

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**GEORGE LUCAS DE LIMA
MATHEUS FRANCISCO CHILA**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO EM
UMA FARMÁCIA**

PONTA GROSSA

2024

**GEORGE LUCAS DE LIMA
MATHEUS FRANCISCO CHILA**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO EM
UMA FARMÁCIA**

Technical feasibility analysis of a photovoltaic system in a pharmacy

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Marcio Mendes Casaro

PONTA GROSSA

2024



Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**GEORGE LUCAS DE LIMA
MATHEUS FRANCISCO CHILA**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO EM
UMA FARMÁCIA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 03/julho/2024

Marcio Mendes Casaro
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Julio Cesar Guimarães
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Edison Luiz Salgado Silva
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PONTA GROSSA
2024**

AGRADECIMENTOS

Iniciamos os agradecimentos com as gratificações aos professores, que fizeram parte desta longa jornada pelo conhecimento de forma ativa e atenciosa. Em especial ao orientador Prof. Márcio Mendes Casaro, que possibilitou, com sabedoria e respeito a trajetória árdua que nos trouxe até aqui.

Agradecemos também às nossas famílias, que nos apoiaram e acolheram nos momentos de dificuldades. Sem elas, nada disso seria possível. Aos nossos colegas, que dividiram conosco não somente os momentos de estudo, mas de descontração e companheirismo. As amizades conquistadas pelo caminho representam um pilar sólido e importante nesta conquista.

RESUMO

Atualmente, no Brasil, existem desafios energéticos a serem driblados, visto que há um incremento da demanda de energia elétrica da população, aumento no custo da matéria base para as usinas termoeletricas, numerosos casos de escassez hídrica e busca global por fontes de energia limpa. Com isso, a energia solar se mostra uma excelente alternativa, dado seu baixo custo quando comparada a outras fontes e possibilidade de instalação na totalidade do território brasileiro. Nesta conjuntura, o presente trabalho exibiu, detalhadamente, a fundamentação teórica necessária no entendimento de Sistemas Fotovoltaicos. Ademais, foi apresentada a análise de viabilidade técnica referente a implementação de painéis fotovoltaicos na Farmácia Coperfarma, situada no Município de Mamborê – PR. Também se realizou o estudo do perfil de consumo energético da unidade consumidora baseado na fatura de energia elétrica, além da análise técnica presencial do local em questão, a modelagem 3D da edificação disponível para instalação dos módulos, assim como dos entornos que poderiam causar sombreamento nestes, o cálculo minucioso dos principais componentes do SFVCR e, por último, a simulação da geração de energia do sistema decretado através do *Software PVSOL*.

Palavras-chave: *setor elétrico; crise energética; painéis fotovoltaicos; energia limpa; sistema fotovoltaico conectado à rede; energia solar; microgeração distribuída.*

ABSTRACT

Currently in Brazil, there are energy challenges to be overcome, as there is an increase in the demand for electricity from the population, rising costs of base materials for thermal power plants, numerous cases of water scarcity, and a global search for clean energy sources. In this context, solar energy proves to be an excellent alternative, given its low cost compared to other sources and the possibility of installation across the entire Brazilian territory. In this scenario, this study presented in detail the theoretical feasibility analysis was presented regarding the implementation of photovoltaic panels at Farmácia Coperfarma, located in the Municipality of Mamborê – PR. This includes studying the energy consumption profile based on the electricity bill, conducting available for module installation and its surroundings to assess potential shading, detailed calculation of the main components of the PV system, and finally, simulation of energy generation from the declared system using PVSOL software.

Keywords: *electric sector; energy crisis; photovoltaic modules; clean energy; grid-connected; photovoltaic system; solar energy; distributed microgeneration.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação dos materiais em relação ao GAP de energia.....	20
Figura 2 - Inserção de um átomo doador em uma rede cristalina de silício.....	22
Figura 3 - Inserção de um átomo doador em uma rede cristalina de silício.....	22
Figura 4 - União de cristais <i>p</i> e <i>n</i>	23
Figura 5 - Junção <i>pn</i>	23
Figura 6 - Estrutura célula fotovoltaica.....	24
Figura 7 - Diagrama para as principais tecnologias de células fotovoltaicas.....	25
Figura 8 - Célula silício monocristalinos.....	26
Figura 9 - Módulos fotovoltaicos flexíveis e célula de filme fino flexível.....	26
Figura 10 - Representação da forma construtiva de uma célula de silício amorfo.....	27
Figura 11 - Representação de uma célula fotovoltaica de telureto de cádmio (cdte).....	28
Figura 12 - Célula fotovoltaica disseleneto de cobre índio e gálio (<i>cigs</i>).....	28
Figura 13 - Inversor de ponte completa.....	32
Figura 14 - Representação do circuito equivalente para a 1ª etapa de operação.....	33
Figura 15 - Representação do circuito equivalente para a 2ª etapa de operação.....	34
Figura 16 - Representação do circuito equivalente para a 3ª etapa de operação.....	35
Figura 17 - Representação do circuito equivalente para a 4ª etapa de operação.....	36
Figura 18 - Principais formas de onda.....	37
Figura 19 - Principais formas de onda.....	37
Figura 20 - Principais formas de onda.....	38
Figura 21 - Principais formas de onda.....	38
Figura 22 - Modulação PWM.....	41
Figura 23 - PWM senoidal a 2 níveis.....	42
Figura 24 - Circuito para a modulação PWM a 2 níveis.....	43
Figura 25 - Modulação PWM a 3 níveis.....	43
Figura 26 - Circuito para a modulação PWM a 3 níveis.....	44
Figura 27 - Representação de um sistema <i>ON-GRID</i>	49
Figura 28 - Sistema <i>ON-GRID</i> com diferentes tecnologias.....	50
Figura 29 - Sistema Autônomo Individual.....	52
Figura 30 - Projeto Amazonas Energia.....	54
Figura 31 - Representação de um Sistema Fotovoltaico Híbrido.....	55
Figura 32 - Configuração de um SFVCR com Inversor Central.....	56
Figura 33 - Configuração de um SFVCR com Inversores <i>String</i>	57
Figura 34 - Configuração de um SFVCR com inversor <i>multi-string</i>	57
Figura 35 - Configuração de um SFVCR com inversor integrado ao módulo.....	58
Figura 36 - Planta de situação do comércio.....	63
Figura 37 - Área disponível para Instalação.....	64
Figura 38 - Planta de situação vista em perspectiva.....	64
Figura 39 - Fator de espaçamento x Latitude.....	65
Figura 40 - Análise do sombreamento da edificação vizinha no telhado.....	66
Figura 41 - Análise do sombreamento entre linhas de módulos.....	67
Figura 42 - Área reduzida.....	68
Figura 43 - <i>layout</i> de instalação, vista em perspectiva.....	72
Figura 44 - <i>layout</i> de instalação, vista superior.....	73
Figura 45 - Corte do Diagrama unilifar.....	77

Figura 46 - Planta 2D da área.....	86
Figura 47 - Previsão de rendimento do sistema.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sombreamento causado pela edificação vizinha sobre a área de instalação.....	66
Tabela 2 - Sombreamento causado entre linhas de módulos.....	67
Tabela 3 – Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia] em diferentes planos.....	68
Tabela 4 – consumo de energia anual e média mensal do ano de 2022.....	69
Tabela 5 – Tipos de fornecimentos e custo de disponibilidade da rede.....	70
Tabela 6 – Eficiência do inversor MIN 5000TL-XE(E).....	74
Tabela 7 – Eficiência do inversor SUN200G3-US-220.....	74
Tabela 8 – Especificações técnicas de entrada e saída inversor MIN5000TL-X.....	75
Tabela 9 – Dados em condições de testes TMx550 MH8-144A.....	76
Tabela 10 – Tabela seção mínima dos condutores.....	78
Tabela 11 – Especificações do fabricante Nexans.....	80
Tabela 12 – Tabela fator de agrupamento.....	81
Tabela 13 – Tabela fator de correção para temperatura.....	82
Tabela 14 – Tabela capacidade de condução de corrente.....	82
Tabela 15 – Parâmetros descritos da fração do sistema.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AM	Amazonas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CDTE	Célula Fotovoltaica de Telureto de Cádmio
CIGS	Seleneto de Cobre Índio e Gálio
COPEL	Companhia paranaense de energia elétrica
CRESESB	Centro de referência para Energia Solar e Eólica
CSI	Current source inverter
Eletrobras	Centrais Elétricas Brasileiros
f	Frequência
GTZ	Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit
h	Hora
HEPR	High Grade Ethylen Propilene Rubber
HJT	Célula Híbrida
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IICA	Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura
INEE	Instituto Nacional de eficiência energética
Kg	quilogramas
Km	quilômetros
kW	quilowatt
KWp	quilowatt pico
Labens	Laboratório de Energia Solar
m	Metros
M	Mega
m ²	Metros quadrados
MIGDI	Microsistemas Isolados de Geração e Distribuição de Energia
mm	Milímetro
m-Si	Silício monocristalino
MPPT	Maximum Power Point Tracking

MWp	megawatt pico
NBR	Norma Brasileira
nm	nanometro
NT	Norma Técnica
PWM	Pulse Width Modulation
RL	Circuito resistor indutor
Sb	Antimônio
SFD	Sistema Fotovoltaico Domiciliar
SFH	Sistema Fotovoltaico Híbrido
SFI	Sistemas Fotovoltaicos Isolados
SFV	Sistema Fotovoltaico
SFVCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SIGFI	Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica
SSPM	Seguidor de ponto de potência máxima
T	Período
TD	Taxa de desempenho
UC	Unidade Consumidora
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Vccmax	Máxima tensão CC do inversor
Vmppt	Tensão de Potência Máxima
Voc	Tensão de circuito aberto
VO	Tensão de saída
W	Watt

LISTA DE SÍMBOLOS

AS	Arsênio
a-Si	Silício amorfo
B	Boro
CdS	Sulfeto de cádmio
CH ₄	Metano
CO ₂	Gás Carbônico
eV	elétron volt
Ga	Gálio
GaAs	Arseneto de Gálio
ITO	Óxido de estanho e índio
Hz	Hertz
In	Índio
n	nêutron
OPV	Célula Orgânica
OTI	Estanho o índio
pn	próton-nêutron
p-Si	Silício policristalino
Si	Silício
SNO	Óxido de estanho

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Tema	15
1.2 Problemas e premissas	15
1.3 Objetivos	16
1.3.1. Objetivos específicos.....	17
1.4 Justificativa.....	18
1.5 Procedimentos Metodológicos	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 Célula Fotovoltaica.....	20
2.2. Métodos construtivos	23
2.3 Tipos de célula	24
2.3.1 Primeira geração	24
2.3.2 Segunda geração	25
2.3.3 Terceira geração	28
2.4 Inversores fotovoltaicos	28
2.5 Princípio de funcionamento de um conversor CC-CA	31
2.5.1 Etapas de operação (carga RL)	32
2.5.2 Operação em baixa frequência	39
2.5.3 Operação em alta frequência	39
2.6 Modulação PWM	40
2.6.1 PWM Senoidal	41
2.7 Aspectos Construtivos para Sistemas de geração Fotovoltaica	44
2.7.1 Radiação Solar.....	45
2.7.2 Irradiação X Irradiância.....	45
2.7.3 Ângulos presentes nas análises de SFVs.....	46
2.7.3.1 Ângulo Azimutal	46
2.7.3.2 Declinação e ângulo da altura do Sol.....	46
2.7.3.3 Ângulo de Inclinação dos Módulos.....	47
3. CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	47
3.1 Sistemas ON-GRID	48
3.2 Sistemas OFF-GRID	50
3.2.1 Sistemas Fotovoltaicos Autônomos Individuais.....	51

3.2.2 Sistemas Fotovoltaicos Autônomos em Minirrede.....	52
3.3 Sistemas Fotovoltaicos Híbridos.....	53
3.4 Associações De Sistemas Fotovoltaicos.....	54
3.5 Geração Distribuída.....	57
4. LEGISLAÇÃO.....	59
5. ANÁLISE TÉCNICA <i>IN LOCO</i>.....	62
5. 1 O projeto.....	62
5.1.1 Localização da Unidade Consumidora.....	62
5.1.2 Análise da Radiação Local.....	67
5.1.3 Estudo do Consumo da Farmácia.....	68
5.1.4 Dimensionamento de Potência do Sistema Fotovoltaico.....	69
5.1.4.1 Número de Módulos Fotovoltaicos.....	71
5.1.5 Dimensionamento do Inversor Fotovoltaico.....	72
5.1.6 Dimensionamento das <i>Strings</i>	73
5.1.7 Dimensionamento dos Condutores Elétricos.....	77
5.1.7.1 Dimensionamento da Seção Transversal dos Cabos CC.....	77
5.1.7.2 Dimensionamento Cabos CA.....	79
5.1.8 Dimensionamento dos Disjuntores.....	83
5.1.8.1 Dimensionamento do Disjuntor CC.....	84
5.1.8.2 Dimensionamento do Disjuntor CA.....	84
5.2 Simulação no <i>Software PVSOL</i>.....	85
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	88
REFERÊNCIAS.....	89
APÊNDICE A.....	93
APÊNDICE B.....	96
ANEXO A.....	98
ANEXO B.....	100
ANEXO C.....	102

1. INTRODUÇÃO

Há, atualmente, um crescimento na procura por fontes sustentáveis de energia no que tange as mais diversas categorias de desenvolvimento. Isto se dá em razão à urgência da sociedade no que concerne a redução progressiva da utilização de fontes de energia não renováveis e que contaminam o meio ambiente (ACIOLI, 1994).

Tendo em consideração que as fontes não renováveis de energia são as mais usadas no mundo, a transição destas fontes para fontes renováveis se torna intrincada. Hodiernamente, no Brasil, a energia hidráulica representa a principal fonte de energia responsável por gerar eletricidade. Apesar de renovável, a energia hidroelétrica causa grande impacto ambiental. De acordo com Pereira (2006), pode haver considerável alagamento de lugares cultiváveis, que se dá por conta das usinas hidroelétricas. Nestas áreas alagadas, através da degradação anaeróbica da matéria orgânica, há a emissão de gases do efeito estufa, como o Metano (CH₄), por exemplo. Desta maneira, as fundamentais bacias hidrográficas do Brasil, que detém capacidade de geração hidroelétrica de alta intensidade encontram-se quase que exauridas.

Segundo Getirana *et al.* (2021), o Brasil encarou, em 2021, a terceira crise hídrica em menos de 23 anos, o que acende o alerta da necessidade de diversificar a matriz energética brasileira. A partir deste contexto, pode-se pensar acerca da geração de energia através de fontes distribuídas. Nesses moldes, a energia gerada é, majoritariamente sustentável e limpa, além de que os danos causados ao meio ambiente também são inferiores, possuindo um vasto potencial a diversificação da matriz energética - tanto no Brasil, como no mundo. Uma das fontes de energia renovável existentes é a solar fotovoltaica, que representa uma fonte de tecnologia sazonal, além de ser de fácil instalação e possuir linhas de crédito (REIS, 2017).

No ano de 2012, concebeu-se pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), uma resolução normativa de número 482, de 17/07/2012, que possui como objetivo a permissão do consumidor gerar sua própria energia elétrica através da energia solar, dentro de seu estabelecimento. Ainda nesta resolução, discorre-se sobre as condições gerais para acesso de microgeração e

minigeração distribuídas para os sistemas de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2012). A partir de tais informações, revela-se uma circunstância conveniente para o estudo da viabilidade técnica da implantação de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFVCR) que atenda todo o consumo da farmácia em questão.

1.1 Tema

O presente trabalho se debruça na análise de viabilidade técnica da implantação de um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFVCR), que se dá em uma farmácia localizada no município de Mamborê, mesorregião do Centro-Ocidental Paranaense.

Por conta da demanda energética da UC, do notável potencial de irradiação local e da área disponível na cobertura do estabelecimento, somados com o propósito de elevar a energia elétrica advinda de uma fonte renovável a matriz elétrica nacional, torna-se viável a análise da implantação.

Com essa finalidade, será utilizado o telhado da farmácia como área para instalação dos módulos fotovoltaicos, por se tratar do único espaço disponível junto ao consumo.

1.2 Problemas e premissas

Após a criação da lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, gerar a energia junto a carga se fez uma realidade possível para boa parte dos consumidores brasileiros. Alinhando este fato ao avanço tecnológico no âmbito de energia solar, participar da geração distribuída se tornou uma possibilidade vantajosa de diversas maneiras. Segundo o Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE), a geração de energia elétrica junto ao consumidor tem benefícios em relação a geração centralizada, visto que o investimento é muito menor e evita perdas oriundas da transmissão de energia.

É importante diversificar a matriz energética, pois a energia hidrelétrica que representa maior parte da energia da matriz brasileira é afetada em épocas de poucas chuvas e crises hídricas - como a de 2014 e a de 2021 - assim, a introdução de fontes renováveis, como é o caso da energia solar, se torna ainda

mais relevante. De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2022¹, publicado em 2023 (BEN), nota-se que a geração solar teve um grande salto, passando de menos de 0,1% do montante da matriz brasileira para 4,4% desta.

Ademais, outro fator determinante para o desenvolvimento deste trabalho é a questão ambiental. Em concordância com Oliveira (2017), os danos ambientais condizentes ao processo de geração de energia solar fotovoltaica são quase nulos, entretanto, existem impactos referentes ao processo de fabricação, visto que os módulos solares necessitam de vários recursos, bens e fases em sua manufatura. Deste modo, mesmo que a energia solar não cause impactos ambientais durante o processo de geração, não se trata de uma fonte 100% limpa, porque o processo de fabricação das placas envolve recursos e métodos que degradam o meio ambiente, mas ainda assim, é uma ótima alternativa em comparação com demais fontes não renováveis (PALZ, 1981).

Além disso, há muita desinformação acerca da energia solar, que se dá por conta da escassez em estudos aprofundados que expliquem de forma clara as vantagens de sustentabilidade, assim como, a valorização do imóvel e o rápido retorno de investimento financeiro referentes aos SFVCR. Consoante com Vaz (2017), pode-se dizer que outro ponto negativo a este tema, diz respeito às despesas relacionadas a instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, mesmo que se tenha reduzido consideravelmente na última década. A partir disso, pode-se dizer que tais fatores mencionados reforçam a importância de estudos como este, que envolvem a temática da energia solar fotovoltaica, a fim de instruir os benefícios desta, visto que se trata de uma área vasta e em ascensão.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste estudo é produzir uma investigação acerca de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em uma farmácia, de modo a integrar o sistema energético como microgeradora de energia. Desta forma a Unidade Consumidora adere a sustentabilidade que a energia solar fotovoltaica

¹ Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em 28 nov. 2023.

oferece, além de tornar-se mais independente do Sistema Interligado Nacional (SIN) reduzindo os impactos de reajustes tarifários.

1.3.1. Objetivos específicos

- Produzir uma investigação acerca de sistemas fotovoltaicos;
- Realizar a verificação da demanda energética da farmácia, além das especificidades do espaço físico disponível;
- Apurar informações sobre a irradiação solar na área de instalação do sistema;
- Investigar o perfil de consumo energético para dimensionar um sistema fotovoltaico qualificado para abater a totalidade do consumo de energia da UC em questão.

1.4. Justificativa

No que tange a justificativa da execução do presente trabalho, destaca-se o crescente aumento de sistemas solares fotovoltaicos adotados na geração distribuída nacional e internacionalmente. Com tal progresso, houve também amplificação dos serviços para profissionais deste campo de atuação, principalmente os engenheiros eletricitas, que são incumbidos pelos projetos e pela execução de plantas dos sistemas solares.

Outro ponto importante é que a energia solar fotovoltaica simboliza uma fonte de energia renovável, gerada através de um processo limpo, que não emite gases poluentes no meio ambiente, possuindo, então, um baixo impacto ambiental, diferentemente das principais fontes de energia utilizadas em grande parte do mundo.

A exploração dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede para o atendimento de usuários, junto do fornecimento de energia elétrica de companhias distribuidoras é pequena no Brasil. Tal fato torna este trabalho muito relevante no que concerne ao progresso de estudos acerca dessa fonte de geração de energia renovável.

Para desenvolver este projeto, serão necessários a realização da explanação teórica de fundamentos e conceitos que perpassam projetos de

sistemas solares fotovoltaicos, além de demonstrar um planejamento de sistema, a fim de que a estruturação seja efetiva e eficiente.

O trabalho abrange as etapas da investigação referente ao sombreamento da área disponível, assim como o estudo acerca do consumo da farmácia, o dimensionamento dos equipamentos do sistema e a simulação da geração de energia.

1.5 Procedimentos Metodológicos

O primeiro passo para realização desta pesquisa foi desenvolver o referencial teórico, que possui início a partir do conceito de efeito fotovoltaico, fator responsável pela geração de energia por meio da irradiação da luz solar. Além disso, o referencial teórico também se concentra nos elementos de um sistema fotovoltaico, nas classificações destes e na legislação em vigor. A bibliografia utilizada para tal refere-se à artigos, livros, sites de fabricantes, datasheet's de produtos, revistas científicas, internet e notas adquiridas a partir da sala de aula.

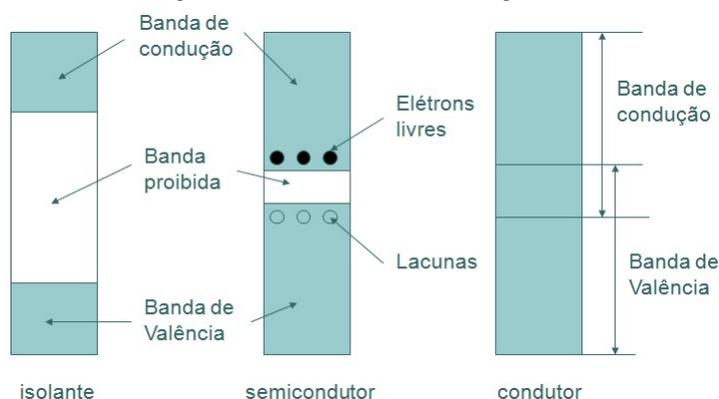
A investigação foi conduzida a partir do levantamento do perfil energético do consumidor, sendo realizado o ensaio do consumo da farmácia através do faturamento mensal fornecido pela fatura de energia da concessionária. Foi estudada, também, a irradiação solar do local por meio do banco de dados do CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito - para a latitude e longitude do espaço. Por fim, o estudo da irradiação solar e do sombreamento na área disponível para instalação foi crucial para o alojamento dos módulos fotovoltaicos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A vida na Terra é totalmente dependente do Sol, a estrela no centro do Sistema Solar, o qual o nosso planeta orbita. Devido a força da gravidade no centro do Sol, cerca de 10 mil vezes maior que no centro da Terra, ocorre a fusão nuclear de átomos de hidrogênio devido a estarem fortemente comprimidos, onde a cada quatro átomos de hidrogênio forma-se um átomo de hélio, entretanto se analisarmos a massa de quatro átomos de hidrogênio e um de hélio nota-se que o quarteto de hidrogênio é 0,7% maior que a massa de hélio, esses 0,7% que sobram do processo de fusão é o que se transforma em radiação. A radiação solar é composta por ondas eletromagnéticas que contém comprimento de onda entre 0,22 e 3 μm .

A conversão da energia solar em energia elétrica é realizada através do efeito fotovoltaico observado por Edmond Becquerel em 1839, onde ele percebeu a existência de uma diferença de potencial nas extremidades de uma estrutura semicondutora, quando incidida uma luz sobre ela (NASCIMENTO, 2015). De maneira simplificada, o efeito fotovoltaico é o surgimento de uma tensão elétrica em um material semicondutor, quando este é exposto à luz visível. Para compreender o funcionamento de uma célula fotovoltaica é preciso entender o funcionamento dos materiais classificados como semicondutores e suas bandas de energia. Existem 3 bandas, a banda de valência, a banda de condução e a banda proibida ou gap e a partir do nível do gap, é possível classificar os materiais como isolantes condutores ou semicondutores.

