplicação elas podem ser classificadas como:

- Tração - indicadas na alimentação de veículos elétricos, projetadas para operar em regimes de ciclos diários com descarga profunda e taxa de descarga moderada [11].
- Automotivas - também conhecidas como SLI (starting, lighting, ignition), projetadas fundamentalmente para descargas rápidas com altas taxas de corrente e reduzidas profundidades de descarga. São muito utilizadas na partida de motores de combustão interna, possuem placas mais finas e maior número de placas em relação aos outros

tipos, e não são muito úteis em sistemas fotovoltaicos, por possuírem baixa vida útil para operação em regime de ciclagem [11].

- Estacionárias - direcionadas tipicamente para aplicações em que as baterias permanecem em estado de flutuação e são solicitadas ocasionalmente para ciclos de carga/descarga. Condição típica de no-breaks [11].
- Fotovoltaicas - projetadas para ciclos diários de profundidade rasa a moderada com taxas de descarga reduzidas. São projetadas também para suportar descargas profundas esporádicas em razão da ausência de geração [11].

Essas mesmas baterias recarregáveis podem também se diferenciar quanto à forma de confinamento do eletrólito em:

- Baterias abertas - denominadas também de ventiladas (vented), são baterias que precisam de verificação periódica e eventual correção do nível do eletrólito. Seu eletrólito é líquido e livre (não confinado no separador) e, devido a isso, devem trabalhar verticalmente. As baterias Chumbo-ácido deste tipo de tecnologia são denominadas FLA (flooded lead acid - chumbo ácido inundado), ou de FVLA (free vented lead acid - chumbo ácido de ventilação livre), ou ainda VLA (vented lead acid - chumbo ácido ventilado) [11].
- Baterias seladas - também conhecidas como “livres de manutenção” porque não precisam de adição de água. Possuem o eletrólito confinado no separador ou sob a forma de gel. Em aplicações de telecomunicações são chamadas também de baterias “reguladas à válvula”. As baterias chumbo-ácido deste tipo de tecnologia são denominadas geralmente de VRLA (valve regulated lead acid - chumbo ácido regulado à válvula), de forma que quando o eletrólito é absorvido em manta de vidro que serve como separador, são denominadas AGM (absorbed glass matt), ao mesmo tempo que aquelas com eletrólito gel apresentam muitas vezes o tipo OPvZ do alemão (Ortsfest Panzerplatte Verschlossen) [11].

Os principais atributos para a análise de baterias recarregáveis são: eficiência, vida cíclica, capacidade, taxa de autodescarga, densidade de energia (por peso ou volumétrica), reciclabilidade e custo de materiais [11].

Existem também alguns fatores que afetam o desempenho, a vida útil e a capacidade das baterias recarregáveis, estes são: temperatura, número de ciclos, controle de carga/descarga, profundidade de descarga (por ciclo), profundidade periódica e manutenção periódica [11].

2.3. Profundidade de descarga

A profundidade de descarga (Depth of discharge - DoD) apresenta, quanto da capacidade nominal da bateria foi retirado a partir do estado de plena carga, é o valor complementar do estado de carga (state of charge - SoC) [12].

$$DoD (\%) = 100 - 100 \times \left(\frac{\text{Capacidade remanescente da bateria em Ah}}{\text{Capacidade nominal da bateria em Ah}} \right) \quad (1)$$

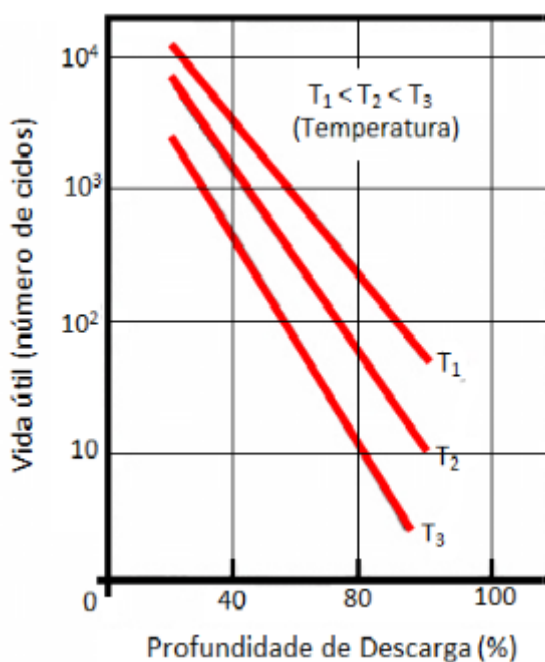
$$DoD (\%) = 100 - SoC (\%) \quad (2)$$

O valor de DoD 100% indicam uma bateria totalmente descarregada, e 0% totalmente carregada. O valor recomendado varia de acordo com a tecnologia utilizada. Baterias de chumbo-ácido, por exemplo, tem o costume de funcionar com valor de DoD inferior ao de baterias de lítio [12].

Os parâmetros da profundidade de descarga e da temperatura de operação são indispensáveis na estimativa da capacidade de vida cíclica da bateria. A Figura 1 apresenta a curva dos efeitos desses parâmetros na vida cíclica das células secundárias. Os valores que a curva aponta indicam uma noção de comportamento nas diversas baterias disponíveis. No entanto, é sempre recomendado que sejam consultados as especificações e os detalhes dos fornecedores, para obter melhor precisão na análise, visto que os parâmetros variam de acordo com a tecnologia utilizada e o modelo da bateria [11].

A vida cíclica está inversamente relacionada aos parâmetros, e a capacidade de uma bateria secundária degrada-se mais rapidamente quando a profundidade de descarga e a temperatura de operação da bateria aumentam. Um detalhe importante, como exemplo, é que as normas consideram o fim da vida útil de uma bateria chumbo-ácido como o instante em que a capacidade remanescente da bateria é de 80% de sua capacidade nominal [11].

Figura 1 - Curvas típicas de efeito da profundidade de descarga e da temperatura na vida útil da bateria.



Fonte: [11].

2.4. Eficiência

Relação entre saída e entrada úteis. A eficiência se expressa de duas formas:

- Eficiência Coulômbica ou de ampere-hora (Ah) - relação entre a quantidade de carga elétrica (Ah) retirada de uma célula durante a descarga e a quantidade necessária para restaurar o estado inicial de carga [11].
- Eficiência voltaica ou de tensão (V) - razão entre a tensão média (potencial médio) durante a descarga de uma célula e da tensão média durante a carga necessária para restaurar a capacidade inicial [11].
- Eficiência global ou de watt-hora (Wh) - conhecida também como eficiência energética, pelo fato de ser o produto entre as eficiências coulômbica e voltaica, sendo determinada pela razão entre a energia retirada da bateria durante o processo de descarga e a energia total do estado inicial de carga [11].

2.5. Capacidade

Geralmente definida como a quantidade de amperes-hora (Ah) que pode ser retirada de uma bateria quando esta apresenta carga plena ou total. Pode ser expressa também em termos de energia (watts-hora - Wh). Existem diferentes medições de capacidade, são elas:

- Capacidade nominal - estimativa do fabricante, do número total de amperes-hora

que pode ser retirado de uma célula nova, para os valores específicos de temperatura, corrente de descarga e tensão de corte (seguindo padrões, normas, ou especificações do fabricante) [11].

- Capacidade instalada - refere-se à quantidade total de amperes-hora que uma célula ou bateria recém-fabricada pode fornecer sob condições operacionais específicas. Estas condições incluem a taxa de descarga, temperatura e tensão de corte [11].
- Capacidade disponível - representa a quantidade total de amperes-hora (Ah) que pode ser retirada de uma célula ou bateria em particular, considerando um conjunto específico de condições operacionais. Essas condições englobam a taxa de descarga, temperatura, estado inicial de carga, idade e tensão de corte [11].
- Capacidade de energia - refere-se à quantidade total de watts-hora (Wh) que pode ser extraída de uma célula ou bateria quando está totalmente carregada. Geralmente, esse valor é calculado multiplicando a capacidade em Ah pela tensão nominal [11].

2.1.6. Temperatura

A temperatura de operação é um fator que influencia diretamente na capacidade da bateria. Normalmente, as características de uma bateria são especificadas pelos fabricantes para uma temperatura de 25°C (podendo também ser encontrados valores na faixa de 20 a 30°C, dependendo do tipo de bateria). Quanto mais baixa a temperatura, mais a capacidade é reduzida, e de forma análoga, temperaturas maiores apresentam capacidade ligeiramente maior, acarretando, contudo, em aumento da perda de água do eletrólito e redução do número de ciclos durante a vida útil da bateria [11].

2.7. Densidade de energia

Relação da capacidade de energia nominal pelo volume (Wh/L) ou pela massa (Wh/kg) da célula ou da bateria.

2.8. Taxa de carga (C-rate)

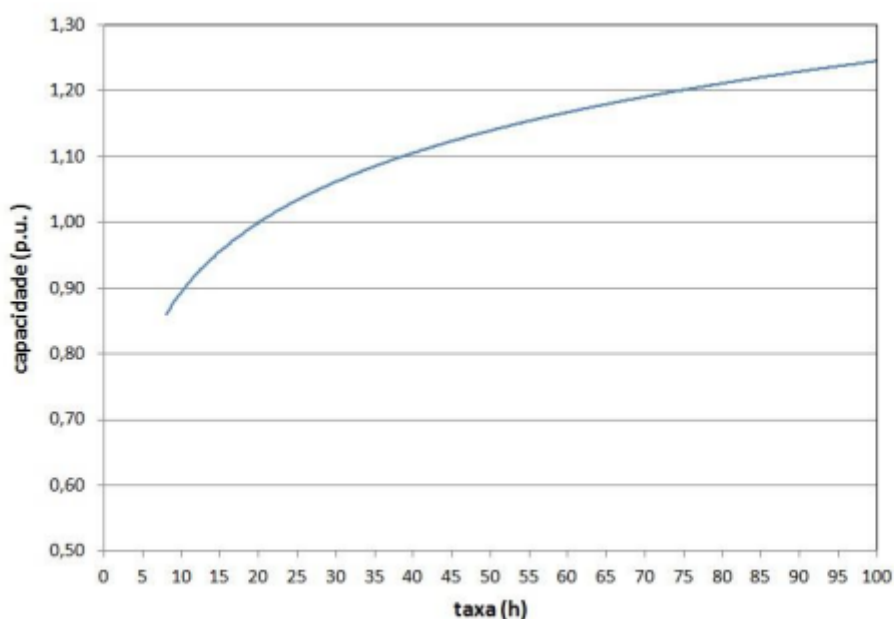
Quantidade ou valor de corrente elétrica aplicado a uma bateria durante o processo de carga. A taxa de carga é normalizada em relação à capacidade nominal do dispositivo. A título de exemplo, uma bateria de 300 Ah de capacidade nominal com um intervalo de 10 horas a corrente constante, tem sua taxa de carga expressa por:

Capacidade nominal/Intervalo de carga = $300 \text{ Ah}/10\text{h} = 30\text{A} = \text{taxa } C/10$.

Dessa forma, C/100 equivale a 100h, C/20 a 20h etc. A capacidade de uma bateria varia de acordo com a taxa de carga/descarga, como ilustrado na Figura 2. Observando a figura,

percebe-se que a capacidade de uma bateria Chumbo-ácido aumenta de forma não linear quando a taxa se reduz (e o número de horas de descarga aumenta). Na Figura 2, o referencial é a capacidade em C/20, a qual é normalmente usada em projetos de sistemas fotovoltaicos [11].

Figura 2- Capacidade de uma bateria Chumbo-ácido em função da taxa de descarga, referenciada à capacidade em C/20.



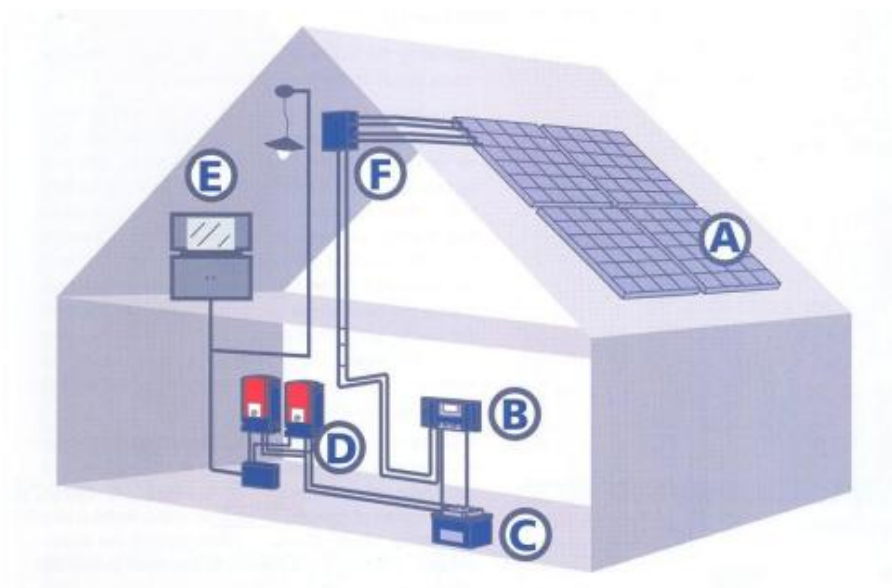
Fonte: [11].

2.3. Controlador de carga

Sistemas fotovoltaicos que incluem baterias requerem a inclusão de um controlador ou regulador de carga como parte essencial do sistema. O controlador de carga atua como um elo crucial entre os painéis fotovoltaicos e a bateria, desempenhando um papel fundamental na prevenção da sobrecarga ou da descarga excessiva da bateria [9].

Alguns controladores de carga são projetados para carregar a bateria seguindo um perfil específico de carga, o que ajuda a prolongar a vida útil da bateria e maximizar a sua eficiência. Além disso, os controladores mais avançados vão além, oferecendo a capacidade de rastrear o ponto de máxima potência dos módulos fotovoltaicos ou do conjunto de módulos. Na ausência dessa técnica, a energia do sistema pode fluir no sentido contrário durante a noite, energizando os painéis e, conseqüentemente, consumindo a energia armazenada de forma indesejada. O recurso, portanto, melhora a eficiência global do sistema fotovoltaico, garantindo que a energia gerada seja utilizada da maneira mais eficaz possível[9]. A Figura 3 apresenta um esquema fotovoltaico domiciliar e a conexão do controlador de carga ao sistema.

Figura 3- Esquema de um SFI domiciliar.



Esquema de um SFI domiciliar: A-painel fotovoltaico; B-controlador de carga; C-banco de baterias; D-inversores; E-cargas c.a. (equipamentos elétricos); F-Caixa de conexão. Fonte: Adaptado (Catálogo de Produtos do fabricante Steca).

Fonte: [11].

2.3.1 Funções de um controlador de carga

São estas as funções de um controlador de carga:

- Proteção de sobrecarga

Uma das funções vitais do controlador de carga é garantir que a bateria não seja sobrecarregada. No caso de baterias de chumbo-ácido estacionárias, a condição de carga completa é tipicamente atingida quando a tensão da bateria se encontra na faixa de 14,4 V a 15,5 V, para o caso de uma bateria de 12V, utilizada como exemplo. O controlador de carga desempenha a responsabilidade de monitorar constantemente a tensão nos terminais da bateria e interrompe o processo de carga quando a tensão de carga máxima é atingida. Isso é feito para prevenir a sobrecarga, e o controlador desconecta os painéis solares do sistema quando a bateria alcança o seu nível máximo de carga [9].

- Proteção de descarga excessiva:

A função de proteção de descarga excessiva, também conhecida como função de desconexão de baixa tensão, é um recurso fundamental dos controladores de carga. Essa função é projetada para interromper o consumo de energia do sistema fotovoltaico quando a bateria atinge um nível crítico de carga. Normalmente, esse nível é alcançado

quando a tensão da bateria se aproxima de 10,5 V no caso de baterias de chumbo-ácido estacionárias de 12V, também a título de exemplo. Continuar a descarregar a bateria abaixo desse nível crítico pode comprometer significativamente a sua vida útil. Portanto, o controlador atua como uma salvaguarda, evitando que a bateria seja descarregada excessivamente e, assim, ajudando a preservar a sua durabilidade [9].

- Gerenciamento da carga da bateria:

Alguns controladores de carga possuem a capacidade de otimizar o carregamento da bateria, respeitando o seu perfil natural de carga. Esse recurso é exclusivo de controladores mais avançados, equipados com algoritmos de carga de vários estágios [9].

No contexto das baterias de chumbo-ácido estacionárias, é benéfico seguir o perfil de carga específico dessas baterias sempre que possível. Algoritmos de múltiplos estágios são empregados para realizar o carregamento da bateria, e esses algoritmos podem variar de acordo com o tipo específico de bateria. Essa abordagem contribui para otimizar o processo de carga, promovendo a durabilidade e o desempenho eficiente da bateria [9].

O perfil de carga de uma bateria estacionária de chumbo ácido, utilizada como exemplo, pode ser observado em três estágios diferentes, que serão especificados a seguir.

- Estágio de carregamento pesado

Nesse estágio inicial a corrente é conduzida ao seu valor máximo, dentro dos limites suportados pelo controlador de carga. Inicialmente, a tensão da bateria é baixa, uma vez que ela se encontra completamente descarregada, e essa tensão aumenta gradualmente à medida que a carga é aplicada. Durante essa fase intensiva, o objetivo é carregar a bateria da forma mais rápida possível, aproveitando ao máximo a energia que o módulo ou conjunto de módulos fotovoltaicos é capaz de fornecer [9].

- Estágio de absorção:

Quando a tensão da bateria atinge aproximadamente a condição de carga completa, ela entra no estágio de absorção. Nesse momento, a bateria está praticamente carregada, mas ainda é possível realizar um carregamento lento para garantir que sua carga atinja 100% de sua capacidade. Durante este estágio, o controlador de carga mantém a tensão da bateria constante, geralmente em 15,5 V, enquanto a corrente da bateria diminui gradualmente até atingir um valor muito pequeno. Esse processo visa assegurar uma carga completa e estável da bateria, otimizando sua capacidade total [9].

