



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ALAN DA SILVA VALENTE  
RANNYS FONTAINE COELHO DE ASSUNÇÃO**

**PROJETO DE UM SISTEMA DE BACKUP DE ENERGIA A PARTIR DA  
GERAÇÃO FOTOVOLTAICA PARA UMA UNIDADE BÁSICA DE SAÚDE**

**TUCURUÍ  
2023**



ALAN DA SILVA VALENTE  
RANNYS FONTAINE COELHO DE ASSUNÇÃO

PROJETO DE UM SISTEMA DE BACKUP DE ENERGIA A PARTIR DA  
GERAÇÃO FOTOVOLTAICA PARA UMA UNIDADE BÁSICA DE SAÚDE

Trabalho de conclusão de curso, apresentado  
como requisito parcial para obtenção do título  
de bacharel em Engenharia Elétrica, pela  
Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof. Dr. Ewerton Ramos Granhen

TUCURUÍ  
2023



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITARIO DE TUCURUI

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO/TCC Nº 1/2023 - CTUCU (11.16)

Nº do Protocolo: 23073.040873/2023-00

Tucuruí-PA, 07 de junho de 2023.

ALAN DA SILVA VALENTE

RANNYS FONTAINE COELHO DE ASSUNÇÃO

PROJETO DE UM SISTEMA DE BACKUP DE ENERGIA A PARTIR DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA PARA UMA UNIDADE BÁSICA DE SAÚDE

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

Data da aprovação: \_\_05\_\_ / \_\_06\_\_ / 2023\_\_

Conceito: \_\_\_\_\_EXCELENTE\_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

*(Assinado digitalmente em 07/06/2023 00:05)*

EWERTON RAMOS GRANHEN  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
CTUCU (11.16)

Matricula: ###081#9

*(Assinado digitalmente em 07/06/2023 18:55)*

VITOR DA SILVA JORGE  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR-SUBSTITUTO  
CTUCU (11.16)

Matricula: ###232#8

*(Assinado digitalmente em 22/06/2023 19:42)*

WASHINGTON CESAR BRAGA DE SOUSA  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
CTUCU (11.16)

Matricula: ###185#4

*Alan da Silva Valente*

Dedico este trabalho à Laura Isabel de Lucena Cariello (*in memoriam*), obrigado por me encontrar [“You taught me the courage of stars before you left, how light carries on endlessly, even after death”].

*Rannys Fontaine Coelho de Assunção*

Dedico este trabalho à minha amada avó  
Maria Tereza Caldas Coelho (*in memoriam*),  
minha maior incentivadora desde o início.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, meu Senhor, por não desistir de mim e por me reapresentar ao Seu amor todos os dias.

A minha amada família por todo suporte ao longo de todos esses anos.

Ao professor Ewerton Granhen, por nos orientar com dedicação e paciência.

Ao meu parceiro e grande amigo Rannys Fontaine, obrigado por partilhar deste trabalho e, principalmente da vida comigo.

Àqueles que se tornaram minha família durante a graduação: Jade Melo e Caio Luz, vocês estiveram aqui nos meus piores dias, eu os amo tanto.

A minha inestimável Eleisiane Barroso, obrigado por ser minha casa.

Às pessoas que mais torcem por mim: Vitor Jorge, Francisco Caio, Gabriel Paraguassú, Natan Martins, Juliane Leão, Fagner Trindade, Gilvan Souza, Dywles Soares, Diego Silva e Clau Arnaud, obrigado por insistirem em mim.

Aos meus novos irmãos Samara Santos e Rodrigo Belmont, obrigado por me escolherem.

Àquela que me ajudou a me encontrar e a me reconstruir: Naiara Pires, obrigado por me mostrar que o Amor pode nos reconstruir e nos fazer inteiro outra vez.

Alan da Silva Valente

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha mãe Ana Coelho, as minhas irmãs Adriana Coelho, Adriely Coelho e Andresa Coelho, a minha sobrinha Abelly Assunção, por todo suporte ao longo do curso.

Ao professor Ewerton Granhen, por nos orientar com dedicação e comprometimento.

Ao meu parceiro de TCC e amigo Alan Valente, obrigado por toda dedicação, persistência e empenho para a elaboração deste trabalho.

Às amigas conquistadas na graduação e na vida Brenda Costa, Caio Muniz, Eleisiane Barroso, Gabriel Paraguassú, Gilvan Souza, Jade Melo, Leon Oliveira, Naiara Pires, Natan Martins, Solaine Coelho e Vitor Jorge.

À enfermeira coordenadora da unidade básica de saúde São Benedito Isis Gonzaga e a recepcionista Nazaré Lisboa, pela prontidão e clareza das informações fornecidas na entrevista.

Ao Kauê Coelho pelo auxílio no registro fotográfico e nas medições para elaboração da planta baixa.

Aos professores da graduação Bernard Carvalho, Ewerton Granhen, Jefferson Costa e Karlo Queiroz.

Aos professores do ensino médio pelo conhecimento técnico, científico, humano e social compartilhado: Élide Monte, Kirla Korina, Laura Lucena, Lusinete da Silva, Marylene Roma, Miranilde Neves, Olivar Martins, Rondinelli Oliveira, Rosinaldo Pereira e Wanderley Santos.

Rannys Fontaine Coelho de Assunção

“Você pode ignorar a realidade, mas não pode ignorar as consequências de ignorar a realidade.”

(Ayn Rand)

## RESUMO

Neste trabalho, foi realizado um estudo de caso na unidade básica de saúde (UBS) São Benedito, localizada na zona rural do município de Cametá, estado do Pará. A unidade de saúde é responsável por ofertar à comunidade local serviços médicos e de enfermagem, além de fornecer medicamentos, vacinação e tratamento para algumas doenças. O funcionamento adequado da UBS depende do fornecimento de energia elétrica, tanto para a realização de atividades administrativas, quanto para atividades hospitalares, como armazenamento de vacinas e medicamentos, exames preventivos e esterilização de equipamentos. A rede elétrica que abastece a UBS é antiga e não atende às necessidades da carga atual, o que resulta em interrupções do fornecimento de energia e, conseqüentemente, prejudicando os serviços ofertados pela unidade de saúde. O Sistema Fotovoltaico Isolado (SFI), comumente denominado de sistema off-grid, apresenta-se como uma alternativa ao fornecimento de energia elétrica em locais remotos, de difícil acesso à rede elétrica ou com fornecimento de energia instável, e, portanto, pode contribuir para melhorar as condições de vida de populações que residem em comunidades afastadas dos centros urbanos. A fim de assegurar a continuidade do fornecimento de energia elétrica para cargas prioritárias da UBS, em caso de falha na rede elétrica convencional, este trabalho se propõe a projetar um sistema de backup de energia a partir da geração fotovoltaica com armazenamento.

**Palavras-chave:** Backup de energia; sistema fotovoltaico off-grid; armazenamento de energia; cargas prioritárias; transferência automática de alimentação.

## ABSTRACT

In this work, a case study was carried out in the basic health unit (UBS) São Benedito, located in the rural area of the municipality of Cametá, state of Pará. The health unit is responsible for offering medical and nursing services to the local community, in addition to providing medication, vaccination and treatment for some diseases. The proper functioning of the UBS depends on the supply of electricity, both for carrying out administrative activities and for hospital activities, such as storage of vaccines and medications, preventive exams and sterilization of equipment. The electrical network that supplies the UBS is old and does not meet the needs of the current load, which results in interruptions in the energy supply and, consequently, jeopardizing the services offered by the health unit. The Isolated Photovoltaic System (SFI), commonly called off-grid system, presents itself as an alternative to the supply of electrical energy in remote locations, with difficult access to the electrical network or with unstable energy supply, and, therefore, can contribute to improve the living conditions of populations residing in communities far from urban centers. In order to ensure the continuity of the supply of electricity to priority loads of the UBS, in case of failure in the conventional electrical network, this work proposes to design an energy backup system from photovoltaic generation with storage.