Figura 1 - Classificação dos materiais em relação ao GAP de energia



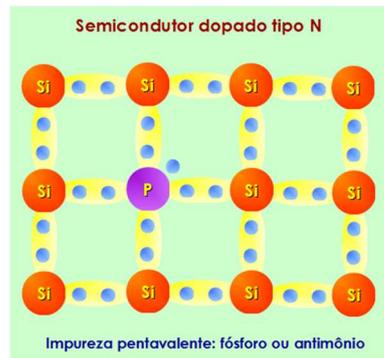
Fonte: Disponível em: <https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA_2_-_Eletr%C3%B4nica_Geral_1_-_T%C3%A9cnico>. Acesso em 15 set. 2023.

Os materiais classificados como semicondutores, os quais, em temperaturas muito baixas, possuem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução totalmente vazia. A barreira entre as duas bandas de condução nos semicondutores é na ordem de 1eV (um elétron Volt), um material com vários eVs é classificado como isolante. Uma característica importante nos materiais semicondutores é, quando sua temperatura é elevada sua condutividade também aumenta, isso ocorre devido à excitação térmica de portadores da banda de valência para banda de condução. Um atributo indispensável para uma célula fotovoltaica, é a possibilidade de fótons, que contêm energia superior ao gap do material, excitam os elétrons para a banda de condução, entretanto apenas movimentar esses elétrons não é praticável, para tornar esse efeito útil, é necessário de alguma forma coletar esses elétrons e com eles gerar corrente útil, para tal é necessária uma estrutura apropriada. O fóton é uma partícula elementar que compõe a luz, possui massa nula e transporta energia.

2.1 Célula Fotovoltaica

Estruturas apropriadas para conversão de energia solar em energia elétrica, são as chamadas células fotovoltaicas, utilizando como semicondutor o silício (Si). O átomo de silício contém 14 prótons, 14 neutros e 14 elétrons, sendo 4 elétrons de ligação na camada de valência, chamado de tetravalente, que quando conectado a seus vizinhos, forma uma rede cristalina tetravalente. Ao incorporar um átomo diferente, com 5 elétrons na camada de valência, pentavalente, um elétron ficará de fora da ligação e não formará uma ligação covalente, este elétron sobrando fica fracamente ligado apenas ao átomo de origem e com pouca energia térmica é possível arrancar esse elétron que está sobrando, movendo-o para a banda de condução, denomina-se ao elemento pentavalente como dopante n ou impureza n , também conhecido como elemento dopante doador de elétrons. Os elementos doadores mais comuns são arsênio (As), fósforo (P) e antimônio (Sb).

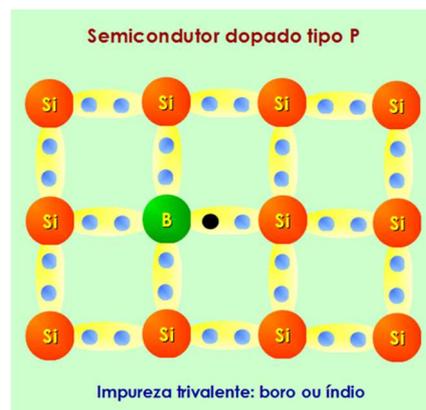
Figura 2 - Inserção de um átomo doador em uma rede cristalina de silício



Fonte: Disponível em: <https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA_2_-_Eletr%C3%B4nica_Geral_1_-_T%C3%A9cnico>. Acesso em 15 set. 2023.

Utilizando a mesma ideia da dopagem *n*, ainda utilizando o silício com uma rede tetravalente, mas agora incorporando um material com 3 elétrons na camada de valência, um material trivalente, o que ocorre é a falta de um elétron para satisfazer as ligações covalentes, essa falta de elétron é chamada de lacuna ou buraco e com pouca energia é possível que um elétron de um átomo vizinho ocupe essa posição vazia, fazendo com que o buraco se desloque. Denomina-se ao elemento trivalente como dopante *p*, também conhecido como elemento dopante receptor ou aceitador de elétrons. Os elementos receptores mais comuns são Boro (B), Gálio (Ga), e Índio (In).

Figura 3 - Inserção de um átomo doador em uma rede cristalina de silício

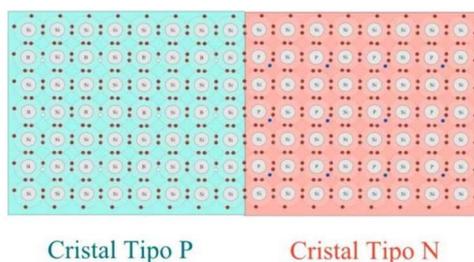


Fonte: Retirado de IF-S, “Eletrônica Geral I”, OLIVEIRA, T. R. (2013)

Se colocados a temperatura ambiente, existe energia térmica suficiente para que os elétrons em excesso dos átomos do material dopante *n* estejam livres, e as lacunas dos átomos do material dopante *p* possam se deslocar.

Elementos do tipo p ou do tipo n , isoladamente não apresentam grandes aplicações, mas se introduzidos juntos a um material, metade do material com dopagem n , e a outra metade com dopagem p , será formado o que se chama de *junção pn* , que é amplamente utilizada em diodos e transistores, a base da eletrônica.

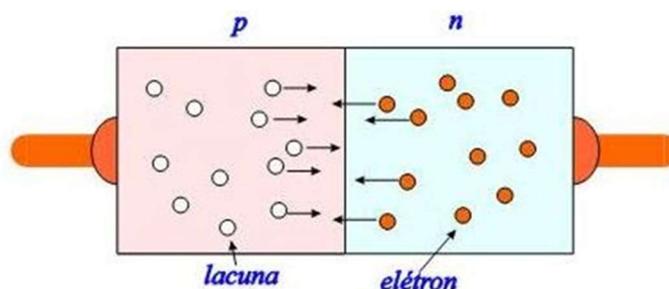
Figura 4 - União de cristais p e n



Fonte: Disponível em: <https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA_2_-_Eletr%C3%B4nica_Geral_1_-_T%C3%A9cnico>. Acesso em 15 set. 2023.

Assim que a junção pn é formada, ocorre um fenômeno chamado de difusão, no qual os elétrons livres do lado n passam para o lado p onde são capturados pelas lacunas, com isso haverá um acúmulo de elétrons na parte p , que ficará negativamente carregado e uma redução nos elétrons do lado n , o que o torna positivamente carregado as cargas. Estas cargas aprisionadas geram um campo elétrico no ponto de junção, o qual opõe-se a passagem de elétrons, de n para p , quando esse campo elétrico é forte o suficiente para impedir qualquer elétron no lado n , diz-se que se criou uma região de depleção, ou camada de depleção.

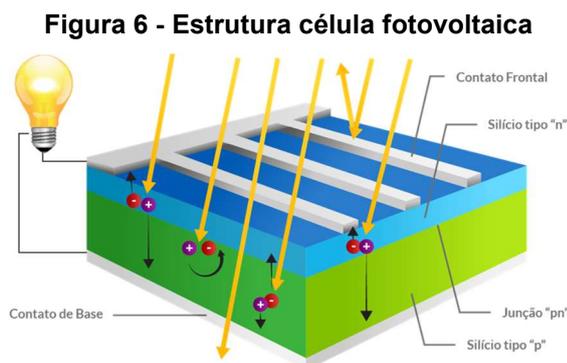
Figura 5 - Junção pn



Fonte: Retirado de IF-S, "Eletrônica Geral I", OLIVEIRA, T. R. (2013)

Quando uma junção pn , como a figura acima, é exposta a luz, onde os fótons possuem energia maior que o gap do material, ocorrerá a geração de

pares elétron-lacuna, se ocorrer onde o campo elétrico é diferente de zero, os elétrons são acelerados, gerando uma corrente elétrica através da junção, essa corrente gera uma diferença de potencial, a qual recebe o nome de efeito fotovoltaico (Eliana Fadigas, Energia Solar Fotovoltaica), agora, basta uma estrutura para direcionar de forma adequada essa tensão para as mais diversas aplicações. Como no exemplo abaixo, usada para alimentar uma lâmpada.

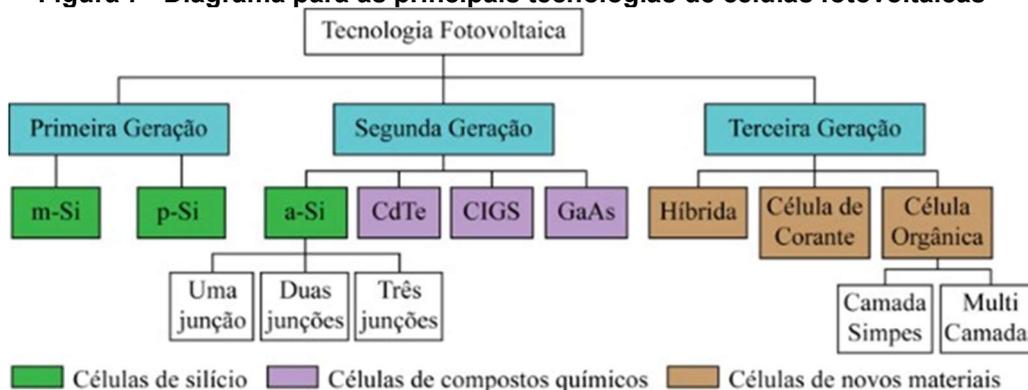


Fonte: *Blog Bluesol* (2022)

2.2 Métodos construtivos

Como a parcela de energia contida nos raios solares estão na faixa visível do espectro, entre 400 e 700nm, é razoável considerar os semicondutores mais sensíveis a luz solar como os mais apropriados para a conversão de luz solar em energia elétrica, geralmente, o material passa por um processo de purificação (alinhamento de moléculas), e então por um processo de dopagem, que com o avanço da tecnologia tornaram-se cada vez mais eficientes e, quanto mais refinado o processo, mais caro se torna o produto final, fazendo com que este seja mais eficaz, porém, menos viável economicamente. As células fotovoltaicas podem ser classificadas em 3 categorias, baseadas no material que são construídas e também podem ser separadas por gerações.

Figura 7 - Diagrama para as principais tecnologias de células fotovoltaicas



Fonte: Disponível em: <https://eletronicadepotencia.com/celula-fotovoltaica/#google_vignette>.

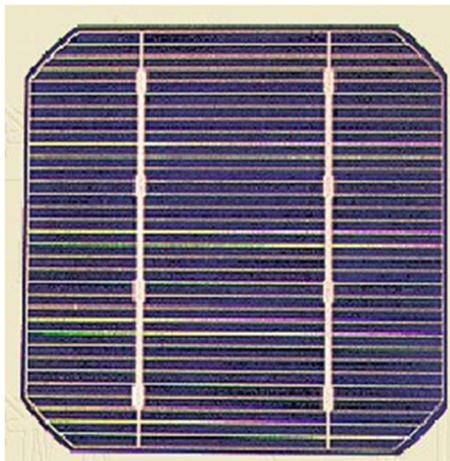
Acesso em 23 ago. 2023.

2.3 Tipos de célula

2.3.1 Primeira geração

Silício monocristalino (m-Si): A mais antiga e que possui eficiência mais alta. Esse material também é utilizado na fabricação de circuitos integrados, para a fabricação, é geralmente utilizado o método Czochralski, um processo de cultura de cristais que consiste em derreter o silício em um forno a fim de criar uma única peça, as células são formadas a partir de um monocristal de silício que é fatiado, formando várias lâminas com espessura de aproximadamente 0.3mm. O limite teórico da conversão de energia para esta célula é de 27%, atualmente no mercado encontra-se uma média de eficiência entre 15% e 22%, é uma tecnologia economicamente viável e possui vida útil em torno de 30 anos, durante o processo de fabricação uma quantidade de material não é aproveitado, necessitando ser reciclado. Abaixo uma foto de um painel solar composto por várias células fotovoltaicas que estão interligadas em série e paralelo:

Figura 8 - Célula silício monocristalino



Fonte: Retirado de FADIGAS, A. [s.d]

2.3.2 Segunda geração

A segunda geração, também chamada de tecnologia de filme fino, se caracteriza por utilizar células com espessura na ordem de micrômetros, algumas vezes menor que $1\ \mu\text{m}$. Sua manufatura é basicamente o depósito de uma ou mais camadas fotossensíveis em outra superfície, nomeada de substrato, podendo ser rígida como vidro ou flexível como o plástico, o que aumenta a maleabilidade, podendo ser moldada em superfícies e possuem uma menor eficiência se comparada com as outras. As células de filme fino são classificadas em duas categorias, baseada no material de sua composição, sendo elas: filme fino à base de silício e não baseado em silício.

Figura 9 - Módulos fotovoltaicos flexíveis e célula de filme fino flexível



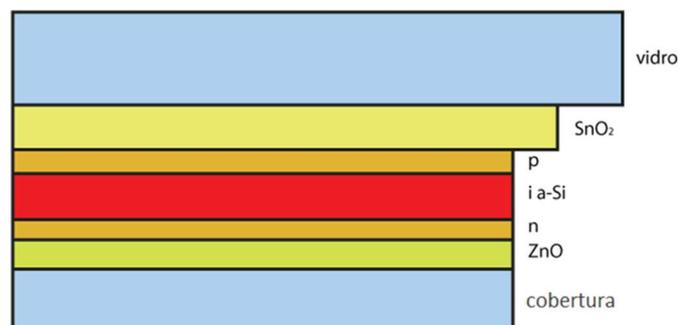
Fonte: Disponível em: <https://eletronica depotencia.com/celula-fotovoltaica/#google_vignette>.

Acesso em 23 ago. 2023.

Silício amorfo (a-Si) - Chamar um material de amorfo significa dizer que este não tem forma ordenada ou estrutura cristalina, e sim uma rede irregular.

Teve sua primeira aplicação em pequenas escalas como calculadoras de bolso. Por conta do avanço das tecnologias na fabricação, várias células podem ser combinadas, o que aumenta a eficiência. Em razão de não possuir uniformidade na estrutura cristalina, surgem ligações livres que absorvem hidrogênio, e devido a possuir uma estrutura extremamente fina, os processos de dopagem p e n possuem baixa efetividade, pois os elétrons e lacunas não sobrevivem por tempo necessário para gerar uma corrente elétrica. Assim, para contornar esse problema, uma camada de silício amorfo hidrogenado é colocada entre as camadas, garantindo que as cargas durem mais tempo. Para os contatos geralmente são utilizados óxido de estanho (SnO), óxido de estanho e índio (ITO) ou óxido de Zinco.

Figura 10 - Representação da forma construtiva de uma célula de silício amorfo



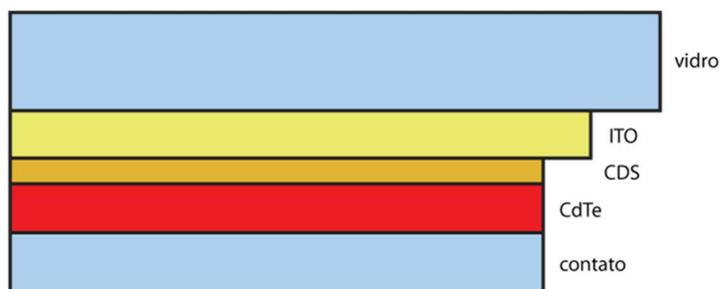
Fonte: *Bluesol* (2022)

Na figura são mostrados os materiais depositados na parte frontal do vidro, formando uma estrutura $p-i-n$, mas se forem depositados na ordem contrária $n-i-p$ permite que os módulos criados sejam flexíveis, podendo ser moldados a diferentes superfícies irregulares.

Telureto de Cádmio (CdTe) - É a única do tipo filme fino que superou o custo/eficiência de painéis de silício cristalino, chegando a eficiência de em média 9 a 16%, são fabricadas em um substrato de vidro com uma camada de óxido de estanho e índio (ITO), é utilizado uma camada de sulfeto de cádmio (CdS) como condutor tipo n e uma camada de telureto de cádmio (CdTe), sendo usadas geralmente em grandes usinas de energia solar, dentre as tecnologias de filme fino, é a que mais possui participação no mercado, e assim como as CIGS, não degradam com a ação da luz solar. O grande empecilho na sua fabricação é o fato de o cádmio ser tóxico, ao passo que o telureto de cádmio é tóxico apenas

durante o processo de fabricação, o que necessita de controle rigoroso durante sua manufatura.

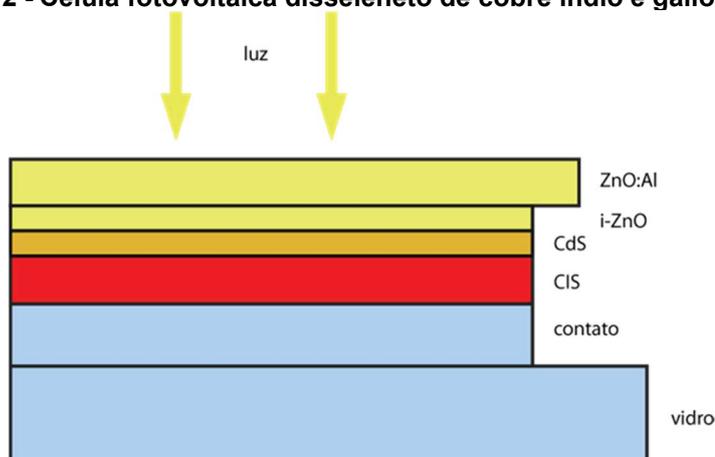
Figura 11 - Representação da célula fotovoltaica de telureto de cádmio (CdTe)



Fonte: *Bluesol* (2022)

Seneleto de cobre Índio e Gálio (CIGS) - Em sua fabricação, é utilizado um processo de pulverização catódica, em que o substrato de vidro é revestido com uma camada de molibdênio, para a camada do tipo p pode ser obtida pela pulverização de cobre, índio, gálio e selênio e depois aquecidos, ou pela vaporização em uma câmara de vácuo destes elementos. Seus contatos são feitos de óxido de zinco para o tipo n e entre os semicondutores p e n é introduzida uma camada de óxido de zinco intrínseco junto com uma camada de sulfeto de cádmio. As células CIGS chegam a atingir 23,4% de eficiência, contudo sua fabricação é limitada devido a utilização do índio, que é um material raro de se obter, o que torna o custo de fabricação elevado em larga escala.

Figura 12 - Célula fotovoltaica disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS)



Fonte: *Bluesol* (2022)

Arseneto de Gálio (GaAs) - O arseneto de gálio possui uma estrutura semelhante ao silício, detém de alto custo de fabricação, sua aplicação está voltada para estruturas que estão fora da terra, em satélites de exploração do sistema solar, por exemplo, sua eficiência em laboratório é de aproximadamente 28%.

2.3.3 Terceira geração

A terceira geração abrange as mais recentes tecnologias, em sua maioria ainda não ativas comercialmente, são resultados de pesquisas e desenvolvimento no setor, com o objetivo de alcançar o máximo rendimento com o menor esforço, tamanho e impactos possíveis.

Célula híbrida (HJT) - Utiliza uma tecnologia chamada heterojunção, são compostos por silício cristalizado e passivação com uma ou mais camadas de uma película fina de silício amorfo, com isso, são capazes de produzir mais energia por metro quadrado, pois empregam mais de um semiconductor com gaps de energia diferentes, o que permite aproveitar um amplo espectro de radiação solar, aumentando sua eficiência, chegando em alguns valores em laboratórios de 46% de eficiência, no entanto devido a utilização de mais de uma tecnologia, seu custo é elevado.

Célula orgânica (OPV) - Surgiram em 1991, apresentadas pelo professor Michael Gratzel, as células que também são chamadas de células Gratzel e utilizam a eletrônica orgânica. Basicamente, essas células são utilizadas para absorção de energia e transporte de carga, semelhante ao processo de fotossíntese, porém possuem uma grande instabilidade em relação a captação de elétrons liberados pelo efeito fotovoltaico, tendo uma grande variação em sua eficiência.

2.4 Inversores fotovoltaicos

O inversor fotovoltaico ou inversor solar é usado em uma instalação fotovoltaica pois a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos se apresenta na forma de corrente contínua (CC), entretanto o padrão adotado pelas instalações elétricas residenciais, industriais e comerciais é na forma de corrente alternada

(CA), para isso é necessário fazer a conversão de CC para CA com uma frequência fixa de 60 Hz (GATI *et al.* 2019).

De acordo com Pinto Neto (2012), os inversores são dispositivos capazes de converter corrente contínua em corrente alternada e vice-versa. Assim, esses equipamentos são adequados para lidar tanto com cargas lineares quanto não lineares. Entre suas principais aplicações, destacam-se o controle de máquinas elétricas de corrente alternada, sistemas de nobreak, aparelhos de transformação de corrente contínua provenientes de fontes renováveis como aerogeradores, biocombustíveis (hidrogênio) e painéis fotovoltaicos.

Os inversores podem ser classificados de duas formas, em relação a sua característica de saída, são elas:

- Inversores de tensão;
- Inversores de corrente;

Os inversores podem operar tanto como fontes de tensão quanto como fontes de corrente. É mais comum encontrarmos inversores com características de fonte de tensão, pois eles podem ser deixados com os terminais abertos, semelhante às tomadas de uso geral. Essa capacidade permite utilizar a energia para suprir a ausência da rede elétrica, podendo ser modelada como uma fonte de tensão alternada.

Em relação ao número de fases dos equipamentos:

- Monofásicos;
- Trifásicos;
- Polifásicos.

No contexto do número de fases, devido ao sistema de distribuição predominante no Brasil, estamos familiarizados com sistemas monofásicos, bifásicos e trifásicos. Contudo, em sistemas de geração autônoma, é comum utilizar um maior número de fases. A utilização de múltiplas fases visa otimizar a distribuição da potência da carga, trazendo vantagens significativas no dimensionamento de cabos e condutores.

Quanto ao tipo de modulação:

- Sem modulação;
- Modulação por histerese;
- Modulação PWM senoidal (2 e 3 níveis);
- Modulação Vetorial;

Entre os métodos de modulação de inversores, o mais simples é a aplicação sem modulação, que envolve apenas uma lógica adequada de controle dos transistores. No entanto, a tensão gerada na saída é alternada, porém retangular, o que não é adequado para alimentar todos os tipos de cargas. Para obter uma forma de onda senoidal na saída, é necessário aplicar outros métodos de modulação, como a modulação por histerese, por exemplo. No entanto, esse método pode fazer o inversor operar com frequência variável, o que não é ideal do ponto de vista do projeto de componentes magnéticos e capacitivos. Em geral, os métodos mais aplicados são a modulação PWM senoidal e a modulação vetorial. Essas técnicas permitem gerar tensões alternadas senoidais na saída, enquanto o inversor opera com comutação fixa ou período constante.

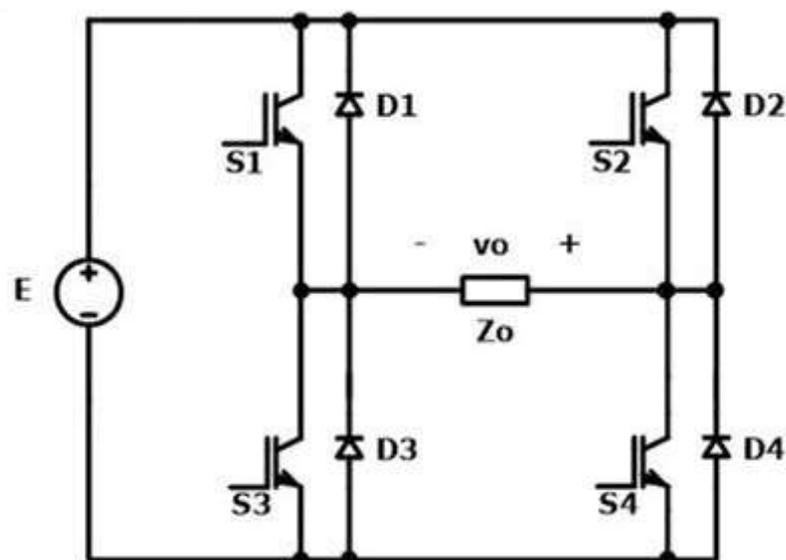
Especificamente, nas aplicações em sistemas fotovoltaicos, os inversores, quanto ao modo de comutação, podem ser classificados como auto comutados ou comutados pela rede, para sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR). Nos comutados pela rede, como o nome sugere, o seu chaveamento é realizado pela própria rede. Apesar de parecer uma opção atrativa, em virtude de utilizar a própria rede para a comutação de seus transistores e tendo um custo e projeto mais simples, devido ao fato de haver grande quantidade de harmônicos na linha de rede, este requer o uso de filtros de saída complexos, o que implica, conseqüentemente, em perdas. Também necessita de correção de fator de potência, com a utilização de tecnologias de chaveamento mais eficientes, sua aplicação é reduzida e restrita a potências acima de 100kW e *drivers* de motores de grande porte.