- Estágio de flutuação:

Ao final do estágio de absorção, a corrente da bateria diminui para um valor muito pequeno, indicando que a bateria está completamente carregada. O controlador de carga identifica essa condição e transita automaticamente para o estágio de flutuação. Neste estágio, o controlador mantém a bateria carregada, controlando sua tensão dentro da faixa entre 13,2 V e 13,8 V. A precisão da tensão de flutuação deve ser ajustada de acordo com as especificações do fabricante da bateria e em conformidade com a temperatura. O controlador de carga é projetado para medir a temperatura ambiente e ajustar o valor da tensão de flutuação conforme o coeficiente térmico da bateria [9]. É importante observar que nem todos os controladores de carga têm a capacidade de realizar os três estágios mencionados. Na prática, a maioria dos sistemas fotovoltaicos emprega controladores simples que executam apenas a conexão ou desconexão da fonte de energia (módulo ou conjunto de módulos fotovoltaicos) e da carga consumidora, com o objetivo de evitar a sobrecarga ou o descarregamento excessivo da bateria [9].

2.3.2. Detalhamento dos parâmetros e funções de um controlador de carga

A especificação do controlador em um sistema fotovoltaico envolve considerar diversas condições e características essenciais. Algumas das condições mínimas necessárias para a especificação do controlador incluem:

- Corrente máxima do controlador: Deve ser maior que a corrente de curto-circuito produzida pelo gerador fotovoltaico multiplicada por um fator de 1,25, para fins de proteção e manutenção do funcionamento do sistema.
- Tensão de operação do sistema: Normalmente 12V, 24V ou 48V.
- Corrente das cargas: Incluindo corrente de surto, se aplicável.

Outras características e condições importantes para a especificação do controlador são:

- Estratégias de controle: Geralmente, utilizando a técnica de modulação por largura de pulso (PWM - pulse width modulation - modulação por largura de pulso).
- Desconexão da carga: Deve oferecer proteção contra descarga excessiva.
- Desvio de energia do gerador fotovoltaico: Quando a bateria estiver completamente carregada.
- Proteções diversas: Contracorrente reversa, sobretensões, inversão de polaridade, curto-circuito na saída para a carga, entre outras.
- Grau de proteção: Adequado para o ambiente de instalação (IP - Ingress Protection).
- Operação nas condições nominais: Dentro da faixa de temperatura e umidade

declaradas.

- Garantia: Mínimo de 2 anos.

Características desejáveis, mas nem sempre presentes nos modelos comuns, incluem:

- Compensação térmica: Baseada em um sensor de temperatura externo na carcaça da bateria.
- Carregamento em três estágios: Seguimento de ponto de potência máxima (SPPM), pontos de regulagem ajustáveis, controle do carregamento pelo estado de carga da bateria.

Indicações e Alarmes: Para melhor monitoramento.

- Baixo autoconsumo: Consumo eficiente de energia.
- Terminais exclusivos para monitoração: Especialmente para a monitoração de tensão das baterias.

A eficácia do controlador em um Sistema Fotovoltaico Isolado (SFI) é determinada pela combinação desses métodos de controle, compensação de temperatura e pontos de regulagem ajustáveis [11].

Vale ressaltar que alguns controladores, ao invés da prática PWM, possuem a função MPPT (Maximum Power Point Tracking – Seguimento de Ponto Máximo de Potência), que busca maximizar a eficiência do processo de carga. A partir desse método, o equipamento pode operar em tensões mais elevadas do que os controladores convencionais e o banco de baterias do sistema, por possuir um conversor cc-cc como primeiro estágio, de forma a alcançar a melhor afinidade entre a curva I-V do painel e as baterias [11].

2.2.3 Tipos de controladores de carga

Os controladores de carga podem variar significativamente em relação à variável utilizada para o controle, ao método de desconexão do painel fotovoltaico e à estratégia de controle adotada. As grandezas mais comumente empregadas para o controle são: estado de carga (com base na integração do fluxo de corrente na bateria), tensão e densidade do eletrólito da bateria [11].

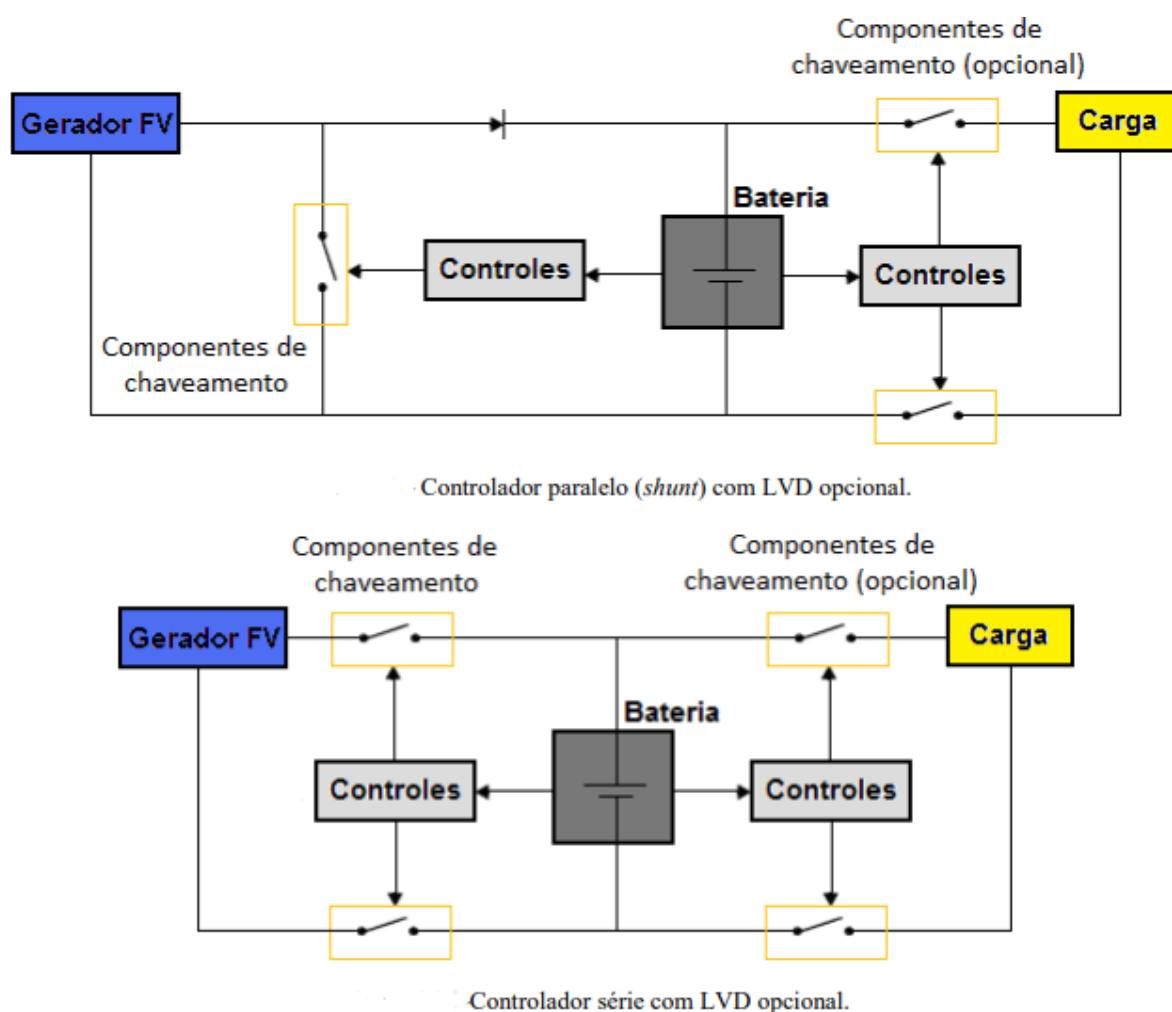
Quanto ao método de desconexão do painel fotovoltaico quando a bateria atinge a carga máxima, os controladores podem ser categorizados como paralelos (shunt) ou série. Ambos são eficazes, e cada um pode incorporar diversas variáveis que influenciam o desempenho básico e a aplicabilidade do controlador [11].

As figuras 4 e 5 ilustram os circuitos para os controladores do tipo paralelo e série,

respectivamente. Ambos incluem a opção para desconexão por baixa tensão (LVD - Low Voltage Disconnect), detalhada no próximo item. O controlador do tipo paralelo geralmente consome menos energia em comparação com o tipo série, tornando-o mais amplamente utilizado [11].

Um controlador paralelo utiliza um dispositivo de estado sólido ou um relé eletromecânico para interromper ou reduzir o fluxo de corrente para a bateria quando esta atinge a carga completa. Desse modo, parte da corrente proveniente do gerador é desviada por meio de um dispositivo em paralelo com a bateria, permitindo apenas uma pequena quantidade dessa corrente para continuar carregando a bateria [11].

Figura 4 - Esquemas de ligação e chaveamento de um controlador de carga.



Fonte: [11].

A fração da corrente a ser desviada depende do limite de tensão estabelecido para a bateria. O controlador paralelo ideal age como uma carga variável, mantendo a tensão na saída do gerador constante e igual ao valor limite. Um componente crucial no controlador paralelo é o diodo de bloqueio, que deve ser conectado em série entre o elemento de chaveamento e a bateria para protegê-la contra curtos-circuitos quando a corrente do gerador é desviada [11].

Um controlador em série pode utilizar um relé eletromecânico ou um dispositivo semicondutor de chaveamento para desconectar o gerador fotovoltaico quando a bateria está completamente carregada. Os controladores modernos empregam IGBTs ou MOSFETs de potência [11].

Não é necessariamente obrigatório o uso de um diodo de bloqueio em um controlador série. Na maioria dos sistemas de baixa tensão, as perdas devido às correntes reversas durante

a noite não são significativas. As perdas causadas pelo uso de um diodo de bloqueio podem superar as perdas causadas por correntes reversas. No entanto, em sistemas de tensões mais altas (acima de 24 V), diodos de bloqueio são necessários, a menos que a chave impeça o fluxo de corrente para o gerador fotovoltaico [11].

Os controladores de carga mais simples comercialmente disponíveis são do tipo liga-desliga (on-off). Esses controladores aplicam diretamente a tensão e a corrente do painel sobre a bateria sem regulação. A estratégia de controle baseia-se na tensão instantânea nos terminais da bateria, comparada a dois limites. Para baterias de chumbo-ácido a 25°C, no limite superior (2,3 a 2,5 V por célula), a bateria é desconectada do arranjo quando considerada completamente carregada (HVD). No limite inferior (1,9 a 2,1 V por célula), a carga é desconectada da bateria, pois neste ponto a bateria é considerada descarregada na máxima profundidade (LVD) [11].

Os parâmetros para especificação dos controladores de carga são derivados das características elétricas do painel fotovoltaico e das cargas, bem como das curvas características das baterias, incluindo as de carga e descarga, além da vida útil desejada (em ciclos), especialmente para baterias de chumbo-ácido. No Brasil, é comum encontrar controladores de carga com correntes de até 60A para operação em bancos de baterias nas tensões de 12V, 24V e 48V, projetados para operar, respectivamente, com painéis fotovoltaicos contendo 1, 2 ou 4 módulos convencionais de c-Si (36 células) em série [11].

2.3 Painel fotovoltaico

É responsável pela transformação da energia solar em energia elétrica. Quando expostas à luz solar, as células fotovoltaicas, componentes dos módulos, interligadas eletricamente e mecanicamente dentro dos mesmos, convertem a energia proveniente dos fótons solares em corrente elétrica utilizável [12].

Para a instalação de um módulo específico, é crucial avaliar suas características elétricas, geralmente fornecidas pelos fabricantes por meio de curvas que relacionam corrente e tensão. No datasheet do módulo, quatro informações importantes podem ser encontradas:

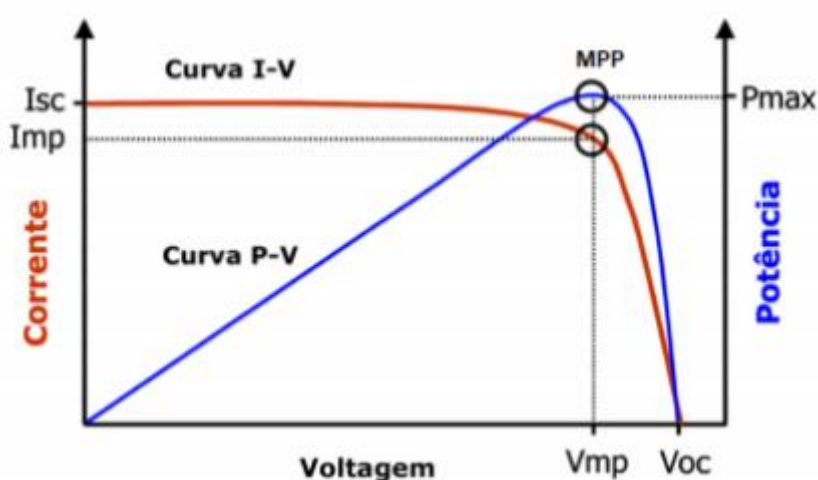
- Corrente de curto-circuito (I_{sc}): A corrente que flui nos condutores quando a tensão nos terminais do módulo é nula (o ponto onde a curva I-V intercepta o eixo Y).
- Tensão de circuito aberto (V_{oc}): A tensão nos terminais do módulo quando a corrente que flui é nula (o ponto onde a curva I-V intercepta o eixo X).
- Corrente máxima de potência (I_{mpp}): A corrente que flui quando a maior potência elétrica possível está sendo produzida.
- Tensão máxima de potência (V_{mpp}): A tensão nos terminais do módulo quando a maior

potência elétrica possível está sendo produzida.

- Potência de pico (P_{mpp}): O valor máximo de potência, correspondente à área máxima da curva I-V ou ao ponto da curva potência x tensão que possui o valor máximo, ou seja, a máxima potência e eficiência do módulo.

Uma curva importante para análise é a curva PxV, que relaciona a Potência (W) e Tensão (V) dos módulos fotovoltaicos:

Figura 5 - Curva P x V.



Fonte: [12].

O ponto MPP, que representa a máxima potência do módulo, destaca-se como crucial na curva IxV. É imperativo compreender que é fundamental manter o ponto de funcionamento dos painéis o mais próximo possível do ponto MPP para garantir uma geração otimizada pelo módulo. Essa função é atribuída ao MPPT (Maximum Power Point Tracking ou rastreamento do ponto de máxima potência da curva I-V dos módulos), presente em inversores e controladores de carga equipados com essa tecnologia, os quais serão abordados mais adiante [12].

A seguir, a título de exemplo, a Tabela 2 traz algumas especificações do módulo de um fabricante do mercado.

Tabela 2 - Especificações do módulo Tiger Neo N-Type 72HL4-BDV 550-580 Watt retiradas do datasheet.

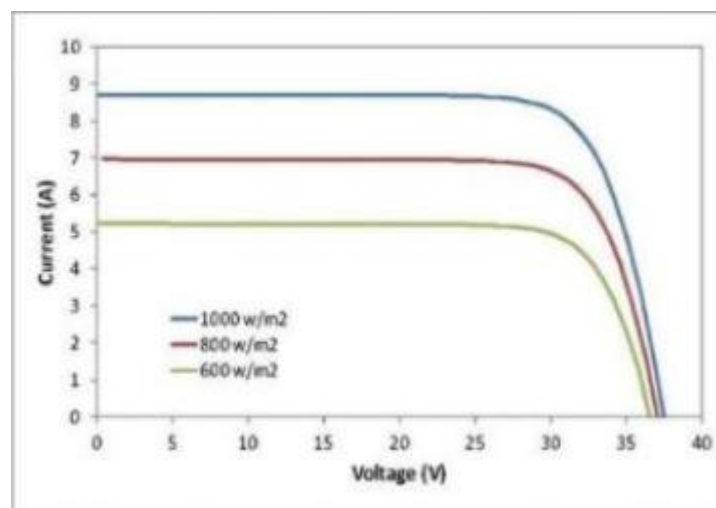
SPECIFICATIONS										
Module Type	JKM550N-72HL4-BDV		JKM555N-72HL4-BDV		JKM560N-72HL4-BDV		JKM565N-72HL4-BDV		JKM570N-72HL4-BDV	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	550Wp	414Wp	555Wp	417Wp	560Wp	421Wp	565Wp	425Wp	570Wp	429Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	41.58V	39.13V	41.77V	39.26V	41.95V	39.39V	42.14V	39.52V	42.29V	39.65V
Maximum Power Current (Imp)	13.23A	10.57A	13.29A	10.63A	13.35A	10.69A	13.41A	10.75A	13.48A	10.81A
Open-circuit Voltage (Voc)	50.27V	47.75V	50.47V	47.94V	50.67V	48.13V	50.87V	48.32V	51.07V	48.51V
Short-circuit Current (Isc)	14.01A	11.31A	14.07A	11.36A	14.13A	11.41A	14.19A	11.46A	14.25A	11.50A
Module Efficiency STC (%)	21.29%		21.48%		21.68%		21.87%		22.07%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	30A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.30%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.25%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.046%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									
Refer. Bifacial Factor	80±5%									

Fonte: [13].

É importante observar que os parâmetros elétricos de um módulo são apresentados sob condições padronizadas de teste (STC - Standard Test Conditions). Essa condição envolve a submissão do painel a uma temperatura de 25°C, juntamente com uma irradiância de 1000W/m² e um espectro de massa de 1,5. A curva em azul na figura 6 ilustra o comportamento de um módulo nessas condições [12].

A seguir, são apresentadas na Figura 6 duas curvas I-V sob diferentes influências. A imagem ilustra o comportamento do módulo em uma temperatura fixa de 25°C, variando as intensidades de irradiância [12].

Figura 6 - Curva IxV em temperatura fixa de 25°C.

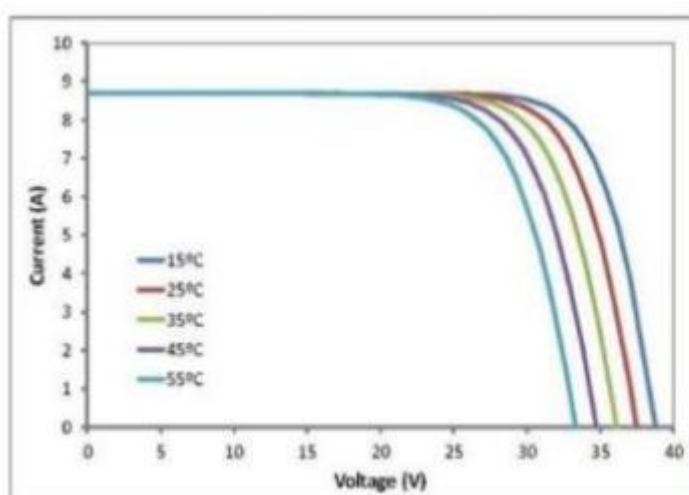


Fonte: [12].