**Keywords:** Power backup; off-grid photovoltaic system; energy storage; priority loads; automatic power transfer.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil. ....	20
<b>Figura 2</b> - Matriz Elétrica Brasileira.....	21
<b>Figura 3</b> - Localização da UBS São Benedito. ....	23
<b>Figura 4</b> - Unidade Básica de Saúde São Benedito. ....	24
<b>Figura 5</b> – Contextualização geográfica. ....	25
<b>Figura 6</b> - O efeito fotoelétrico.....	26
<b>Figura 7</b> - Corrente fotoelétrica versus tensão quando o cátodo é iluminado com luz de comprimento de onda idêntico, mas intensidades diferentes (I). A corrente de saturação é proporcional à intensidade da luz. ....	27
<b>Figura 8</b> - Estrutura de bandas de energia em (a) condutores, (b) semicondutores e (c) isolantes. ....	28
<b>Figura 9</b> - Diagrama de energia de um semicondutor e fundamentos básicos da conversão solar fotovoltaica: (a) ilustração do espectro da radiação solar e da energia contida em cada fóton em função do comprimento de onda; (b) disposição dos elétrons nos sólidos – bandas de energia; (c) absorção de energia do fóton e liberação do elétron da banda de valência; (d) geração do par elétron-lacuna para o silício monocristalino – efeito fotovoltaico.....	30
<b>Figura 10</b> - Representação de uma rede cristalina (a) representação plana de uma rede cristalina de átomos tetravalente; (b) representação tridimensional de uma rede cristalina de átomos tetravalente. ....	31
<b>Figura 11</b> - Inserção de impurezas no átomo de silício. ....	32
<b>Figura 12</b> - Inserção de átomos com a deficiência de um elétron na rede cristalina do átomo de silício.....	33
<b>Figura 13</b> - Movimento de elétrons em um semicondutor do tipo P.....	33
<b>Figura 14</b> - Junção PN com detalhe da região de depleção, da difusão e da ação do campo elétrico interno sob elétrons e lacunas.....	34
<b>Figura 15</b> - Representação do processo de conversão fotovoltaica.....	35
<b>Figura 16</b> - Ilustração do aquecimento de um semicondutor de silício.....	35
<b>Figura 17</b> - Célula fotovoltaica de silício monocristalino vista de perto.....	37
<b>Figura 18</b> - Painel fotovoltaico de silício policristalino. ....	37
<b>Figura 19</b> – Célula fotovoltaica de filme fino. ....	38
<b>Figura 20</b> - Esquema da constituição de um módulo fotovoltaico. ....	39

<b>Figura 21</b> - Conexão de células em série e paralelo. ....	40
<b>Figura 22</b> - Esquema da constituição de um arranjo fotovoltaico. ....	40
<b>Figura 23</b> - Esquema do fluxo de energia da geração distribuída e centralizada. ....	42
<b>Figura 24</b> - Esquema de um sistema fotovoltaico conectado à rede.....	44
<b>Figura 25</b> - Esquema de um sistema fotovoltaico autônomo com carga CA e com armazenamento. ....	45
<b>Figura 26</b> - Módulo fotovoltaico de 565 Wp.....	46
<b>Figura 27</b> - Controlador de carga PWM. ....	48
<b>Figura 28</b> - Controlador de carga do tipo MPPT.....	48
<b>Figura 29</b> - Bateria solar de lítio Dyness A48100 48V 4.8KW.....	49
<b>Figura 30</b> - Inversor solar off-Grid 5kVA 48V 220V - Growatt.....	49
<b>Figura 31</b> - String Box CC - Clamper. ....	51
<b>Figura 32</b> – Perfil da irradiância solar ao longo de um dia. ....	52
<b>Figura 33</b> - Planta baixa da UBS São Benedito.....	56
<b>Figura 34</b> – Ligação em paralelo das baterias A4800. ....	61
<b>Figura 35</b> - Insolação da região de instalação do sistema fotovoltaico. ....	62
<b>Figura 36</b> – Ligação dos módulos em série. ....	65
<b>Figura 37</b> - Esquema de Aterramento TN-S.....	78
<b>Figura 38</b> - Diagrama multifilar do sistema de backup. ....	82
<b>Figura 39</b> - Diagrama multifilar do sistema de backup ampliado. ....	83
<b>Figura 40</b> - Diagrama multifilar do sistema de backup ampliado. ....	84
<b>Figura 41</b> – Circuito de comando. ....	85
<b>Figura 42</b> – Circuito de comando (potência) ampliado. ....	86
<b>Figura 43</b> – Circuito de comando (controle) ampliado. ....	87
<b>Figura 44</b> - Localização dos componentes na planta baixa. ....	88
<b>Figura 45</b> - Esquema de aterramento TN-S.....	88
<b>Figura 46</b> – Vista frontal da disposição dos módulos no telhado.....	89
<b>Figura 47</b> – Vista superior da disposição dos módulos no telhado. ....	89
<b>Figura 48</b> - Análise de sombreamento nos módulos para o dia 15 de junho 2022.....	90
<b>Figura 49</b> – Local de instalação e disposição. ....	91
<b>Figura 50</b> – Gráfico de custo para implantação do sistema.....	93

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Levantamento de carga prioritária da unidade básica de saúde - São Benedito.....	57
<b>Tabela 2</b> - Características da bateria A48100 – Dyness. ....	59
<b>Tabela 3</b> - Características dos módulos utilizados no projeto .....	63
<b>Tabela 4</b> - Características do controlador de carga utilizado no projeto. ....	66
<b>Tabela 5</b> - Características do inversor utilizado no projeto .....	66
<b>Tabela 6</b> – Especificações do módulo .....	71
<b>Tabela 7</b> – Orçamento para implementação do sistema de backup. ....	92

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIACÕES

- $A$  – Unidade de medida ampère
- $A$  – Área do módulo
- ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
- ACS – Agente Comunitário de Saúde
- AGM – Absorbent Glass Mat
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- $a$  – Aceleração
- a-Si – Silício amorfo
- BEP – Barramento de equipotencialização principal
- $B$  – Campo Magnético
- CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito
- CA – Corrente Alternada
- CC – Corrente Contínua
- $CBB$  – Capacidade de carga do banco de baterias em ampère-hora
- $C_{bateria}$  – Capacidade de carga de cada bateria em ampère-hora
- Classe* – São classificados em tipos I, II e III em função da zona de proteção contra raios;
- $c$  – Velocidade da luz
- $C_d$  – Consumo diário
- $cm^2$  – Unidade de medida centímetro quadrado
- DPS – Dispositivo de proteção contra surtos
- $DOD_{max}$  – Profundidade de descarga máxima para proteger o banco de baterias de descarga profunda
- $E$  – Campo Elétrico
- $EA$  – Energia armazenada no banco de baterias
- $EC$  – Energia consumida
- $EC_d$  – Energia consumida diariamente
- $E_e$  – Eficiência do inversor
- $E_F$  – Quantidade de energia de um fóton
- $E_g$  – Energia de Gap
- EM – Onda Eletromagnética
- $EP$  – Energia produzida diariamente pelo módulo fotovoltaico
- $EP_{Real}$  – Energia produzida diariamente (levando em consideração a autonomia do sistema)

*EVA* – Polímero emborrachado, flexível, com propriedades adesivas e componentes à prova d'água

*eV* – Unidade de medida elétron-volt

*F* – Nível de exposição a sobretensões de origem transitórias

*F* – Força

*f* – Frequência da luz

*f<sub>ca</sub>* – Frequência nominal ou da instalação

*f<sub>0</sub>* – Frequência da luz (valor crítico)

FCP – Fundação Cultural Palmares

GD – Geração Distribuída

g – Unidade de medida grama

gPV – Fusíveis fotovoltaicos

HSP – Horas de Sol Pleno

*H<sub>z</sub>* – Unidade de medida de frequência

*h* – Constante de Planck

h – Unidade de medida hora

*I* – Corrente

*I* – Irradiação solar no mês mais crítico

IEA – Agência Internacional de Energia

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

*I<sub>ac</sub>* – Fator de agrupamento do circuito

*I<sub>c</sub>* – Corrente elétrica corrigida

*I<sub>ca</sub>* – Corrente máxima de saída

*I<sub>MÁX</sub>* – Corrente máxima de classificação do dispositivo em série

*I<sub>mp</sub>* – Corrente de máxima potência

*I<sub>n</sub>* – Corrente nominal do dispositivo

*I<sub>n</sub>* – Valor de um impulso de corrente com forma de onda

*ISC* – Corrente de curto-circuito máxima

*I<sub>sc</sub>* – Corrente de curto-circuito do módulo

*I<sub>sistema</sub>* – Corrente elétrica do sistema

*I<sub>ta</sub>* – Fator de temperatura ambiente

*J* – Unidade de medida Joule

*l* – Comprimento do condutor

*LBT* – Comprimento da linha aérea que alimenta a instalação

*LiFePO<sub>4</sub>* – Lítio Ferro Fosfato

*MPPT* ou *SPPM* – Maximum Power Point Tracking

mono-Si – Silício monocristalino

multi-Si ou p-Si – Silício policristalino

*m* – Massa

*m* – Unidade de medida metro

*mm<sup>2</sup>* – Unidade de medida milímetro quadrado

*N* – Portadores de cargas negativas

*NB* – Número de baterias em paralelo

*NBR* – Norma Brasileira

$\eta$  – Rendimento

$\eta_{CC/CA}$  – Eficiência total entre o consumo em CC no banco de baterias e o consumo em CA