Já os inversores auto comutados podem ser do tipo fonte de corrente (*CSI-current source inverter*) ou fonte de tensão (*VSI-voltage source inverter*). Na configuração fonte de tensão, a mais empregada em sistemas de conversão fotovoltaica, o controle pode ser feito tanto por tensão quanto pela corrente, dependendo da grandeza de saída utilizada como referência. Devido a sua estabilidade diante de perturbações na rede e à facilidade no controle do fator de potência, o controle pela corrente é adotado na maioria dos modelos para SFVCRs, enquanto o controle por tensão é utilizado principalmente em inversores para SFIs (PINHO; GALDINO, 2014).

2.5 Princípio de funcionamento de um conversor CC-CA

Existem diferentes topologias para inversores, as mais comuns são meia ponte, push-pull e ponte completa. Na figura abaixo é mostrado um inversor com topologia ponte completa, utilizado na grande maioria das aplicações, já que pode operar em potências mais elevadas e tem um princípio de funcionamento relativamente simples.

Figura 13 - Inversor de ponte completa



Fonte: Retirada da disciplina de *Eletrônica de potência II*, ILLA FONT, C. (2019)

Essa topologia emprega dois braços de transistores, ou seja, quatro transistores e um único barramento CC, necessitando vários *gate drivers* de acionamentos isolados; existe também a possibilidade de empregar a carga de

forma isolada, porém será em baixa frequência, logo, a densidade volumétrica de potência será baixa devido ao grande volume do transformador.

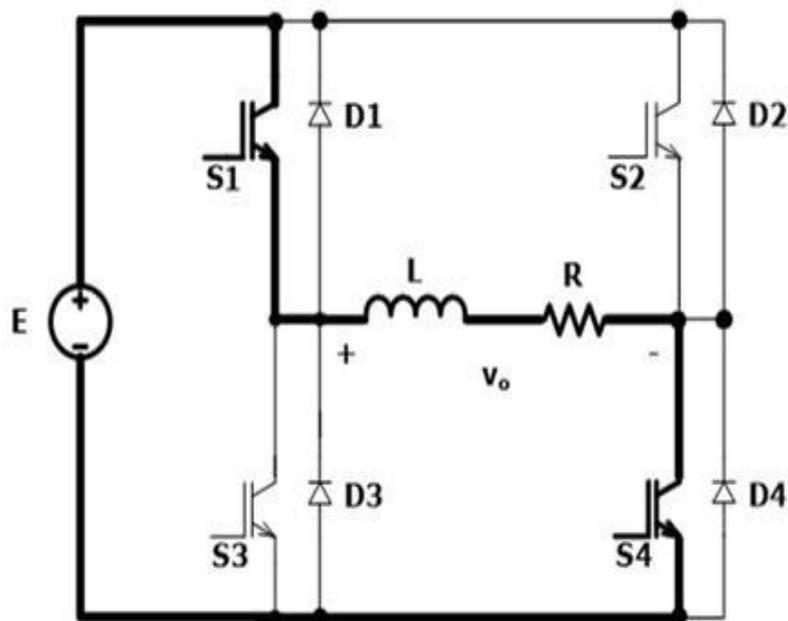
2.5.1 Etapas de operação (carga RL)

Operação com carga RL está muito próxima das aplicações práticas, como por exemplo o acionamento de um motor de indução. O estator do motor pode ser modelado matematicamente como um circuito RL, com resistência pequena e indutância elevada, então quando temos uma carga resistiva-indutiva, vê-se quatro estágios de operação, sendo dois para cada semiciclo da tensão alternada gerada na saída. Em cada semiciclo, haverá uma etapa de transferência de energia e uma de roda livre, causada pelo indutor. O processo de análise de circuito com carga puramente resistiva é bastante similar, porém com apenas duas das etapas.

- 1ª ETAPA DE OPERAÇÃO

A figura abaixo mostra uma representação esquemática de como o circuito se comporta. Esta análise também pode ser estendida para a análise com carga resistiva.

Figura 14 - Representação do circuito equivalente para a 1ª etapa de operação



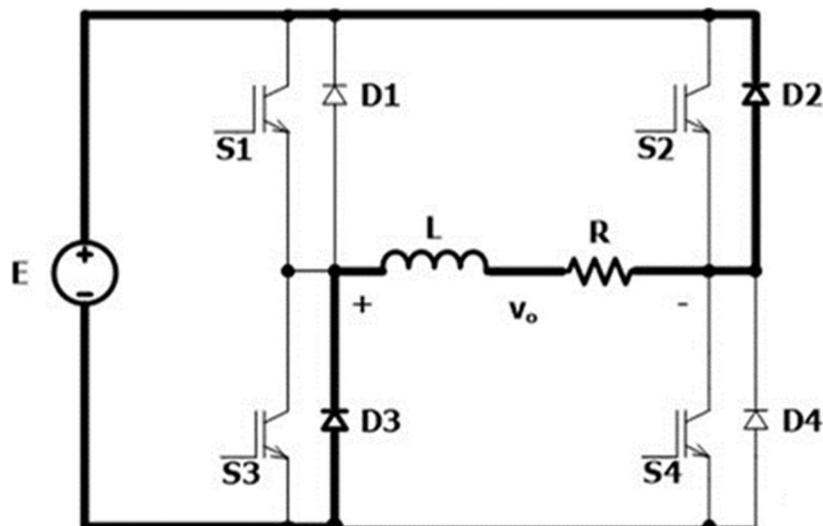
Fonte: Retirada da disciplina de *Eletrônica de potência II*, ILLA FONT, C. (2019)

Esta etapa ocorre quando é comandado aos transistores S1 e S4 conduzirem, no exato momento é estabelecido a malha que está apresentada em negrito, assim, observa-se que a tensão V_0 que está sobre a carga é igual a tensão de entrada E . Quando aplicada uma tensão nesta carga, se entrega energia para o indutor e a corrente cresce desde 0 até um valor máximo, nesse período ocorre a transferência de energia da fonte E para a carga RL .

- 2ª ETAPA DE OPERAÇÃO

A segunda etapa acontece quando são bloqueados os transistores S1 e S2. Esta é uma etapa de roda livre.

Figura 15 - Representação do circuito equivalente para a 2ª etapa de operação



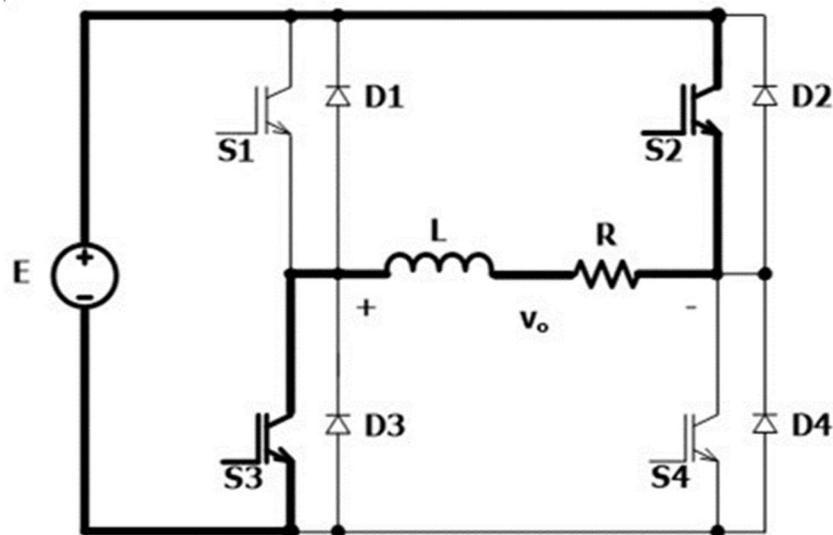
Fonte: Retirada da disciplina de *Eletrônica de potência II*, ILLA FONT, C. (2019)

Nesta fase, é colocado o pulso de comando em S2 e S3, mas eles não irão imediatamente conduzir, afinal, não há circulação de corrente por eles. Note a malha estabelecida representada em negrito na figura acima. Os diodos D2 e D3 irão entrar em condução porque agora V_0 é igual a $-E$, então, o indutor pelo seu princípio de inércia vai manter a quantidade de corrente e devolver sua energia para a fonte pelos diodos D2 e D3, sendo que a corrente começa a decrescer de forma exponencial desde um valor máximo até 0 A. Quando a

corrente no indutor chega a 0 A significa que os diodos D2 e D3 chegam a 0V também, dando início a terceira etapa.

- 3ª ETAPA DE OPERAÇÃO

Figura 16 - Representação do circuito equivalente para a 3ª etapa de operação



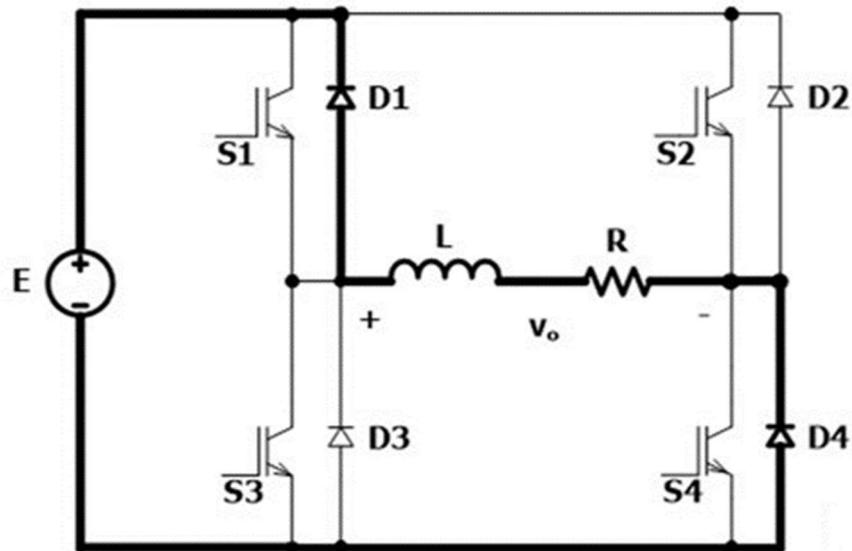
Fonte: Retirada da disciplina de *Eletrônica de potência II*, ILLA FONT, C. (2019)

Aqui, V_0 continua sendo $-E$ e agora, como S2 e S3 já detinham um pulso de comando, esses transistores assumem a corrente e o sistema volta a transferir energia para a carga RL por S2 e S3 estabelecidos pela malha da figura acima, a corrente no indutor irá decrescer desde 0 até um valor máximo negativo, caracterizando como o semiciclo negativo da tensão.

- 4ª ETAPA DE OPERAÇÃO

Por último, após o comando para S2 e S3 bloquear, se dá início a quarta etapa de operação como mostrado na figura abaixo:

Figura 17 - Representação do circuito equivalente para a 4ª etapa de operação

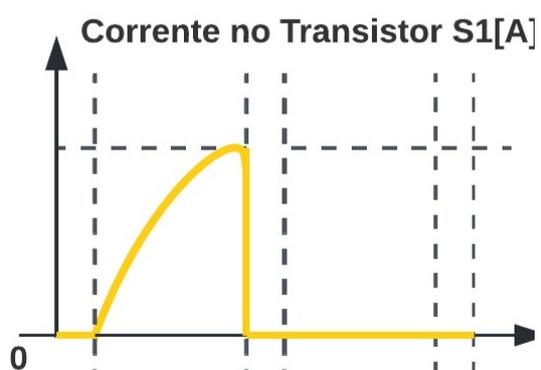
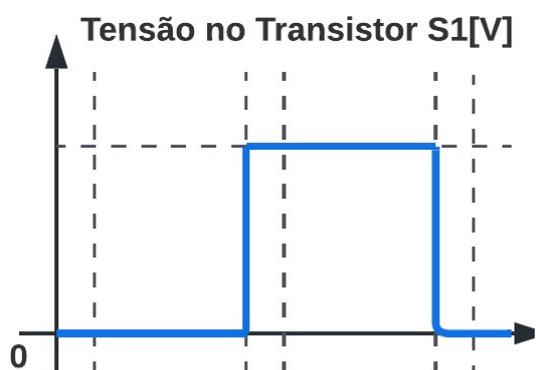


Fonte: Retirada da disciplina de *Eletrônica de potência II*, ILLA FONT, C. (2019)

Observando o sentido da corrente da etapa anterior, agora D1 e D4 entram em condução e a energia armazenada no indutor é transferida para a fonte E. Neste momento, V_0 é igual a E novamente, a corrente no indutor volta a crescer desde um máximo negativo até 0, quando essa corrente é igual a 0 A, os diodos bloqueiam, então retorna-se para a primeira etapa de operação iniciando um novo ciclo de operação

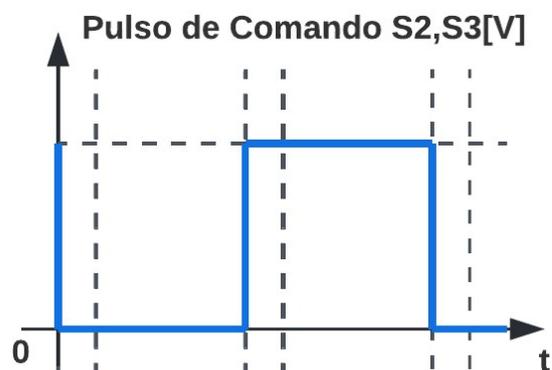
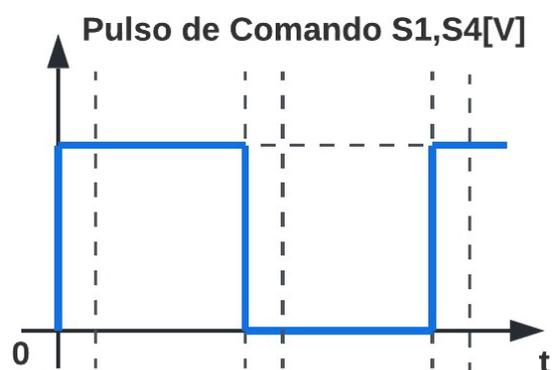
Nas figuras 19 a 21, podemos observar as formas de ondas de calor. A partir delas se vê: a tensão no transistor, corrente no transistor (presentes na Figura 18) e pulso de comando S1 e S4[V], S2 e S3[V] (presentes na Figura 19).

Figura 18 - Principais formas de onda



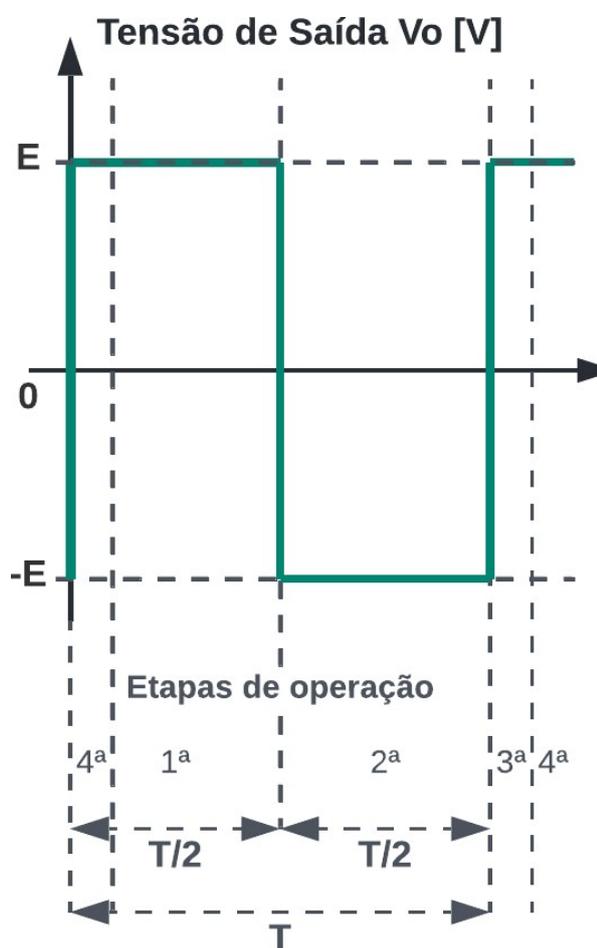
Fonte: autoria própria (2022)

Figura 19 - Principais formas de onda



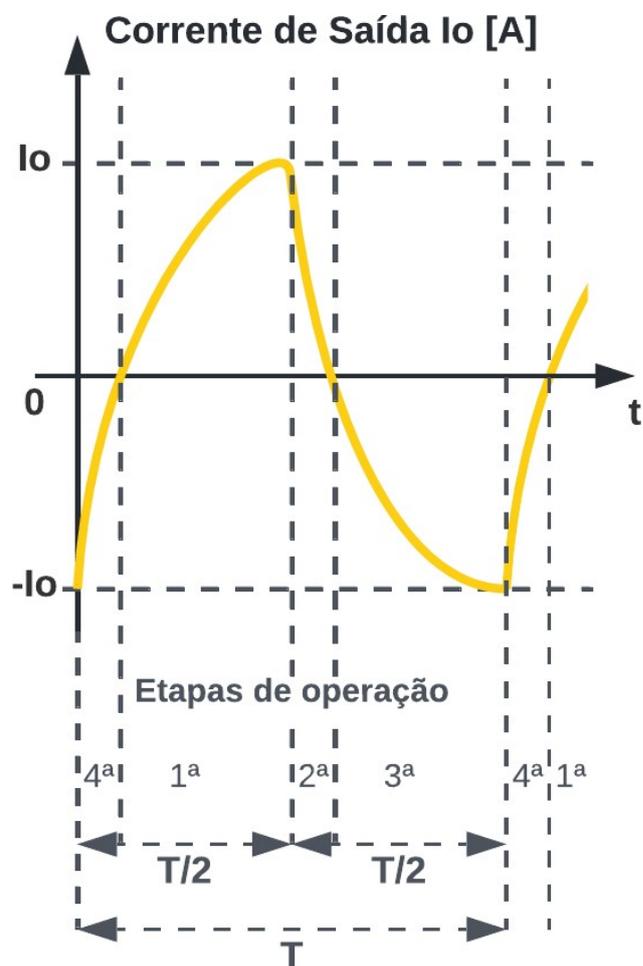
Fonte: autoria própria (2022)

Figura 20 - Principais formas de onda



Fonte: autoria própria (2022)

Figura 21 - Principais formas de onda



Fonte: autoria própria (2022)

Cada transistor irá receber um pulso de comando que tem a duração de metade do período, de modo que $T = 1/f$ com f sendo 60 [Hz]. A forma de onda gerada na carga é uma tensão retangular com valores E e $-E$. Na forma de onda da corrente, pode-se observar as etapas de operação do conversor no instante em que a forma de onda é zero, assim, iniciada a primeira etapa de operação, onde S1 e S4 já receberam comando para conduzir, logo, entram em operação, analisando as ondas anteriores observa-se tensão e corrente positivas, portanto é uma etapa de transferência de energia.

A segunda etapa tem início quando os transistores S1 e S4 deixam de conduzir, ao mesmo tempo em que S3 e S4 recebem o comando para conduzir, não entrando em operação imediatamente. Por um período de tempo, a corrente será conduzida por D1 e D4 de forma decrescente, então essa é uma etapa de roda livre, onde há a transferência de energia entre o indutor e a fonte. Quando a corrente chega a 0, os diodos bloqueiam e dão início à terceira etapa, como S2 e S3 já estavam com o pulso de comando habilitado para conduzir, entram em operação e passam a conduzir essa corrente que decresce desde 0 até um valor máximo negativo. Na quarta etapa, os transistores S2 e S3 deixam de conduzir, ao mesmo tempo em que S1 e S4 irão receber o comando para conduzir, mas não irão entrar em operação instantaneamente, por um período de tempo a corrente será conduzida por D2 e D3 de maneira crescente.

Essa é uma etapa de roda livre, na qual há a transferência de energia entre o indutor e a fonte, quando a corrente chega a 0 A os diodos bloqueiam e dão início ao primeiro estágio novamente. Analisando a corrente e tensão no transistor S1, na quarta etapa, mesmo o transistor com pulso de comando para conduzir, a sua tensão em seus terminais é igual a 0 V e a corrente também é igual a 0 A, pois quem está conduzindo são os diodos em antiparalelo. Para a primeira etapa, a corrente nos diodos D1 e D4 chega a 0 A, assim passa a circular pelo transistor S1 e pela carga. No início da segunda e terceira etapa o transistor deixa de conduzir, de modo que a corrente vai a 0 A e a tensão em seus terminais é a tensão da fonte, uma característica do inversor de ponte completa em si, por conta disso a necessidade de dimensionar esses transistores de acordo com a tensão máxima da fonte.

2.5.2 Operação em baixa frequência

Para a operação em baixa frequência, consideram-se os transistores do inversor comutado em baixa frequência, ou seja, na mesma frequência da tensão gerada, então nesse caso, quando se fala em operação em baixa frequência, não estamos considerando um processo de modulação, mas sim uma lógica de comando dos transistores sem um processo de modulação.

Se os transistores se comutam em alta frequência, a tensão gerada na saída é alternada, com formato retangular e valor eficaz constante de alta frequência; como as cargas do dia a dia são alimentadas em 60Hz, é apenas utilizada em casos muito específicos. Nos inversores comutados em baixa frequência de onda retangular existem dois princípios de operação: o primeiro é fazer a operação complementar dos transistores, quando S1 é mandado a conduzir, S2 é mandado a bloquear, evitando assim o curto-circuito de braço, que é um curto-circuito na fonte, já o segundo é certificar a igualdade nos tempos de condução dos transistores, em que S1 é comandado a conduzir durante meio período assim como S2, que é metade do período da forma de onda da saída, com isto evita-se o aparecimento de componente média (componente CC) na tensão alternada de saída, garantindo que o pico de tensão positivo seja igual ao pico de tensão negativo, assegurando uma simetria em relação ao eixo x, portanto, o valor médio sendo igual a 0.

2.5.3 Operação em alta frequência

Como visto anteriormente, se operado em baixas frequências, o conversor irá gerar uma tensão retangular na saída, o que não é apropriado para a maioria das cargas do dia a dia, para gerar uma tensão senoidal na saída, que é a forma adequada para o uso residencial, comercial e industrial. Deste modo, se faz necessário que os transistores sejam comutados em alta frequência, mesmo que a tensão alternada gerada na saída possua baixa frequência, para garantir isso é empregado um processo de modulação, sendo a mais comum a modulação PWM (Pulse Width Modulation-Modulação por Largura de Pulso), o que permite um valor de tensão eficaz ajustável, a partir de um valor de referência.

Ao se aplicar um processo de modulação em um conversor, é necessário inserir um filtro na saída, em geral um filtro passa-baixa, para que ele elimine as

componentes de alta frequência da modulação e deixe apenas a componente da baixa frequência, que é a componente senoidal, comumente em 60Hz.