Ao observar a representação gráfica apresentada, pode-se inferir que a intensidade luminosa está diretamente relacionada à corrente gerada pelos módulos fotovoltaicos. Isso significa que, quanto maior a incidência solar, maior será a corrente gerada, pois a geração de corrente está diretamente vinculada à quantidade de fótons incidentes nos módulos. Por outro lado, para a tensão, a radiação solar não exerce uma influência tão significativa. Isso destaca a importância da incidência solar na produção de corrente elétrica pelos módulos fotovoltaicos, enquanto a tensão é menos sensível às variações na radiação [12].

A Figura 7 apresenta a curva IxV com o comportamento dos módulos fotovoltaicos sob uma radiação de 1000W/m² para diferentes temperaturas.

Figura 7 - Curva IxV para temperaturas diferentes.



Fonte: [12].

Nesse contexto, é possível observar que a temperatura exerce uma influência mais significativa na tensão do que na corrente gerada pelos módulos. Além disso, há uma relação inversamente proporcional entre temperatura e tensão, indicando que, à medida que a temperatura aumenta, a tensão nos terminais dos módulos tende a diminuir. Esse fenômeno destaca a sensibilidade da tensão à variação da temperatura, enquanto a corrente é menos afetada por essa variável [12].

2.3.3. Identificação das características elétricas dos módulos

Algumas informações essenciais normalmente constam da etiqueta afixada em cada

módulo, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados técnicos que constam na etiqueta do módulo.

Dados técnicos que constam na etiqueta do módulo.

Informação	Significado ou importância da informação
Nome do fabricante	Identificação do responsável pela qualidade do módulo
Identificação do modelo	Pelo modelo pode-se identificar a folha de dados técnicos com informações sobre tecnologia, potência e tolerância
Número de série	O número de série é obrigatório para registro, qualificação, rastreabilidade e garantia do produto
Tensão máxima do sistema	Indica o maior valor de tensão de circuito aberto de um arranjo onde o módulo pode ser instalado
Tensão de circuito aberto (V_{OC})	Multiplicando-se V_{OC} de cada módulo pelo número de módulos em série em um arranjo, obtém-se V_{OC} do arranjo (ver item 4.1.2)
Corrente de curto-circuito (I_{SC})	Multiplicando-se I_{SC} de cada módulo pelo número de módulos em paralelo em um arranjo, obtém-se I_{SC} do arranjo (ver item 4.1.2)
Tensão de máxima potência (V_{MP})	Multiplicando-se V_{MP} de cada módulo pelo número de módulos em série em um arranjo, obtém-se V_{MP} nominal do arranjo (ver item 4.1.2)
Corrente de máxima potência (I_{MP})	Multiplicando-se I_{MP} de cada módulo pelo número de módulos em paralelo em um arranjo, obtém-se I_{MP} nominal do arranjo (ver item 4.1.2)
Potência nas condições-padrão de ensaio (STC)	Potência máxima nominal do módulo nas condições de irradiância de 1.000 W/m^2 , espectro AM 1,5 e temperatura de célula de 25°C
Temperatura nominal da célula nas condições de operação (NOCT)	Temperatura das células do módulo nas condições de irradiância de 800 W/m^2 , temperatura ambiente de 20°C e velocidade de vento de 1 m/s

Fonte: [11].

Tabela 4 - Dados técnicos adicionais que podem constar na folha de dados do módulo.

Dados técnicos adicionais que podem constar na folha de dados do módulo.

Informação	Significado ou importância da informação
Potência nas condições de operação (P_{MP})	Potência máxima do módulo nas condições de irradiância de 800 W/m ² , e temperatura de célula NOCT
Tensão de máxima potência nas condições de operação (V_{MP})	Tensão do ponto de máxima potência do módulo, medida com o módulo sob irradiância de 800 W/m ² e temperatura NOCT
Corrente de máxima potência nas condições de operação (I_{MP})	Corrente no ponto de máxima potência do módulo, medida com o módulo sob irradiância de 800 W/m ² e temperatura NOCT
Coeficiente de temperatura para tensão	Coeficiente de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura (β), em volts por grau Celsius
Coeficiente de temperatura para corrente	Coeficiente de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura (α), em amperes por grau Celsius
Coeficiente de temperatura para potência	Coeficiente de variação da potência máxima do módulo com a temperatura (γ), em watts por grau Celsius
Dimensões externas	Dimensões de largura, comprimento e espessura do módulo, incluindo a moldura
Número de células	Número de células associadas no módulo
Tecnologia das células	Tipo de célula fotovoltaica e materiais envolvidos
Desenho indicando furações	Desenho com localização das perfurações da moldura, para instalação dos módulos em painéis

Fonte: [11].

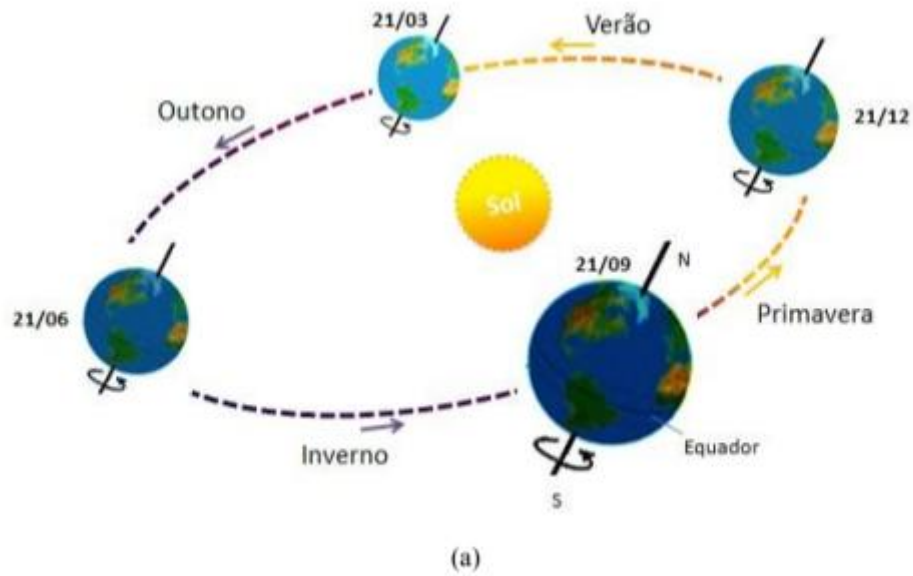
2.3.4. Geometria Sol Terra

A Terra realiza um movimento anual ao redor do Sol, descrevendo uma trajetória elíptica com uma pequena excentricidade ($\epsilon \approx 0,017$). O eixo da Terra, em relação ao plano normal à elipse, apresenta uma inclinação de aproximadamente 23,45 graus. Essa inclinação, combinada com o movimento de translação, é responsável pela ocorrência das estações do ano.

Ao observar o movimento aparente do Sol ao meio-dia solar ao longo do ano, nota-se que o ângulo entre os raios solares e o plano do Equador varia entre +23,45 graus em torno do dia 21 de junho (solstício de inverno no hemisfério Sul) e -23,45 graus em 21 de dezembro (solstício de verão no hemisfério Sul). Este ângulo é conhecido como Declinação Solar (δ), sendo positivo ao Norte e negativo ao Sul do Equador. Nos dias 21 de setembro (equinócio de primavera) e 21 de março (equinócio de outono), os raios solares se alinham com o plano do Equador ($\delta = 0$).

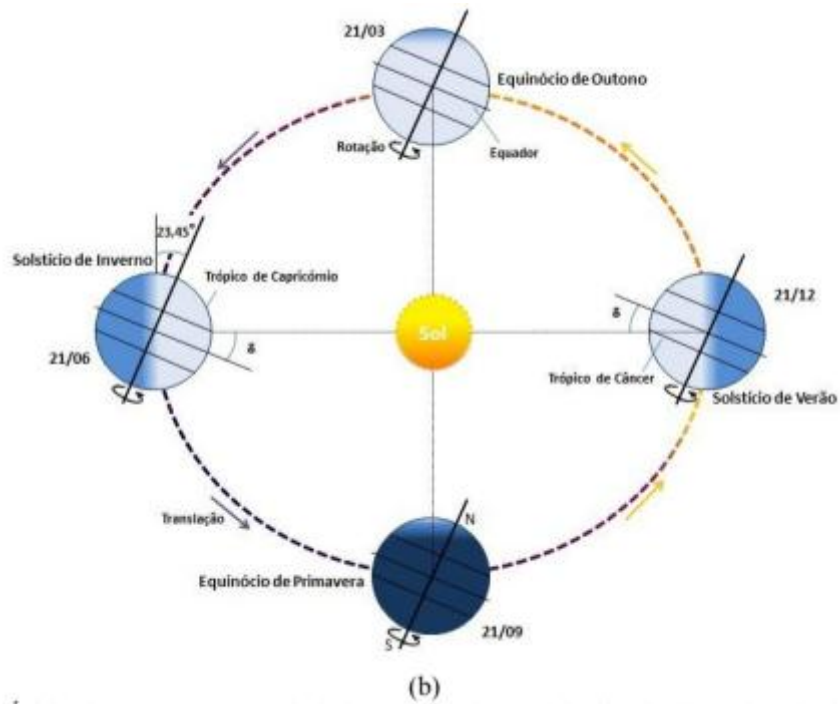
A Figura 8 ilustra o movimento da Terra ao redor do Sol e as estações do ano para o hemisfério Sul, enquanto a Figura 9 mostra a Declinação Solar (δ) em quatro posições da Terra ao longo do ano [11].

Figura 8 - Movimento de Terra ao redor do Sol.



Fonte: [11].

Figura 9 - Declinação Solar.



Fonte: [11].

Na Figura 9, é possível observar a variação da duração dos dias ao longo do ano para uma determinada localidade, resultante da inclinação do eixo da Terra. Verificam-se dias mais longos em localidades no hemisfério Sul, por exemplo, no solstício de verão, e dias mais curtos no solstício de inverno. No Equador, a duração dos dias é sempre igual, e nas proximidades do Equador, as variações são pequenas ao longo do ano. Nos equinócios, a duração dos dias é a mesma para qualquer localidade.

Considerando as convenções para a declinação solar e a latitude, positivas ao Norte e negativas ao Sul do Equador, a diferença entre a declinação e a latitude determina a trajetória do movimento aparente do Sol para um determinado dia em uma dada localidade na Terra. A declinação solar pode ser calculada utilizando a equação:

$$\text{sen}(\delta) = -\text{sen}(23,45) \times \cos[(360 \div 365,25) \times (n + 10)] \quad (3)$$

onde n representa o dia juliano, contado do dia 1 a 365 a partir de 1 de janeiro.

O conceito de "radiação solar" abrange diversas expressões, podendo ser descrito como fluxo de potência quando referido como "irradiância solar", ou como energia por unidade de área, sendo denominado "irradiação solar". Existem várias unidades para quantificar os valores dessa radiação solar. A Tabela 5 mostra algumas dessas unidades e fatores de conversão.

Tabela 5 - Unidades para a radiação solar e fatores de conversão.

Para converter de:	Para:	Multiplique por:
cal/cm ² .min	W/m ²	697,8
W/m ²	cal/cm ² .min	0,0014331
W/m ²	mcal/cm ² .s	0,023885
MJ/m ² .dia	kWh/m ² .dia	0,27778
Langley/dia	kWh/m ² .dia	0,01163
cal/cm ²	J/cm ²	4,1868
cal/cm ²	kWh/m ²	0,01163
J/cm ²	cal/cm ²	0,23885
J/cm ²	kWh/m ²	0,0027778
kWh/m ²	cal/cm ²	85,985
kWh/m ²	J/cm ²	360
Langley	cal/cm ²	1

Fonte: [11].

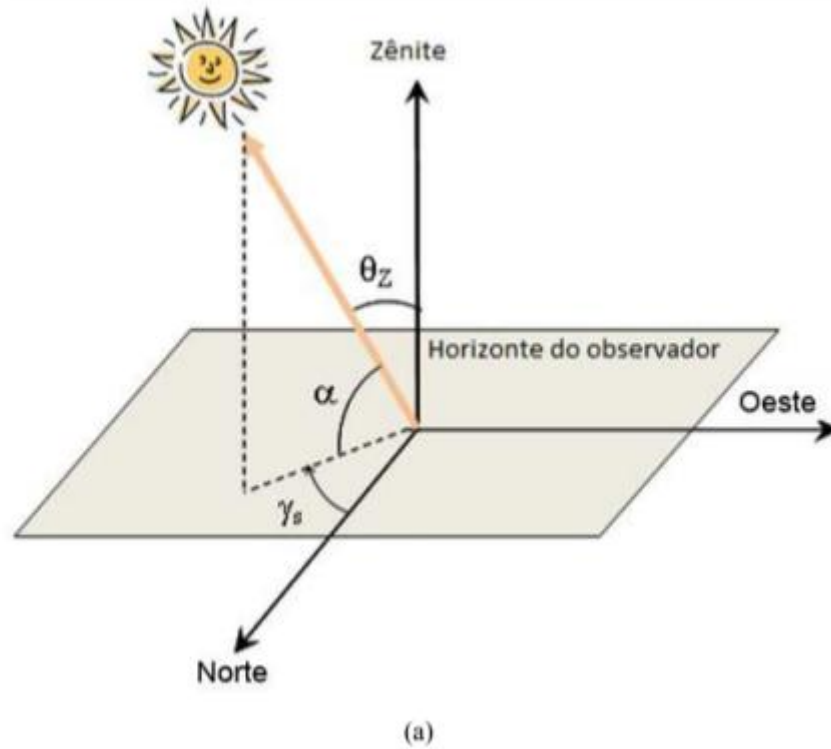
As relações geométricas entre os raios solares e a superfície terrestre são descritas por meio de diversos ângulos, apresentados na Figura 10, e definidos como segue:

- Ângulo Zenital (θ_z): ângulo entre os raios solares e a vertical local (Zênite).
- Altura ou Elevação Solar (α): ângulo entre os raios solares e a projeção destes sobre o plano horizontal (horizonte do observador). Esses ângulos são complementares, ou seja, ($\theta_z + \alpha = 90^\circ$).

Na Figura 11, pode-se observar a complementaridade desses ângulos.

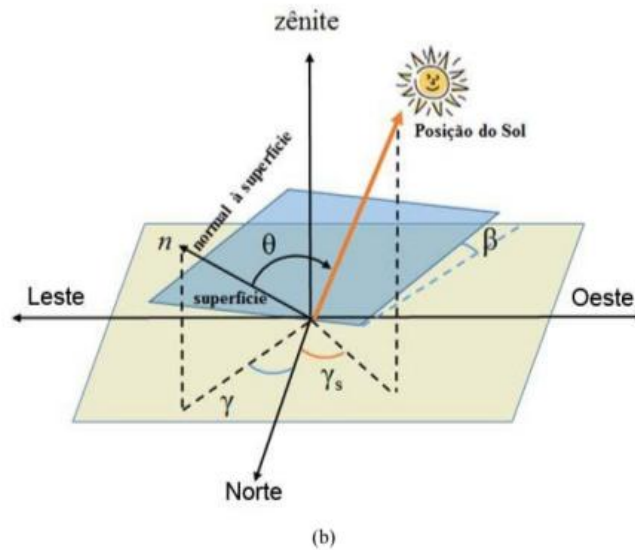
- Ângulo Azimutal do Sol (γ_s): também conhecido como azimuth solar, é o ângulo entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção Norte-Sul. O azimuth solar é tomado a partir do Norte (0°) geográfico, sendo positivo quando a projeção está à direita do Sul (a Leste) e negativo quando está à esquerda (a Oeste), obedecendo a $-180^\circ \leq \gamma_s \leq 180^\circ$.
- Ângulo Azimutal da Superfície (γ): ângulo entre a projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção Norte-Sul, seguindo as mesmas convenções do azimuth solar.
- Inclinação da Superfície de Captação (β): ângulo entre o plano da superfície em questão e o plano horizontal, variando de $[0^\circ \ 90^\circ]$.
- Ângulo de Incidência (θ): ângulo formado entre os raios solares e a normal à superfície de captação.

Figura 10 - Ilustração dos ângulos da posição do Sol em relação ao plano horizontal.



Fonte: [11].

Figura 11 – Orientação de uma superfície inclinada em relação ao mesmo plano.



(a) Ilustração dos ângulos θ_Z , α e γ_s , representando a posição do Sol em relação ao plano horizontal; (b) Ilustração da orientação de uma superfície inclinada em relação ao mesmo plano: ângulos β , γ , γ_s e θ .

Fonte: [11].

2.3.6 Horas de Sol Pleno (Recurso solar)

Na análise da produção de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos, é comum simplificar os cálculos ignorando as variações instantâneas de irradiância e concentrar-se na energia total convertida em intervalos horários. Dada a forte relação linear entre a energia gerada e a irradiância média horária, surge uma forma prática de expressar a energia solar acumulada ao longo do dia: o conceito de Horas de Sol Pleno (HSP) [11].

As HSP representam a quantidade de horas em que a irradiância solar seria constante e igual a 1kW/m^2 (1000W/m^2), resultando em uma geração de energia total equivalente àquela acumulada ao longo do dia em condições reais. Esse parâmetro é especialmente útil para estimar o desempenho de sistemas fotovoltaicos e avaliar o potencial solar de um local de forma prática e intuitiva [11].

2.3.5. Tipos de painéis fotovoltaicos

Alguns dos principais tipos de módulos fotovoltaicos são:

- Módulo cristalino

Os painéis solares monocristalinos são fabricados a partir de um único cristal de silício puro, destacando-se como a tecnologia mais antiga e considerada mais eficiente. Sua identificação é facilitada pela cor uniforme, que serve como indicador da pureza do silício [12].

Como mencionado anteriormente, estes painéis apresentam a mais alta eficiência em comparação com outras tecnologias, situando-se entre 15% e 22% atualmente. Essa maior eficiência resulta em uma necessidade reduzida de espaço físico para a geração de energia elétrica. Essa característica pode ser particularmente vantajosa em locais com restrições de espaço, proporcionando uma boa geração de energia [12].

Além disso, os painéis solares monocristalinos têm uma vida útil superior a 30 anos, respaldada por uma garantia de 25 anos. No entanto, é importante observar que esses painéis têm um custo de aquisição mais elevado e podem perder parte de sua capacidade de geração em temperaturas mais altas. Portanto, sua utilização é mais vantajosa em regiões com climas mais amenos. Recomenda-se avaliar cuidadosamente as características climáticas locais antes de decidir sobre a tecnologia a ser adotada, visando obter a melhor relação custo-benefício [12].