*OPV* – Célula fotovoltaica orgânica

*P* – Portadores de cargas positivas

*P* – Potência

*PA* – Pará

*P<sub>mp</sub>* – Potência máxima do módulo fotovoltaico

*PN* – Contato ou ligação produzida nos semicondutores através da dopagem com impurezas de polaridades opostas

*PN<sub>ca</sub>* – Potência nominal de saída

*Proinfa* – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

*PWM* – Pulse Width Modulation

*QMF* – Quantidade total de módulos fotovoltaicos

*R<sub>c</sub>* – Resistência elétrica do condutor

*RN* – Resolução Normativa

*S* – Diâmetro

*SFCR* – Sistema fotovoltaico conectado à rede de energia elétrica

*Si* – Silício

*STC* – *Standard Test Conditions* (Condições-padrão de ensaio)

*s* – Unidade de medida segundos

*T<sub>A</sub>* – Tensão do arranjo fotovoltaico

*Td* – Nível cerâmico local

UBS – Unidade Básica de Saúde

$U_c$  – Tensão máxima aplicada aos terminais do DPS sem comprometer seu funcionamento

UPA – Unidade de Pronto Atendimento

$U_p$  – Valor da limitação de tensão dos terminais do DPS

$U_0$  – Tensão fase–neutro

$\nu$  – Frequência da luz

VA – Unidade de medida volt-ampère

$V_B$  – Tensão do banco de baterias

$V_{banco}$  – Tensão do banco de baterias

$V_{ca}$  – Tensão nominal de saída

$V_{CC}$  – Tensão do arranjo fotovoltaico

$V_{mp}$  – Tensão de máxima potência

$V_{oc}$  – Tensão de circuito aberto do módulo fotovoltaico

W – Unidade de medida watt

$W_p$  – Unidade de medida watt-pico

Wh – Unidade de medida watts-horas

Wh/dia – Unidade de medida watts-horas/dia

$W/m^2$  – Unidade de medida watt por metro quadrado

XLPE – Polietileno reticulado

$\delta$  – Coeficiente que indica a situação da linha aérea e da edificação

$\lambda$  – Comprimento de onda do fóton em

°C – Unidade de medida graus

$\Delta V\%$  – Queda de tensão

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	20
<b>1.1 Justificativa</b> .....	22
<b>1.2 Objetivos</b> .....	22
1.2.1 Objetivo geral .....	22
1.2.2 Objetivos específicos .....	22
<b>1.3 Contextualização</b> .....	23
<b>1.4 Estrutura do trabalho</b> .....	25
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	26
<b>2.1 Efeito fotoelétrico</b> .....	26
<b>2.2 Efeito fotovoltaico</b> .....	27
<b>2.3 Dispositivos semicondutores</b> .....	30
2.3.1 Semicondutor do Tipo N .....	32
2.3.2 Semicondutor do Tipo P .....	32
2.3.3 Junção PN .....	33
2.3.4 Influência térmica .....	35
<b>2.4 Células fotovoltaicas</b> .....	36
2.4.1 Células monocristalinas .....	36
2.4.2 Células policristalinas .....	37
2.4.3 Células de silício amorfo ou de filme fino .....	38
<b>2.5 Módulo fotovoltaico</b> .....	38
<b>2.6 Sistema de backup de energia</b> .....	41
<b>2.7 Sistemas fotovoltaicos de Geração Distribuída (GD)</b> .....	41
2.7.1 Sistema fotovoltaico conectado à rede de energia elétrica (on-grid) – SFCR.....	43
2.7.2 Sistema fotovoltaico autônomo ou isolado (off-grid) – SFI.....	44
<b>2.8 Componentes do sistema off-grid</b> .....	45
2.8.1 Módulo fotovoltaico .....	45
2.8.2 Controlador de carga .....	46
2.8.2.1 Controlador de carga PWM.....	47
2.8.2.2 Controlador de carga MPPT .....	48
2.8.3 Bateria.....	48
2.8.4 Inversor Off-grid.....	49
2.8.4.1 Inversor off-grid Interativo .....	50

2.8.5 String Box.....	51
<b>2.9 Fatores que influenciam a geração fotovoltaica.....</b>	<b>52</b>
2.9.1 Incidência solar e temperatura.....	52
2.9.2 Sombreamento.....	53
2.9.3 Microfissuras.....	53
2.9.4 Sujeira no módulo fotovoltaico.....	54
2.9.5 Tolerância elétrica do sistema fotovoltaico.....	54
2.9.6 Perdas no inversor.....	54
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>55</b>
<b>3.1 Dimensionamento dos componentes.....</b>	<b>55</b>
3.1.1 Levantamento de carga.....	56
3.1.2 Consumo diário de energia.....	58
3.1.3 Dimensionamento do banco de baterias.....	58
3.1.4 Dimensionamento dos módulos fotovoltaicos.....	61
3.1.5 Dimensionamento do controlador de carga.....	66
3.1.6 Dimensionamento do Inversor.....	66
<b>3.2 Dimensionamento dos condutores elétricos.....</b>	<b>67</b>
3.2.1 Seção mínima.....	67
3.2.2 Condução de corrente.....	67
3.2.3 Queda de tensão.....	68
3.2.4 Dimensionamento dos trechos.....	68
3.2.4.1 Arranjo fotovoltaico – Inversor.....	68
3.2.4.1.1 Seção mínima.....	68
3.2.4.1.2 Condução de corrente.....	68
3.2.4.1.3 Queda de tensão.....	68
3.2.4.2 Banco de baterias - Inversor.....	69
3.2.4.3 Inversor – Carga.....	69
3.2.4.3.1 Seção mínima.....	69
3.2.4.3.2 Condução de corrente.....	69
3.2.4.3.3 Queda de tensão.....	70
<b>3.3 Dimensionamento dos dispositivos de proteção.....</b>	<b>70</b>
3.3.1 Proteção contra sobrecorrente.....	71
3.3.1.1 Arranjo fotovoltaico.....	71
3.3.1.2 Bateria.....	72