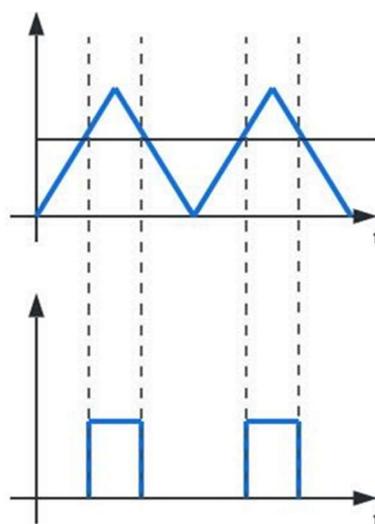
2.6 Modulação PWM

Quando se trata de sinais digitais, estes estão ligados ou desligados, geralmente chamado de nível lógico alto ou nível lógico baixo, *on/off* ou ainda simplesmente 1 ou 0 respectivamente. A modulação por largura de pulso ou PWM (*pulse width modulation*) é um sinal digital, *on/off* que pulsa para cima e para baixo em diferentes taxas de frequências e *duty cycle* (razão cíclica).

Taxa de frequência é uma medida de quantas vezes o pulso se repete, no sistema internacional de unidades e é expresso em Hertz [Hz] ou também pode ser expresso por ciclo por segundo, *duty cycle*, que representa a proporção de tempo que um circuito está ligado em comparação com o tempo em que está desligado, também denominado de razão cíclica.

Basicamente, o princípio de um sinal PWM é uma onda quadrada de período constante, cuja largura do pulso é controlada por outro sinal de referência, e uma simples comparação entre um sinal de referência com um sinal de onda, chamada de portadora, que pode ser triangular ou dente de serra. Quando o valor da onda de referência apresenta valor maior do que o da onda triangular, o sinal de saída assume nível lógico alto. Caso o sinal for menor, admite nível lógico baixo, a frequência do PWM está diretamente relacionada à frequência da portadora.

Figura 22 - Modulação PWM

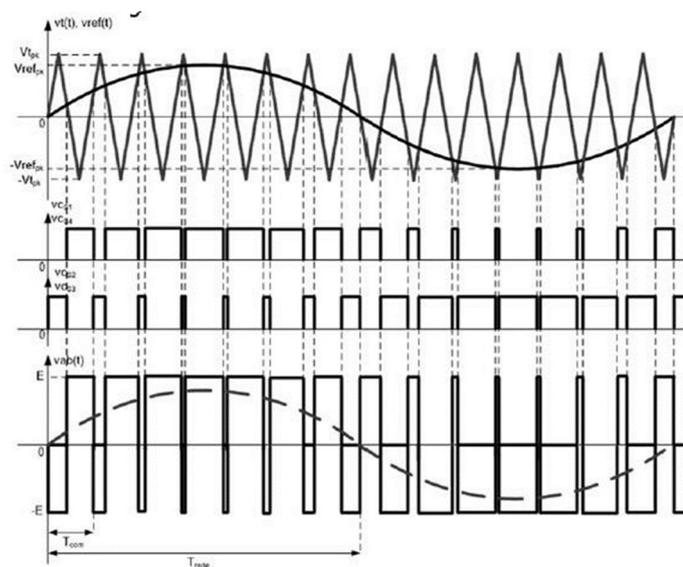


Fonte: Autoria própria (2024)

2.6.1 PWM Senoidal

Para um conversor CC-CA, deve ser implementada uma técnica que garanta na saída um sinal senoidal. Na Figura 23 abaixo, temos um exemplo de modulação PWM senoidal de dois níveis. Nessa modulação, os transistores S1 e S4 conduzem, enquanto os transistores S2 e S3 estão bloqueados. Para a próxima etapa, os transistores S2 e S3 conduzem, enquanto os transistores S1 e S4 estão bloqueados - o que garante apenas dois níveis de tensão na carga (E e -E). Esse sinal, portanto, é obtido a partir da comparação de uma onda senoidal de referência com uma triangular de portadora, a partir dessa comparação são obtidos os pulsos de comando para S2 e S3 e o complementar desse sinal aciona S1 e S4.

Figura 23 - PWM senoidal a 2 níveis

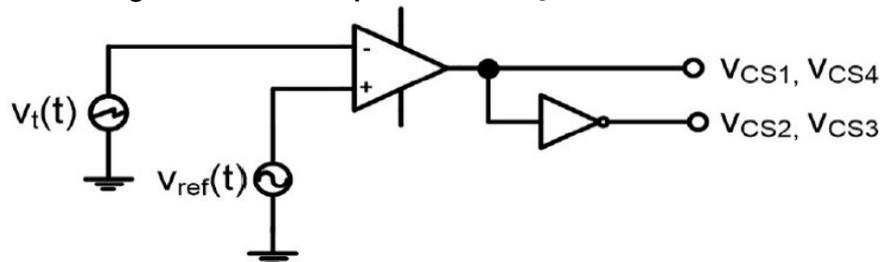


Fonte: Retirada da disciplina de *Eletrônica de potência II*, ILLA FONT, C. (2019)

Analisando a figura 23, podemos definir que sempre que a onda portadora triangular for maior que a onda senoidal referência, é gerado um pulso alto que aciona S2 e S3, e a sua complementar aciona S1 e S4, quando a senoide é maior que triangular. Assim, S1 e S4 conduzem e S2 e S3 bloqueiam. Nota-se, também, que a largura dos pulsos de comando das chaves será diferente ao longo de um período, o que é justamente o objetivo do PWM. A tensão de saída terá dois níveis, sendo uma tensão em alta frequência, o que necessita de um filtro de saída. Após filtrada, a tensão terá um formato senoidal

e uma frequência apropriada para o uso padronizado. Para sua implementação podemos utilizar o seguinte circuito:

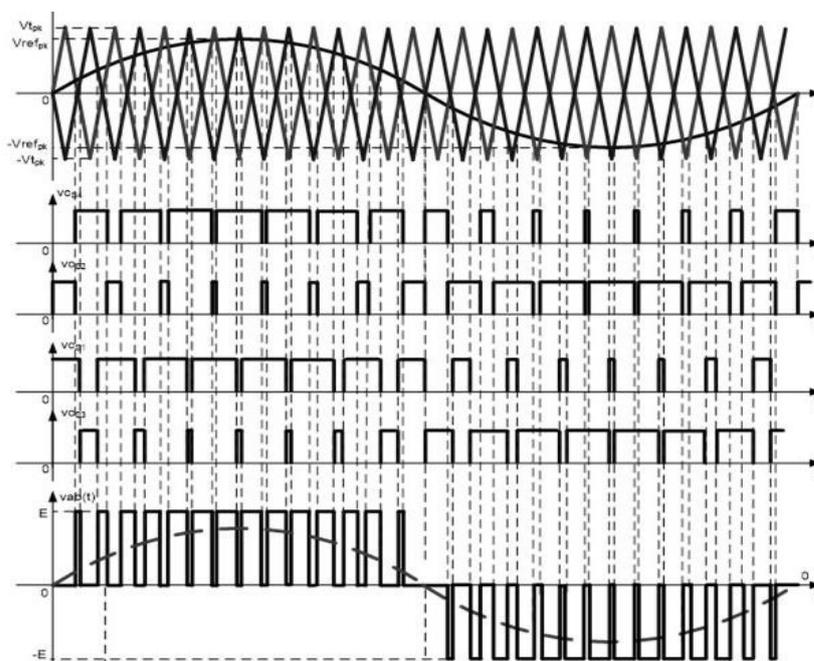
Figura 24 - Circuito para a modulação PWM a 2 níveis



Fonte: Retirada da disciplina de *Eletrônica de potência II*, ILLA FONT, C. (2019)

Para a modulação em 3 níveis a comparação é feita entre a senoide de referência e duas ondas triangulares defasadas em 180° . Deste modo, são duas comparações, uma entre a senoide de referência e a triangular. Ao passo que a segunda, entre a senoide de referência e a triangular defasada de 180° . A comparação entre a senoide e a triangular vai gerar o pulso de comando para S2 e seu complementar para S4. Já a comparação entre a senoide e a triangular defasada em 180° , pode-se dizer que geram os pulsos de comando para S1 e seu complementar para S3.

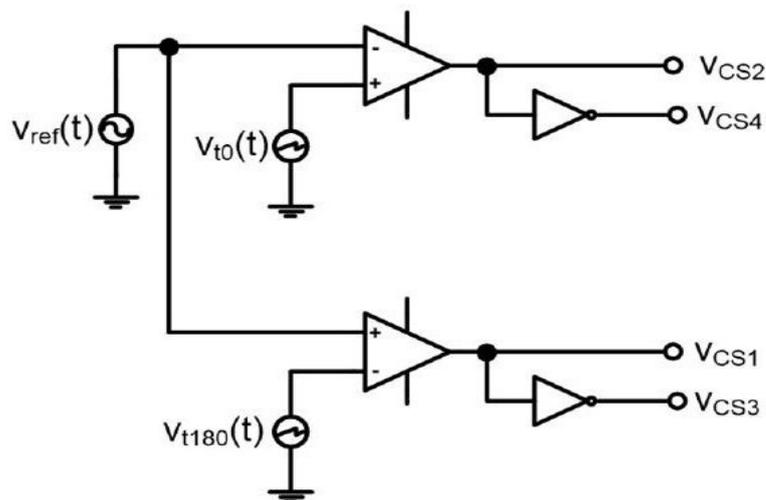
Figura 25 - Modulação PWM a 3 níveis



Fonte: Retirada da disciplina de *Eletrônica de potência II*, ILLA FONT, C. (2019)

Sempre que a onda triangular for maior que a senoidal, é gerado um pulso de comando para S2 e conseqüentemente seu complementar para S4. Para este mesmo período de tempo a senoide é maior que a onda triangular defasada, o que ocasiona nível lógico alto para o transistor S1 e o seu complementar S3 com nível lógico baixo e assim por diante. Para a modulação de três níveis terão 4 pulsos de comando distintos. Agora, com 3 níveis que o sinal de saída se aproxima mais de uma senoide. Entretanto, ainda se faz necessário um filtro na saída que conterà um esforço de filtragem muito menor, devido às componentes de alta frequência já estarem em frequências mais elevadas; por esta vantagem, tal modulação é muito mais usada. Sua implementação pode ser feita com o seguinte circuito:

Figura 26 – Circuito para a modulação PWM a 3 níveis



Fonte: Retirada da disciplina de *Eletrônica de potência II*, ILLA FONT, C. (2019)

2.7 Aspectos Construtivos para Sistemas de Geração Fotovoltaica

Diversos elementos são essenciais para o projeto de Sistemas Fotovoltaicos (SFVs) eficientes. Entre eles, destacam-se a Radiação Solar, que se divide em radiação difusa e global, a irradiância, a irradiação, o ângulo azimutal e o ângulo de inclinação e orientação dos painéis fotovoltaicos. Esses aspectos serão detalhados nos tópicos subsequentes.

2.7.1 Radiação Solar

Segundo Fraidenraich e Lyra (1995), a radiação solar condiz à energia emitida pelo Sol na forma de radiação eletromagnética, a qual se propaga ao longo do espaço até chegar ao planeta Terra. Aquela, corresponde à junção de diferentes faixas de comprimentos de onda, além da luz visível, infravermelho e ultravioleta, cada uma com diferentes efeitos e interações com a atmosfera terrestre. A concentração da radiação solar que chega até a superfície terrestre é alterada conforme a latitude, período do ano, parâmetros atmosféricos e hora do dia, sendo crucial para processos climáticos, biológicos e geológicos.

Ao passo que a radiação solar atinge a atmosfera do planeta, a componente chamada de radiação direta gera sombras límpidas de objetos visíveis ao Sol, atingindo a superfície da terra sem que receba ação da atmosfera. Já a radiação difusa ilumina partes que não são iluminadas diretamente pelo Sol, além de produzir a claridade vista no céu ao longo do dia. Esta é difundida na atmosfera e espelhada por meio das nuvens, da poeira e demais componentes que estão suspensos na atmosfera. Por fim, a união das duas radiações explicadas resulta na radiação global.

2.7.2 Irradiação X Irradiância

Outros fatores que devem ser levados em consideração para a análise de Sistemas Fotovoltaicos dizem respeito a Irradiação e a Irradiância. A primeira tem como unidade o Wh/m^2 e condiz com uma grandeza responsável por traduzir a densidade de energia solar refletida em uma área plana na superfície da terra. É dada através da operação matemática integral da área da curva de Irradiância, conforme Pinho e Galdino (2014). De acordo com Villalva (2012) a segunda, tem como unidade o W/m^2 e é utilizada na quantificação de radiação solar refletida sobre a terra. A Irradiância é a divisão da potência pela fração da área, sendo diretamente proporcional à radiação solar incidente e inversamente proporcional a área atingida.

2.7.3 Ângulos presentes nas análises de SFVs

Diversos parâmetros angulares são relevantes na análise de Sistemas Fotovoltaicos, abrangendo variáveis como a inclinação dos módulos, seu desvio azimutal e o ângulo de elevação solar, o qual varia ao longo das estações do ano. Estes elementos desempenham um papel crucial na otimização da eficiência dos sistemas fotovoltaicos, uma vez que influenciam diretamente a captura e utilização da radiação solar disponível.

2.7.3.1 Ângulo Azimutal

De acordo com Pinho e Galdino (2014), os raios solares apresentam variações no ângulo azimutal conforme o nascer e o pôr do Sol: o nascer ocorre no sentido Leste e o pôr no Oeste. O período de maior incidência solar em uma região é chamado de meio dia solar, quando o ângulo azimutal é zero. O azimute solar, visto do hemisfério norte da Terra, é definido pela orientação dos raios solares em relação ao sul geográfico. No hemisfério sul, por outro lado, é determinado pela orientação dos raios solares em relação ao norte geográfico. Por isso, no Brasil a melhor orientação para os módulos é ao Norte.

2.7.3.2 Declinação e ângulo da altura do Sol

De acordo com Villalva (2012), a Declinação Solar é o ângulo δ pelo qual os raios solares incidem sobre a linha do Equador, variando ao longo do ano devido ao movimento de translação da Terra e à inclinação de seu eixo, que é inclinado aproximadamente $23,5^\circ$ em relação a uma linha perpendicular ao plano orbital do planeta. Por outro lado, o ângulo da Altura Solar é determinado pela declinação solar e indica a posição vertical do Sol no céu, sendo complementar ao ângulo zenital.

Em sistemas solares fotovoltaicos, a declinação solar e o ângulo da altura solar são cruciais para entender como a duração do dia e a quantidade de radiação solar variam ao longo do ano em uma localidade específica. No verão, por exemplo, a declinação solar é positiva, resultando em uma trajetória solar com um ângulo zenital menor no céu, o que permite que os raios solares

percorram uma camada atmosférica mais curta e atinjam a superfície terrestre com maior energia.

Com um ângulo zenital menor ao meio-dia, os objetos na superfície terrestre projetam sombras menores, devido ao aumento do ângulo da altura solar. Além disso, o verão é caracterizado pelo Solstício, por volta de 21 de dezembro, marcando o dia mais longo do ano, com dias mais prolongados. Portanto, o verão apresenta o maior potencial de geração de energia solar do ano, enquanto o inverno tem o menor potencial.

2.7.3.3 Ângulo de Inclinação dos Módulos

Levando em consideração as definições que foram abordadas anteriormente, entende-se que a direção e o ângulo de instalação dos módulos são determinantes na eficiência durante o processo de geração de energia em sistemas solares fotovoltaicos. Em consonância com Villalva (2012), no que diz respeito ao hemisfério norte da terra, os módulos têm de ser direcionados para o sul geográfico, com ângulo azimutal zero. Já em relação ao ângulo azimutal e o caminho que o Sol percorre no decorrer do dia, de leste a oeste, constata-se que, no hemisfério sul da terra, os módulos fotovoltaicos têm de ser orientados para o norte geográfico com um ângulo azimutal também zero.

3. CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos correspondem a mecanismos que, utilizando o efeito fotovoltaico, são capazes de realizar a conversão da luz solar em energia elétrica. Para os autores Pinho e Galdino (2014) e Ruther (2004), a energia solar fotovoltaica se mostra uma fonte energética extremamente promissora, visto que se trata de um recurso inesgotável, que não contribui significativamente com os gases do efeito estufa, além do fato de não ter um custo tão elevado e poder ser instalado em qualquer região, por mais remota e inóspita que seja, desde que tenha boa incidência de irradiação solar. Tais sistemas são formados, basicamente, por um arranjo com função de geração, somados a um conjunto de condicionamento de potência e, facultativamente, por um conjunto armazenador.

Quanto ao arranjo gerador, este possui as combinações de módulos fotovoltaicos, os quais podem ser ligados de múltiplas formas, bem como a estrutura que serve de base e os condutores elétricos responsáveis por conectar as células e módulos. A respeito do conjunto de tratamento de potência, além das ferramentas de controle, supervisão e proteção, neste, pode haver conversores CC/CC (corrente contínua/corrente contínua), inversores, seguidor de ponto de potência máxima - da sigla SPPM - e controladores de carga (em casos que exista armazenamento de energia). Por último, o conjunto armazenador é composto por baterias, como também outros tipos de acumuladores de carga e eventualmente uma combinação destes. Por conseguinte, o atual módulo visa elucidar as divergentes aplicações dos presentes sistemas.

Alicerçados na viabilidade, lucratividade e sustentabilidade da energia solar fotovoltaica, investimentos neste tipo de sistema têm crescido a cada ano e se mostrado cada vez mais presentes em grandes nações como Estados Unidos, China, Japão, Alemanha, Itália e mais proximamente no Brasil. Os Sistemas Fotovoltaicos, ou como também são chamados "SFV", podem ser ordenados em três grupos, sendo eles: *On-Grid*, sistemas que fazem parte da rede de distribuição de energia, *Off-Grid*, também chamados de autônomos, os quais, encontram-se isolados em regiões fora do alcance da rede de fornecimento da Concessionária mais próxima. Tal qual, o modo de classificação

que se baseia na geração de energia elétrica, podendo se tratar de um sistema que faz uso de apenas uma fonte de energia, ou híbrido, na hipótese de utilizar de duas ou mais fontes.

3.1 Sistemas *ON-GRID*

Os Sistemas *On-Grid*, em outros termos, Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede - SFVCR - operam sobre o domínio da rede de fornecimento das concessionárias, não necessitam da utilização de baterias ou banco de baterias, logo, possuem um custo inferior e maior eficiência em relação aos SFI e SFH, uma vez que a energia gerada por estes sistemas têm potencial de ser usada diretamente pelos aparelhos elétricos em funcionamento, bem como, é permitido aplicar na rede de distribuição o excedente da energia gerada pelo Sistema Fotovoltaico, em troca de créditos de energia os quais podem ser aproveitados posteriormente. Outro ponto a ser destacado, é que os SFVCR no Brasil se subordinam às legislações e regulamentações da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

A potência instalada em cada SFV varia em magnitudes em um intervalo entre poucos kWp (quando se trata de instalações residenciais) e consideráveis MWp (referindo-se a expressivos sistemas de geração de grandes firmas ou fazendas solares). No tocante aos componentes dos Sistemas *On-Grid*, habitualmente, encontram-se arranjos que possuem: painéis fotovoltaicos, bem como suas caixas de conexão, suportes, cabos, inversores, medidores de energia, disjuntores, quadro de luz, entre outros. Observe o esquemático abaixo:

Figura 27 - Representação de um sistema *ON-GRID*



Fonte: Ecomais (2022)

Note a incidência do sol nos painéis, produzindo energia em corrente contínua, passando pelo inversor onde é convertida em corrente alternada, para assim ser consumida pelos equipamentos elétricos da residência. Por fim, é visto o Medidor de Energia, ou em outras palavras, o relógio bidirecional, sendo responsável por mensurar toda a energia produzida pelos painéis (consumida pelos utensílios elétricos do domicílio e também o excedente) que será injetado na rede elétrica.

Um bom exemplo de SFVCR foi desenvolvido entre os anos de 2018 e 2019 e encontra-se na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) na cidade de Ponta Grossa - PR. O sistema integra o Projeto P&D COPEL: Metodologia para Análise, Monitoramento e Gerenciamento da Geração Distribuída por Fontes Incentivadas que busca apurar dados a respeito da energia solar e o potencial fotovoltaico em 6 regiões diferentes do estado do Paraná. Tal pesquisa teve coordenação do Laboratório de Energia Solar (Labens) do Campus Curitiba. Note a figura 28:

Figura 28 - Sistema ON-GRID com diferentes tecnologias



Fonte: Autoria própria (2022)

Aqui, é possível ver o sistema o qual é formado por 3 tipos diferentes de módulos fotovoltaicos, dentre eles, módulos de silício monocristalinos, silício policristalinos, *Cadmium Telluride* - representado pela sigla CdTe.

3.2 Sistemas *OFF-GRID*

Os Sistemas *Off-Grid*, SFI, ou Sistemas Fotovoltaicos Autônomos, recebem estas denominações porque possui uma fonte geradora exclusivamente fotovoltaica e encontram-se isolados da rede de distribuição convencional; por conseguinte, necessitam do uso de banco de baterias ou outros armazenadores de potencial para noites, dias nublados, chuvosos ou quaisquer intervalos sem sol, já que a produção de energia elétrica ocorre apenas nos períodos em que há incidência de raios solares nos painéis fotovoltaicos.

De acordo com o projeto, são capazes de alimentar tanto cargas CC quanto CA e na maior parte dos casos, é possível notar em sistemas deste tipo: painéis fotovoltaicos, inversores, controladores de carga e o já citado banco de baterias. Especificamente nos casos de SFI, a bateria opera igualmente como um referencial de tensão de corrente contínua para os inversores formadores da rede.

Outro fator importante a ser considerado é que os SFI podem ser divididos em dois grupos, sendo eles: Sistemas Fotovoltaicos Autônomos Individuais e os Sistemas Fotovoltaicos Autônomos em Minirrede. O item posterior diz respeito à geração de energia elétrica para apenas uma unidade consumidora, ao passo que o seguinte se refere à geração de energia elétrica para um reduzido conjunto de unidades, as quais necessitam estar dimensionalmente perto entre si, de modo que formem uma minirrede.

Primeiramente, os sistemas isolados respeitavam os requisitos presentes na Resolução Aneel nº 83/2004 (ANEEL, 2004), que enquadra somente os Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFI), uma vez que não havia demanda para os sistemas em minirrede. Mesmo que esta resolução tenha sido elementar para a introdução de sistemas fotovoltaicos autônomos em projetos de eletrificação rural no Brasil, se tornou obsoleta, pois com o decorrer do tempo os avanços tecnológicos propiciaram a necessidade de englobar os sistemas em minirrede, ou Microssistemas Isolados de Geração e Distribuição de Energia - MIGDI - ambos os casos se enquadram na Resolução Nº 493/2012 (ANEEL, 2012), que foi criada justamente para que os sistemas em minirrede pudessem ser incluídos.

3.2.1 Sistemas Fotovoltaicos Autônomos Individuais

Os Sistemas Fotovoltaicos Autônomos Individuais estão relacionados com a geração de energia elétrica em residências que se encontram ilhadas da rede elétrica, através dos Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares, representado pela sigla SFD. Estes possibilitam aos habitantes da unidade consumidora usufruir de equipamentos elétricos para várias finalidades, como recreação, educação, produção, trabalho e outros serviços.

Na generalidade, esses SFD são formados por painéis fotovoltaicos, que têm a função de geração, controladores de carga, responsáveis por impedir cargas e descargas exageradas, além do banco de baterias, incumbido de possibilitar que a energia seja utilizada nos momentos em que não existe incidência de luz solar nos painéis. Os controladores de carga podem ter seu uso dispensado, no entanto trazem uma série de benefícios ao sistema, como a extensão da durabilidade do sistema, além de melhoria no desempenho.