- Módulo policristalino

Assim como visto anteriormente, os painéis solares desta categoria são fabricados a partir de silício, com a diferença relacionada à tecnologia de desenvolvimento. Nesse caso, os cristais de silício são fundidos em um bloco, preservando a formação de múltiplos cristais [12]. A eficiência desses painéis varia entre 14% e 20%, sendo, portanto, menos eficiente que os monocristalinos. Essa menor eficiência está associada ao processo de fabricação, que pode resultar em degradação, além de uma menor pureza do silício. Como resultado, pode ser necessário mais espaço físico para alcançar a mesma eficiência de um módulo monocristalino. A vida útil desses painéis é semelhante à dos monocristalinos, ultrapassando os 30 anos, com uma garantia de funcionamento de 25 anos [12].

- Módulo de filme fino

Os painéis de filme fino são produzidos depositando uma ou várias camadas finas de material fotovoltaico sobre um substrato. Existem diferentes tipos de painéis de filme fino, e as variações ocorrem devido aos diferentes materiais depositados no substrato, como Silício amorfo (a-Si), Telureto de cádmio (CdTe), Cobre, Índio e Gálio Seleneto (CIS/CIGS), e Células Solares Fotovoltaicas Orgânicas (OPV).

Comparado aos processos de produção dos módulos cristalinos, o método de filme fino é consideravelmente mais simples, resultando em uma fabricação em massa mais econômica. Uma vantagem adicional é a flexibilidade desses painéis, possibilitando diversas aplicações, como em fachadas de prédios. Vale ressaltar que o desempenho de geração desses painéis é menos afetado pela temperatura em comparação com módulos monocristalinos e policristalinos.

Apesar da fabricação mais econômica, os painéis de filme fino apresentam eficiência consideravelmente menor, variando entre 7% e 13%. Naturalmente, exigem uma área maior para gerar a mesma quantidade de energia. Por esse motivo, geralmente não são utilizados em sistemas residenciais e projetos específicos. Além disso, esses módulos tendem a degradar mais rapidamente do que os módulos cristalinos, resultando em períodos de garantia geralmente mais curtos.

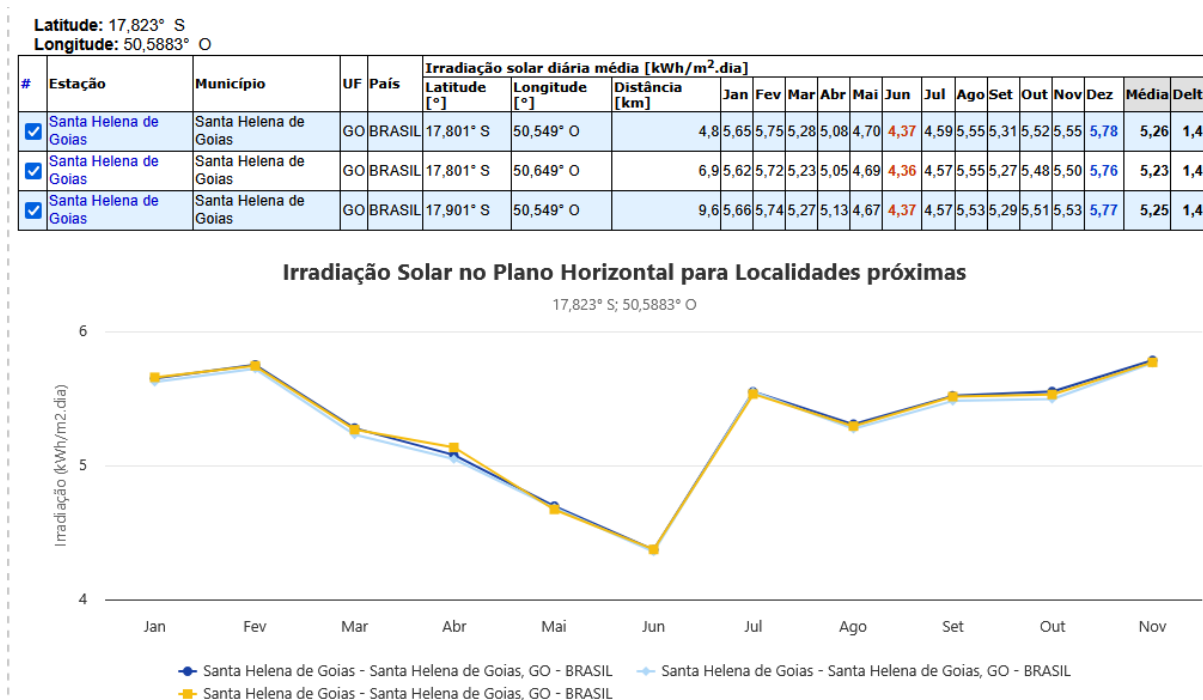
2.5. Obtenção de dados de irradiação solar

Existem programas computacionais disponíveis para auxiliar na consulta aos dados de radiação solar incidente em uma determinada localidade. As bases de dados geralmente contêm informações sobre a radiação solar em uma superfície horizontal, mas os painéis dos Sistemas Fotovoltaicos (SFV) são comumente instalados em planos inclinados com diversas orientações.

Além disso, existem programas que utilizam algoritmos apropriados para sintetizar computacionalmente sequências de dados meteorológicos. Essas sequências, mesmo na ausência de dados medidos sequenciais, podem ser utilizadas para alimentar programas de simulação computacional de sistemas fotovoltaicos em operação [11].

O programa SunData destina-se ao cálculo da irradiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território nacional e constitui-se em uma tentativa do CRESESB de oferecer um recurso de apoio ao dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. Neste trabalho, metodologia utilizada envolve a curva diária de geração, pois os métodos matemáticos de modelagem também contemplam o período de um dia inteiro. Segue abaixo um exemplo de cálculo na localidade utilizada para o dimensionamento deste trabalho [11].

Figura 12 - Dados e gráfico de irradiação solar na localidade escolhida.



Fonte: [14].

2.5. Inversor

Um inversor é um dispositivo eletrônico que converte energia elétrica em corrente contínua (c.c.) para energia elétrica em corrente alternada (c.a.). Esse processo permite a utilização de fontes de energia como baterias, células a combustível ou módulos fotovoltaicos para alimentar cargas que requerem corrente alternada. A saída do inversor deve fornecer uma tensão c.a. com amplitude, frequência e conteúdo harmônico apropriados para as cargas a serem alimentadas. Em sistemas conectados à rede elétrica, é necessário que a tensão de saída do

inversor esteja sincronizada com a tensão da rede para garantir uma operação adequada [11].

2.5.1. Classificação dos inversores

Com base no princípio de operação, os inversores podem ser categorizados em dois grupos principais: inversores comutados pela rede (comutação natural) e inversores auto comutados (comutação forçada). A Figura 13 ilustra a classificação dos inversores de acordo com o princípio de operação [11].

Figura 13 - Tipos de inversores de acordo com o tipo de funcionamento.

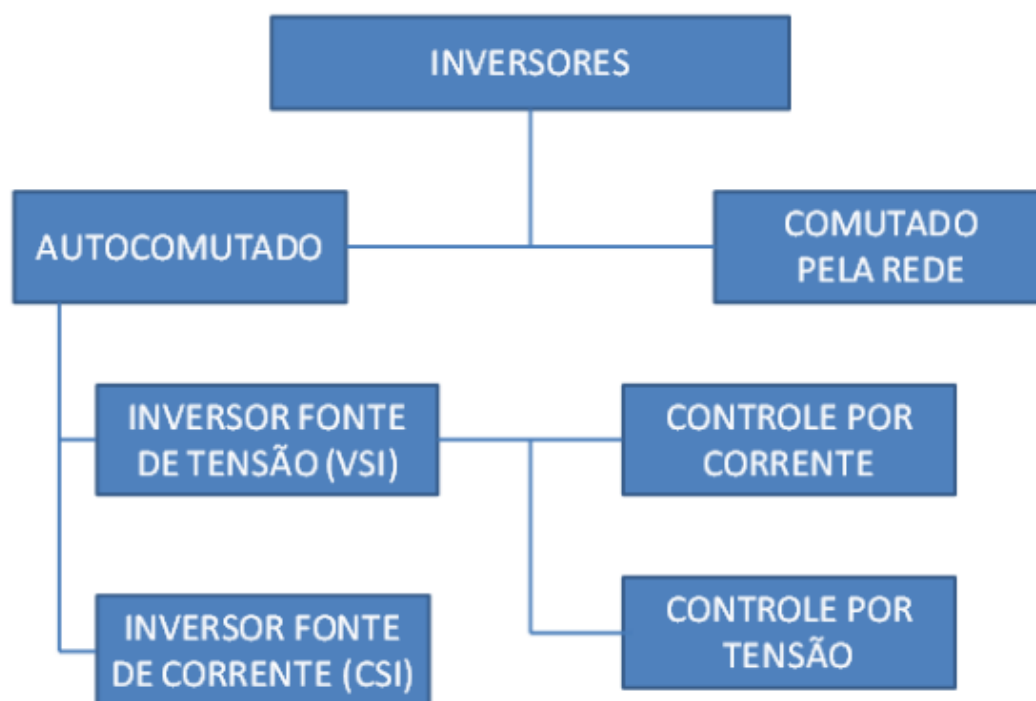


Figura 13 - Tipos de inversores classificados de acordo com o princípio de funcionamento.

Fonte: [11].

2.5.2. Inversores comutados pela rede (para SFCR)

Os primeiros inversores empregavam tiristores (SCR, TRIAC) como elementos de chaveamento, que são dispositivos semicondutores capazes de suportar altas tensões e correntes. Uma vez em condução, esses dispositivos só são levados ao corte quando a corrente que flui através deles é inferior à corrente de manutenção de condução ou quando ocorre uma inversão de polaridade entre anodo e catodo. Devido ao controle do circuito de potência sobre a transição entre os estados de condução e corte, estes inversores são chamados de inversores

de comutação natural ou inversores comutados pela rede.

Apesar de serem robustos e simples, a baixa qualidade da tensão e corrente de saída, devido à alta quantidade de harmônicos, requer o uso de redes de filtragem complexas, dispendiosas e associadas a perdas. Com o surgimento de novos dispositivos de chaveamento (MOSFET, IGBT), a utilização de inversores a tiristor foi sendo reduzida, limitando-se atualmente a unidades de alta potência (acima de 100 kW) e acionadores de motores elétricos de grande porte [11].

2.5.3 Inversores auto comutados

Os inversores auto comutados utilizam elementos de chaveamento semicondutores que podem ser colocados em estado de condução ou corte a qualquer momento do ciclo, por meio de um terminal de controle. Dependendo da velocidade de chaveamento e dos níveis de potência e tensão, são empregados IGBTs ou MOSFETs nos inversores. Esses dispositivos operam com a estratégia de controle de modulação por largura de pulso (PWM), proporcionando um bom controle sobre a forma de onda e o valor da tensão de saída. Os inversores autocomutados podem ser do tipo fonte de corrente (CSI – current source inverter) ou fonte de tensão (VSI – voltage source inverter).

Na configuração de fonte de tensão, a mais comum em sistemas de conversão fotovoltaica, o controle pode ser realizado tanto por tensão quanto por corrente, dependendo da grandeza de saída utilizada como referência. Devido à sua estabilidade diante de perturbações na rede e à facilidade no controle do fator de potência, o controle por corrente é adotado na maioria dos modelos para SFCRs (Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede), enquanto o controle por tensão é utilizado principalmente em inversores para SFIs (Sistemas Fotovoltaicos Isolados) [11].

Esses inversores podem ter um ou dois estágios. Os inversores de um estágio são caracterizados pela robustez e alta eficiência, devido ao reduzido número de componentes. Por outro lado, no caso de um inversor sem transformador, a tensão c.c. de entrada deve ter um valor mínimo relativamente elevado, equivalente ao valor de pico da tensão c.a. da rede elétrica ou o dobro desta, dependendo da configuração da ponte inversora. A inclusão opcional de um transformador de alta frequência cria um isolamento galvânico entre os lados de corrente contínua e alternada [11].

2.5.4 Características dos inversores

A forma de onda geralmente indica a qualidade e o custo do inversor, sendo influenciada

pelo método de conversão e filtragem utilizados para eliminar os harmônicos indesejáveis resultantes da conversão. A eficiência do inversor também é um aspecto crucial, sendo variável e dependente da potência demandada pela carga e do fator de potência. Os fabricantes frequentemente destacam a eficiência na carga nominal, mas nem sempre mencionam que sob cargas parciais seus dispositivos podem apresentar baixas eficiências. Para usuários de sistemas com necessidades variáveis de potência, altas eficiências em cargas parciais são essenciais [11].

Um parâmetro relevante para inversores em Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFI), especialmente para Sistemas Individuais de Geração Fotovoltaica Intermitente (SIGFI), é a potência consumida em modo de espera (standby). A economia de energia em modo de espera pode reduzir a capacidade de geração fotovoltaica necessária no dimensionamento do projeto, contribuindo para a redução do custo do sistema como um todo. No entanto, é importante observar que alguns inversores, tanto para SFI quanto para SFCR, podem ter limitações de potência em operação em temperaturas elevadas [11].

Outra característica crucial é que um inversor para SFI deve tolerar surtos de corrente, como os que ocorrem na partida de motores elétricos. Esses surtos podem exigir correntes mais de 10 vezes superiores à corrente nominal do motor em curtos períodos de tempo antes de entrar em regime normal de trabalho. Alguns modelos de inversores podem suportar altas potências de surto, como duas vezes a potência nominal em 1 minuto ou três vezes a potência nominal em 5 segundos, sendo a potência de surto suportada inversamente proporcional ao tempo de duração do surto [11].

Ao avaliar as especificações de um inversor fotovoltaico, diversas características são cruciais. Algumas delas incluem:

- **Forma de Onda e Distorção Harmônica (THD- Total harmonic distortion):** A forma de onda da tensão c.a. produzida deve ser senoidal pura, e a distorção harmônica total (THD) deve ser inferior a 5% em qualquer potência nominal de operação de acordo com a NBR 16149
- **Eficiência na Conversão de Potência:** A eficiência é a relação entre a potência de saída e a potência de entrada do inversor. Geralmente, as especificações dos fabricantes se referem à eficiência máxima. Contudo, é essencial considerar que variações na potência de entrada e saída, fator de potência da carga e outros fatores podem impactar negativamente a eficiência. Os inversores normalmente têm eficiências variando de 50% a 95%, podendo diminuir quando operam abaixo da potência nominal. Em algumas situações, como ao operar motores, a eficiência real pode ser inferior a 50%.
- **Potência Nominal de Saída:** Indica a potência que o inversor pode fornecer à carga em

regime contínuo. Para sistemas isolados, é recomendável que o inversor forneça uma potência superior às necessidades máximas das cargas conectadas, considerando aumentos momentâneos na demanda de potência.

- Potência de Surto: Indica a capacidade do inversor de exceder sua potência nominal por um certo período. Aplica-se apenas a inversores para sistemas isolados e deve ser determinada com base nas necessidades específicas de surtos para cargas particulares.
- Taxa de Utilização: Refere-se ao número de horas que o inversor pode fornecer energia operando com potência nominal.
- Tensão de Entrada: É a tensão c.c. do inversor. Os valores mais comuns no Brasil para SFI são 12V, 24V e 48V, geralmente fornecidos por baterias.
- Tensão de Saída: Geralmente regulada, a escolha depende da tensão de operação das cargas. No Brasil, os valores comuns são 127V ou 220V, na frequência de 60 Hz.
- Regulação de Tensão: Indica a variação de amplitude permitida na tensão de saída c.a. Variações devem estar de acordo com os limites estabelecidos pela Aneel-PRODIST, considerando a queda de tensão no circuito de distribuição.
- Frequência da Tensão de Saída: Indica a frequência da tensão c.a. de saída do inversor, sendo geralmente 60 Hz para equipamentos elétricos convencionais no Brasil.
- Fator de Potência: Os melhores inversores compensam cargas indutivas para manter o fator de potência próximo de 1, maximizando a transferência de potência para a carga.
- Consumo de Potência Sem Carga: É a quantidade de potência que o inversor utiliza mesmo quando nenhuma carga está sendo alimentada.
- Modularidade: Alguns inversores podem ser conectados em paralelo para operar diferentes cargas, aumentando a confiabilidade do sistema.

Essas características são fundamentais para garantir a eficiência, confiabilidade e adequação do inversor ao sistema fotovoltaico em questão [11].

2.6. Modelagem de carga

Para garantir o fornecimento correto de energia elétrica às unidades consumidoras residenciais é necessário conhecer o comportamento de funcionamento dos equipamentos elétricos pertencentes à unidade, para obter a demanda de potência elétrica que será fornecida. Essa demanda varia de acordo com diversos fatores, os principais são condições climáticas e socioeconômicas da região. O poder aquisitivo dos consumidores e a temperatura ambiente influenciam diretamente na posse de equipamentos elétricos, bem como no uso dos

equipamentos utilizados para refrigeração e climatização dos ambientes. Portanto, conclui-se que a demanda total de energia elétrica é variável e contextual [15].

A análise periódica e o planejamento do sistema elétrico tornam possível a manutenção do atendimento à demanda de potência das unidades consumidoras dentro dos parâmetros necessários e adequados. Portanto, é de suma importância prever ou conhecer a demanda de potência das unidades consumidoras, sendo a partir dela que se torna possível o planejamento da elaboração de um sistema de distribuição de energia elétrica para uma nova região, bem como realizar reparações e manutenções nas redes de distribuição existentes. Para conhecer o perfil de carga de uma região é necessária a realização de diversos estudos da curva de carga das unidades consumidoras.

As curvas de carga são gráficas da variação de demanda de potência em função do tempo. Com a elaboração dessas curvas de uma região, torna-se possível a análise do comportamento individual dos consumidores ou de uma região, possibilitando a implementação de medidas que garantem o correto funcionamento do sistema no que tange à eficiência energética [15].

Para se conhecer as curvas de carga de uma região, são necessárias estimativas de consumo energético para diferentes tipos de consumidores. Entre os principais métodos estimativos estão o top-down e o bottom-up.

O método top-down consiste em analisar parâmetros desagregados para estimar o perfil de consumo de uma região a partir de variáveis como o histórico do perfil de consumo das unidades consumidoras locais, o consumo total da região, condições climáticas e indicadores macroeconômicos. Em adição a esses fatores, não é necessário que se tenha dados detalhados relacionados aos hábitos dos consumidores e aos equipamentos das unidades. Em vista disso, como desvantagem existe a necessidade de possuir um histórico de perfil de consumo dos indivíduos [15].

O método bottom-up a curvas de carga são analisadas a partir de dados de posses, características de funcionamento dos equipamentos e hábitos de consumo das instalações. Por conta disso, nesse caso, não é necessário o conhecimento do histórico de consumo, e partindo dessa metodologia, os resultados possuem maior detalhamento.