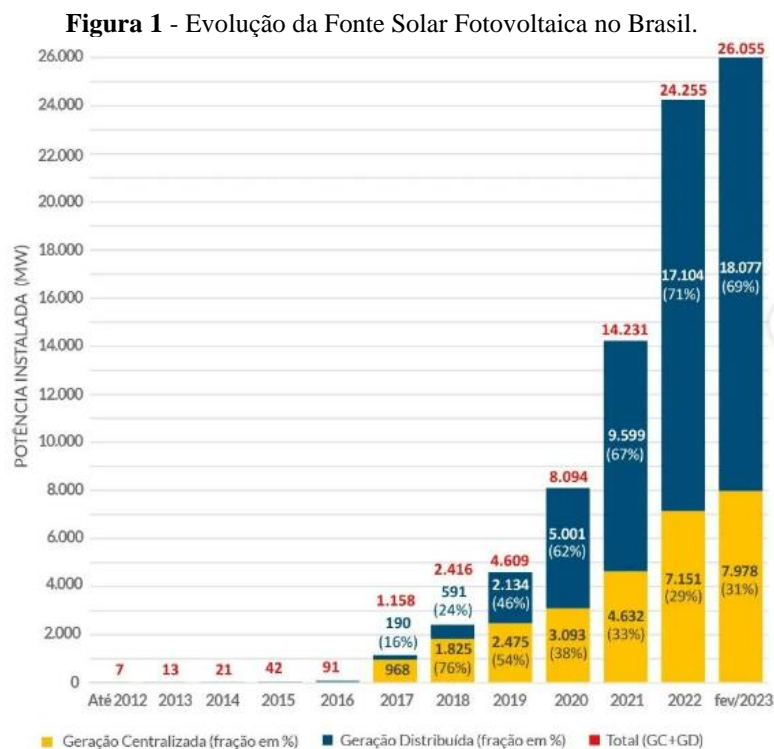
3.3.2 Proteção contra surtos.....	72
3.3.2.1 Arranjo fotovoltaico – Inversor .....	73
3.3.2.2 Inversor – Carga .....	74
3.3.2.3 Entrada.....	75
3.3.3 Chave seccionadora .....	77
3.3.4 Disjuntor CA .....	77
3.3.5 Disjuntor CC.....	77
<b>3.4 Esquema de Aterramento .....</b>	<b>78</b>
3.4.1 Condutor de proteção (PE) .....	78
3.4.2 Condutor de equipotencialização .....	78
3.4.3 Condutor de aterramento .....	79
3.4.4 Eletrodo de aterramento.....	79
3.4.5 Barramento de equipotencialização principal (BEP).....	79
<b>3.5 Circuito de comando para transferência automática.....</b>	<b>79</b>
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>82</b>
<b>4.1 Sistema de backup .....</b>	<b>82</b>
<b>4.2 Circuito de comando .....</b>	<b>85</b>
<b>4.3 Localização dos componentes na planta baixa .....</b>	<b>88</b>
<b>4.4 Esquema de aterramento .....</b>	<b>88</b>
<b>4.5 Simulação do local de instalação dos módulos.....</b>	<b>89</b>
<b>4.6 Simulação do local de instalação .....</b>	<b>91</b>
<b>4.7 Análise de custo do sistema de backup .....</b>	<b>91</b>
4.7.1 Justificativa para a escolha da bateria LiFePO4.....	94
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>96</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>97</b>
<b>APÊNDICE A – LEVANTAMENTO DE CARGA .....</b>	<b>102</b>
<b>APÊNDICE B – DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE BATERIAS.....</b>	<b>103</b>
<b>APÊNDICE C – PLANTA BAIXA COMPLETA .....</b>	<b>104</b>
<b>ANEXO A – DATASHEET DA BATERIA A48100 .....</b>	<b>105</b>
<b>ANEXO B – DATASHEET DO INVERSOR SPF 3000TL LVM-ES .....</b>	<b>106</b>
<b>ANEXO C – DATASHEET DO MÓDULO 565 Wp .....</b>	<b>107</b>
<b>ANEXO D – SIEMENS: MAPA DE CURVAS ISOCERÂNICAS.....</b>	<b>108</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização da energia solar para gerar eletricidade teve início em meados do século XX, com a descoberta do efeito fotovoltaico e o desenvolvimento das células solares. A partir disso, a tecnologia evoluiu rapidamente e começou a ser utilizada em aplicações militares e espaciais. (FARIAS; SELLITO, 2011).

Durante a década de 1970 houve grande interesse na energia solar para uso doméstico e comercial, principalmente nos EUA. A tecnologia evoluiu bastante desde então, com a redução de custos, melhoria da eficiência dos painéis solares e surgimento de sistemas de armazenamento, como baterias solares. A partir dos avanços tecnológicos mencionados, a energia solar se estabeleceu como uma das fontes renováveis de energia mais competitivas em termos de custo.

No Brasil, a geração de energia fotovoltaica tem um grande potencial, podendo ser produzida de forma centralizada (usinas solares) e de forma descentralizada (Geração Distribuída). A Geração Distribuída (GD) é uma maneira descentralizada de produzir energia elétrica, onde sistemas geradores são instalados próximos ou na própria unidade consumidora, podendo ou não estar conectados à rede elétrica. Em fevereiro de 2023, o Brasil atingiu a marca de 26 GW de potência operacional em energia solar, conforme a Figura 1, entrando para a lista dos dez maiores produtores dessa fonte de energia no mundo, segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, (ABSOLAR, 2023).



Fonte: Adaptado ABSOLAR, 2023.

Em fevereiro de 2023 o país atingiu outra marca, a energia solar se tornou a segunda maior fonte de energia elétrica do país, representando 12% da matriz energética brasileira, conforme mostra o gráfico da Figura 2, (ABSOLAR, 2023).

**Figura 2 - Matriz Elétrica Brasileira.**



**Fonte:** Adaptado ABSOLAR, 2023.

Um sistema de backup de energia é um sistema que fornece energia elétrica para uma instalação ou equipamento em caso de interrupção na rede elétrica principal. A energia solar pode ser empregada como uma fonte para um sistema de backup de energia. É possível armazenar a energia gerada para ser utilizada quando for necessário.

O sistema de backup a partir da geração fotovoltaica apresenta vantagens em termos de sustentabilidade e economia a longo prazo, reduzindo a dependência de fontes de energia fósseis. Em regiões isoladas ou com problemas na infraestrutura da rede elétrica, essa solução se mostra proveitosa, proporcionando uma fonte de energia independente e sustentável.

A falta de infraestrutura elétrica adequada em regiões afastadas dos centros urbanos pode resultar em problemas de fornecimento de energia, como é o caso da comunidade quilombola São Benedito, localizada na zona rural do município de Cametá, no estado do Pará, objeto de estudo deste trabalho.

As frequentes interrupções no fornecimento de energia podem resultar em transtornos para alguns serviços, como em unidades de saúde. Na unidade básica de saúde (UBS) de São Benedito, o fornecimento é interrompido por horas ou até dias. A defasagem entre o sistema elétrico projetado para a região e a demanda atual é um dos principais fatores que contribuem para a instabilidade da rede.

O fornecimento ininterrupto de energia é fundamental para o funcionamento adequado da UBS, que desempenha um papel crucial como a principal provedora de serviços médicos e de enfermagem na região.

Para mitigar os problemas resultantes da falta de energia, este trabalho se propõe a projetar um sistema de backup, que armazena energia em um banco de baterias, a partir da geração fotovoltaica para atender a unidade básica de saúde São Benedito.

## 1.1 Justificativa

O presente trabalho tem por motivação elaborar um projeto de engenharia na área de sistemas fotovoltaicos com foco no dimensionamento de um sistema backup com armazenamento de energia em um banco de baterias para uma unidade básica de saúde.

A defasagem da rede elétrica que abastece à UBS resulta em instabilidade e longas interrupções do fornecimento de energia. Os serviços de atendimento médico e de enfermagem prestados à população, dependem diretamente do fornecimento de energia elétrica.

A unidade básica de saúde é de extrema importância para a região em que está localizada e dispor de um sistema de backup com geração fotovoltaica, para assegurar o fornecimento ininterrupto de energia elétrica, é justificado por sua contribuição ambiental (a energia solar é uma fonte limpa, renovável e sustentável), durabilidade do sistema (em torno de 25 anos), baixo custo de manutenção e flexibilidade de local de instalação.

Prover saúde pública de qualidade significa garantir e respeitar a dignidade de cada cidadão que integra e constrói a sociedade brasileira e, para tal, é indispensável que o atendimento das unidades de saúde seja constante e de qualidade.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

Projetar um sistema fotovoltaico off-grid como backup para fornecer energia elétrica de forma contínua às cargas prioritárias de uma unidade básica de saúde – UBS São Benedito.