A título de exemplo, é possível citar o SFD localizado no município de Xapuri, no Acre, mais especificamente no Seringal Albrácea, o qual foi concebido em 2007 em parceria da Eletrobras com a empresa alemã *Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit* (GTZ). O Projeto Piloto de Xapuri foi executado apoiando-se no Projeto Luz para Todos, que visa dar acesso à energia elétrica em regiões isoladas, principalmente no Norte e Nordeste do Brasil. Na Figura 29, temos um dos locais de instalação.

Figura 29 - Sistema Autônomo Individual



Fonte: Eletrobras (2011)

O seringal em questão possui 37 SIGFI's. A imagem se trata de um sistema fotovoltaico autônomo individual com classe de atendimento de ao menos 13 kWh/mês, que possui atendimento em corrente contínua com potência de 285 Wp, banco de baterias (2 x 150 Ah) e controlador de carga de 30 A.

3.2.2 Sistemas Fotovoltaicos Autônomos em Minirrede

O fornecimento de eletricidade para comunidades ilhadas em zonas rurais também é capaz de ser realizado com o uso de sistemas fotovoltaicos autônomos em minirrede, enquadrados pela Aneel como MIGDI. Neste caso, a potência total instalada referente a geração não pode superar 100 kW e são indicados para populações com demanda de energia de até 9000 kWh/mês.

Conforme a Eletrobras (2017), os MIGDI possuem algumas vantagens e desvantagens em relação aos SIGFI, sendo:

- SIGFIs apresentam custo específico com aquisição de equipamentos (por UC) maior devido à compra de equipamentos de menor porte. No entanto os MIGDIs apresentam custos de minirrede e obra civil;
- MIGDIs podem apresentar viabilidade econômica para instalação de sistemas de monitoramento e automação, dependendo do número de UCs atendidas;
- MIGDIs apresentam perda técnica maior, visto a existência de rede de distribuição;

Para exemplificar, é possível citar o Projeto realizado pela Eletrobras Amazonas Energia, em parceria com o Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura - IICA -. Este envolve 6 cidades do estado amazonense, que são: Barcelos; Beruri; Eirunepé; Autazes; Maués e Novo Airão.

O Programa atende 222 domicílios, que são favorecidas pelas minirredes de distribuição e sistemas puramente fotovoltaicos. Além disso, a potência instalada varia num intervalo de 9,6 kWp até 16,8 kWp e são vistos 12 mini-usinas fotovoltaicas. A figura 30 mostra, os postes de distribuição, bem como algumas unidades consumidoras da minirrede em foco e a Mini-usina Solar Comunidade Nossa Senhora de Nazaré da cidade de Maués-AM.

Figura 30 - Projeto Amazonas Energia



Fonte: Villaça (2011)

3.3 Sistemas Fotovoltaicos Híbridos

De forma holística, para Pinho e Galdino (2014), os Sistemas Híbridos caracterizam-se como esquemas que empregam mais de uma fonte de energia, ao passo que, tais fontes podem vir de origem renovável ou não-renovável. Os Sistemas Fotovoltaicos Híbridos - SFH - combinam em seu arranjo gerador além da parte fotovoltaica, outras matrizes como: diesel, gás natural, biomassa, hídrica, eólica, entre outras, com a finalidade de produzir eletricidade de maneira potencializada usufruindo de ambas as fontes sem sobrecarregar alguma parte do sistema.

Os SFH têm a possibilidade de ser ou não conectados à rede de distribuição de energia. Afinal, no tocante ao segundo caso, estes sistemas carecem de bloco armazenador para a energia gerada. Este acúmulo é feito em banco de baterias e/ou em outros armazenadores de potencial, e conseqüentemente, torna-se possível usufruir de utensílios e equipamentos elétricos mesmo em intervalos de tempo nos quais não acontece geração de energia. Na figura 31 aparece um esquemático que demonstra um exemplar *Off-Grid* que utiliza três fontes geradoras distintas.

Figura 31 - Representação de um Sistema Fotovoltaico Híbrido



Fonte: CRESESB (2008)

3.4 Associações De Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos permitem conectar células, módulos e arranjos de maneira a alcançar diferentes níveis de tensão e corrente conforme planejado no projeto. Essa configuração define como os módulos serão agrupados, seja em série, paralelo ou ambas as configurações, além de determinar o tipo de conversores necessários para o sistema.

Conexão em série - Para fazer uma ligação em série basta conectar o terminal negativo de uma célula ao terminal positivo de outra célula e assim por diante, o mesmo é válido para módulos e arranjos com vários módulos; nesta conexão, para células e módulos iguais as tensões são somadas e a corrente permanece a mesma. Matematicamente temos:

$$V_{Total} = V1 + V2 + V3 + \dots + Vn \text{ e } I = I1 = I2 = I3 = \dots = In$$

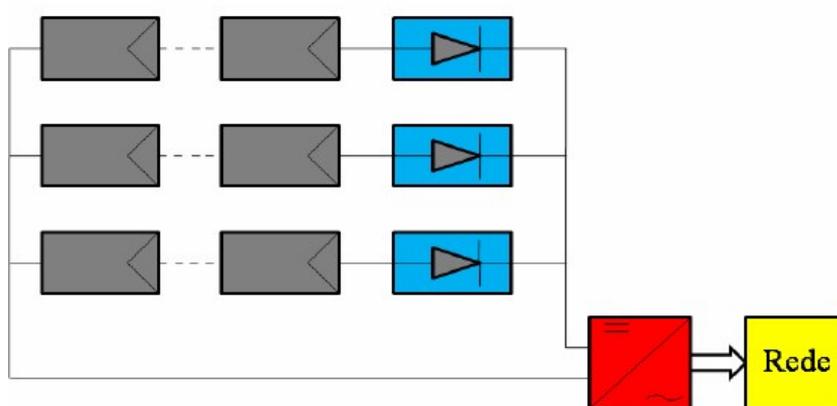
Conexão em Paralelo - Na associação em paralelo os terminais iguais são ligados entre si, ou seja, o terminal positivo de uma célula é conectado ao positivo de outra célula e o negativo de uma célula é conectado ao negativo de outra célula. Sabendo disso, nesta configuração, as correntes são somadas e a tensão se mantém constante.

$$I = I1 + I2 + I3 + \dots + In \text{ e } V = V1 = V2 = V3 = \dots = Vn$$

A partir das conexões dos módulos fotovoltaicos, podemos definir qual a topologia de inversor a ser utilizado. Note os exemplos;

Inversor central - Normalmente utilizado em sistemas com potências entre 20 e 400 kW, os painéis são conectados em série para formar uma fileira, e estas fileiras são então conectadas em paralelo para compor um arranjo que alimenta o barramento CC de um único sistema.

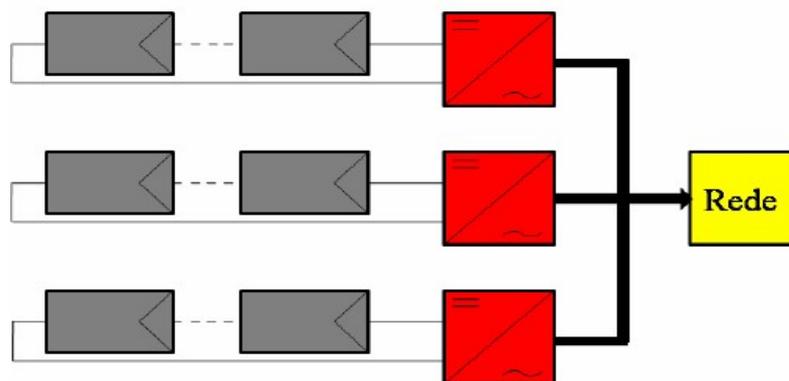
Figura 32 - Configuração de um SFVCR com Inversor Central



Fonte: Villaça (2011)

Inversor CA paralelo ou inversor *string* – Para Villaça (2021) refere-se a um tipo específico de inversor utilizado em sistemas fotovoltaicos. Este inversor é projetado para lidar com vários painéis solares conectados em série, formando uma *string* (ou série) de painéis. Ele converte a corrente contínua (CC) gerada pelos painéis solares em corrente alternada (CA), que pode ser utilizada na rede elétrica ou em sistemas isolados. Confira o esquema abaixo.

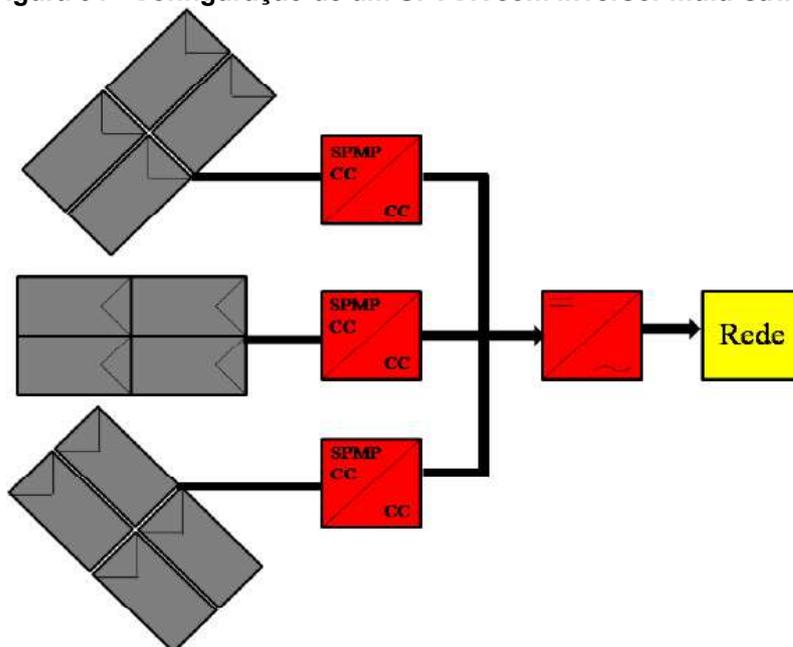
Figura 33 - Configuração de um SFVCR com Inversores *String*



Fonte: Villaça (2011)

Inversor CC paralelo ou *multi-string* - Os arranjos são conectados em paralelo a conversores CC-CC, que são conectados a um único barramento CC, que irá para um único conversor.

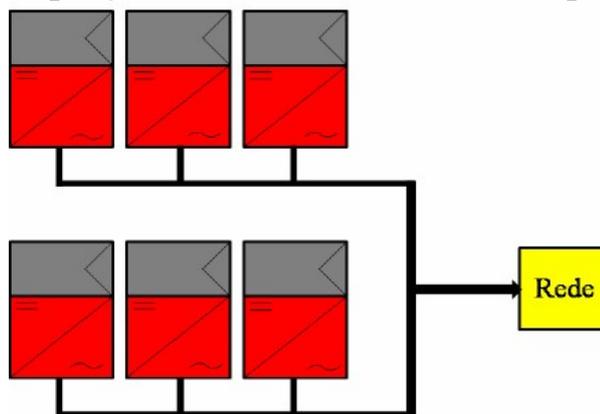
Figura 34 - Configuração de um SFVCR com inversor *multi-string*



Fonte: Villaça (2011)

Inversor integrado ou módulo CA - cada módulo tem seu próprio inversor individual, os quais são ligados em paralelo.

Figura 35 - Configuração de um SFVCR com inversor integrado ao módulo



Fonte: Villaça (2011)

Micro-inversor – De acordo com Almeida (2012), este dispositivo converte de forma individual a energia gerada por cada painel solar em corrente alternada. É o oposto dos inversores do tipo central e string, afinal, estes realizam essa conversão para um grupo de painéis. Deste modo, tal característica concede um controle mais eficiente da produção de energia durante a operação, pois, reduz perdas de rendimento oriundas por sombreamento e variações de desempenho.

Ademais, os micro-inversores ofertam flexibilidade superior na instalação de sistemas solares, adaptando-se com mais facilidade a diferentes espaços disponíveis. No entanto, possuem modelos que variam numa faixa potência entre 1,5 kW á 2,8kW, o que leva sistemas que demandam de maior geração a utilizar mais de um micro-inversor, resultando em maior grau de complexidade, dificultando a manutenção, o que pode inviabilizar o uso destes equipamentos.

3.5. Geração Distribuída

Segundo Ackermann *et al.* (2001), a geração distribuída se caracteriza como uma fonte de geração de energia conectada diretamente à rede de distribuição. Geralmente a geração distribuída possui pequena capacidade instalada e é utilizada principalmente em fontes de energia renováveis como a solar, eólica, células de combustível, entre outras.

A energia gerada pode ser produzida próxima no ponto de consumo, podendo ser totalmente consumida no próprio local onde foi gerada ou tendo seu excedente injetado na rede. Para a geração de médio porte são utilizados motogeradores, geralmente movidos a diesel, para uso em emergência ou para operação em período de ponta. Módulos fotovoltaicos vêm ganhando espaço nessa categoria devido ao aumento de sua eficiência. Já para a geração de energia em pequeno porte temos os módulos fotovoltaicos e moto geradores movidos a *diesel* ou gasolina, também utilizados para emergências e uso no horário de ponta. Para Pepermans *et al.* (2005), existem 5 fatores que contribuíram para a evolução e crescente interesse na geração distribuída; “desenvolvimento de tecnologias de geração distribuída, restrições na construção de novas linhas de transmissão, aumento da demanda do consumidor por uma energia mais confiável, a liberalização do mercado de energia e a preocupação com as mudanças climáticas”.

No ponto de vista dos consumidores, o investimento em autogeração de energia, representa uma economia relativa à compra de energia da rede; quanto maior for a capacidade de gerar sua própria energia, menor será a dependência da rede e o consumidor não fica exposto a eventuais mudanças de bandeira tarifária, como tivemos em 2019 durante a crise hídrica a criação de uma bandeira exclusiva para o período.

Entretanto, para as concessionárias, a geração distribuída pode gerar alguns problemas. Com o seu avanço, questões técnicas e operacionais começam a surgir, por exemplo: o fluxo de potência, sem a geração distribuída, é unidirecional, mas com a geração distribuída passa a ser bi-direcional, necessitando a readequação de sistemas de proteção. Outro ponto negativo é a injeção muito elevada de harmônicos de tensão na rede.

4. LEGISLAÇÃO

Todos os tipos de geração de energia geram impactos econômicos sociais e ambientais, os quais devem ser levados em consideração quando se trata da elaboração de um projeto de geração de energia elétrica. Isto posto, vale dizer que o setor energético vem sofrendo uma mudança no Brasil e no mundo, visto que, atualmente, baseia-se em combustíveis fósseis ou outras fontes não-renováveis e/ou com impactos ambientais. Assim, vê-se a necessidade de regulamentação e padronização do uso e geração de energia elétrica.

No ano de 1996, foi criada no Brasil a lei 9.427/96 (BRASIL, 1996) que desenvolveu um órgão que determina as normas para a utilização de energia elétrica, a chamada *Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)*. Este órgão tem por finalidade regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do Governo Federal. Desta maneira, devido ao aumento do consumo de energia elétrica, em 17 de abril de 2012, a ANEEL publicou a resolução normativa nº 482 que implementou termos gerais para o acesso da microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia.

Com essa lei, as concessionárias foram obrigadas a criar novos mecanismos de distribuição que permitem ao consumidor gerar energia elétrica para seu consumo, e, até mesmo, a troca de seu excedente por créditos que são acumulados no CPF ou CNPJ do consumidor e podem abater o consumo de outros empreendimentos que estejam sob a mesma titularidade da UC geradora, quando não existem meios de armazenagem dessa energia. Em 24 de novembro de 2015 a ANEEL altera a resolução normativa nº 482 de abril de 2012, mais especificamente, os procedimentos referentes à distribuição de energia elétrica, então a resolução nº 482 passa a vigorar com a seguinte redação:

“Art.

2º.....

I - microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

II - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes

renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

III - Sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa;

IV - Melhoria: instalação, substituição ou reforma de equipamentos em instalações de distribuição existentes, ou a adequação destas instalações, visando manter a prestação de serviço adequado de energia elétrica;

V - Reforço: instalação, substituição ou reforma de equipamentos em instalações de distribuição existentes, ou a adequação destas instalações, para aumento de capacidade de distribuição, de confiabilidade do sistema de distribuição, de vida útil ou para conexão de usuários;

VI – empreendimento com múltiplas unidades consumidoras: caracterizado pela utilização da energia elétrica de forma independente, no qual cada fração com uso individualizado constitua uma unidade consumidora e as instalações para atendimento das áreas de uso comum constituam uma unidade consumidora distinta, de responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário do empreendimento, com microgeração ou minigeração distribuída, e desde que as unidades consumidoras estejam localizadas em uma mesma propriedade ou em propriedades contíguas, sendo vedada a utilização de vias públicas, de passagem aérea ou subterrânea e de propriedades de terceiros não integrantes do empreendimento;

VII – Geração compartilhada: caracterizada pela reunião de consumidores, dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, composta por pessoa física ou jurídica, que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada;

VIII – Autoconsumo remoto: caracterizado por unidades consumidoras de titularidade de uma mesma Pessoa Jurídica, incluídas matriz e filial, ou Pessoa Física que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras, dentro da mesma área de concessão ou permissão, nas quais a energia excedente será compensada (ANEEL, 2015).

Nesta normativa, o consumidor que se enquadre no tipo micro ou minigeração distribuída, pode utilizar de fontes renováveis para gerar a própria energia e, por meio de um sistema de crédito, injetar sua energia excedente na rede com a proporção de 1kWh injetado = 1 kWh em crédito. Esses créditos podem ser abatidos na sua fatura de energia elétrica ao que se refere ao consumo de energia.

Em janeiro de 2022 foi sancionada a lei 14.300 (BRASIL, 2022), que estipulou que os créditos sejam taxados, com a justificativa principal de “cobrir as despesas da concessionária com o investimento em melhoria na rede elétrica”. Vale ressaltar, também, que a taxação é apenas válida para sistemas montados a partir de 07/01/2023. Os sistemas montados e regularizados antes

dessa data terão o direito de usufruir da regra antiga até 31/12/2045. Para a solicitação de acesso à rede de sistemas fotovoltaicos, após 07/07/2023 - na prática quando injetado na rede 1kWh será recebido 1kWh-taxa de crédito energético.

Além da taxação, a nova lei traz algumas outras vantagens como a segurança jurídica, pois agora haverá a garantia desse direito. Dentre eles temos: a inclusão social, pois foi facilitado o acesso de fontes renováveis para consumidores de baixa renda, por meio de programas de financiamento de instalações de geração fotovoltaica; cobrança em duplicata; o consumidor pagava o valor mínimo do custo de disponibilidade mesmo que compensado pelo valor injetado; distribuição de créditos energéticos acumulados. Com a nova lei é possível transferir os créditos energéticos adquiridos em uma unidade consumidora, para outra, desde que pertençam ao mesmo proprietário e estejam dentro da área de cobertura da concessionária; As bandeiras tarifárias não incidirão sobre a energia excedente, apenas para a energia consumida normalmente.

Um SFV precisa estar enquadrado nas Normas Técnicas - NT's - da concessionária vigente em seu estado, no caso do Paraná, a Copel. As NT's são responsáveis pelas diretrizes na análise do projeto e também do abastecimento de energia elétrica. Tais parâmetros devem atender os padrões de entrada, proteção e medição da concessionária de energia.

5. ANÁLISE TÉCNICA *IN LOCO*

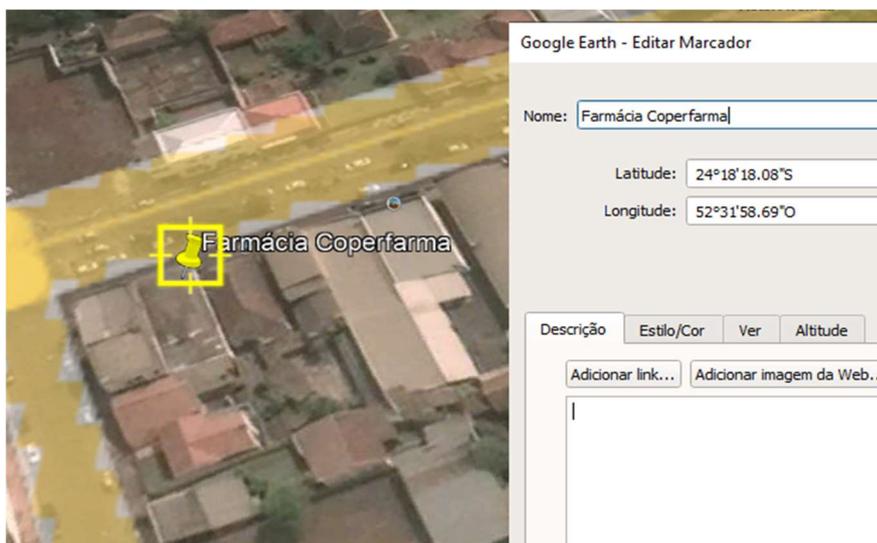
5.1 O projeto

De acordo com Pinho e Galdino (2014), para desenvolver um projeto fotovoltaico faz-se necessário analisar certos fatores e características do local. Os principais deles são: espaço físico disponível, direção dos módulos, incidência solar, demanda, estética, dentre outros.

5.1.1 Localização da Unidade Consumidora

A farmácia localiza-se no município de Mamborê - PR, na Avenida Interventor Manoel Ribas, n° 313, no Centro da cidade, CEP: 87340-000. Com assistência do *software Google Earth Pro* obteve-se as seguintes coordenadas, em acordo com a Figura 36, em que a Latitude é 24°18'18.08" Sul e a Longitude 52°31'58.69" Oeste em Graus Minutos e Segundos (GMS), ou -24,305°, -52,532° em Graus Decimais.

Figura 36 - Planta de situação do comércio



Fonte: *Google Earth Pro* (2023)

O comércio se enquadra na classificação B3 Comercial da *Copel*, possui um disjuntor de 40A no padrão e o tipo de fornecimento é bifásico. Ademais, dispõe de cerca de 190m² de área disponível para instalação dos painéis fotovoltaicos em seu telhado, o qual possui azimute de 338°, em outras palavras

seu desvio azimutal é 22° Oeste, comparado ao Norte geográfico, de acordo com a figura 37:

Figura 37 - Área disponível para Instalação



Fonte: SolarEdge Designer (2023)

Tanto a área da cobertura quanto o desvio azimutal foram obtidos com o auxílio do *software SolarEdge Designer* e validados por medições *in loco*. Com o intuito de serem reproduzidos na modelagem 3D do sistema - realizada com o amparo do *software SketchUp 2023*. Note a Figura 37 e a Figura 38, as quais detalham diferentes vistas da planta de situação do projeto.