Uma vez apresentado todo referencial teórico necessário para a compreensão deste trabalho, o capítulo 3, apresentado em sequência, demonstra e detalha a metodologia utilizada para a obtenção dos resultados esperados.

3. METODOLOGIA

3.1 Otimização linear e método simplex

O princípio da metodologia utilizada na resolução desse trabalho é baseado no método matemático de otimização linear. Consiste em um método utilizado para determinar o valor ótimo (mínimo ou máximo) de uma função linear, denominada função objetivo, sujeita a um conjunto de restrições também lineares expressas por igualdades ou desigualdades [16].

A formulação geral de um problema de otimização linear pode ser dada por:

Maximizar ou minimizar:

$$Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (4)$$

sujeito a:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1 \quad (5)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2 \quad (6)$$

$$x_i \geq 0, \text{ para } i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$$

$$x_i \geq 0, \text{ para } i = 1, 2, \dots, n$$

Em que:

z - Função objetivo a ser otimizada;

c_i - Coeficientes da função objetivo;

x_i - Variáveis de decisão;

a_{ij} - Coeficientes das restrições;

b_j - Limites das restrições.

O método simplex é um algoritmo iterativo utilizado amplamente para resolver problemas de otimização linear, e foi utilizado neste trabalho para resolver o problema. Desenvolvido por George Dantzig em 1947 e opera em conjunto de soluções viáveis de um

problema linear, movendo-se de um vértice de uma extremidade a outra ao longo da fronteira do poliedro formado pelas restrições. O objetivo é encontrar o ponto máximo ou mínimo da função objetivo [16].

Em cada iteração, o método avalia a função objetivo em um vértice extremo, determina a direção para o próximo vértice onde o valor da função objetivo melhorar, e termina quando alcança o vértice onde não é mais possível melhorar a função, correspondendo à solução ótima [16].

Como exemplo de utilização do método, apresenta-se um problema de autoria própria, em que uma fábrica produz dois produtos, P_1 e P_2 . Cada produto exige recursos limitados de matéria prima e tempo de produção. A fábrica deseja maximizar seu lucro total sujeito às restrições de disponibilidade de recursos.

- P_1 : 40R\$ por unidade
- P_2 : 30R\$ por unidade.
- Matéria prima: 100 unidades
- Tempo de produção: 180 horas
- x_1 : Quantidade de P_1 a ser produzida.
- x_2 : Quantidade de P_2 a ser produzida.

Função objetivo: $Z = 40x_1 + 30x_2$

Restrições:

- $2x_1 + x_2 \leq 100$
- $3x_1 + 2x_2 \leq 180$
- $x_1 \geq 0, x_2 \geq 0$

Uma vez definidas a função objetivo e as restrições, é necessário transferir as restrições do problema para a forma padrão, adicionando variáveis de folga (s_1 e s_2) para transformar as inequações em equações.

- $2x_1 + x_2 + s_1 = 100$
- $3x_1 + 2x_2 + s_2 = 180$

A partir dessa etapa, é formada a tabela simplex, com as variáveis básicas s_1 e s_2 para o início da resolução do problema. As Tabelas 6, 7 e 8, apresentam as etapas da resolução utilizando a tabela simplex.

Tabela 6 – Primeiro formato da tabela simplex.

Básica	x_1	x_2	s_1	s_2	RHS
s_1	2	1	1	0	100
s_2	3	2	0	1	180
Z	-40	-30	0	0	0

Fonte: Autoria própria.

Escolhe-se a coluna com o menor coeficiente negativo na linha Z: $x_1 = (-40)$. Depois, calcula-se a razão mínima para determinar a linha de saída (pivô):

$$Razão = \frac{RHS}{Coeficiente\ de\ x_1} \quad (8)$$

A linha escolhida para saída foi a linha de s_1 , pois contém a menor razão. O pivô é o elemento de interseção da variável de entrada (x_1) e saída (s_1): 2.

O próximo passo é atualizar a tabela, aplicando operações de linha para zerar os coeficientes de x_1 nas demais linhas. A tabela x mostra a atualização:

Tabela 7 – Primeira iteração da tabela simplex

Básica	x_1	x_2	s_1	s_2	RHS
x_1	1	0,5	0,5	0	50
s_2	0	0,5	-1,5	1	30
Z	0	-10	20	0	2000

Fonte: Autoria própria.

Após a atualização, repete-se o processo anterior escolhendo a linha de saída s_2 , a fim de obter uma nova atualização.

Tabela 8 – Segunda e última iteração da tabela simplex

Básica	x_1	x_2	s_1	s_2	RHS
x_1	1	0	2	-1	40
x_2	0	1	-3	2	20
Z	0	0	10	20	2200

Fonte: Autoria própria.

Após as iterações feitas, obtém-se a solução ótima, onde $x_1 = 40$, $x_2 = 20$, e $Z = 2200$.

O algoritmo simplex resolve os problemas transformando o problema na forma padrão

matricialmente, e realiza iterações como as apresentadas para encontrar a solução movendo-se entre os vértices das soluções possíveis [16]. As principais etapas incluem:

- Escolha da variável de entrada: Baseia-se na maior melhoria potencial da função objetivo.
- Escolha da variável de saída: Baseia-se na razão mínima para garantir que as restrições continuem satisfeitas.
- Atualização da tabela: Aplica operações de linha para recalcular os coeficientes e valores.

Esse método é utilizado como um exemplo de resolução para a finalidade deste trabalho.

3.2 Biblioteca PuLP Python

A partir do estabelecido anteriormente, a fim de resolver a solução ótima da função objetivo visada no trabalho e de seus coeficientes, foi utilizada a biblioteca PuLP do Python, que consiste em um framework para modelagem e resolução de problemas e programação linear e inteira.

3.3 Criação e implementação do código

Por meio da utilização da biblioteca PuLP e do Google Colab, foi gerado e implementado um script para a resolução do problema. O script é representado e explicado detalhadamente.

Primeiramente, é necessário que a prompt de comando reconheça a biblioteca utilizada, logo, são utilizados os comandos “from” e “import” para importar as bibliotecas Python e PuLP para esse reconhecimento.

```
# Dimensionamento de um sistema fotovoltaico offgrid utilizando otimização linear
```

```
from IPython import get_ipython
```

```
from IPython.display import display
```

```
!pip install pulp
```

```
from pulp import *
```

Inicia-se então a formação do problema, que consiste em minimizar o custo da aquisição de um sistema fotovoltaico offgrid no método simplex a partir do conhecimento do pico de potência de carga e da energia consumida diariamente no estabelecimento.

Na geração da variável da função objetivo, a variável “prob” é criada para dar nome a essa função, e atribui-se a essa variável o valor de função a ser otimizada pela sintaxe: `prob = LpProblem(“Problem”, LpMinimize)`. A classe `LpProblem` recebe dois parâmetros: o nome do problema, e seu tipo (minimização ou maximização).

Create the problem

prob = LpProblem("Problem", LpMinimize)

Surge então a necessidade de definição das variáveis do problema, que representam os parâmetros do sistema, explicados e detalhados após o término da definição do código. A sintaxe utilizada é: `Pfv = LpVariable(“Pfv”, 0)`. A classe `LpVariable` recebe 3 parâmetros: o nome da variável, seu respectivo intervalo de domínio e sua categoria. Visto que, no problema estabelecido, um fator de alta importância é a não negatividade das variáveis e da função objetivo, o limite inferior 0 é estabelecido, e a categoria, por padrão e por definição das variáveis, decimal.

Define the variables

Pfv = LpVariable("Pfv", 0)

Pb = LpVariable("Pb", 0)

Pcc = LpVariable("Pcc", 0)

Pi = LpVariable("Pi", 0)

Ictrl = LpVariable("Ictrl", 0)

Imáxmod = LpVariable("Imáxmod", 0)

Uma vez definidas as variáveis, tem-se a definição das constantes do problema. Essas são definidas apenas a partir dos nomes e seus respectivos valores atribuídos pelo sinal “=”. No script, todas as constantes são seguidas da definição dos parâmetros que elas representam no sistema fotovoltaico.

Constants

HSP = 5.26 # horas de sol no pico

DoD = 0.8 # depth of discharge

*Ec = 3 * 13.307 # energia consumida no dia x (dias de autonomia + 1)*

Vdc = 12 # voltagem


```

# Ictrl = Pcc/Vdc corrente máx. controlador
# Imáxmod = Pfv/Vdc corrente máxima fv
Ppc = 1.543 # potência de pico da carga
Imáxc = Ppc/Vdc # corrente máxima carga
Crate = 20 # taxa de carregamento/descarregamento da bateria

```

Em seguida, definem-se os dados da função objetivo e suas variáveis de decisão. A sintaxe segue a mesma linha de raciocínio do exemplo utilizado anteriormente na definição de otimização linear, e consiste em: `prob += cpfvPfv + cbPb + cpcc*Pcc + ci*Pi,"Objective Function"`. `Cn` representa o custo da variável `N`. Logo após, utilizando a mesma sintaxe “`prob +=`” em adição às igualdades e desigualdades, são definidas as restrições, que são as características de funcionamento do sistema, em sua forma otimizada e parametrizada.

```

# Define the objective function
prob += 720 * Pfv + 6752 * Capb + 1250 * Pcc + 1039 * Pi, "Objective Function"

# Define the constraints
prob += Pfv * HSP >= Ec, "Constraint 1"
prob += Capb * DoD * Vdc >= Ec, "Constraint 2"
prob += Ictrl * Vdc == Pcc, "Coinstrant 3a"
prob += Imáxmod * Vdc == Pfv, "Coinstrant 3b"
prob += Ictrl >= Imáxmod, "Coinstrant 3c"
prob += Ictrl >= Imáxc, "Coinstrant 4"
prob += Pi >= Ppc, "Coinstrant 5"
prob += Pi >= Pfv, "Coinstrant 6"
prob += Capb * Vdc >= Crate * Ppc, "Coinstrant 7"
prob += Capb * Vdc >= Crate * Pfv, "Coinstrant 8"

```

Após definir o problema como um todo, obtém-se a resolução. Por meio da sintaxe: `Prob.solve()`. A prompt irá rodar a solução do problema no método simplex, e trará os resultados na saída da célula de código, por meio da utilização do comando “`print`”, revelando os valores de todas as variáveis de decisão e da função objetivo otimizada.

```

# Solve the problem
prob.solve()

```

```

# Print the status of the solution
print("Status:", LpStatus[prob.status])

# Print the values of the variables
print("Pfv =", value(Pfv))
print("Pb =", value(Pb))
print("Pcc =", value(Pcc))
print("Pi =", value(Pi))
print("Ictrl =", value(Ictrl))
print("Imáxmod =", value(Imáxmod))

# Print the value of the objective function
print("Objective Function =", value(prob.objective))

```

3.4. Variáveis e constantes

Nesta seção é feito o detalhamento dos parâmetros do sistema implantados no código.

A começar pelas variáveis:

- P_{fv} : Potência fotovoltaica em kw
- Cap_b : Capacidade do banco de baterias em kah;
- P_{cc} : Potência do controlador de carga em kw
- P_i : Potência do inversor em kw

A opção de potência para a unidade do inversor, controlador de carga, módulos fotovoltaicos e de capacidade do banco de baterias foi escolhida para disponibilizar a possibilidade de qualquer arranjo de equipamentos, podendo ser de potências, marcas e ligações (como no caso das placas e baterias) diferentes. No caso da I_{ctrl} (corrente máxima do controlador) e $I_{máxmod}$ (corrente máxima dos módulos), foram definidas como variáveis apenas para fins de modelagem para um problema linear, ao dependerem da potência do controlador de carga e da potência dos módulos.

A respeito das constantes necessárias para os cálculos de dimensionamento, temos:

- HSP (Horas de sol pleno): Indicativo da irradiância solar diária média do local da instalação, a localidade definida para o cenário base foi o município de Santa Helena

(GO);

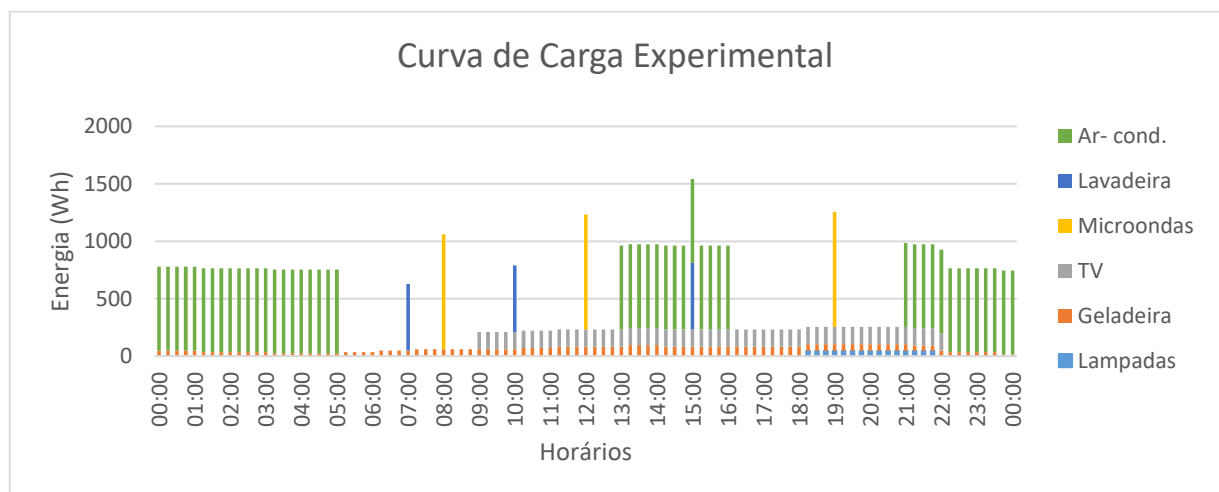
- DoD (Depth of Discharge - Profundidade de descarga): Profundidade de descarga relacionada a capacidade total da bateria;
- E_c (Energia consumida - kW): Indicativo da energia consumida em um dia multiplicado por dias de autonomia + 1;
- V_{dc} (Voltagem - V): Indicativo da tensão de operação do sistema;
- P_{pc} (Potência de pico da carga - kW): Indicativo da maior potência atingida instantaneamente pela carga na curva de carga durante o dia;
- $I_{máxc}$ (Corrente máxima da carga - kA): Indicativo de corrente máxima exigida pela carga;
- C_{rate} (Taxa de carga/descarga da bateria): Indicativo da taxa de carregamento ou descarregamento da bateria em relação a sua capacidade e ao tempo.

É importante ressaltar que, para atingir uma solução ótima e precisa, torna-se necessário o conhecimento do comportamento da curva de carga da unidade consumidora, para obter os valores exatos de E_c e P_{pc} .

3.5. Modelagem da curva de carga

A fim de modelar a curva de carga, foram utilizados valores de consumo de equipamentos do mercado, de hora em hora, para obter a curva, ilustrada pela Figura 14. Os dados de todos os equipamentos foram obtidos a partir de pesquisas no google.

Figura 14 - Curva de carga do cenário principal.



Fonte: Autoria própria.

Cada equipamento possui um perfil de consumo, e a curva foi desenvolvida

selecionando os equipamentos, que são detalhados nesta seção. Os equipamentos considerados para essa unidade consumidora foram:

- Geladeira;
- Lâmpada;
- Lavadeira (Máquina de lavar);
- Televisão;
- Ar-condicionado;
- Micro-ondas.

A iniciar pela geladeira, o modelo escolhido para o primeiro cenário foi: Refrigerador 340L 2 Portas Frost Free Classe A Evox 220 Volts, Inox da marca Consul, com um valor de consumo médio anual de 500kWh [17] Esse valor foi transformado e dividido entre as horas do dia. É de conhecimento comum que durante horários mais quentes (12h às 16h), o compressor trabalha mais devido à maior temperatura ambiente, resultando em maior consumo. Pela noite (00h às 06h), o consumo é reduzido, pois a temperatura ambiente diminui, reduzindo o tempo de funcionamento do compressor. A frequência de abertura da porta, típica dos horários de refeições, também aumenta o tempo de funcionamento.

Em relação às lâmpadas, foi considerado que permanecem ligadas apenas durante à noite, quando há menor iluminação natural. O modelo escolhido para o cenário principal foi: PHILIPS Lâmpada LED bulbo luz amarela, 9W, Bivolt (100-240V), Base E27, na quantidade de 5 lâmpadas [18].

A máquina de lavar é ligada apenas em horários definidos, 3 vezes ao dia. O modelo escolhido para o cenário principal foi: Lavadora de Roupas Brastemp 12Kg, Automática, 12 Programas de Lavagem, Branca - BWK12AB 220V, 580W de potência [19].

A televisão é ligada das 9h às 22h, considerando alto consumo. O modelo escolhido para o cenário principal foi: Smart TV LG 60UQ8050PSB 60" LED 4K UHD Inteligência Artificial, 150W de potência [20].

O microondas é ligado nos horários de refeição, como de costume, às 8h, 12h e 19h. O modelo escolhido para o cenário principal foi: Micro-ondas Electrolux Prata com Painel Integrado 31L (MI41S), 1000W de potência [21].

O ar-condicionado está ligado durante a madrugada e algumas horas do dia. O modelo escolhido para o cenário principal foi: Ar-Condicionado Hi Wall LG Dual Inverter Voice 9.000 Btus Quente e Frio 220v R-32, 730W de potência [22].

A partir desses dados de consumo, tornou-se possível a construção da curva de carga

aproximada dessa residência. Com os devidos cálculos, foram encontrados os valores da potência de pico da carga (1,543kW) e o valor de consumo total diário (13,30763kWh).

Ao observar os equipamentos selecionados para a curva, percebe-se a falta do chuveiro, que foi omitido por escolha do autor devido á alteração brusca no valor de pico da potência nos horários de funcionamento.

Ao encontrar essas constantes, obtém-se todos os valores necessários para a utilização do código e a otimização do dimensionamento do sistema.

3.6. Função Objetivo

A função objetivo em estudo representa uma solução ótima das variáveis de decisão (detalhadas na seção anterior em valores de potência) em relação aos preços de custo de mercado em R\$ (constantes), utilizando modelos de fabricantes como referência.

O valor de 720 R\$/kW foi escolhido para os módulos fotovoltaicos, obtido em pesquisas da International Renewable Energy Agency em 2023 [23].

Para as baterias, o valor escolhido foi de 6752 R\$/kA, utilizando como referência a Bateria Solar Moura 234Ah MS234Ah [24].