### 1.2.2 Objetivos específicos

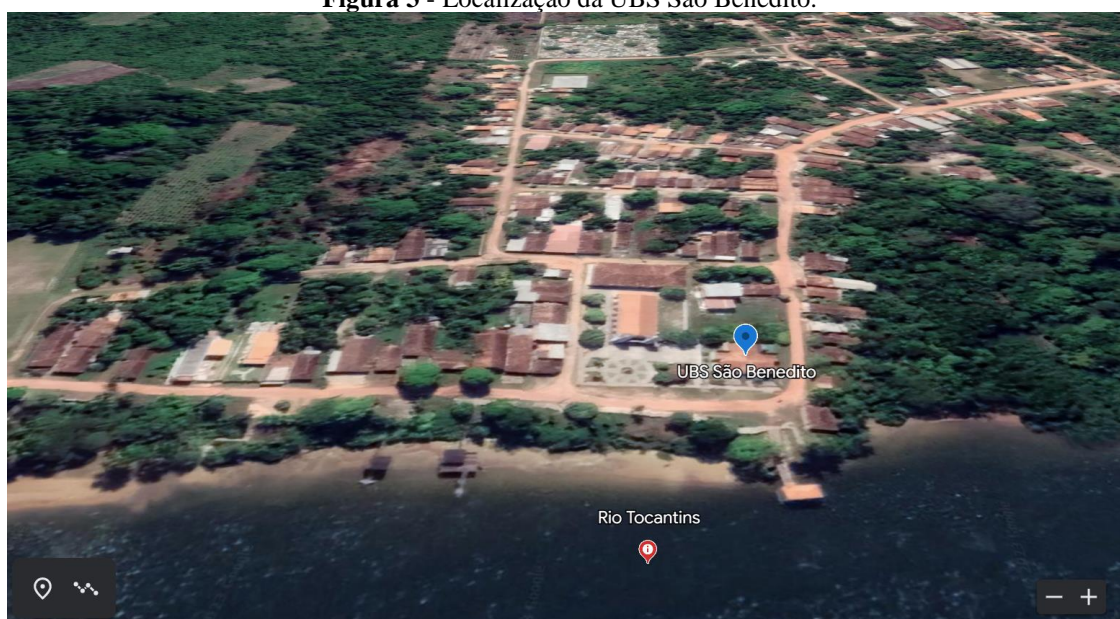
- ✓ Compreender o funcionamento de um sistema fotovoltaico;
- ✓ Projetar um sistema fotovoltaico off-grid com armazenamento para atender a demanda prioritária da unidade básica de saúde São Benedito;
- ✓ Projetar, no software *CadeSimu*, um circuito de automação para transferência automática da fonte de alimentação elétrica da UBS;

- ✓ Simular nos softwares *AutoCad* e *SketchUp* o sistema fotovoltaico off-grid projetado;
- ✓ Apresentar análise de viabilidade para implantação do sistema de backup.

### 1.3 Contextualização

O desenvolvimento deste trabalho ocorreu a partir de um estudo de caso, no período de 18 a 22 de julho de 2022, na unidade básica de saúde São Benedito, situada na comunidade quilombola São Benedito, zona rural do município de Cametá, estado do Pará, como mostra a Figura 3. A pesquisa de campo ocorreu a partir de entrevistas com servidores e usuários da unidade de saúde.

**Figura 3** - Localização da UBS São Benedito.



**Fonte:** Adaptada Google Earth, 2023.

De acordo com as informações fornecidas pela enfermeira coordenadora e demais servidores, a UBS oferece à população local serviços de saúde: atendimento médico e de enfermagem, fornecimento de medicamentos básicos, curativos, vacinação, tratamento da tuberculose e hanseníase, acompanhamento de ações relacionadas à saúde da mulher, da criança, planejamento familiar, prevenção ao câncer, pré-natal e tratamento de doenças crônicas, como diabetes e hipertensão.

O funcionamento adequado da UBS está essencialmente ligado ao fornecimento de energia elétrica. As principais demandas são a realização de serviços administrativos, iluminação do ambiente e atividades relacionadas. Na área hospitalar, as atividades indispensáveis são a utilização da geladeira para o armazenamento de vacinas e medicamentos, uso do aparelho Foco no exame preventivo e a utilização da estufa e da autoclave para esterilização, a UBS é apresentada na Figura 4.

**Figura 4** - Unidade Básica de Saúde São Benedito.

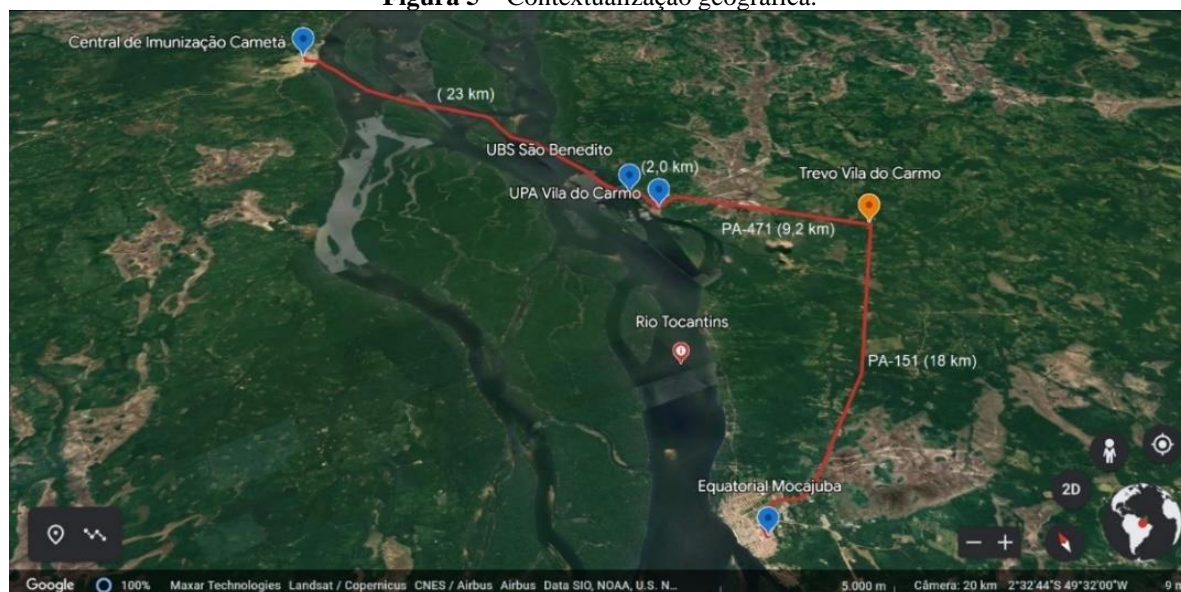
**Fonte:** Registro realizado pelos autores, 2022.

A partir da pesquisa de campo foi constatado que a rede de energia que atende à UBS é defasada e sofre de constante instabilidade. O período de maior ocorrência de falhas corresponde ao inverno amazônico (dezembro a maio) devido às chuvas intensas. Quando o fornecimento de energia é interrompido, a média é de 4 horas para o restabelecimento, podendo ficar dias sem energia.

Um dos fatores que contribui para a demora do reestabelecimento da energia é a logística de manutenção corretiva da concessionária (Equatorial Energia); a equipe de trabalho responsável pela manutenção da rede fica alocada à 29 km de distância, na cidade de Mocajuba.

A enfermeira coordenadora ressalta que o gerenciamento específico demandado pelo armazenamento das vacinas é um exemplo dos transtornos gerados pela falta de energia: havendo falta de energia elétrica, as vacinas são mantidas na geladeira por até 30 minutos, após esse período são armazenadas em uma caixa de isopor com gelo seco (Gelo-X) por até 2:30h; não havendo retorno da energia em 3h, as vacinas são enviadas para a Unidade de Pronto Atendimento (UPA) de Vila do Carmo, localizada à 2 km de distância.

Quando a interrupção no fornecimento de energia é geral, as vacinas são encaminhadas de ambulância para o centro de imunização na cidade de Cametá, localizado à 23 km de distância. A contextualização da logística operacional que envolve a UBS, a UPA, a Equatorial Mocajuba e o Centro de Imunização é apresentada na Figura 5.

**Figura 5 – Contextualização geográfica.**

**Fonte:** Adaptada Google Earth, 2023.

#### 1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo:

O Capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, a justificativa para elaboração do trabalho, os objetivos a serem alcançados e a contextualização do estudo de caso.

No Capítulo 2 é feita a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento deste trabalho, sendo apresentado os principais conceitos sobre o efeito fotovoltaico, dispositivos semicondutores, células fotovoltaicas, sistemas fotovoltaicos de geração distribuída, os principais componentes do sistema off-grid e fatores que influenciam a geração fotovoltaica.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia de cálculo para o dimensionamento do sistema fotovoltaico off-grid, com controlador de carga MPPT (Maximum Power Point Tracking), considerando o perfil da carga a ser alimentada, dados de radiação solar do local da instalação, o tipo de bateria a ser utilizado, a potência do painel fotovoltaico e do inversor, bem como o desenvolvimento de um circuito de comando para transferência automática de alimentação elétrica.