Figura 38 - Planta de situação vista em perspectiva



Fonte: Autoria própria via SketchUp (2023)

Outro ponto levado em consideração relativo ao espaço físico disponível para a instalação dos módulos, diz respeito ao sombreamento causado por obstáculo ou obstáculos, que os raios solares podem encontrar até incidirem na área do telhado. De acordo com Pinho e Galdino (2014), a operação matemática descrita pela expressão [1] possibilita estimar o espaçamento mínimo entre um obstáculo e o bloco gerador de forma a evitar sombreamento. Note:

$$D = Fe (hob - hi) \quad [1]$$

Em que:

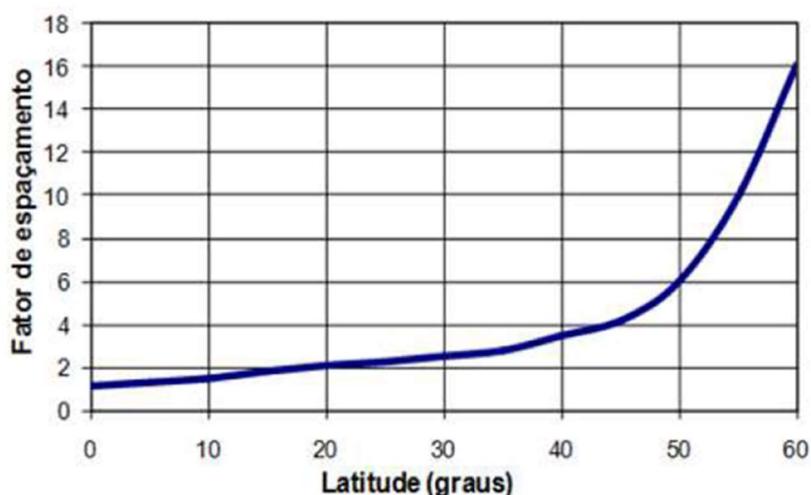
D = espaçamento mínimo entre obstáculo e bloco de geração;

Fe = fator de espaçamento obtido pela figura;

hob = altura do obstáculo;

hi = altura de instalação do painel;

Figura 39 - Fator de espaçamento x Latitude

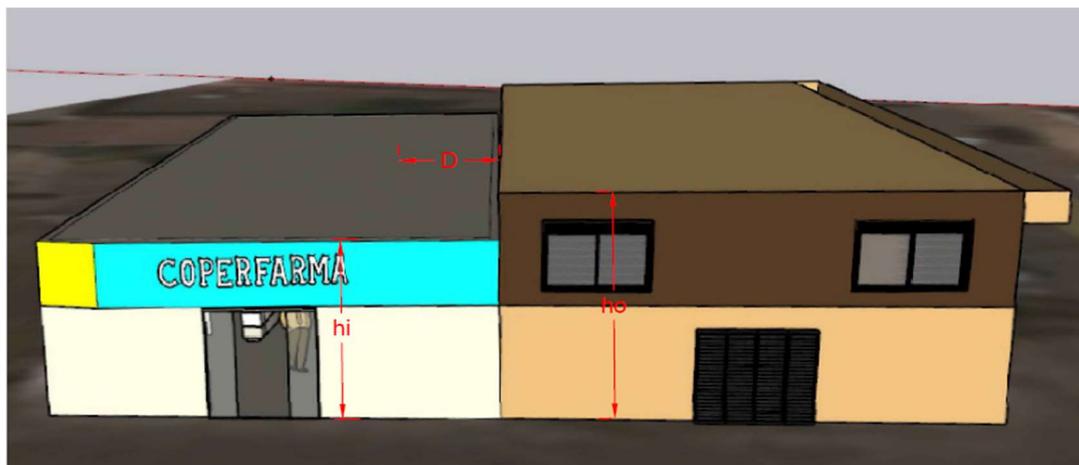


Fonte: Pinho et al. (2008) apud Pinho e Galdino (2014)

Neste caso, fez-se necessário investigar tanto o sombreamento da edificação vizinha, quanto o sombreamento causado por uma fileira de módulos sobre outra. Para a análise do sombreamento da edificação vizinha, o hob foi considerado como altura da própria, e a altura do telhado da farmácia como a hi do bloco gerador - os quais foram obtidos por medições *in loco* e reproduzidos

nos software's *SolarEdge Designer* e *SketchUp 2023* - em conformidade com a vista frontal do empreendimento e a Tabela 1, vista na figura 40:

Figura 40 - Análise do sombreamento da edificação vizinha no telhado



Fonte: Autoria própria via *SketchUp* (2023)

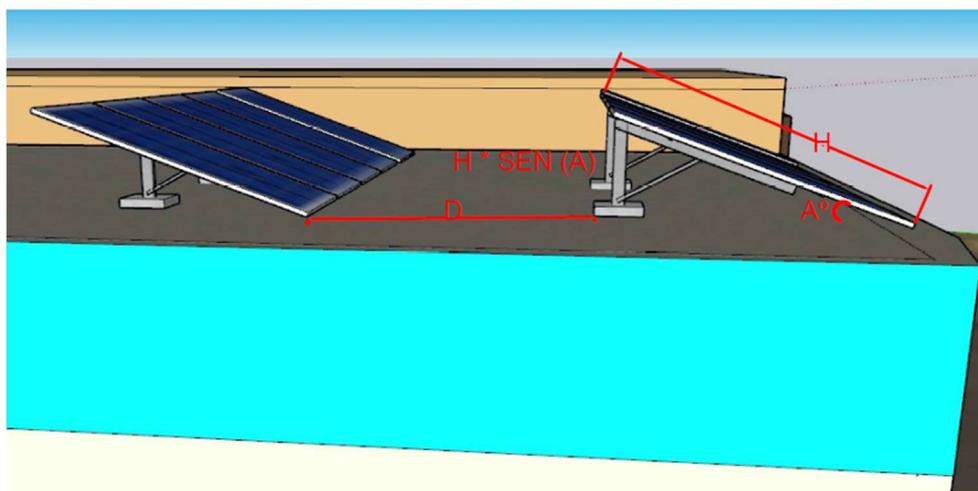
Tabela 1 – Sombreamento causado pela Edificação vizinha sobre a Área de Instalação

Sombreamento Edificação vizinha e telhado da farmácia	
Fe	2,5
hob	5,3 m
hi	4,2 m
D	2,75 m

Fonte: Autoria própria (2023)

Já para a análise do espaçamento entre as linhas de módulos, a *hob* foi obtido multiplicando a altura do módulo H (2,278m) pelo seno 24° (A : ângulo de inclinação dos painéis), ao passo que, a *hi* – por ser a referência de onde a sombra poderia atingir – foi considerada 0. Em consonância com a Tabela 2 e a Figura 41, a seguir:

Figura 41 – Análise do sombreamento entre linhas de módulos



Fonte: Autoria própria via *SketchUp* (2023)

Tabela 2 – Sombreamento causado entre linhas de módulos

Sombreamento: linhas de módulo	
Fe	2,5
hob	0,93 m
hi	0 m
D	2,32 m

Fonte: autoria própria (2023)

Sendo assim, com o intuito de evitar perdas por sombreamento, a área disponível para a instalação dos módulos foi reduzida para 134,13m² e a distância mínima entre as linhas de módulos definida para no mínimo 2,32m, distância a qual foi acrescido um fator de segurança de 20% na simulação, note a Figura 42:

Figura 42 – Área reduzida



Fonte: Autoria própria via *SolarEdge Designer* (2023)

5.1.2 Análise da Radiação Local

A presente análise foi realizada com base no banco de dados do *CRESESB*, o qual contém informações do potencial de irradiação solar e eólico de todo o território brasileiro. O ponto mais próximo da localização do comércio se encontra a 1,7 km desta e possui as coordenadas $-24,301^\circ$ S e $-52,549^\circ$ O, respectivamente de latitude e longitude. Observe a Figura 43, a qual mostra a média da irradiação solar diária mensal em kWh/m².dia.

Tabela 3 - Irradiação solar diária média mensal [kWh/m².dia] em diferentes planos

Estação: Mambore															
Município: Mambore , PR - BRASIL															
Latitude: 24,301° S															
Longitude: 52,549° O															
do ponto de ref.(24,301° S; 52,549															
Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]													
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
Plano Horizontal	0° N	6,21	5,67	5,17	4,40	3,52	3,15	3,37	4,26	4,50	5,27	6,01	6,48	4,83	3,33
Ângulo igual a latitude	24° N	5,59	5,41	5,35	5,05	4,40	4,14	4,34	5,11	4,83	5,16	5,49	5,72	5,05	1,59
Maior média anual	20° N	5,74	5,50	5,37	4,99	4,29	4,01	4,22	5,01	4,81	5,23	5,63	5,89	5,06	1,88
Maior mínimo mensal	44° N	4,62	4,72	4,99	5,09	4,70	4,54	4,71	5,29	4,63	4,60	4,60	4,65	4,76	0,76

Fonte: <Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/>> Acesso em: 22 nov de 2023.

O parâmetro utilizado foi o “ângulo igual a latitude”, visto que o telhado tem uma inclinação de 0°, o que permite inclinar a estrutura de fixação dos módulos com a angulação igual a ideal, isto é, com o *ângulo igual a latitude*, de modo que os raios solares incidam a 90° em cima das células.

5.1.3 Estudo do Consumo da Farmácia

Para apurar a energia gerada pelo arranjo fotovoltaico em kWp, primeiro fez-se necessário examinar a fatura de energia elétrica do cliente, com o intuito de levantar seu padrão de consumo, para posteriormente calcular a média da energia consumida pelo comércio. Note abaixo, a Figura 44, a qual mostra o consumo de energia anual e a média do consumo mensal da Unidade Consumidora no ano de 2022.

Tabela 4 – Consumo de energia anual e média mensal do ano de 2022

Mês	consumo(kWh)
janeiro	1064
fevereiro	1023
março	947
abril	535
maio	451
junho	437
julho	445
agosto	440
setembro	466
outubro	440
novembro	601
dezembro	923
consumo anual	7772
média	647,67

Fonte: Aatoria própria, adaptado da fatura da Copel do consumidor (2023)

Outro ponto fundamental no estudo da fatura diz respeito ao custo de disponibilidade da rede da UC. Tal custo, de acordo com a ANEEL (2012), refere-se a uma taxa convertida em real de um valor estabelecido em kWh, o qual garante ao consumidor – alusivo ao grupo B - a entrega e acessibilidade de sua

energia pela concessionária local. Vale ressaltar, portanto, que esta taxa varia com relação ao tipo de fornecimento da rede e ao número de condutores. Note a Tabela 5, a seguir:

Tabela 5 – Tipos de Fornecimento e custo de disponibilidade da rede

Tipo de Fornecimento – N° de condutores	Custo de disponibilidade da rede
Monofásico ou bifásico – 2 condutores	30kWh
Bifásico – 3 condutores	50kWh
Trifásico	100kWh

Fonte: Autoria própria, adaptado de ANEEL (2012)

À medida que a Unidade Consumidora em estudo possui o fornecimento feito com três condutores - sendo duas fases e um neutro - o custo de disponibilidade pra a mesma é de 50 kWh. A equação [2] demonstra quanto de energia o sistema fotovoltaico precisa gerar para abater o consumo:

$$E = (C - Cdr) \quad [2]$$

$$E = (647,67 - 50)$$

$$E = 597,67 \text{ kWh}$$

Onde:

E = energia gerada pelos módulos (kWh/mês);

C = Consumo mensal médio (kWh);

Cdr = Custo de disponibilidade da rede (kWh);

5.1.4 Dimensionamento de Potência do Sistema Fotovoltaico

Segundo Júnior (2020), *apud* Marcelino (2022), para estimar a potência fotovoltaica que um sistema carece, leva-se em consideração o produto entre a energia gerada pelo sistema (E), com a irradiância nas condições padrão de teste (G_{stc}), dividido pelo produto entre irradiação global no local (H_{tot}),

juntamente com a taxa de desempenho do sistema fotovoltaico (TD) e o número de dias componentes do mês. Note:

$$P_{FV} = \frac{E \cdot G_{STC}}{H_{TOT} \cdot 30 \cdot TD} \quad [3]$$

Onde:

P_{FV} = potência de pico do sistema fotovoltaico

E = Energia gerada em $\frac{kWh}{mês}$

$G_{stc} = 1000 \frac{W}{m^2}$, Irradiância nas condições padrão de teste

H_{TOT} = Irradiação global horizontal no local, em $\frac{kWh}{m^2}$ por dia

TD = Taxa de desempenho do sistema fotovoltaico ($0,75 < TD < 0,85$)

A irradiância nas condições padrão de teste é fornecida pelo catálogo dos módulos - vide Anexo A. Já a Irradiação Global Média é fornecida no local, em que o arranjo será alocado é de 5,05 kWh/m². Em consonância com Messenger (2000) a Taxa de desempenho foi fixada no valor de 0,8 visto que, a área disponível para instalação não possui sombreamento, a inclinação escolhida foi com ângulo igual a latitude e existe adequada ventilação natural.

Quanto a última variável, como o número de dias varia conforme o mês, esta foi calculada fazendo o quociente entre o número de dias que um ano possui pelo número de meses. Sendo assim, foram aplicados tais fatores conforme a operação abaixo:

$$Pfv = (597,67 * 1000) / (5,05 * 30,417 * 0,8)$$

$$Pfv = 4,86 kWp$$

Por conseguinte, a potência de pico mínima considerada para suprir o consumo de energia elétrica da farmácia foi de 4,86 kWp.

5.1.4.1 Número de Módulos Fotovoltaicos

Para o cálculo do número de módulos fotovoltaicos, primeiramente, fez-se necessário definir o modelo destes. De acordo com Ruther (2004), o equipamento de silício monocristalino é o mais utilizado no mercado, gozando da melhor eficiência entre as tecnologias devido ao desempenho em condições de baixa luminosidade, durabilidade, estética, ou seja, um exímio custo-benefício. Dessa forma, decidiu-se pelo modelo TMX 550 MH8-144A, o qual possui potência de 550 Wp, 21,3% de eficiência do fabricante TRIMAX SOLAR. Este módulos tem 2,279 m de altura x 1,134 m de comprimento x 0,035m de largura e pesa 27,0 kg (conforme detalhado no Anexo B).

Com a potência e modelo dos módulos definidos, utilizou-se a equação [4] abaixo para estimar o número de módulos necessários para suprir o consumo da UC. Confira:

$$n^{\circ} \text{ módulos FV} = \frac{\text{Demanda contratada}}{\text{Potência do módulo FV}} \quad [4]$$

$$n^{\circ} \text{ módulos FV} = 4,86 \text{ kW} / 550 \text{ W}$$

$$n^{\circ} \text{ módulos FV} = \sim 9$$

No entanto, segundo Miranda (2013), superdimensionar a potência do sistema se mostra como uma estratégia assertiva, pois essa folga prevê equilibrar a geração em anos com muitas chuvas e tempo nublado, além de conjecturar pequenos aumentos no consumo. Sendo assim, decidiu-se por utilizar 10 módulos, totalizando 5500 Wp de potência. Observe as Figuras 45 e 46, respectivamente, nas quais foram obtidas com o auxílio do *SketchUp* 2023 e ostentam diferentes perspectivas do *layout*:

Figura 43 - *layout* de instalação, vista em perspectiva



Fonte: Autoria própria via SketchUp (2023)

Figura 44 - *layout* de instalação, vista superior



Fonte: Autoria própria via SketchUp (2023)

5.1.5 Dimensionamento do Inversor Fotovoltaico

De acordo com Villalva e Gazoli (2012), o dimensionamento de um inversor fotovoltaico parte do estudo do consumo e deve levar em consideração variados atributos, sendo eles: o rendimento, a proteção, as especificações do local e se o sistema é ou não conectado a rede.

Existem diversos tipos de inversores disponíveis no mercado, entretanto, como o sistema aqui estudado se trata de um SFVCR de baixo consumo, os arquétipos analisados foram os inversores *ON-GRID* do tipo

Inversor *String* e Microinversor. Observe as características de eficiência de um exemplo de cada um destes, presentes nas Tabelas 6 e 7, a seguir:

Tabela 6 – Eficiência do inversor *MIN 5000TL-X(E)*

Eficiência		
Máxima eficiência global	98,2%	98,4%
Eficiência europeia	97,1%	97,5%
Eficiência MPPT		99,9%

Fonte: Adaptado de Growatt (2019)

Tabela 7 – Eficiência do inversor *SUN2000G3-US-220*

Eficiência	
Eficiência pondera CEC	95 %
Máxima eficiência global	96,5%
Eficiência estática do MPPT	99%
Consumo de energia noturno	50mW

Fonte: Adaptado de Deye (2020)

Sendo assim, tanto a eficiência máxima global quanto a eficiência máxima no MPPT do inversor *string*, se mostram superiores e pela circunstância do telhado possuir apenas uma água - logo todos os módulos podem ficar na mesma orientação - optou-se pelo inversor *string* do fabricante *Growatt*, modelo *MIN 5000TL-X* monofásico de 220V, o qual possui 2 MPPT's independentes com uma entrada cada, eficiência global máxima de 98,4%, eficiência no MPPT de 99,9% e possui seu desempenho autenticado pelo *INMETRO*, com o nº de Registro: 008282/2022.

5.1.6 Dimensionamento das *Strings*

Com a finalidade de dimensionar os arranjos – ou *strings* – a priori, foi necessário examinar o catálogo do inversor com o intuito de extrair determinados elementos fundamentais para a análise. De acordo com o fabricante *Growatt*, o valor de Máxima Potência Fotovoltaica de geração recomendada para o inversor

é 7000 W, em outras palavras o inversor suporta trabalhar com no máximo 40% de sobrecarga em seu valor nominal.

Sabendo que o inversor escolhido oferece até 5000 W de potência à rede, e os módulos selecionados possuem 550 W em seu pico, os 10 módulos firmados anteriormente, neste capítulo, são suficientes para entregar os 5000 W que o inversor injeta na rede e, também, oferecer 10% de sobrecarga. Vale ressaltar que, segundo Grazina (2021), superdimensionar o inversor se trata de uma boa prática que faz com que o comportamento da curva de geração do SFV se aproxime mais do comportamento ideal, gerando ganhos na eficiência do projeto. Ou seja, de modo a totalizar 5500 Wp de potência. A Figura 47, a seguir, exhibe as especificações técnicas relacionadas a entrada e saída do inversor *MIN 5000TL-X*.

Tabela 8 - Especificações técnicas de entrada e saída inversor *MIN 5000TL-X*

Ficha de dados	MIN 5000TL-X
Dados de entrada	
Máxima potência fotovoltaica recomendada (para o módulo STC)	7000W
Máxima tensão CC	550V
Tensão de partida	
Faixa de tensão de MPPT / tensão nominal de MPPT	60V-550V /360V
Corrente máxima de entrada	13.5A/13.5A
Máxima corrente curto-circuito por trackers MPP	16A/16A
Número de MPPT / strings por MPPT	2/1
Saída (CA)	
Potência nominal de saída CA	5000W
Potência aparente máxima de CA	5000VA
Corrente máxima de saída	22.7A
Tensão nominal de saída (Faixa)	230V(160V-300V)
Frequência de rede CA(Faixa)	50Hz/60Hz, ± 5Hz
Fator de potência ajustável	0.8i-0.8c
THDi	<3%
Conexão CA	Fase única

Fonte: Growatt (2019)

Similarmente, foi preciso consultar o *datasheet* dos módulos fotovoltaicos, em busca da Tensão de circuito aberto – Voc – e da Tensão de Potência Máxima do MPPT – Vmppt. Note a seguir a Figura 48, a qual exhibe os dados elétricos em condições de testes.

Tabela 9 – Dados em condições de testes TMX550 MH8-144A

TMX 550 MH8–144A

ELECTRICAL DATA AT STC	TMX 530 MH8-144A	TMX 535 MH8-144A	TMX 540 MH8-144A	TMX 545 MH8-144A	TMX 550 MH8-144A
Rated power P _{max} (Wp)	530	535	540	545	550
Rated voltage P _{max} – V _{mp} (V)	41,28	41,51	41,70	41,92	42,11
Rated current P _{max} – I _{mp} (A)	12,84	12,89	12,95	13,00	13,06
Open circuit voltage – V _{oc} (V)	49,61	49,87	49,95	50,04	50,28
Short circuit current – I _{sc} (A)	13,66	13,72	13,78	13,84	13,9
Module efficiency (%)	20,5	20,7	20,9	21,1	21,3
Sorting (plus tolerance)	0 ~ +5 Wp				

STC (Standard Test Conditions) : Irradiance 1000 W/m², Air Mass = 1.5, Cell Temperature 25°C, Measurement Tolerance P_{max} ± 3%, V_{oc} ± 2%, I_{sc} ± 2%

Fonte: TRIMAX Solar (2022)

De acordo com Pinho e Galdino (2014), o número máximo de módulos que pode ser arranjado em série para cada MPPT, é limitado pelo quociente entre a Máxima Tensão CC do inversor – V_{ccmax} – e a Tensão de Curto Circuito do módulo - V_{oc} – ademais, precisa-se averiguar se a Tensão Nominal de MPPT do inversor é superior ao produto entre a Tensão de Potência Máxima do MPPT – V_{mppt} - e o N° de módulos em série. Daí a equação [5]:

$$n^{\circ} \text{ módulos em série} = \frac{V_{ccmax}}{V_{oc}} \quad [5]$$

$$N^{\circ} \text{ módulos em série} = 550/50,29$$

$$N^{\circ} \text{ módulos em série} = \sim 10 \text{ módulos em série}$$

$$V_{mp} \cdot n^{\circ} \text{ módulos em série} < V_{mppt}$$

$$42,11 * 10 < 550 V$$

$$421,10 V < 550 V$$

Ou seja, neste inversor, cada *string* suporta até 10 módulos com essas especificações. Com base nesses critérios e no fato de todos os módulos poderem ser posicionados, seguindo a mesma orientação, faz-se possível arranjá-los em apenas uma *string* com 10 módulos em série.

Porém, de acordo com Ruther (2004), para ter ganhos com eficiência e rendimento, optou-se por dividir os módulos em dois arranjos diferentes, de modo a controlar cada *string* individualmente e evitar perdas de associação em todo o sistema, pois os efeitos de sombreamento ou de sujidades em um módulo prejudicaria a geração de todos, afinal, como os arranjos são conectados em série, afetar a corrente em um módulo limita a corrente de todo aquele grupo de módulos conectados.

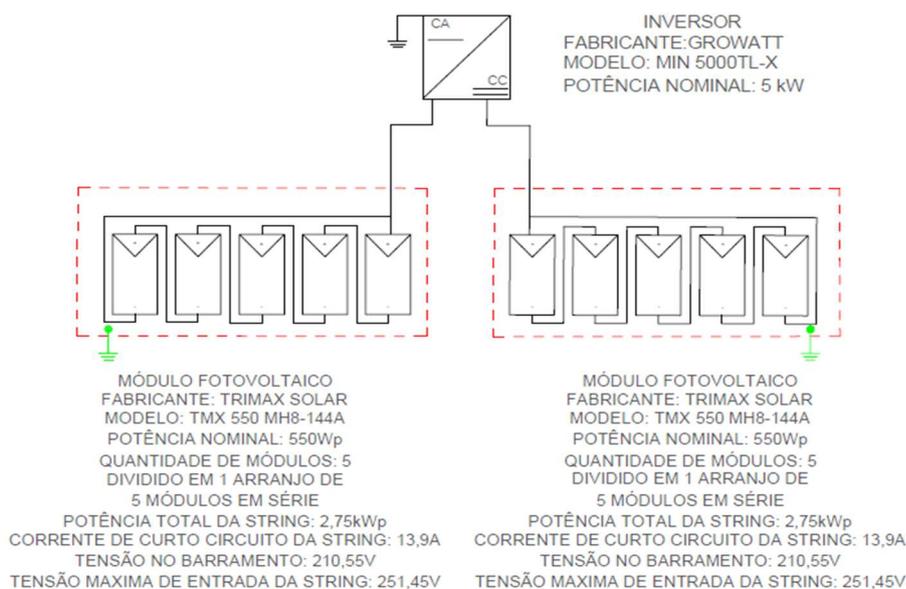
Diante disso, o bloco de geração foi fragmentado em dois arranjos contendo 5 módulos cada, isto é, potência total de *string* de 2750 Wp. Ao passo que, a equação mostra o cálculo da área ocupada pelos módulos e o diagrama unifilar simplificado mostrado na figura 49 demonstra os arranjos conectados no inversor, assim como dados de potência, tensão e corrente destes. Note a equação [6]:

$$\text{Área ocupada pelos módulos} = \text{área do módulo} * N^{\circ} \text{ de módulos} \quad [6]$$

$$\text{Área ocupada pelos módulos} = 2,583 * 10$$

$$\text{Área ocupada pelos módulos} = 25,83 \text{ m}^2$$

Figura 45 - Corte do Diagrama unifilar



Fonte: Autoria própria (2023)

5.1.7 Dimensionamento dos Condutores Elétricos

Em consonância com a NBR 5410 (ABNT, 2005), a seção transversal mínima para condutores elétricos em sistemas fotovoltaicos deve estar de acordo com a tabela abaixo, explicita pela Figura 50. Em outras palavras, como estes cabos se referem a circuitos de força, os valores mínimos das bitolas para os materiais alumínio e cobre são 16 mm² e de 2,5 mm², respectivamente.

tabela 10 – retirada da NBR 5410

Seção mínima dos condutores¹⁾

Tipo de linha		Utilização do circuito	Seção mínima do condutor mm ² - material
Instalações fixas em geral	Condutores e cabos isolados	Circuitos de iluminação	1,5 Cu 16 Al
		Circuitos de força ²⁾	2,5 Cu 16 Al
		Circuitos de sinalização e circuitos de controle	0,5 Cu ³⁾
	Condutores nus	Circuitos de força	10Cu 16 Al
		Circuitos de sinalização e circuitos de controle	4 Cu
Linhas flexíveis com cabos isolados		Para um equipamento específico	Como especificado na norma do equipamento
		Para qualquer outra aplicação	0,75 Cu ⁴⁾
		Circuitos a extra baixa tensão para aplicações especiais	0,75 Cu
¹⁾ Seções mínimas ditadas por razões mecânicas ²⁾ Os circuitos de tomadas de corrente são considerados circuitos de força. ³⁾ Em circuitos de sinalização e controle destinados a equipamentos eletrônicos é admitida uma seção mínima de 0,1 mm ² . ⁴⁾ Em cabos multipolares flexíveis contendo sete ou mais veias é admitida uma seção mínima de 0,1 mm ² .			