Para o controlador de carga foi atribuído o valor de 1250 R\$/kW, com base no Controlador De Carga 60a 12v-825/24v-1650/48v-3300 Felicity [25].

Por fim, para o inversor, foi determinado o valor de 1039 R\$/kW, com base no Inversor Off Grid Senoidal ZTROON ZT1000-11 - 1000W - 12/127V [26].

Portanto, a função objetivo visa simplificar e otimizar o dimensionamento, possibilitando a análise econômica e a comparação entre diversos cenários.

3.7. Restrições

$$P_{fv} \times HSP \geq E_c \quad (9)$$

Garante o valor de potência fotovoltaica necessário para suprir o consumo total diário multiplicado pelos dias de autonomia somado a 1. Confere o valor de produção de P_{fv} relacionado a E_c .

$$Cap_b \times DoD \times V_{dc} \geq E_c \quad (10)$$

Garante o valor de potência de armazenamento do banco de baterias (kAh x V) para

suprir o consumo total diário multiplicado pelos dias de autonomia somado a 1. Confere o valor de Cap_b relacionado a E_c . O DoD significa a porcentagem máxima de carregamento/descarregamento previsto para o banco de baterias.

$$I_{ctrl} \times V_{dc} == P_{cc} \quad (11)$$

Garante o funcionamento e a proteção do controlador de carga em relação à sua capacidade de potência.

$$I_{máxmod} \times V_{dc} == P_{fv} \quad (12)$$

Garante o funcionamento e a proteção do gerador fotovoltaico em relação à sua capacidade de potência máxima de operação.

$$I_{ctrl} \geq I_{máxmod} \quad (13)$$

Garante o funcionamento e a proteção do controlador de carga em relação a corrente máxima que pode fluir do sentido dos módulos.

$$I_{ctrl} \geq I_{máxc} \quad (14)$$

Garante o funcionamento e a proteção do controlador de carga em relação a corrente máxima que pode ser exigida da carga.

$$P_i \geq P_{pc} \quad (15)$$

Garante o funcionamento e a proteção do inversor fotovoltaico em relação ao valor máximo de potência exigido pela carga.

$$P_i \geq P_{fv} \quad (16)$$

Garante o funcionamento e a proteção do inversor fotovoltaico em relação à potência total de operação da produção fotovoltaica.

$$Cap_b \times V_{dc} \geq C_{rate} \times P_{pc} \quad (17)$$

Garante o valor de potência utilizado no banco de baterias para suprir a taxa de carregamento/descarregamento necessária para suprir o valor máximo de potência da carga no descarregamento.

$$Cap_b \times V_{dc} \geq C_{rate} \times P_{fv} \quad (18)$$

Garante o valor de potência necessária no banco de baterias para suprir o carregamento em relação à produção fotovoltaica e a taxa de carregamento.

3.8. Resolução do código

Com a definição de toda a metodologia desenvolvida para a operação do código, obtém-se o necessário para a resolução do código e a fim de chegar à solução do problema.

3.9. Análise da resposta do sistema

A fim de verificar e aprovar o resultado obtido com o código, foram elaborados no software Excel três gráficos que analisam o desempenho do sistema.

Os gráficos de simulação offgrid, que apresenta e relaciona os parâmetros mais importantes do sistema: produção, carga a ser suprida e armazenamento. Este gráfico foi dividido em dois por viés de escala e visualização. Os dados de produção foram construídos utilizando a potência fotovoltaica e os dados de irradiação geográfica do município de Santa Helena (GO). Os dados da curva de carga são os dados da curva modelada neste trabalho, de hora em hora. Os dados de armazenamento foram obtidos de acordo com a capacidade das baterias e a produção fotovoltaica.

O primeiro gráfico apresenta o armazenamento do banco de baterias. O segundo gráfico relaciona a produção fotovoltaica e a curva de carga.

Outro gráfico importante utilizado para análise é o de descarregamento das baterias sem geração, para determinar se a autonomia está sendo respeitada. Os dados utilizados neste gráfico são os dados de armazenamento e os dados da curva de carga.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Cenário Base com 12V

Por meio da resolução do código, obtém-se os resultados esperados, das variáveis de decisão e da FO propriamente dita. A Tabela 6 mostra os valores do resultado do cenário base.

Tabela 9 - Resultados para 12V.

Parâmetro	Valor ótimo
P_{fv}	7,59 kW
Cap_b	12,65 kAh
P_{cc}	7,59 kW
P_i	7,59 kW
I_{ctrl}	0,63 kA
$I_{máxmod}$	0,63 kA
Função Objetivo	108244,60 R\$

Fonte: Autoria própria.

Os valores apresentados são os valores ótimos para os coeficientes determinados. Tendo os valores de potência e capacidade dos equipamentos, é chegado o momento de arranjar o sistema. A escolha dos equipamentos do arranjo, foi arbitrária, assim como a escolha dos equipamentos da unidade consumidora, apenas para os fins do cálculo.

A iniciar pelos módulos, uma potência de aproximadamente 7590W pode ser dividida em 15 módulos de 500W. O modelo Painel Solar 510W Trina - Mono (TSM-510DE18M(II)) se adequa ao necessário.

Os controladores de carga que suprem a potência e a quantidade de corrente dimensionada, são ligados em paralelo para obterem a soma do valor necessário da corrente máxima, o modelo escolhido foi o mesmo do modelo de custo, totalizando 10 Controladores De Carga 60a 12v-825/24v-1650/48v-3300 Felicity.

A capacidade do banco de baterias é de aproximadamente 12,650kah. O modelo utilizado para baterias em paralelo de 12V foi o do modelo de custo, totalizando 54 Baterias Solar Moura 234Ah MS234Ah.

Por fim, a potência do inversor necessária como resultado é de 7,5kW. Em detrimento de limitações de equipamento, foram escolhidos 8 inversores de 1kW trabalhando em paralelo, somando as correntes necessárias para o arranjo dos módulos. o modelo escolhido foi o Inversor

Off Grid Senoidal ZTROON ZT1000-11 - 1000W - 12/127V.

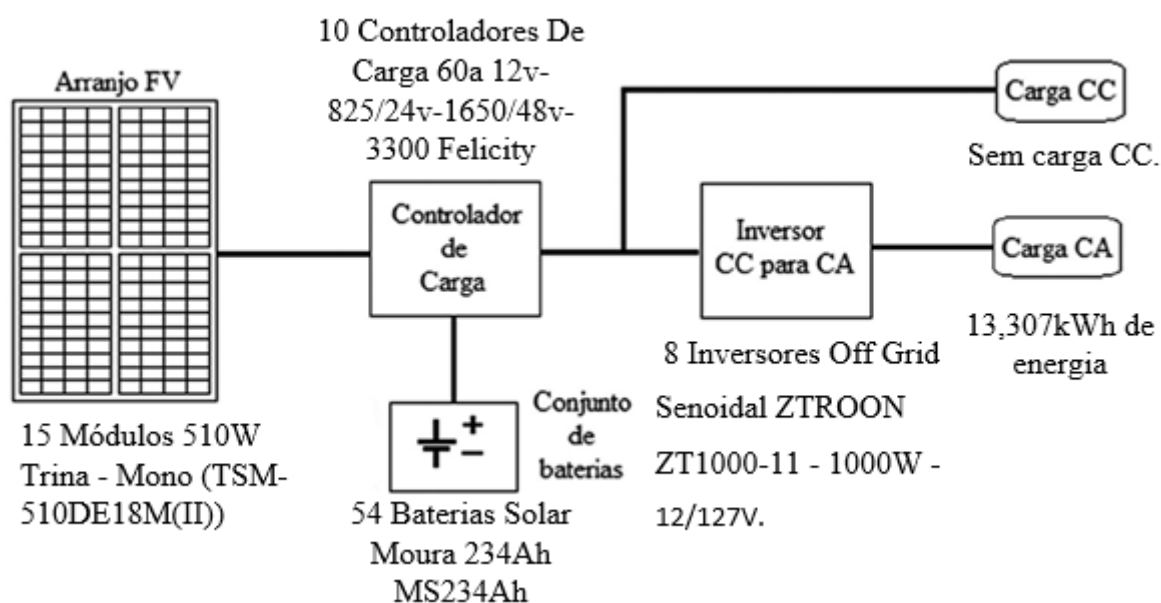
Em relação ao arranjo escolhido para esse cenário, devido ao modelo escolhido para os controladores operarem em até 825W de potência em 12V, são necessários 10 controladores para suprir a demanda completa de 7,5kW, em que são conectados 5 módulos individualmente em 5 controladores, e os outros 5 controladores recebem 2 módulos em paralelo, com todos os controladores operando em paralelo.

O Controlador De Carga 60a 12v-825/24v-1650/48v-3300 Felicity possui um limite de tensão de entrada de 145V, e recebe 43,2V dos módulos em potência máxima de operação do modelo utilizado, a fim de então regular a tensão em 12V com sua função de controle no lado cc para o banco de baterias com a tecnologia MPPT. A corrente de curto-circuito do módulo é de 12,42A, e o controlador suporta até 60A, garantindo a proteção em operação do sistema, que receberia no máximo 24,84A no caso de dois módulos em paralelo no controlador.

Os controladores estão ligados em paralelo com o banco de baterias, que opera também em paralelo entre si e em paralelo com os inversores, mantendo a tensão do sistema em 12V.

A Figura 15, produzida pelo autor deste trabalho, representará um esquema visual que determina o arranjo do sistema. O mesmo esquema é montado em todos os cenários do trabalho.

Figura 15 - Arranjo fotovoltaico em 12V.



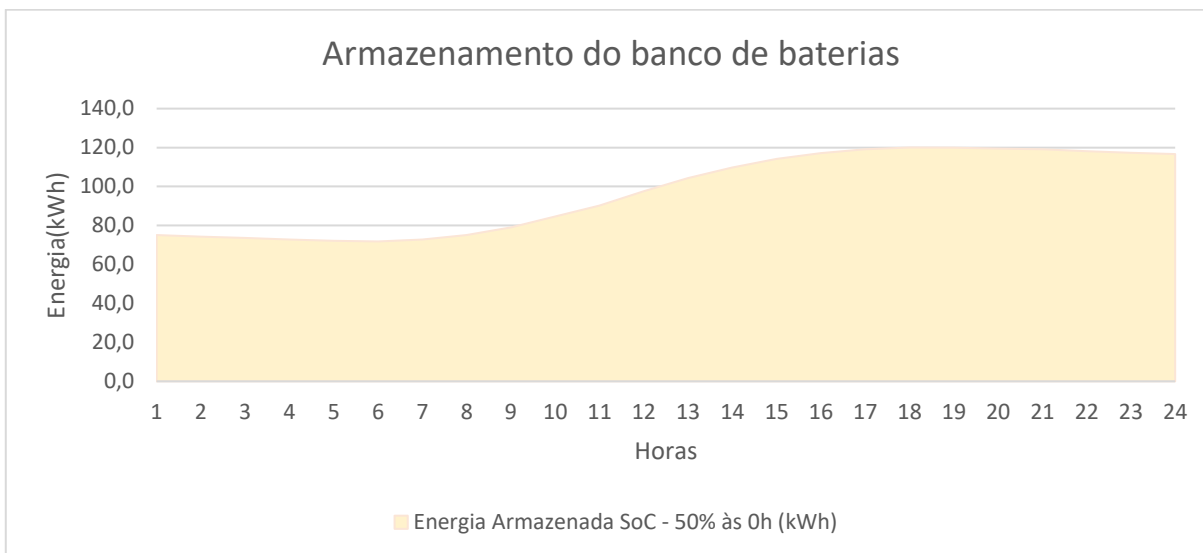
Fonte: Autoria própria.

Feito o dimensionamento e o arranjo completo do sistema, em seguida é feita a análise do sistema dimensionado.

As Figuras 16 e 17 apresentam o gráfico que relaciona os parâmetros mais importantes

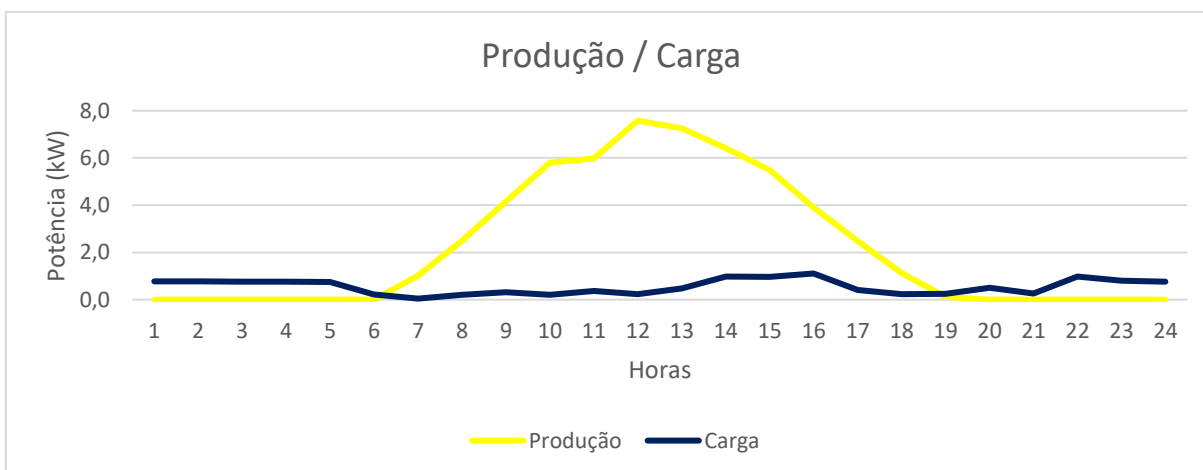
do sistema, a produção em kW, a carga a ser suprida e a energia armazenada pelo banco de baterias, a partir de um estado de carga de 50% às 0h.

Figura 16 - Simulação do armazenamento do banco de baterias em 12V.



Fonte: Autoria própria.

Figura 17 - Simulação da produção/carga em 12V.



Fonte: Autoria própria.

A partir da Figura 16, observa-se que parece haver um superdimensionamento tratando-se da quantidade de energia armazenada, que é muito elevada em relação à produção e à carga apresentados na Figura 17. A razão disso se dá ao analisar a restrição 8, representada pela Equação 18, em que a potência de armazenamento (Capacidade do banco de baterias multiplicada pela tensão) precisa suportar os 7,59Kw de potência fotovoltaica em 1 hora devido a taxa de carregamento de 20 horas. Em uma análise de cálculo, ao multiplicar o valor da

capacidade do banco de baterias (12,65kAh) pela tensão (12V) o valor atingido é de 151,68kWh. Ao dividir esse valor pela taxa de carregamento (20), o valor obtido é de 7,58kW, exatamente a potência fotovoltaica do sistema, valor que as baterias precisam suportar em capacidade máxima. E devido a esse valor de máximo de carga, a taxa de carregamento não permite que as baterias carreguem mais do que essa quantidade de energia.

Ao substituir os valores do resultado em cada inequação, provaremos matematicamente a solução ótima.

$$\begin{aligned}
 P_{fv} \times HSP &\geq E_c \\
 7,59kW \times 5,26 &\geq 39,921kWh \\
 39,923kWh &\geq 39,921kWh
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Cap_b \times DoD \times V_{dc} &\geq E_c \\
 12,65kAh \times 0,8 \times 12 &\geq 39,921kWh \\
 121,44kWh &\geq 39,921kWh
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{ctrl} \times V_{dc} &== P_{cc} \\
 0,63kA \times 12 &== 7,59kW \\
 7,59kW &== 7,59kW
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{máxmod} \times V_{dc} &== P_{fv} \\
 0,63kA \times 12 &== 7,59kW \\
 7,59kW &== 7,59kW
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{ctrl} &\geq I_{máxmod} \\
 0,63kA &\geq 0,63kA
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{ctrl} &\geq I_{máxc} \\
 0,63kA &\geq 0,13kA
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_i &\geq P_{pc} \\
 7,59kW &\geq 1,543kW
 \end{aligned}$$

$$P_i \geq P_{fv}$$

$$7,59kW \geq 7,59kW$$

$$Cap_b \times V_{dc} \geq C_{rate} \times P_{pc}$$

$$12,65kAh \times 12 \geq 20 \times 1,543kW$$

$$151,8kWh \geq 30,86kWh$$

$$Cap_b \times V_{dc} \geq C_{rate} \times P_{fv}$$

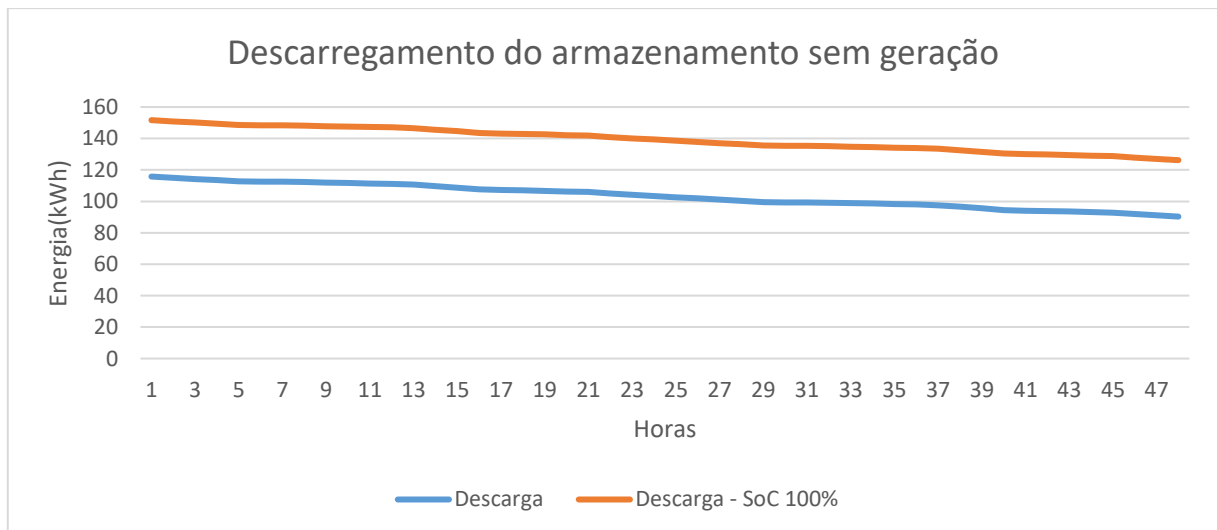
$$12,65kAh \times 12 \geq 20 \times 7,59kW$$

$$151,8kWh \geq 151,8kWh$$

A partir dos cálculos, obtém-se a conclusão matemática de que todas as restrições foram atendidas, e nas inequações que se tornaram igualdades pelos resultados, pode-se inferir que foi atingido o valor máximo da variável para aquela determinada restrição, justificando o valor elevado no dimensionamento das baterias. Esse comportamento se repetirá em todos os cenários por conta das manipulações matemáticas do código.