No Capítulo 4 os resultados obtidos, com a metodologia de cálculo apresentada no Capítulo 3, foram utilizados para simular e verificar a viabilidade de implantação do sistema de backup na UBS.

O Capítulo 5 apresenta as considerações finais sobre o sistema de backup proposto e sugere trabalhos futuros relacionados ao tema.

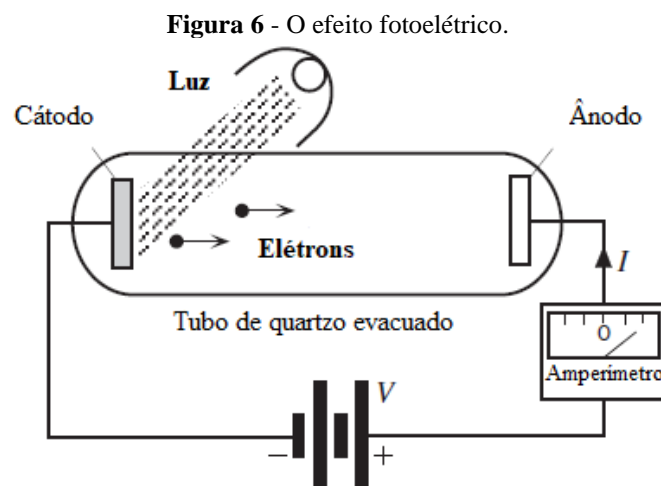
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Efeito fotoelétrico

Em 1887, Heinrich Hertz realizou as experiências que confirmaram a existência de ondas eletromagnéticas e ainda observou que uma descarga elétrica entre dois eletrodos dentro de uma ampola de vidro é facilitada quando uma radiação luminosa incide em um dos eletrodos, fazendo com que elétrons sejam emitidos de sua superfície. Esse fenômeno foi chamado efeito fotoelétrico (CAVALCANTE; TAVOLARO, 2002).

Em 1905, depois da formulação de Planck da radiação do corpo negro em 1900, o físico Albert Einstein propôs a hipótese da quantização da radiação eletromagnética pela qual, em certos processos, a luz comporta-se como pacotes concentrados de energia, chamados fótons. Com esta hipótese, ele forneceu uma explicação para o efeito fotoelétrico. Einstein propôs que a energia da luz incidente estaria concentrada em um pacote (fóton) de valor  $h\nu$ , onde  $h$  é a constante de Planck e  $\nu$  é a frequência da luz, a intensidade da luz seria proporcional ao número de pacotes de energia. No processo fotoelétrico, a energia de um pacote seria completamente absorvida por um elétron do emissor. Desta forma, uma energia  $\nu$  seria transferida para o elétron que poderia escapar do cátodo se esta fosse suficiente para superar a energia de ligação do elétron com o material do cátodo (CAVALCANTE; TAVOLARO, 2002).

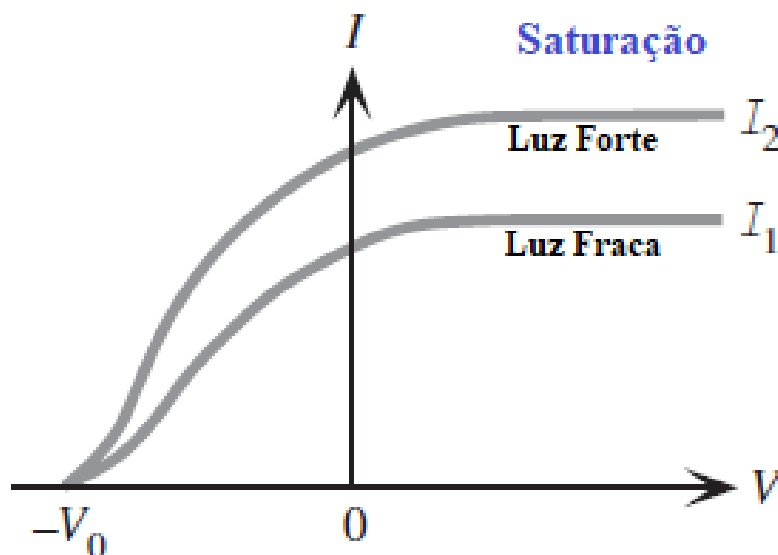
Em uma montagem da experiência do efeito fotoelétrico, os eletrodos estão dentro de uma ampola de quartzo (transparente à radiação ultravioleta), que foi evacuada, conforme mostra a Figura 6. Quando o cátodo é exposto a luz, se a frequência  $f$  da luz for maior que um certo valor crítico  $f_0$ , o amperímetro registra uma corrente  $I$ , mesmo quando a tensão do ânodo é zero (ou seja, o fornecimento é desviado). Quando a luz atinge o cátodo, os elétrons são emitidos com energia cinética suficiente para atingir o eletrodo oposto (KASAP, 2018).



Fonte: KASAP, 2018.

O resultado da experiência do efeito fotoelétrico para uma frequência  $f$  fixa e duas intensidades de luz é mostrado no gráfico da corrente  $I$  versus a diferença de potencial  $V$  entre os eletrodos. Quando  $V$  é positiva, os fotoelétrons são atraídos para a placa coletora e, a partir de um determinado valor de  $V$ , a corrente atinge um máximo e permanece constante. Esta corrente de saturação é proporcional à intensidade da luz, conforme mostra a Figura 7.

**Figura 7** - Corrente fotoelétrica versus tensão quando o cátodo é iluminado com luz de comprimento de onda idêntico, mas intensidades diferentes ( $I$ ). A corrente de saturação é proporcional à intensidade da luz.



Fonte: KASAP, 2018.

De maneira resumida o efeito fotoelétrico é a emissão de elétrons dos átomos de um material, especialmente metálicos, quando ele é exposto à radiação eletromagnética de frequência alta o suficiente para que seus fótons consigam energizar os elétrons e liberá-los do material (essa frequência varia de material para material).

## 2.2 Efeito fotovoltaico

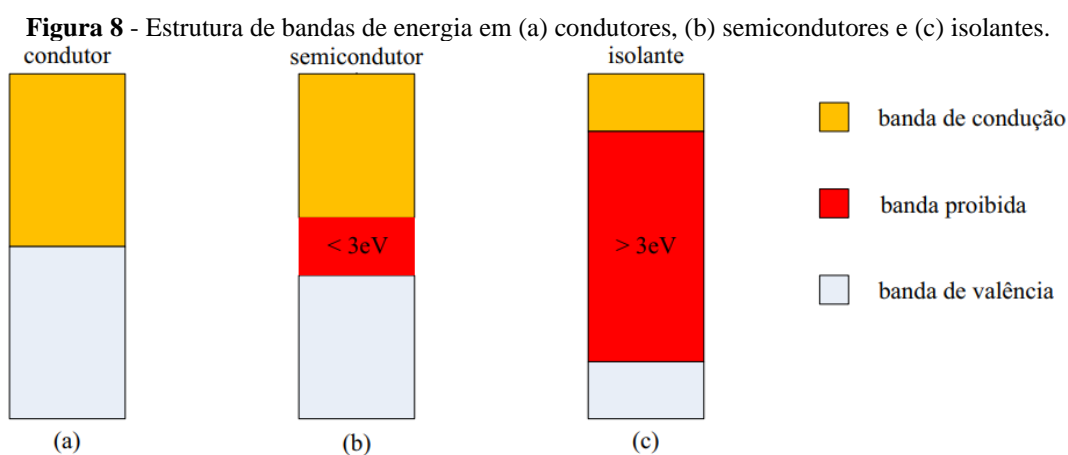
A palavra “fotovoltaico” vem do grego photos, que significa luz, e Volta, nome do físico italiano que, em 1800, descobriu a pilha elétrica. A descoberta do fenômeno de conversão fotovoltaica remete ao século XIX, período no qual estudiosos observaram fenômenos físicos que permitiam a conversão da luz em energia elétrica. Alexandre Edmond Becquerel, em 1839, percebeu que uma solução de um eletrólito com eletrodos de metal, quando exposta à radiação luminosa, tem sua condutividade aumentada. Em 1873, Willoughby Smith descobriu a fotocondutividade no selênio sólido. Em 1876, Adams e Day percebem que a junção de selênio e platina desenvolve o efeito fotovoltaico quando exposta à luz solar (ZILLES et al., 2012).