Fonte: NBR 5410 (2005)

5.1.7.1 Dimensionamento da Seção Transversal dos Cabos CC

Conforme Urbanetz Junior (2015), o cálculo para definir a seção transversal mínima de cabos CC, segue a operação [7]:

$$S_{cond} = (2 * L * I_{scb} * \rho_{cu} / (V_{mpb} * \Delta V\%)) \quad [7]$$

Nos quais:

$L = \text{comprimento do cabo CC (m)}$;

$V_{mpb} = \text{tensão no barramento CC (V)}$;

$I_{scb} = \text{corrente de curto – circuito no barramento CC (A)}$;

$\rho_{cu} = \text{resistividade do cobre}$;

$$S_{cond} = (2 * 30 * 27,80 * 0,0172 / (210,55 * 4))$$

$$S_{cond} = 3,41 \text{ mm}^2$$

Em concordância com a tabela da NBR 5410, representada pela Figura 50, e os cálculos realizados, para o trecho do circuito envolvendo o inversor e as *strings*, o valor mínimo comercial da bitola do condutor CC que supre os parâmetros obtidos, foi 4 mm². Sendo assim, o condutor flexível unipolar de cobre estanhado, isolamento em composto termofixo estruturado, resistência 120° e proteção UVB, *Energyflex BR Afitox 120° 0.6/1kV* do fabricante *Nexans*, consoante a Figura 51 abaixo, satisfaz as especificidades do projeto.

Tabela 11 – Especificações do fabricante Nexans

Seção nominal (mm ²)	Resistência elétrica máx DC à 90°C (Ω/km)	Resistência elétrica máx. DC à 120°C (Ω/km)	Instalação com um único cabo	Instalação de um único circuito DC (+ / -)	à 90°C	à 120°C
2.5	10.47	11.70	39	33	20.9	23.4
4	6.49	7.26	52	44	13.0	14.5
6	4.32	4.83	67	57	8.6	9.7
10	2.49	2.78	93	79	5.0	5.6
16	1.58	1.77	125	107	3.2	3.5
25	1.01	1.13	167	142	2.0	2.3
35	0.720	0.805	207	176	1.4	1.6
50	0.501	0.560	262	221	1.0	1.1
70	0.353	0.395	330	278	0.71	0.79
95	0.268	0.300	395	333	0.54	0.60
120	0.209	0.234	464	390	0.42	0.47
150	0.168	0.188	538	453	0.34	0.38
185	0.138	0.154	612	515	0.28	0.31
240	0.104	0.116	736	620	0.21	0.23

Condições de instalação ao ar livre com temperatura ambiente de até 60° C.

(*) Para agrupamento de mais de um circuito, devem ser aplicados os fatores correspondentes da NBR 5410.

Fator de correção para diferentes temperaturas ambientes (ou de contato)

Temperatura	Fator
Até 60°C	1.00
70°C	0.91
80°C	0.82
90°C	0.71

Fonte: **Nexans (2018)**

5.1.7.2 Dimensionamento Cabos CA

Para determinar a bitola dos condutores elétricos CA de um SFVCR em congruência com a NBR 5410 e a NBR 16690, levou-se em consideração as equações [8] e as tabelas 42,40,36, respectivamente.

$$I_p (A) = S(VA) / V \quad [8]$$

$$I_p = 5000/220$$

$$I_p = 22,72 A$$

Onde:

I_p = corrente de projeto

S = potência do inversor

V = tensão nominal do inversor

Tabela 12 – NBR 5410(tabela 42)

Fatores de correção aplicáveis a condutores agrupados em feixe (em linhas abertas ou fechadas) e a condutores agrupados num mesmo plano, em camada única

Ref.	Forma de agrupamento dos condutores	Número de circuitos ou de cabos multipolares											Tabelas dos métodos de referência	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9 a 11	12 a 15	16 a 19		≥20
1	Em feixe: ao ar livre ou sobre superfície; embulidos; em conduto fechado	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45	0,41	0,38	36 a 39 (métodos A a F)
2	Camada única sobre parede, piso, ou em bandeja não perfurada ou prateleira	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70				36 e 37 (método C)
3	Camada única no teto	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61				
4	Camada única em bandeja perfurada	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72				38 e 39 (métodos E e F)
5	Camada única sobre leito, suporte etc.	1,00	0,87	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78				

Fonte: NBR 5410 (2005)

tabela 13 – NBR 16690 (tabela 40)

Fatores de correção para temperaturas ambientes diferentes de 30°C para linhas não-subterrâneas e de 20°C (temperatura do solo) para linhas subterrâneas

Temperatura °C	Isolação	
	PVC	EPR ou XLPE
Ambiente		
10	1,22	1,15
15	1,17	1,12
20	1,12	1,08
25	1,06	1,04
35	0,94	0,96
40	0,87	0,91
45	0,79	0,87
50	0,71	0,82
55	0,61	0,76
60	0,50	0,71
65	–	0,65
70	–	0,58
75	–	0,50
80	–	0,41

Fonte: NBR 16690 (2019)

Tabela 14 – NBR 16690 (tabela 36)

Capacidades de condução de corrente, em ampères, para os métodos de referência A1, A2, B1, B2, C e D

Seções nominais mm ²	Métodos de referência indicados na tabela 33											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	Número de condutores carregados											
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Cobre												
0,5	7	7	7	7	9	8	9	8	10	9	12	10
0,75	9	9	9	9	11	10	11	10	13	11	15	12
1	11	10	11	10	14	12	13	12	15	14	18	15
1,5	14,5	13,5	14	13	17,5	15,5	16,5	15	19,5	17,5	22	18
2,5	19,5	18	18,5	17,5	24	21	23	20	27	24	29	24
4	26	24	25	23	32	28	30	27	36	32	38	31
6	34	31	32	29	41	36	38	34	46	41	47	39
10	46	42	43	39	57	50	52	46	63	57	63	52
16	61	56	57	52	76	68	69	62	85	76	81	67
25	80	73	75	68	101	89	90	80	112	96	104	88

Fonte: NBR 16690 (2019)

O circuito foi arranjado com dois condutores carregados, no método de instalação B1 – eletroduto aparente - de material cobre e isolamento em HEPR. Após obter a corrente de projeto, foi preciso encontrar a capacidade de corrente do condutor nas condições pressupostas da instalação. Para isso, foi realizado o produto envolvendo a corrente do cabo e os fatores de correção de agrupamento e de temperatura. Note a equação 8:

$$I_z (A) = I_{cabo} * FCT * FCA \quad [8]$$

$$I_z (A) = 32 * 1,04 * 0,80$$

$$I_z (A) = 26,624 A$$

Em que:

I_z = capacidade de corrente do condutor, nas condições pressupostas da instalação;

I_{cabo} = corrente do cabo para condição B1;

FCT = fator de correção de temperatura, de acordo com a NBR5410;

FCA = fator de correção de agrupamento, em conformidade com a NBR5410;

Por fim, empregou-se o critério de dimensionamento pela queda de tensão, conforme a operação matemática [9]:

$$\Delta V\% = 2 * L * \rho_{cu} * I_p / S * V \quad [9]$$

$$\Delta V\% = 2 * 7 * 0,0172 * 22,72 / 4 * 220$$

$$\Delta V\% = 0,62\%$$

No qual:

ΔV% = queda de tensão percentual;

ρ_{cu} = resistividade do cobre

L = Tamanho do condutor (m);

I_p = corrente de projeto (A);

S = seção transversal do condutor (mm²);

V = tensão nominal (V);

Sendo assim, para o segmento do circuito que inicia no inversor e vai até o Quadro de Distribuição Geral da Unidade Consumidora, o cabo flexível de 4mm² SILNAX 0,6/1 KV HEPR 90°C atende as condições, pois a queda de tensão se mostrou dentro do intervalo requerido na NBR 5410. A Figura 55, abaixo, demonstra a tabela onde os parâmetros desta fração do sistema são descritos.

Tabela 15 – Parâmetros descritos da fração do sistema

Método de instalação	B1
nº condutores carregados	2
material	Cobre
isolamento do cabo	HEPR
distância	7
temperatura do ambiente	25°
resistividade do condutor	0,172
tensão de linha	220V
queda de tensão	0,62%

Fonte: Autoria Própria (2023)

5.1.8 Dimensionamento dos Disjuntores

Em conformidade com a NBR 16690, é indispensável o uso de dispositivo interruptor seccionador tanto na parte CC quanto na porção CA do circuito. Mesmo que o inversor *GROWATT 5000 MINTL-X(E)* possua diversas proteções integradas a seu sistema. Segundo a NBR5410, para se determinar um disjuntor CC e CA, emprega-se primeiramente a inequação [10] a seguir:

$$I_p/n \text{ condutores carregados} \leq I_d \leq I_z \quad [10]$$

Em que:

I_p = corrente de projeto;

I_d = corrente nominal do disjuntor;

I_z = capacidade de corrente do condutor, nas condições pressupostas da instalação;

Conjuntamente, deve-se levar em consideração a corrente nominal de atuação do disjuntor (I_2), a qual – segundo a NBR 5410 - se relaciona com a I_z através da operação [11]:

$$I2 \leq 1,45 * Iz \quad [11]$$

Por fim, de acordo com a NBR 5361 de disjuntores de baixa tensão, a $I2$ é calculada multiplicando a corrente nominal do disjuntor – I_d – por 1,35. Aplicando na inequação acima, tem-se:

$$1,35 * I_d \leq 1,45 * Iz \quad [12]$$

5.1.8.1 Dimensionamento do Disjuntor CC

Para dimensionar o disjuntor da porção CC, fixaram-se as especificações desta parte do circuito, nas operações matemáticas, note:

$$27,80A / 2 \leq I_d \leq 44A * 1 * 0,8$$

$$13,9A \leq I_d \leq 35,2A$$

$$I2 \leq 1,45 Iz$$

$$1,35 * 25A \leq 1,45 * 35,2A$$

$$33,75A \leq 51,04A$$

Ou seja, o disjuntor de corrente nominal equivalente a 25A se faz presente neste intervalo, em consonância com a NBR 5410 (2005), NBR 16690 (2019) e NBR 5361 (1998). O que não apenas assegura a eficácia e a segurança dos processos, mas também reforça a confiabilidade dos resultados.

5.1.8.2 Dimensionamento do Disjuntor CA

Por conseguinte aplicando os parâmetros do projeto nas operações matemáticas citadas, para o disjuntor CA obteve-se:

$$11,36A \leq I_d \leq 26,624A$$

$$I2 \leq 1,45 Iz$$

$$1,35 * 25A \leq 1,45 * 26,624A$$

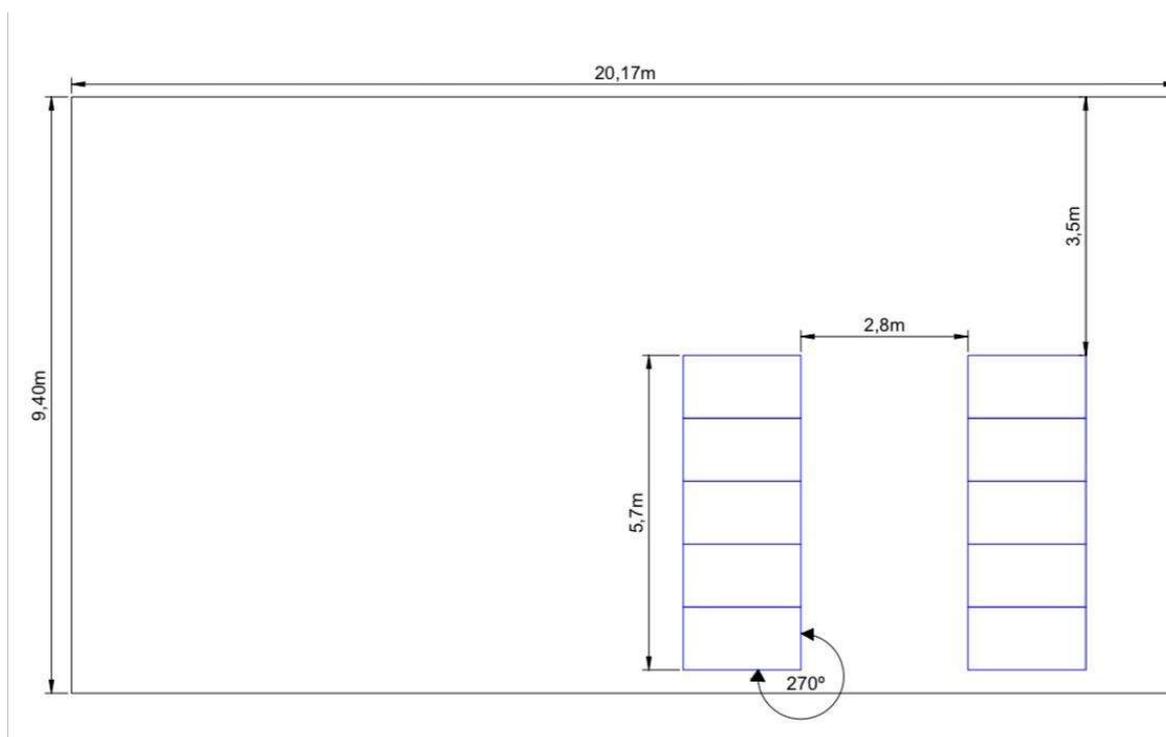
$$33,75A \leq 38,605A$$

Sendo assim, o disjuntor de 25A, também está em concordância com as normas vigentes no tocante a fração CA do circuito. Consolidando a credibilidade do projeto conforme as diretrizes estabelecidas pelo padrão técnico aplicável.

5.2 Simulação no *Software PVSOL*

Após examinar a área disponível para instalação, verificar o sombreamento causado por obstáculos ao redor do imóvel e definir os equipamentos do sistema, foi possível identificar o local mais adequado para o bloco de geração proposto no projeto. Note a planta de situação em 2D de tal área - obtida com o auxílio do *software PVSOL*, na Figura 56:

Figura 46 – Planta 2D da área



Fonte: Autoria própria (2023)

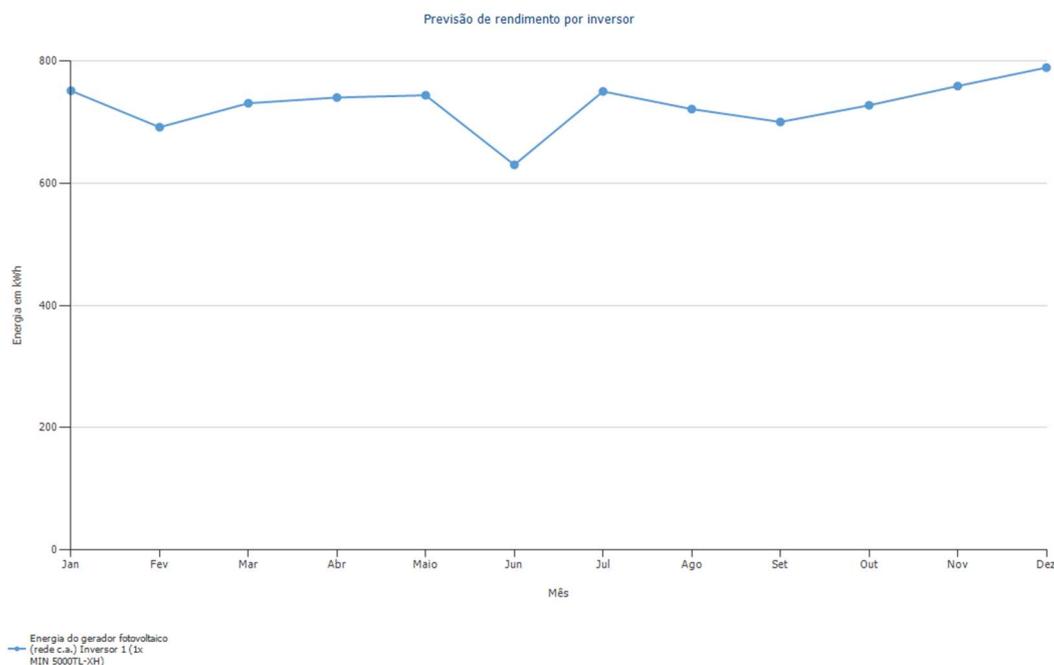
Deste modo, os painéis foram posicionados na área com menor sombreamento ao longo do ano, com orientação, predominantemente Norte – desvio azimutal de 22° Oeste - partindo dos 5,5 kWp determinados como parâmetro de potência de pico, calculados no item “5.1.6 - Dimensionamento das

Strings”, com o propósito de validar se o sistema proposto supre o consumo do imóvel.

Sendo assim, com base na simulação, constatou-se que o sistema atende com folga o consumo energético da UC, pois os 10 módulos de 550 Wp de potência, ligados no inversor de 5,0 kW possuem uma estimativa de geração de 8739 kWh/ano. Este parâmetro condiz a 111% do consumo da farmácia e *PR* (*performance ratio*) = 84,13%, que, de acordo com Perez *et al* (2010), é classificado como satisfatório, uma vez que demonstra que o sistema está operando de forma eficiente, isto é, que produz uma quantidade significativa de energia sob as condições reais de operação em relação à sua capacidade teórica. Note o gráfico abaixo, representado pela Figura 57, em que se mostra o desempenho e o balanço energético do sistema. Vale ressaltar, que o balanço energético detalhado obtido através da simulação está disponível no Apêndice A deste trabalho.

Agora, na Figura 57 apresentada abaixo, é possível realizar uma análise da previsão de rendimento do inversor, proporcionando uma visão abrangente sobre como o equipamento deverá operar ao longo de um ano.

Figura 47 - Previsão de rendimento do sistema



Fonte: Autoria própria via software PVSOL (2023)

Por fim, de acordo com a análise realizada, pode-se constatar que, apesar dos desafios relacionados ao sombreamento, identificados na estrutura disponível para instalação dos módulos fotovoltaicos, o SFVCR proposto para ser implementado na sede da farmácia Coperfarma de Mamborê apresenta ótima viabilidade técnica.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi expor um Sistema Solar Fotovoltaico conectado à Rede de Distribuição que se mostre suficiente para o atendimento do consumo mensal da farmácia em questão. No sistema proposto, foi possível não apenas mitigar o consumo do imóvel, como gerar um excedente de energia.

A partir da análise técnica do projeto, determinou-se que a instalação dos painéis é factível em uma grande fração do telhado do comércio, porém, tal área foi reduzida, uma vez que é necessário fugir do sombreamento causado pela edificação vizinha e pelos módulos inclinados em sua estrutura de fixação. No tocante a viabilidade, foram retratados pontos como a investigação acerca do sombreamento no telhado da farmácia, análise técnica in loco do espaço que se pretende instalar o sistema, modelagem 3D da estrutura, aferição da estimativa de geração via *software PVSOL*, bem como o dimensionamento e a determinação dos principais componentes de um SFVCR.

O presente trabalho visa instruir àqueles que se mostram atraídos pelo âmbito da Energia Solar Fotovoltaica, pois o projeto pretendeu demonstrar a possibilidade de um pequeno consumidor, que possui um consumo e área disponível adequados para implementação de painéis fotovoltaicos, possuir um sistema de geração próprio com a fonte renovável apresentada. Ademais, concede como recomendação para trabalhos posteriores uma avaliação acerca da viabilidade econômica e técnica utilizando a tecnologia de módulos monocristalinos bifaciais.

REFERÊNCIAS

- ACIOLI, J. L. **Fontes de energia**. Brasília: Universidade de Brasília, 1994.
- ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed generation: a definition. **Electric power systems research**, v. 57, n. 3, p. 195-204, 2001.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA (ANEEL). **Nota técnica – resolução nº 482, de 2012 – ANEEL**. Disponível em: <https://www.confea.org.br/midias/uploads-imce/energiasolar-notaconfea-resolucao482-aneel.pdf> Acesso em 26 agos. 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA (ANEEL). **Resolução normativa no 84, de 20 de setembro de 2004**. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2004084.html> Acesso em 28 nov. 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA (ANEEL). **Resolução normativa no 493, de 05 de junho de 2012**. Disponível em <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012493.pdf> Acesso em 28 nov. 2023.
- AHMAD, T.; SOBHAN, S.; NAYAN, M. F. Comparative analysis between single diode and double diode model of PV cell: concentrate different parameters effect on its efficiency. **Journal of power and Energy Engineering**, v. 4, n. 3, p. 31-46, 2016.
- ALMEIDA, M. P. **Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- ALVARENGA, C. A. **Energia solar**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5361:1998 - Disjuntores de baixa tensão**. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/343/nbr5361-disjuntores-de-baixa-tensao>. Acesso em 28 nov. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT/CB-003. Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos — Requisitos de projeto, 2º PROJETO ABNT NBR 16690**. Jul. 2019. Disponível em: <https://www.solarize.com.br/downloads/manual-energia-solar/NBR-16690-2019-consulta-publica.pdf> Acesso em 28 nov. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5410**. 2005. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/jeangaldino/disciplinas/2015.1/instalacoes-eletricas/nbr-5410>. Acesso em 28 nov. 2023.
- BECQUEREL, Edmond. On electric effects under the influence of solar radiation. **Compt. Rend.**, v. 9, p. 561, 1839.
- BLUESOL, 2022. Disponível em: <https://www.reachr.com.br/bluesol/#/>. Acesso: 21 set. 2023.

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022.** Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/l14300.htm Acesso em 28 nov. 2023.

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996.** Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9427compilada.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%209.427%2C%20DE%2026%20DE%20DEZEMBRO%20DE%201996.&text=Institui%20a%20Ag%C3%AAncia%20Nacional%20de,el%C3%A9trica%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%AAsncias. Acesso em 28 nov. 2023.

CARVALHO, D. D. C. **Proposta de um modelo para implantação de sistemas híbridos de geração distribuída eólico-fotovoltaicos.** 2016. Dissertação de Mestrado. Brasil.

CARVALHO, J. F. Energia e sociedade. **Estudos avançados**, v. 28, p. 25-39, 2014.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRESESB). **Energia Eólica: Princípios e Tecnologia.** 2008. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf. Acesso em 20 set. 2023.

DEYE INVERTER. **Micro Inversor 1300-2000W.** 2020. Disponível em: <https://pt.deyeinverter.com/deyeinverter/2021/09/16/1300-2000w.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2023.

ECOMAISS-EFFICIENT ENERGY. **Energia Solar.** 2022. Disponível em: <https://www.ecomais.ind.br/energia-solar> Acesso em 5 nov. 2023.

ELETROBRAS. **Especificações Técnicas dos Programas para Atendimento às Regiões Remotas dos Sistemas Isolados no âmbito do Programa Luz para Todos.** Edição Revisada, julho, 2017.