A Figura 18 apresenta o processo de descarga das baterias em relação à autonomia desejada, 2 dias, a partir do estado de carga de 50%, escolhido apenas para os fins da simulação.

Figura 18 - Descarga da bateria em função do tempo em 12V.



Fonte: Autoria própria.

Por meio das figuras, observa-se que a produção e o armazenamento do sistema foram capazes de suprir completamente a demanda de carga, e o descarregamento das baterias

suportou as 48 horas de autonomia, conservando a profundidade de descarga desejada.

Um fator importante a se considerar nessa resolução, é que o resultado a partir desse cenário em 12V entregou uma quantidade muito elevada de equipamentos, o que em termos de aplicação prática na instalação ou aquisição do sistema se tornaria uma alternativa inviável por quesitos como espaço físico e arranjo dos equipamentos.

Em relação à contribuição de cada variável na obtenção da função objetivo, obtém-se os seguintes valores:

- P_{fv} : 5,05%;
- Cap_b : 78,91%;
- P_{cc} : 8,76%;
- P_i : 7,29%

A partir desses valores, observa-se que as baterias são os componentes mais onerosos do sistema, que contribuem majoritariamente para o preço mais elevado.

4.2 Cenário Base com 24V

Na mudança da voltagem do sistema, a alteração no resultado do código foi pequena, apenas no banco de baterias e nas correntes máximas, seguem os resultados:

Tabela 10 - Resultados para 24V.

Parâmetro	Valor ótimo
P_{fv}	7,59 kW
Cap_b	6,32 kAh
P_{cc}	7,59 kW
P_i	7,59 kW
I_{ctrl}	0,32 kA
$I_{máxmod}$	0,32 kA
Função Objetivo	65540,77 R\$

Fonte: Autoria própria.

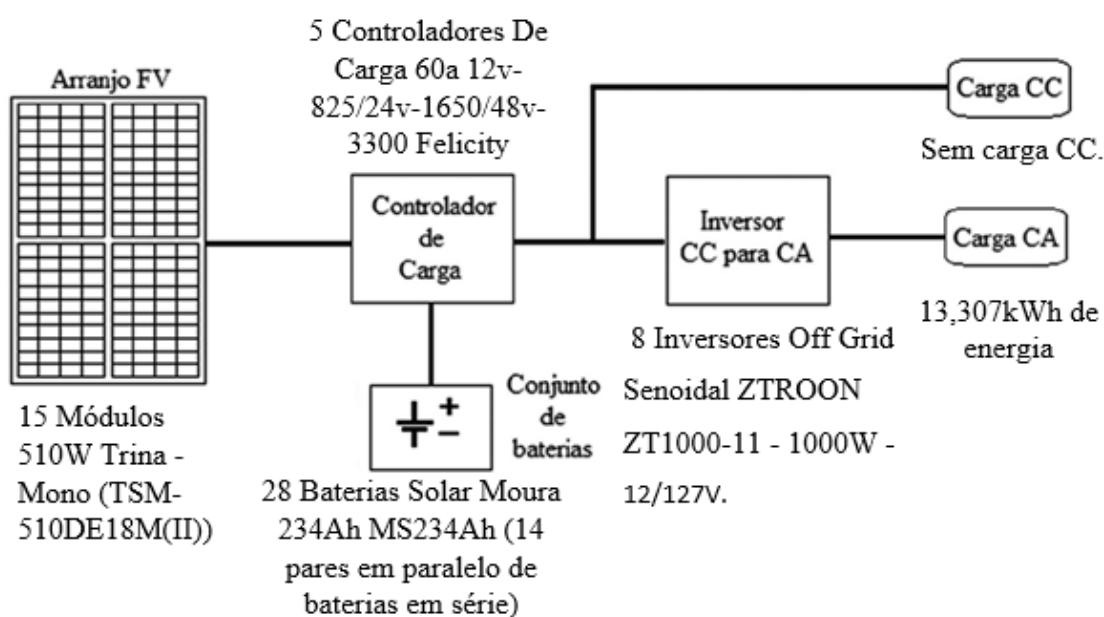
Em relação ao resultado do dimensionamento, a capacidade do banco de baterias e as correntes máximas são reduzidas pela metade, por serem inversamente proporcionais a tensão de operação. Apenas com a mudança na tensão, o arranjo dos módulos pode ser otimizado de uma forma diferente. Os 15 módulos necessários para suprir a potência fotovoltaica são

organizados de forma que cada controlador recebe 3 módulos conectados em série, reduzindo o número de controladores para 5. Essa mudança ocorre pelo fato de o controlador escolhido suportar até 1650W de potência em 24V.

A partir dessa mudança, torna-se notório o fato de que o código contempla apenas o dimensionamento, e que uma vez feito, os arranjos podem ser diversos e ficam a cargo do engenheiro projetista, relacionando os equipamentos escolhidos com a configuração ótima para eles no sistema. Para trabalhos futuros, segue a possibilidade de incrementar o código com restrições que contemplem também o arranjo ótimo do sistema.

Quanto ao banco de baterias, a nova configuração é de 28 baterias de 12V, com 14 pares em paralelo de baterias ligadas em série. A Figura 19 determina o arranjo.

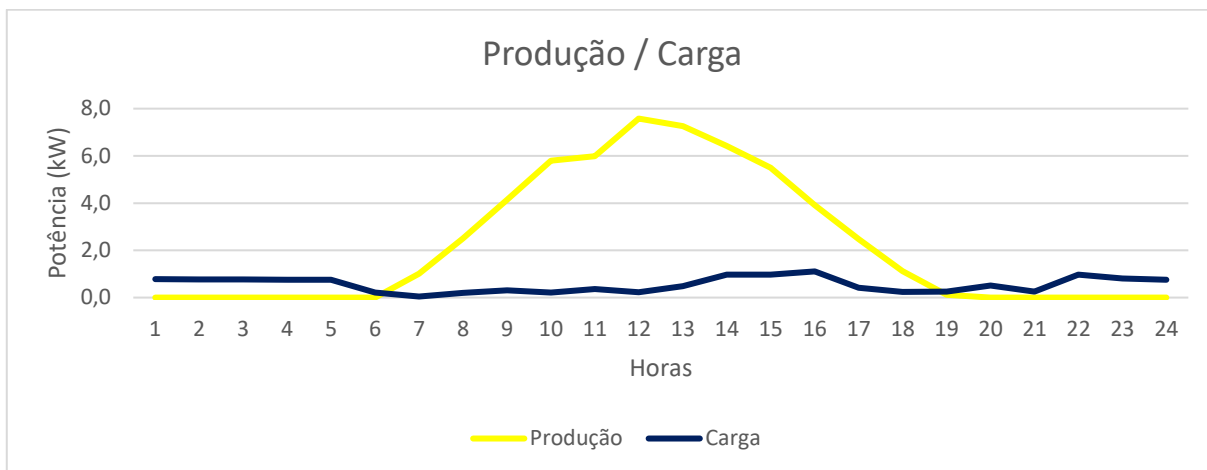
Figura 19 - Arranjo fotovoltaico em 24V.



Fonte: Autoria própria.

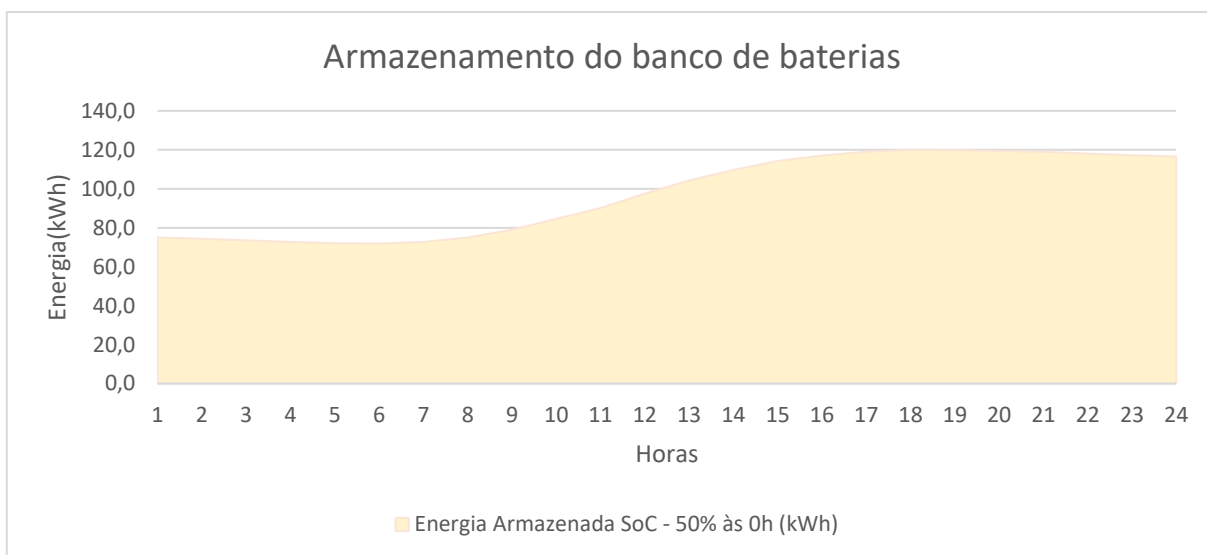
É importante observar que para este consumidor e seu perfil de consumo, uma voltagem mais elevada no sistema parece comportar melhor a operação, reduzindo as correntes máximas que irão circular para os controladores e as baterias, estando mais próximo de aplicações reais, necessitando de cabos com seções menores e possibilitando menos perdas por aquecimento na operação do sistema. As Figuras 20 e 21 revelam o desempenho do sistema na nova configuração.

Figura 20 - Simulação da produção/carga em 24V.



Fonte: Autoria própria.

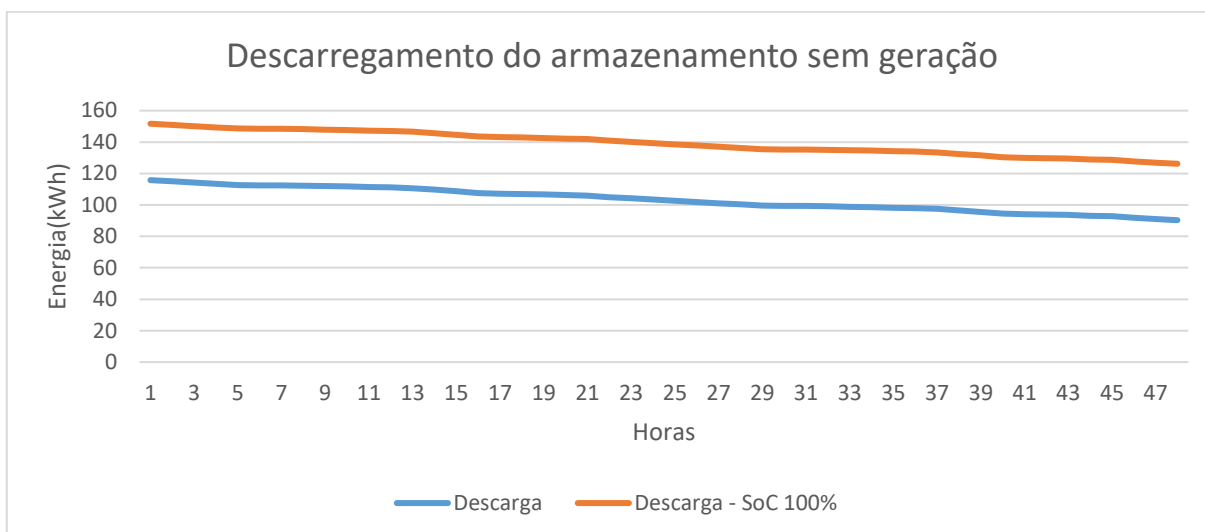
Figura 21 - Simulação do armazenamento do banco de baterias em 24V.



Fonte: Autoria própria.

Devido a permanência dos dados de consumo, a carga permanece constante na Figura 20, e a produção também, por conta da mesma localização geográfica e da mesma potência fotovoltaica. O comportamento das baterias também segue o mesmo pelo fato de a potência necessária para armazenar a energia ser a mesma, em que a capacidade em Ah do banco de baterias é inversamente proporcional a tensão de operação, por isso a redução da capacidade no geral. A Figura 22 representa o comportamento do banco de baterias nesse cenário, que segue o mesmo também.

Figura 22 - Descarga da bateria em função do tempo em 24V.



Fonte: Autoria própria.

Em relação às contribuições de cada variável na obtenção da função objetivo neste cenário, tem-se:

- P_{fv} : 8,33%
- Cap_b : 65,1%
- P_{cc} : 14,47%
- P_i : 12,03%

Mais uma vez conclui-se que a bateria continua sendo a mais onerosa, mas agora um pouco mais próxima dos outros valores.

4.3. Cenário Base com 48V

Alterando mais uma vez a tensão de operação do sistema, obtém-se, pela Tabela 11:

Tabela 11 - Resultados para 48V.

Parâmetro	Valor ótimo
P_{fv}	7,59 kW
Cap_b	3,16 kAh
P_{cc}	7,59 kW
P_i	7,59 kW
I_{ctrl}	0,15 kA
$I_{máxmod}$	0,15 kA
Função Objetivo	44188,85 R\$

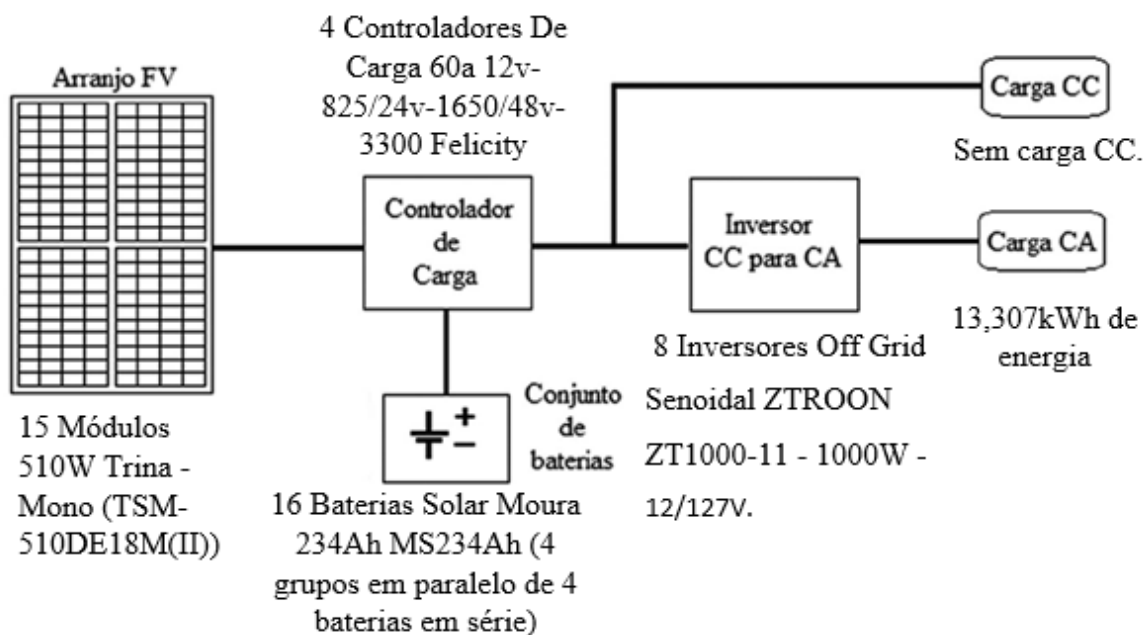
Fonte: Autoria própria.

Observa-se que, novamente, as potências se mantiveram devido ao valor necessário de

produção fotovoltaica para suprir o consumo, e houve redução na capacidade do banco de baterias e nas correntes máximas mais uma vez.

Ao empregar a tensão de 48V, o arranjo utilizado poderá ser otimizado aumentando mais uma vez o número de módulos por controlador, agora que ele suporta 3300W. A configuração é de 4 módulos por controlador em 3 controladores e 1 controlador com 3 módulos, todos os módulos ligados em série entre si. A Figura 23 revela o novo arranjo.

Figura 23 - Arranjo fotovoltaico em 48V.

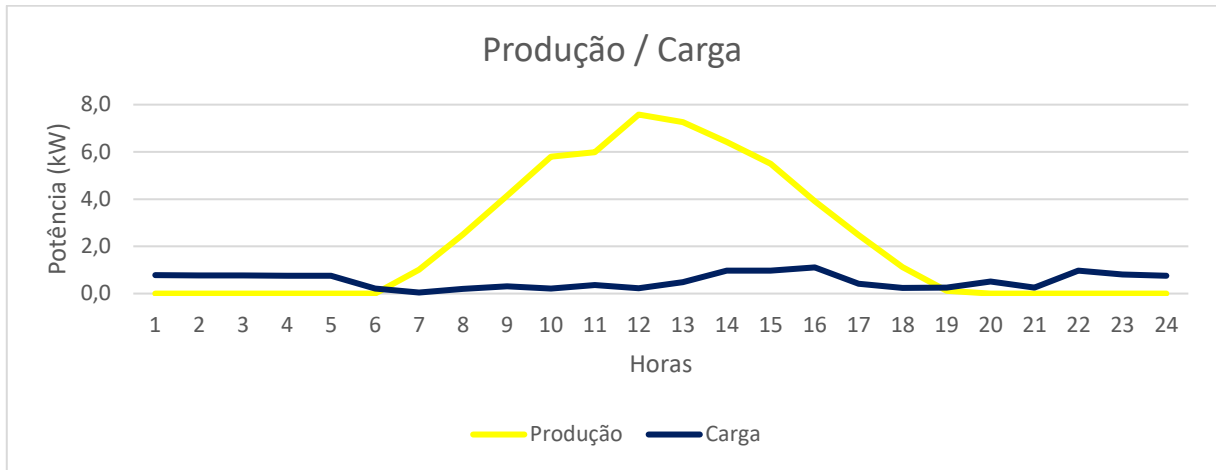


Fonte: Autoria própria.

Como visto na Figura 23, quanto ao banco de baterias, a configuração segue em 16 baterias, com 4 grupos em paralelo de 4 baterias de 12V em série para obter a tensão de 48V.