Para compreender o efeito fotovoltaico é necessário entender um pouco mais sobre materiais semicondutores e seu funcionamento. Quando se trata de elementos com propriedades

elétricas, há três tipos de classificações principais: condutores, semicondutores e isolantes. De forma resumida, pode-se definir materiais condutores como aqueles que permitem a movimentação de cargas elétricas em seu interior com grande facilidade, possuindo um excesso de elétrons em sua camada de valência, que é a última camada a receber elétrons em um átomo.

Os materiais semicondutores são caracterizados por possuírem banda de valência totalmente preenchida por elétrons e banda de condução “vazia”, ou seja, sem elétrons e, na temperatura do zero absoluto (0 K), um semicondutor comporta-se como um isolante. Os materiais isolantes são materiais que possuem grande resistência em ceder ou receber elétrons livres, isso ocorre porque os elétrons estão fortemente ligados ao átomo na camada de valência. Para o estudo de energia solar fotovoltaica deste trabalho, será abordado o comportamento dos materiais semicondutores, em especial os materiais semicondutores de silício.

A *bandgap* ou simplesmente *gap*, denominada de banda proibida, é a separação entre as duas bandas de energia permitidas dos materiais semicondutores e é representada por  $E_g$  e pode atingir até 3 eV (elétron-volt), dessa forma, diferenciando estes materiais dos materiais considerados isolantes, onde o *gap* supera este valor. A Figura 8 apresenta a estrutura de separação de bandas de energia para os materiais condutores, semicondutores e isolantes.



**Fonte:** PINHO; GALDINO, 2014.

O efeito fotovoltaico ocorre em materiais semicondutores com capacidade de absorver a energia contida nos fótons presentes na radiação luminosa incidente, transformando-a em eletricidade. A energia absorvida por esses materiais quebra as ligações químicas entre as moléculas presentes em suas estruturas. Com isso, cargas elétricas são liberadas e podem ser utilizadas para realizar de trabalho. O efeito fotovoltaico é uma característica física intrínseca ao material que compõe os dispositivos de conversão fotovoltaica (ZILLES et al., 2012).

A descrição do fenômeno fotovoltaico só foi possível a partir do desenvolvimento da teoria da mecânica quântica. Esta afirma que qualquer

tipo de radiação eletromagnética possui partículas, denominadas de fótons, que carregam certa quantidade “pacotes” de energia ( $E_F$ ). A energia em um fóton é dada por uma equação familiar,  $E_F = h \cdot c/\lambda$ , onde  $h$  é a constante de Planck ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34} J \cdot s$ ),  $c$  é a velocidade da luz ( $c = 2,998 \cdot 10^8 m/s$ ) e  $\lambda$  é o comprimento de onda do fóton em metros, conforme apresentado no item *a* da Figura 9.

A energia de *gap*, apresentado no item *b* da Figura 9, é usualmente dada em elétron-volt e depende do tipo de material utilizado. Uma vez que a energia no nível atômico é tipicamente expressa em elétron-volt ( $1 eV = 1,602 \cdot 10^{-19} J$ ) e o comprimento de onda é tipicamente expresso em micrômetro. É possível expressar o produto  $h \cdot c$  em unidades apropriadas tal que, se  $\lambda$  é expresso em  $\mu m$ , então  $E_F$  será expresso em *eV*. A expressão de conversão será:  $E_F(eV) = 1,24/\lambda$ . Portanto, a energia em um fóton depende das características espectrais de sua fonte e varia inversamente com o comprimento de onda da emissão eletromagnética, conforme mostra a Figura 9 (ZILLES et al., 2012).

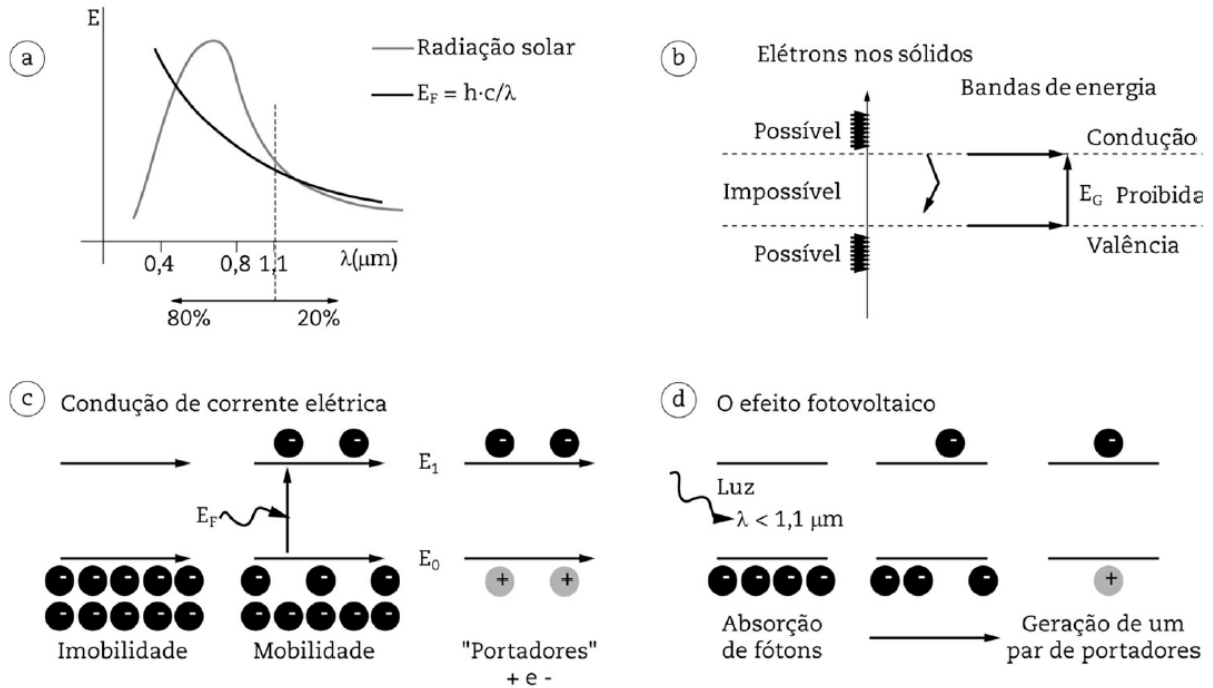
De acordo com a teoria quântica da matéria, a quantidade de energia que os elétrons possuem está relacionada à banda ou camada em que esse portador de carga se encontra em relação ao núcleo do átomo de origem. Assim, define-se banda de valência como aquela que apresenta um baixo nível de energia que é ocupada por elétrons capazes de efetuar ligações químicas com elétrons de outros átomos.

Em determinadas circunstâncias, alguns elétrons da banda de valência podem adquirir energia suficiente capaz de fazê-los migrar para um estágio de maior nível de energia, chamado de banda de condução, na qual os elétrons podem se movimentar livremente pelo material e, assim, produzir corrente elétrica, efeito mostrado no item *b* da Figura 9.

No processo de migração do elétron, uma lacuna fica na banda de valência, temos então a origem da denominação de par elétron-lacuna, quando um fóton consegue estimular o átomo para realizar o trabalho (ZILLES et al., 2012).

A Figura 9 ilustra os fundamentos básicos da conversão solar fotovoltaica, é possível observar que, no caso particular de dispositivos de conversão monocristalinos ( $E_G = 1,1 eV$ ), em decorrência da energia de *gap* necessária para a geração do par elétron-lacuna, apenas fótons de comprimento de onda inferior a  $1,1 \mu m$  contribuem para a conversão solar fotovoltaica ( $E_G = 1,24/\lambda$ ), conforme mostra o item *c* da Figura 9 (ZILLES et al., 2012).

**Figura 9** - Diagrama de energia de um semiconductor e fundamentos básicos da conversão solar fotovoltaica: (a) ilustração do espectro da radiação solar e da energia contida em cada fóton em função do comprimento de onda; (b) disposição dos elétrons nos sólidos – bandas de energia; (c) absorção de energia do fóton e liberação do elétron da banda de valência; (d) geração do par elétron-lacuna para o silício monocristalino – efeito fotovoltaico.