ELETROBRAS. **Experiência da Eletrobras com sistemas de atendimento para eletrificação rural utilizando fontes renováveis de energia.** Campinas, Brasil: Apresentação na 1º INOVA FV - Workshop Inovação para o Estabelecimento do Setor de Energia Solar Fotovoltaica no Brasil, 2011.

FADIGAS, E. A. F. M. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica,** [s.d].

FRAIDENRAICH, N.; LYRA, F. **Energia solar: fundamentos e tecnologia de conversão heliotermolétrica e fotovoltaica.** Universitária da UFPE, 1995.

GATI, Victor et al. **Desenvolvimento de inversor fotovoltaico conectado à rede elétrica com sistema de armazenamento de energia e isolamento galvânico.** 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

GETIRANA, A., LIBONATI, R. e CATALDI, M. **Brazil is in water crisis - it needs a drought plan**, 2021. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/d41586-021-03625-w>. Acesso em: 22 nov. 2023.

GRAZINA, C. S. P. **Uma base para o projeto de produção de energia elétrica de origem fotovoltaica para uma indústria aeronáutica**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade de Évora.

GROWATT, New Energy Technology Co., LTD. **MIN5000TL-X(E)**. 2019.

ILLA, F. C. **Eletrônica de Potência II**. 2019. Notas de aula. Não paginado.

MARCELINO, I. P. **Análise de viabilidade técnica e econômica de um sistema fotovoltaico de microgeração distribuída**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MESSENGER, R.; VENTRE, J. **Photovoltaic Systems Engineering**, CRC. **Press LLC, Boca Raton**, 2000.

MIRANDA, R. F. C. **Análise da inserção de geração distribuída de energia solar fotovoltaica no setor residencial brasileiro**. **Universidade Federal do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, Brazil**, 2013.

MORENO, H. **Cabos elétricos para instalações fotovoltaicas**. IFC/COBRECUM, 2017.

NASCIMENTO, A. S. **Energia solar fotovoltaica: estudo e viabilidade no nordeste brasileiro**. 2015. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

NEXANS, **Cabo Energyflex BR Afitox**, 2018.

OLIVEIRA, T. R. **APOSTILA PARA A DISCIPLINA ELETRÔNICA GERAL**. Minas Gerais, 2013.

PALZ, W. **Energia solar e fontes alternativas**. São Paulo: Hemus, 1981.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: Inpe, 2006.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos**. 2014.

PINTO NETO, A. F. C. **Qualificação e etiquetagem de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Energia, EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

REIS, L. B. **Geração de energia elétrica**. 3 ed. Editora Manole, 2017.

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos**. 1. ed. Florianópolis – SC: LABSOLAR/UFSC, 2004, p. 114.

TRIMAX, Solar GmbH. Photovoltaic Module **TMX 550 MH8–144^a**, 2022.

URBANETZ JUNIOR, J. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade**. 189 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2010.

VAZ, J. M. R. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico. Caso de estudo: edifício Azevedo Gomes**. Orientadora: Ana Cristina Ferreira da Cunha Queda. 2017. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior de Agronomia, Engenharia do Ambiente, Universidade de Lisboa, Lisboa: ISA, 2017. Disponível em:

https://www.repository.utl.pt/bitstream/10400.5/15117/1/Tese_Vers%c3%a3oFinal-Jo%c3%a3o%20Vaz.pdf Acesso em 10 ago. 2022.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R; **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1^o edição. 224 f. Editora Érica. São Paulo-SP, 2012.

VILLAÇA, Andrea Lopes. A implantação de mini-redes de energia solar em comunidades isoladas do Amazonas. 2015.

**APÊNDICE A - Dados de saída (Balanço Energético do Sistema e
Desempenho do Sistema por Área de Módulo)**

Dados de saída - Balanço energético do sistema

Irradiação global - horizontal	1.813,43	kWh/m ²	
Desvio em relação ao espectro padrão	-18,13	kWh/m ²	-1,00 %
Reflexão do solo (albedo)	15,52	kWh/m ²	0,86 %
Orientação e inclinação do plano dos módulos	77,94	kWh/m ²	4,30 %
Sombreamento independente do módulo	0,00	kWh/m ²	0,00 %
Reflexão na superfície de módulo	0,00	kWh/m ²	0,00 %
Irradiação global no plano dos módulos	1.888,75	kWh/m ²	
Irradiação global fotovoltaica	48.812,58	kWh	
Sujeira	-488,12	kWh	-1,00 %
Conversão de STC (eficiência nominal do módulo 21,28 %)	-38.041,03	kWh	-78,72 %
Energia fotovoltaica nominal	10.283,43	kWh	
Sombra parcial, específica do módulo	-71,05	kWh	-0,69 %
Comportamento sob baixa irradiação	-270,52	kWh	-2,65 %
Desvio em relação à temperatura nominal do módulo	-556,87	kWh	-5,60 %
Diodos	-1,77	kWh	-0,02 %
Mismatch (indicações do fabricante)	-187,66	kWh	-2,00 %
Mismatch (conexão/sombra)	-8,90	kWh	-0,10 %
Cabo do string	-18,46	kWh	-0,20 %

Energia fotovoltaica (c.c.) sem redução pelo inversor	9.168,19	kWh	
Potência CC mínima não atingida	-0,23	kWh	0,00 %
Redução devido à faixa de tensão PMP	-0,01	kWh	0,00 %
Redução devido à corrente c.c. máx.	-4,18	kWh	-0,05 %
Redução devido à potência c.c. máx.	0,00	kWh	0,00 %
Redução devido à potência c.a. máx./cos phi	-47,02	kWh	-0,51 %
Perda no seguidor PMP	-14,56	kWh	-0,16 %
Energia fotovoltaica (c.c.)	9.102,19	kWh	
Energia na entrada do inversor	9.102,19	kWh	
Conversão c.c./c.a.	-220,36	kWh	-2,43 %
Consumo em espera (Inversor)	-2,58	kWh	-0,03 %

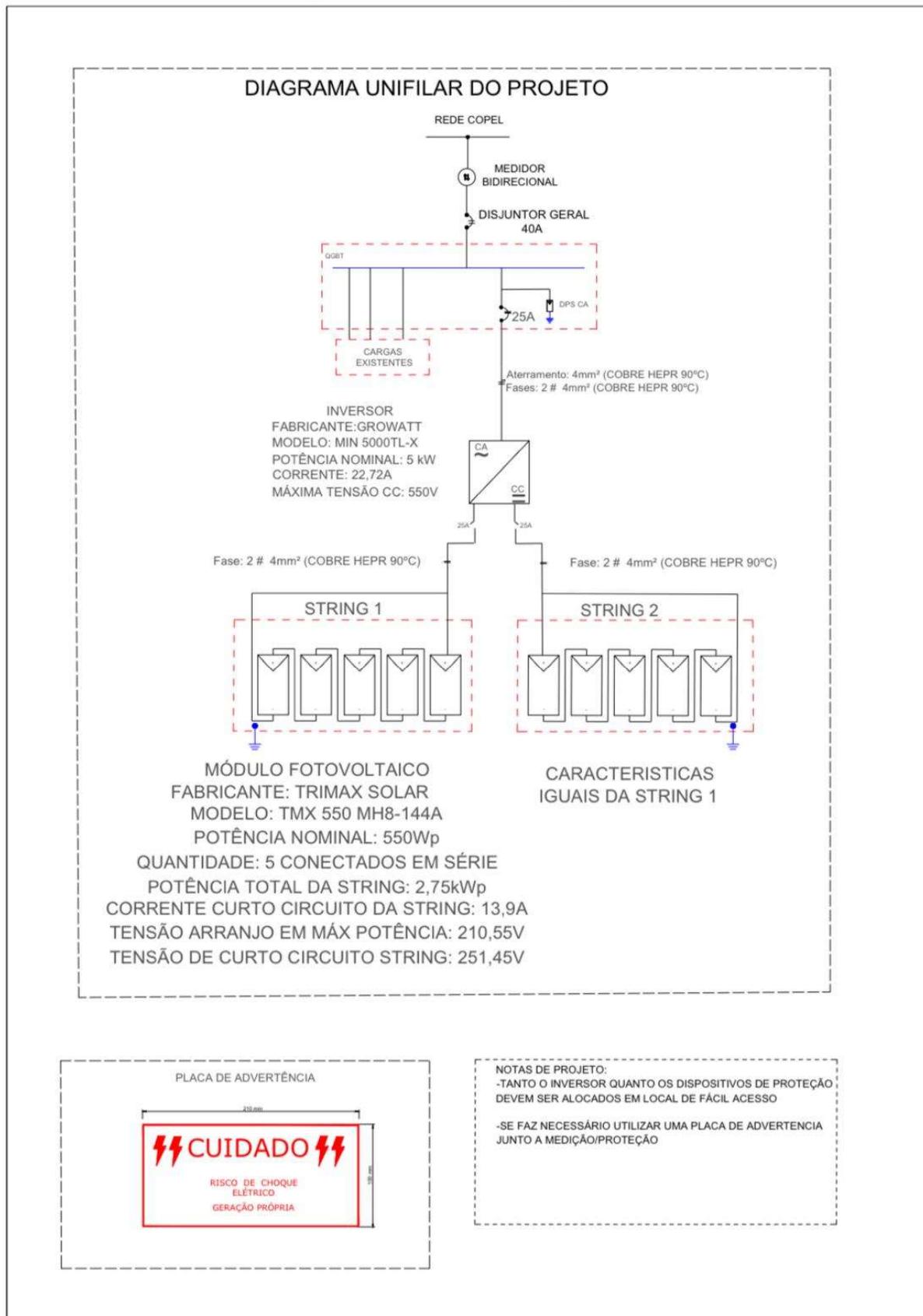
Dados de saída - Desempenho do sistema por área de módulo

	valor	Unidade
Potência do gerador fotovoltaico	5,50	kWp
Area do gerador fotovoltaico	25,84	m ²
Irradiação global no plano dos módulos	1888,75	kWh/m ²
Irradiação global no módulo sem reflexão	1888,75	kWh/m ²
Desempenho do sistema (PR)	84,13	%
Energia do gerador fotovoltaico (rede c.a.)	8738,73	kWh/Ano

Fonte: Autoria própria, via *PV SOL* (2023)

APÊNDICE B – DIAGRAMA UNIFILAR DO PROJETO

Diagrama Unifilar Do Projeto



ANEXO A – Ficha de datos MIN500TL-X

ANEXO A - Ficha de dados MIN5000TL-X

Ficha de dados	MIN 3000TL-X	MIN 5000TL-X	MIN 6000TL-X
Dados de entrada			
Máxima potência fotovoltaica recomendada (para o módulo STC)	4200W	7000W	8100W
Máxima tensão CC	500V	550V	550V
Tensão de partida			
Faixa de tensão de MPPT / tensão nominal de MPPT	60V-500V /360V	60V-550V /360V	60V-550V /360V
Corrente máxima de entrada		13.5A/13.5A	
Máxima corrente curto-circuito por trackers MPP		16A/16A	
Número de MPPT / strings por MPPT		2/1	
Saída (CA)			
Potência nominal de saída CA	3000W	5000W	6000W
Potência aparente máxima de CA	3000VA	5000VA	6000VA
Corrente máxima de saída	13.6A	22.7A	27.2A
Tensão nominal de saída (Faixa)		230V(160V-300V)	
Frequência de rede CA(Faixa)		50Hz/60Hz ± 5Hz	
Fator de potência ajustável		0.8i-0.8c	
THDI		<3%	
Conexão CA		Fase única	
Eficiência			
Máxima eficiência	98.2%	98.4%	98.4%
Eficiência europeia	97.1%	97.5%	97.5%
Eficiência MPPT		99.9%	
Dispositivos de proteção			
Proteção de polaridade reversa de CC		sim	
Interruptor CC		sim	
Proteção de sobretensão CC		Tipoll	
Proteção de sobrecorrente de saída		sim	
Proteção de sobretensão CA		Tipolll	
Monitoramento de falta à terra		sim	
Monitoramento de grade		sim	
Unidade de monitoramento de corrente de vazamento sensível a todos os pólos integrada		sim	
Dados Gerais			
Dimensões (L/A/P)		375/350/160mm	
Peso		10.8kg	
Faixa de temperatura operacional		-25°C... +60°C	
Emissão de ruído (típico)		≤35 dB(A)	
Altitude		4000m	
Auto-consumo à noite		< 1W	
Topologia		Sem transformador	
Resfriamento		Resfriamento Natural	
Gráu de proteção ambiental		IP65	
Humidade relativa		100%	
Características			
Conexão CC		H4 / MC4	
Conexão CA		Conector	
Exibição		OLED+LED	
Interfaces: RS485 / USB		Sim/	
Garantia: 5 anos		Sim/	

CE, IEC62109, G98, G99, VDE0126-1-1, AS4777, AS/NZS 3100, VDE-AR-N4105, CQC, IEC61683, IEC60068, IEC61727, IEC62116, INMETRO

ANEXO B – TMX 550 MH8–144A

TMX 550 MH8-144A

TMX 550 MH8-144A

ELECTRICAL DATA AT STC	TMX 530 MH8-144A	TMX 535 MH8-144A	TMX 540 MH8-144A	TMX 545 MH8-144A	TMX 550 MH8-144A
Rated power Pmax (Wp)	530	535	540	545	550
Rated voltage Pmax – Vmp (V)	41,28	41,51	41,70	41,92	42,11
Rated current Pmax – Imp (A)	12,84	12,89	12,95	13,00	13,06
Open circuit voltage – Voc (V)	49,61	49,87	49,95	50,04	50,28
Short circuit current – Isc (A)	13,66	13,72	13,78	13,84	13,9
Module efficiency (%)	20,5	20,7	20,9	21,1	21,3
Sorting (plus tolerance)	0 ~ +5 Wp				

STC (Standard Test Conditions): Irradiance 1000 W/m², Air Mass = 1.5, Cell Temperature 25°C, Measurement Tolerance Pmax ± 3%, Voc ± 2%, Isc ± 2%

ELECTRICAL DATA AT NOCT	TMX 530 MH8-144A	TMX 535 MH8-144A	TMX 540 MH8-144A	TMX 545 MH8-144A	TMX 550 MH8-144A
Power at Pmax (Wp)	407,16	411,01	414,85	418,69	422,53
Voltage at Pmax – Vmp (V)	37,62	37,83	38,01	38,21	38,39
Current at Pmax – Imp (A)	10,82	10,86	10,91	10,96	11,01
Open voltage current – Voc (V)	45,80	46,04	46,12	46,20	46,42
Short circuit current – Isc (A)	11,61	11,66	11,72	11,77	11,82

NOCT (normal operating cell temperature): Irradiation 800W/m², Air Mass = 1.5, Wind Speed 1m/s, Ambient Temperature 20°C

SPECIFICATIONS

Cells	182 mm HALF-CUT PERC
Number of cells	144 (6x24)
Dimensions	2278 x 1134 x 35 mm
Weight	27,0 kg
Glass	3,2 mm, AR tempered glass
Frame	aluminum, silver or black
Junction-box	IP68, 3 Bypass diodes
Cable	UV-resistant 4,0 mm ² 1200 mm
Connector	Stäubli MC4-Evo2
Application class	A

TEMPERATURE COEFFICIENT

Temperature coefficient Pmax	-0,354 %/°C
Temperature coefficient Voc	-0,266 %/°C
Temperature coefficient Isc	+0,046 %/°C
NMOT	45 ±2°C

LIMITING VALUES

Operating temperature (°C)	-40 ~ +85
Maximum system voltage (V)	1500
Max Series Fuse Rating (A)	25
Safety class	class II
Maximum load capacity (Pa)	snow 5400 / wind 2400

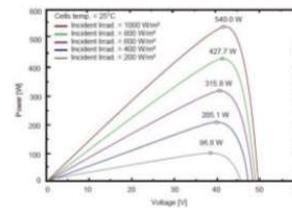
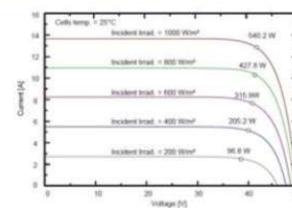
PACKAGING

Container	40' HC
Modules per pallet	31
Modules per container	620

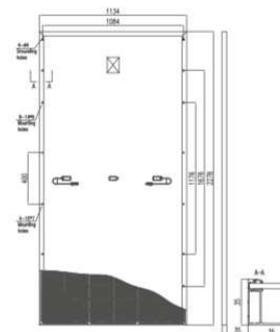
Technical data are average values and may vary slightly. The associated data of the individual measurement are decisive. Possible light-induced degradation of the power after commissioning is not taken into account. Technical data is subject to change without notice. The current data sheets are available online at www.trimax-solar.com. All specifications in this data sheet comply with DIN EN 50380. Further information can be found in the installation manual.

WEEE Reg.No.: DE65803239 | © TRIMAX Solar DB/22 Version 2.3

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (540W)



TECHNICAL DRAWING



*40mm mounting holes are only suitable for 4005-T6 aluminum frame

ANEXO C – CABO FLEXÍVEL SILNAX 0,6/1 kV HEPR 90 °C

CABO FLEXÍVEL SILNAX 0,6/1 kV HEPR 90 °C

PRODUTOS

CABO FLEXÍVEL SILNAX 0,6/1 kV HEPR 90 °C

CONDUTOR: Fios de Cobre, têmpera mole, classe 4 até a seção nominal de 6 mm² e classe 5 a partir da seção 10 mm² atendendo à norma NBR NM 280;

ISOLAÇÃO: Composto termofixo atendendo à norma NBR 6251 para o tipo HEPR (EPR/B);

COBERTURA: Composto termoplástico polivinílico atendendo à norma NBR 6251 para o tipo PVC/ST2;

CERTIFICAÇÃO: TÜV Rheinland

NORMA DE REFERÊNCIA: NBR 7286 - Cabos de potência com isolamento extrudado de borracha etilenopropileno (EPR) para tensões de 1 kV a 35 kV - Requisitos de desempenho;

COR DAS VEIAS DOS CABOS MULTIPOLARES:

- 2 Condutores – Preto e Azul-Claro;
- 3 Condutores – Preto, Azul-Claro e Branco;
- 4 Condutores – Preto, Azul-Claro, Branco e Vermelho;
- 5 Condutores – Preto, Azul-Claro, Branco, Vermelho e Verde;

APLICAÇÃO: Recomendado para circuitos de alimentação e distribuição de energia elétrica em prédios residenciais, comerciais, subestações transformadoras e em redes subterrâneas que exijam cabos com maior flexibilidade. É destinado às instalações fixas, podendo ser instalado em bandejas, canaletas, eletrodutos ou dutos subterrâneos, proporcionando, com as características de autoextinção do fogo, maior segurança. Por ser um cabo isolado em HEPR (borracha etilenopropileno) com temperatura de operação de 90 °C, sua capacidade de corrente elétrica é superior em relação aos cabos isolados em PVC.

Seção Nominal do Condutor (mm ²)	Diâmetro Nominal do Condutor (mm)	Espessura Nominal da Isolação (mm)	Espessura Nominal da Capa (mm)	Diâmetro Nominal Externo (mm)	Cores	Embalagem	Peso (kg/100 m)
1 x 1,5	1,5	0,7	0,9	4,5	●○●●●	○ □	3,2
1 x 2,5	2,0	0,7	0,9	5,2	●○●●●	○ □	4,3
1 x 4	2,4	0,7	0,9	5,5	●○●●●	○ □	5,8
1 x 6	2,9	0,7	0,9	6,1	●○●●●	○ □	7,7
1 x 10	3,9	0,7	1,0	7,6	●○●●●	○ □	12,2
1 x 16	5,0	0,7	1,0	8,4	●○●●●	○ □	17,5
1 x 25	6,5	0,9	1,1	10,3	●○●●●	○ □	26,9
1 x 35	7,5	0,9	1,1	11,4	●○●●●	○ □	36,4
1 x 50	9,0	1,0	1,2	13,3	●○●●●	○ □	50,6
1 x 70	10,6	1,1	1,2	15,7	●○●●●	○ □	71,9
1 x 95	12,2	1,1	1,3	17,6	●○●●●	○ □	93,6
1 x 120	14,2	1,2	1,3	19,5	●○●●●	○ □	117,2
1 x 150	15,8	1,4	1,4	21,8	●○●●●	○ □	146,7
1 x 185	17,0	1,6	1,4	23,8	●○●●●	○ □	174,3
1 x 240	20,0	1,7	1,5	26,8	●○●●●	○ □	227,9
1 x 300	23,1	1,8	1,8	30,5	●○●●●	○ □	287,1
2 x 1,5	1,5	0,7	1,0	8,0	●●	○ □	8,2
2 x 2,5	2,0	0,7	1,0	9,2	●●	○ □	11,5
2 x 4	2,4	0,7	1,1	9,9	●●	○ □	15,0
2 x 6	2,9	0,7	1,1	10,9	●●	○ □	20,9
2 x 10	3,9	0,7	1,2	13,3	●●	○ □	31,7
2 x 16	5,0	0,7	1,2	15,1	●●	○ □	44,9
* 2 x 25	6,5	0,9	1,3	19,2	●●	○ □	72,6
* 2 x 35	7,5	0,9	1,4	21,4	●●	○ □	93,8
* 2 x 50	9,0	1,0	1,5	25,0	●●	○ □	117,7
3 x 1,5	1,5	0,7	1,0	8,1	●●●	○ □	9,6
3 x 2,5	2,0	0,7	1,1	9,4	●●●	○ □	13,6
3 x 4	2,4	0,7	1,1	10,4	●●●	○ □	18,3
3 x 6	2,9	0,7	1,1	11,5	●●●	○ □	25,2
3 x 10	3,9	0,7	1,2	14,1	●●●	○ □	38,7
3 x 16	5,0	0,7	1,3	16,3	●●●	○ □	58,5
3 x 25	6,5	0,9	1,4	19,9	●●●	○ □	92,2
3 x 35	7,5	0,9	1,5	22,8	●●●	○ □	124,5
3 x 50	9,0	1,0	1,6	28,0	●●●	○ □	168,6
3 x 70	10,6	1,1	1,7	31,3	●●●	○ □	253,3
3 x 95	12,2	1,1	1,8	36,4	●●●	○ □	319,9
3 x 120	14,2	1,2	1,9	41,1	●●●	○ □	399,9
4 x 1,5	1,5	0,7	1,1	9,1	●●●●	○ □	12,3
4 x 2,5	2,0	0,7	1,1	10,4	●●●●	○ □	16,6
4 x 4	2,4	0,7	1,1	11,3	●●●●	○ □	22,3
4 x 6	2,9	0,7	1,2	12,6	●●●●	○ □	31,7
4 x 10	3,9	0,7	1,2	15,9	●●●●	○ □	49,2
4 x 16	5,0	0,7	1,3	18,5	●●●●	○ □	76,3
4 x 25	6,5	0,9	1,5	22,5	●●●●	○ □	116,2
4 x 35	7,5	0,9	1,5	25,4	●●●●	○ □	157,0
4 x 50	9,0	1,0	1,7	29,9	●●●●	○ □	219,9
4 x 70	10,6	1,1	1,8	36	●●●●	○ □	315,5
4 x 95	12,2	1,1	1,9	41,6	●●●●	○ □	418,3
4 x 120	14,2	1,2	2,1	46,3	●●●●	○ □	508,2
5 x 1,5	1,5	0,7	1,1	10,6	●●●●●	○ □	15,5
5 x 2,5	2,0	0,7	1,1	12,2	●●●●●	○ □	22,3
5 x 4	2,4	0,7	1,2	12,8	●●●●●	○ □	30,4
5 x 6	2,9	0,7	1,2	14,4	●●●●●	○ □	40,7
5 x 10	3,9	0,7	1,3	17,7	●●●●●	○ □	63,3
5 x 16	5,0	0,7	1,4	20	●●●●●	○ □	97,3

○ Rolo □ Bobina

*Seções Nominais produzidas sob encomenda.