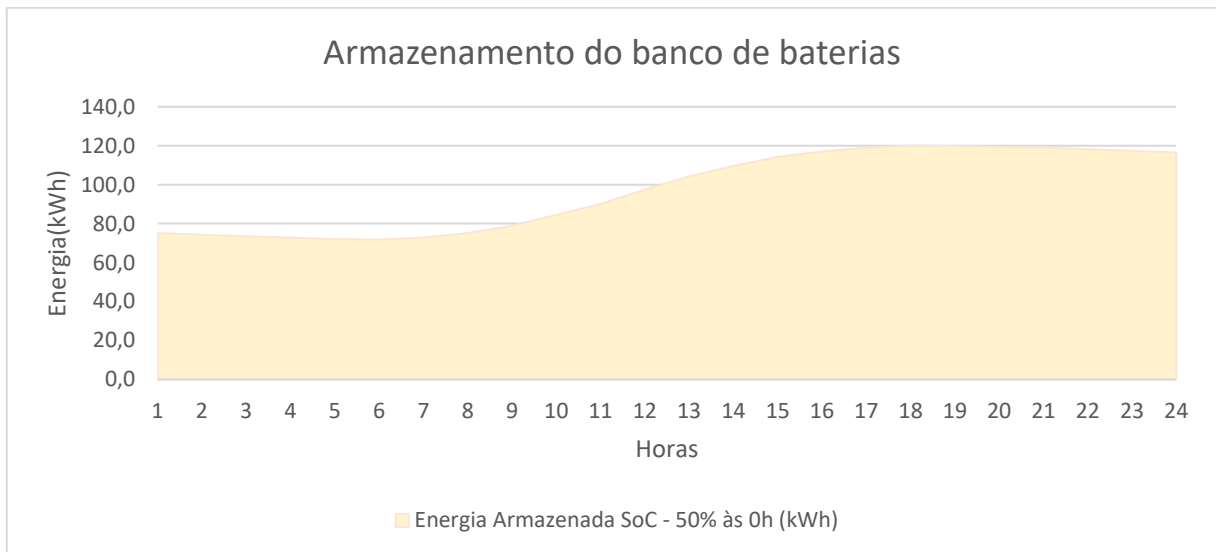
As Figuras 24, 25 e 26, revelam o desempenho do sistema neste cenário.

Figura 24 - Simulação da produção/carga em 48V.



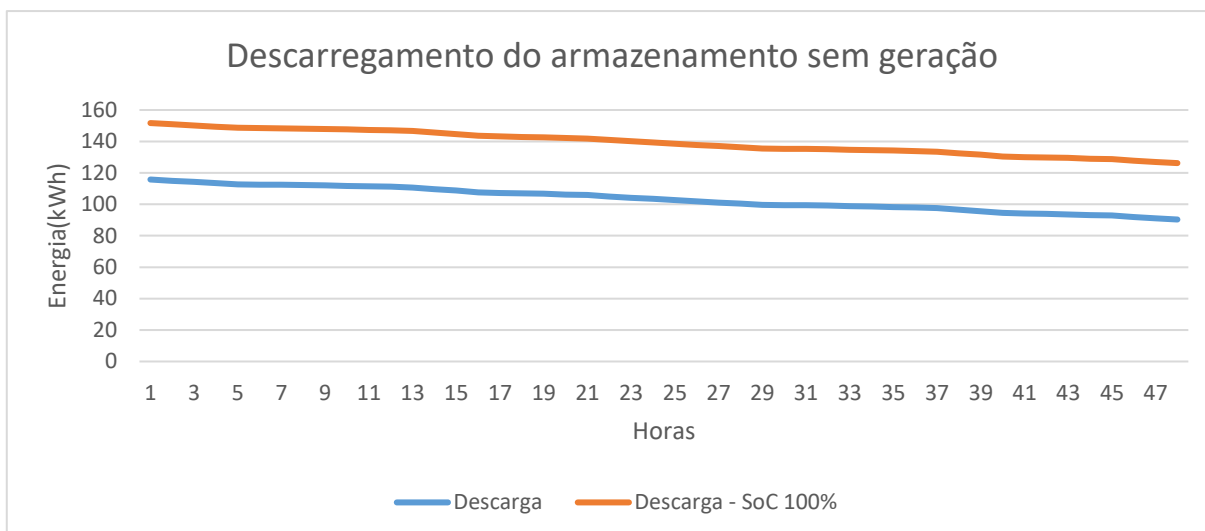
Fonte: Autoria própria.

Figura 25 - Simulação do armazenamento do banco de baterias em 48V.



Fonte: Autoria própria.

Figura 26 - Descarga da bateria em função do tempo em 48V.



Fonte: Autoria própria.

Mais uma vez, o comportamento do sistema graficamente segue sendo o mesmo devido à mesma potência fotovoltaica e potência de armazenamento.

Quanto à contribuição das variáveis na obtenção da função objetivo:

- P_{fv} : 12,36%
- Cap_b : 48,29%
- P_{cc} : 21,47%
- P_i : 17,85%

No cenário de 48V, observa-se que a configuração da contribuição das variáveis segue maior uniformidade do que as outras configurações, sendo a bateria ainda mais onerosa em todos os cenários.

Em relação a voltagem, conclui-se que um valor maior em sistemas que demandam muita energia para consumo, o sistema opera menos sobrecarregado e de forma mais eficiente, visto que para esse sistema em 48V o número de controladores é reduzido para 4, aproveita quase a totalidade a capacidade do controlador, minimiza as perdas que podem ocorrer com aquecimento por conta das correntes máximas, e reduz o custo do cabeamento necessário.

Portanto, nas condições apresentadas a partir das constantes do código, e com os equipamentos escolhidos de forma arbitrária para os cenários do estudo, a voltagem de 48V mostra ser a mais adequada para o sistema.

A partir da Tabela 9, segue uma comparação dos 3 cenários.

Tabela 12 - Comparativo dos 3 cenários.

	12V	24V	48V
Qtd. Módulos	15	15	15
Qtd. Baterias	54	28	16
Qtd. Controladores	10	5	4
Qtd. Inversores	8	8	8
Corrente máx. (kA)	0,63	0,32	0,15
Função objetivo	108244,60	65540,77	44188,85

Fonte: Autoria própria.

Por meio da Tabela 9 percebe-se diferença entre a quantidade de equipamentos em cada arranjo e o impacto que a simples mudança da voltagem teve na função objetivo e no sistema como um todo. O quadro comparativo revela de forma mais clara a superioridade da operação do sistema em 48V, apresentando correntes mais reduzidas, menor valor de dimensionamento na função objetivo e o arranjo otimizado com menos equipamentos trabalhando de forma mais eficiente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da importância da geração e distribuição de energia elétrica no Brasil, esse estudo se fez pertinente para apresentar uma nova alternativa para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos off-grid. Os conceitos necessários na compreensão dos aspectos do sistema, na compreensão da metodologia e dos resultados foram apresentados de forma explícita e detalhada. A metodologia utilizada foi apresentada e descrita, e se baseou na dedução da curva de carga da unidade consumidora e na criação do código que realizou o dimensionamento.

Em detrimento dos resultados e das discussões expostas neste trabalho, é possível afirmar a assertividade e o funcionamento do código. Porém, como visto nesta mesma seção, existem algumas alternativas no estudo e na implementação do código que podem vir a ser parte de trabalhos futuros ou que poderiam ter sido implementados neste trabalho e não foram por decisão do autor, essas possibilidades são:

- Menor arbitrariedade nas escolhas dos equipamentos da unidade consumidora, existem dados de pesquisas de listas de equipamentos mais utilizados que trariam uma curva de carga mais assertiva para um contexto mais geral;
- Restrições no código que contemplem o arranjo fotovoltaico otimizado, visto que foi confirmado que o código só contempla o dimensionamento, e este é limitado à própria definição do arranjo, que altera diversos fatores e condições;
- Diagrama unifilar do projeto, que poderia ter sido produzido em vista de uma melhor visualização do arranjo e das conexões;
- Análise econômica do dimensionamento e dos arranjos, visto que a função objetivo traz o dimensionamento ótimo e representa custo mínimo;
- Diferentes cenários de consumo, possibilitando uma análise técnica mais profunda a respeito dos componentes do sistema.
- Aplicação prática do projeto, levantamento de custos de mão de obra de execução, administração, cabeamento, aterramento, etc.

Apresentadas essas possibilidades, é possível afirmar que os objetivos do trabalho foram contemplados contemplando os resultados. Foram realizadas análises a respeito do comportamento do sistema dimensionado e sua modelagem completa, partindo do dimensionamento ótimo para o arranjo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Encontro de Energia no Meio Rural - Eletrificação rural em Goiás: estudo de três casos”. Acessado: 10 de março de 2025. [Online]. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022000000100015&script=sci_arttext
- [2] “Acesso à energia elétrica no Brasil chega a 17 milhões de pessoas — Casa Civil”. Acessado: 10 de março de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/noticias/2022/agosto/acesso-a-energia-eletrica-no-brasil-chega-a-17-milhoes-de-pessoas>
- [3] “Encontro de Energia no Meio Rural - Qualidade na utilização de energia elétrica no setor rural: problemas, legislação e alternativas”. Acessado: 12 de março de 2025. [Online]. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000200047&script=sci_arttext
- [4] “Problemas de energia elétrica no campo são levados à Aneel - Sistema FAEMG”. Acessado: 10 de março de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.faemg.org.br/noticias/problemas-de-energia-eletrica-no-campo-sao-levados-a-aneel>
- [5] L. H. Jensen, “UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA SISTEMA FOTOVOLTAICO DE FORNECIMENTO OFF-GRID METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA RESIDENCIAL ISOLADO Palhoça”, 2021.
- [6] “MATRIZ ENERGÉTICA”. Acessado: 10 de março de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcedenergia/matriz-energetica-e-eletrica>
- [7] “Micro e Minigeração Distribuída — Agência Nacional de Energia Elétrica”. Acessado: 10 de março de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>
- [8] “Energia Solar Fotovoltaica — Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços”. Acessado: 12 de março de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/sustentabilidade/energia-solar-fotovoltaica>
- [9] M. G. Villalva, *Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações*, vol. 1º Edição. São Paulo, 2012.
- [10] J. I. Seguel, “Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital”, 2009.
- [11] J. T. Pinho, *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Rio de Janeiro, 2014.
- [12] B. De Oliveira, S. Rafael, e S. Passos, “SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: UM ESTUDO DE CASO”, 2021.
- [13] “BIFACIAL MODULE WITH DUAL GLASS Higher Power Output Tiger Neo N-type 72HL4-BDV Positive power tolerance of 0+3% 30 Year Linear Power Warranty N-Type PID Resistance Hot 2.0 Technology”. Acessado: 12 de março de 2025. [Online]. Disponível em: www.jinkosolar.com
- [14] “CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica”. Acessado: 13 de março de 2025. [Online]. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/index.php#data>
- [15] A. Original, I. S. Cardoso, E. Guedes Da Costa, J. Fernandes De Araújo, e A. De Sousa Leitão, “Metodologia para Estimação de Curvas de Carga de Unidades Consumidoras Individuais”, *Revista Física no Campus*, vol. 1, nº 1, p. 36–46, nov. 2021, Acessado: 13 de março de 2025. [Online]. Disponível em: <https://revista.uepb.edu.br/fisicanocampus/article/view/538>
- [16] G. B. Dantzig, *Linear Programming and Extensions*. RAND Corporation, 1963. doi:

- 10.7249/R366.
- [17] “Refrigerador 340L 2 Portas Frost Free Classe A Evox 220 Volts, Inox, Consul | Amazon.com.br”. Acessado: 13 de março de 2025. [Online]. Disponível em: https://www.amazon.com.br/Refrigerador-Litros-Consul-Portas-Crm39akana/dp/B083MSYPDB/ref=asc_df_B083MSYPDB/?gad_source=1&hvadid=709884460975&hvdev=c&hvdvcmdl&hvlocint&hvlocphy=9198756&hvnetw=g&hvponesone&hvpos=&hvptwo=&hvqmt=&hvrnd=17482777055860876356&hvtargid=pla-2074174399863&linkCode=df0&mcid=272c96fbdce43d94ad56cd31a5fba00f&pssc=1&tag=googleshopp00-20
 - [18] “PHILIPS Lampada LED bulbo luz amarela, 9W, Bivolt (100-240V), Base E27 | Amazon.com.br”. Acessado: 13 de março de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/LED-Bulbo-3000K-806LM-100-240V/dp/B081DFJTHS?th=1>
 - [19] “Máquina Lavar Roupas Brastemp 12kg*Bwk12-220v - Lojas Afubra | Eletrodomésticos, Campo e Jardim e mais...” Acessado: 13 de março de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.lojasafubra.com.br/maquina-lavar-roupa-brastemp-12kg-bwk12-220v/p?srsId=AfmBOopGmhGE2qxxHcWvXfGRwpQaABKpNTcHYl90fjMKgarq7CLUAGPN>
 - [20] “Smart TV LG 60UQ8050PSB 60" LED 4K UHD Inteligência Artificial - Benoit.com.br”. Acessado: 13 de março de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.benoit.com.br/smart-tv-lg-60uq8050psb-60-led-4k-uhd-inteligencia-artificial-10008180-p1056377>
 - [21] “Micro-ondas Electrolux Prata com Painel Integrado 31l Mi41s 220v | Amazon.com.br”. Acessado: 13 de março de 2025. [Online]. Disponível em: https://www.amazon.com.br/Micro-Ondas-MI41S-Prata-220v-Electrolux/dp/B076XC1QX7/ref=asc_df_B076XC1QX7/?tag=googleshopp00-20&linkCode=df0&hvadid=709864975911&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=2717143401539682395&hvponesone=&hvptwo=&hvqmt=&hvdev=c&hvdvcmdl=&hvlocint=&hvlocphy=9198756&hvtargid=pla-1047129713029&mcid=1547cc81d2b53781a6717207f4ef5364&gad_source=1&th=1
 - [22] “Ar Condicionado Hi Wall LG Dual Inverter Voice 9.000 Btus Quente e Frio 220v R-32 | Amazon.com.br”. Acessado: 13 de março de 2025. [Online]. Disponível em: https://www.amazon.com.br/Condicionado-LG-Inverter-Voice-Quente/dp/B0CHZ75V3V/ref=asc_df_B0CHZ75V3V/?tag=googleshopp00-20&linkCode=df0&hvadid=709968341215&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=4913215353579073734&hvponesone=&hvptwo=&hvqmt=&hvdev=c&hvdvcmdl=&hvlocint=&hvlocphy=9198756&hvtargid=pla-2438512851552&pssc=1&mcid=a8e045e491483e8cac7ab83d5e2faedd&gad_source=1
 - [23] “Painel solar: preços e custos de instalação | Portal Solar”. Acessado: 13 de março de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/painel-solar-precos-custos-de-instalacao.html>
 - [24] “Quanto custa o Armazenamento Solar por Baterias? Entenda os Preços da Bateria Solar”. Acessado: 13 de março de 2025. [Online]. Disponível em: <https://institutosolar.com/precos-da-bateria-solar/>
 - [25] “Controlador De Carga 60a 12v-825/24v-1650/48v-3300 Felicity”. Acessado: 13 de março de 2025. [Online]. Disponível em: https://www.ensolarenergia.com.br/MLB-5162682812-controlador-de-carga-60a-12v-82524v-165048v-3300-felicity-_JM
 - [26] “Inversor Off Grid Senoidal ZTROON ZT1000-11 1000W I NeoSolar”. Acessado: 13 de março de 2025. [Online]. Disponível em:

https://www.neosolar.com.br/loja/inversor-off-grid-senoidal-ztroon-zt1000-11-1000w-12-127v.html?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwvr--BhB5EiwAd5YbXlnJT2JWtc2_X3mKBVU0M4uI1ZG2V9WeV3JYxx1QGuumlMhI-KzjsxoCCxEQAvD_BwE

7. ANEXO

Dimensionamento de um sistema fotovoltaico offgrid utilizando otimização linear

```
from IPython import get_ipython
```

```
from IPython.display import display
```

```
!pip install pulp
```

```
from pulp import *
```

```
# Create the problem
```

```
prob = LpProblem("Problem", LpMinimize)
```

```
# Define the variables
```

```
Pfv = LpVariable("Pfv", 0)
```

```
Capb = LpVariable("Pb", 0)
```

```
Pcc = LpVariable("Pcc", 0)
```

```
Pi = LpVariable("Pi", 0)
```

```
Ictrl = LpVariable("Ictrl", 0)
```

```
Imáxmod = LpVariable("Imáxmod", 0)
```

Constants

HSP = 5.26 # horas de sol no pico

DoD = 0.8 # depth of discharge

Ec = 3 * 13.307 # energia consumida no dia x (dias de autonomia + 1) em kWh

Vdc = 12 # voltagem

Ictrl = Pcc/Vdc corrente máx. controlador

Imáxmod = Pfv/Vdc corrente máxima fv

Ppc = 1.543 # potência de pico da carga em kW

Imáxc = Ppc/Vdc # corrente máxima carga

Crate = 20 # taxa de carregamento/descarregamento da bateria

Define the objective function

```
prob += 720 * Pfv + 6752 * Capb + 1250 * Pcc + 1039 * Pi, "Objective Function"
```

```
# Define the constraints
```

```
prob += Pfv * HSP >= Ec, "Constraint 1"
```

```
prob += Capb * DoD * Vdc >= Ec, "Constraint 2"
```

```
prob += Ictrl * Vdc == Pcc, "Coinstrant 3a"
```

```
prob += Imáxmod * Vdc == Pfv, "Coinstrant 3b"
```

```
prob += Ictrl >= Imáxmod, "Coinstrant 3c"
```

```
prob += Ictrl >= Imáxc, "Coinstrant 4"
```

```
prob += Pi >= Ppc, "Coinstrant 5"
```

```
prob += Pi >= Pfv, "Coinstrant 6"
```

```
prob += Capb * Vdc >= Crate * Ppc, "Coinstrant 7"
```

```
prob += Capb * Vdc >= Crate * Pfv, "Coinstrant 8"
```

```
# Solve the problem
```

```
prob.solve()
```

```
# Print the status of the solution
```

```
print("Status:", LpStatus[prob.status])
```

```
# Print the values of the variables
```

```
print("Pfv =", value(Pfv),"kw")
```

```
print("Capb =", value(Capb),"kah")
```

```
print("Pcc =", value(Pcc),"kw")
```

```
print("Pi =", value(Pi),"kw")
```

```
print("Ictrl =", value(Ictrl),"kA")
```

```
print("Imáxmod =", value(Imáxmod),"kA")
```

```
# Print the value of the objective function
```

```
print("Objective Function =", value(prob.objective))
```