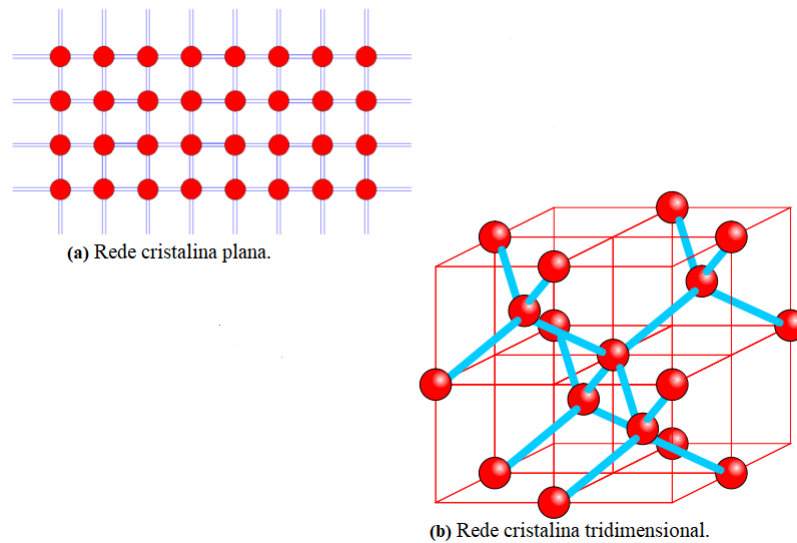
Fonte: ZILLES et al., 2012.

O efeito fotovoltaico, que é a base dos sistemas de energia solar fotovoltaica para a produção de eletricidade, consiste na transformação da radiação eletromagnética do sol em energia elétrica por meio de uma diferença de potencial ou tensão elétrica, sobre uma célula formada por um “sanduíche” de materiais semicondutores. Se a célula for conectada a dois eletrodos, haverá tensão elétrica sobre eles. Se houver um caminho elétrico entre os dois eletrodos, surgirá uma corrente elétrica, o item *d* da Figura 9 demonstra o efeito fotovoltaico em um material semiconductor (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

### 2.3 Dispositivos semicondutores

Alguns materiais apresentam propriedades de condução elétrica intermediárias entre aquelas inerentes aos isolantes e aos condutores. Tais materiais são denominados de semicondutores. Os materiais semicondutores mais simples são constituídos de átomos de um único elemento químico com quatro elétrons na camada de valência, ou seja, átomos tetravalentes, a Figura 10 mostra a representação de uma rede cristalina de um átomo tetravalente (WENDLING, 2011).

**Figura 10** - Representação de uma rede cristalina (a) representação plana de uma rede cristalina de átomos tetravalente; (b) representação tridimensional de uma rede cristalina de átomos tetravalente.



Fonte: WENDLING, 2011.

Os átomos que têm quatro elétrons na camada de valência, como o átomo de silício, tendem a se arranjar formando uma estrutura ou rede cristalina com átomos vizinhos compartilhando seus elétrons de valência, formando assim uma rede cristalina semelhante à mostrada na Figura 10 (WENDLING, 2011).

Os semicondutores aplicados em dispositivos de conversão fotovoltaica consistem em elementos capazes de absorver energia da radiação solar e transferir parte dessa energia para os elétrons, produzindo assim pares de portadores de carga (elétrons e lacunas). Os materiais utilizados para este fim são selecionados com base na equivalência das características de absorção com o espectro solar, bem como os custos de produção e o impacto ambiental causado pelo acúmulo de material (ZILLES et al., 2012).

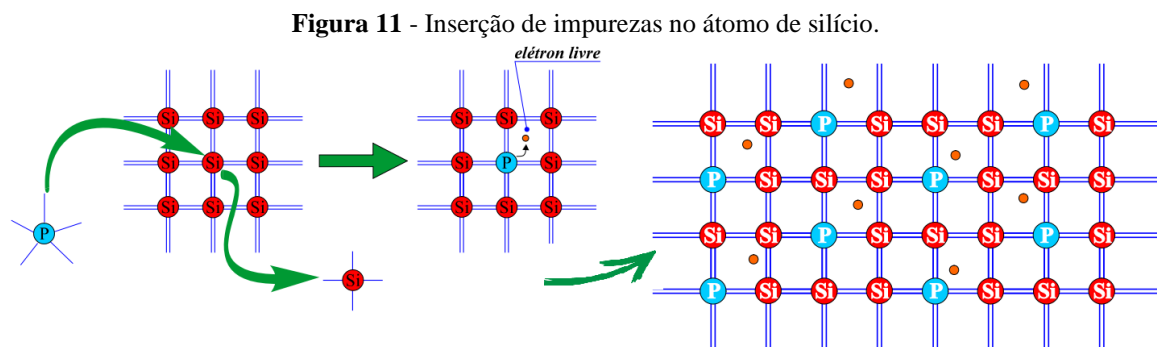
Para que os materiais semicondutores possam gerar energia elétrica, por meio da incidência da luz, é necessário que elétrons circulem, de forma que é necessário extraí-los do material semicondutor, fazendo com que passem por um circuito elétrico externo, caso contrário, os elétrons liberados retornariam ao seu estado inicial na periferia do átomo. Essa extração de cargas se consolida por meio de uma junção criada voluntariamente no semicondutor, com o objetivo de gerar um campo elétrico no interior do material. Esse campo interno, por sua vez, se encarregará de separar as cargas negativas das cargas positivas. Isso é possível graças ao processo conhecido como dopagem do semicondutor (WENDLING, 2011).

A dopagem é um processo químico no qual átomos estranhos são introduzidos na estrutura cristalina de uma substância. Em um cristal semicondutor a dopagem é geralmente realizada para alterar suas propriedades elétricas. Existem dois tipos de materiais semicondutores, tipo *N* e *P*, que dependem do tipo de impureza introduzida na rede cristalina.

A dopagem eletrônica, ou simplesmente dopagem, é o processo de adição de impurezas químicas (usualmente boro ou fósforo) em um elemento químico semiconductor puro (germânio ou silício, notadamente este último), com a finalidade de dotá-lo de propriedades de semicondução. A adição de boro, elemento trivalente, provoca o aparecimento de cargas positivas ou “lacunas”, já a adição de fósforo, elemento pentavalente, provoca o aparecimento de cargas negativas (elétrons livres) (ZILLES et al., 2012).

### 2.3.1 Semicondutor do Tipo N

Para produzir um semicondutor do tipo *N* (portadores de cargas negativas), insere-se na estrutura cristalina átomos contendo excesso de um elétron de valência em relação aos átomos da rede, conforme mostrado na Figura 11.



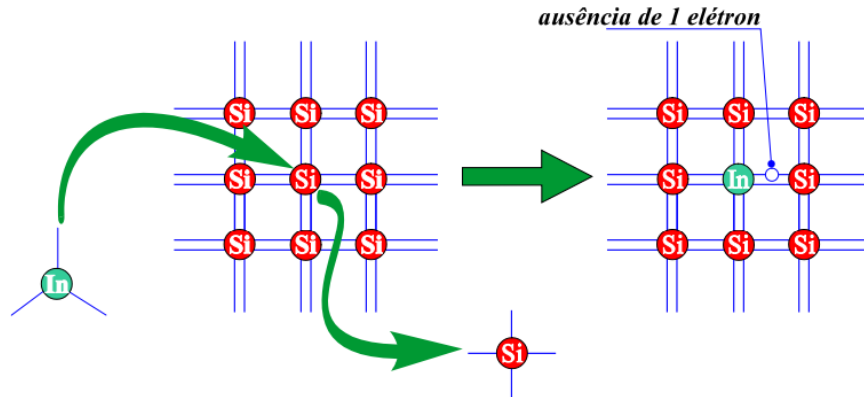
Fonte: WENDLING, 2011.

Com a inserção de vários átomos de impurezas, os elétrons livres passam a transitar livremente pelo material, tornando um material isolante (rede cristalina) em material com certo nível de condutividade (WENDLING, 2011).

### 2.3.2 Semicondutor do Tipo P

Para produzir um semicondutor do tipo *P* (portadores de cargas positivas), insere-se na estrutura cristalina átomos com a deficiência de um elétron em relação aos átomos da rede, conforme mostrado na Figura 12. Inicialmente o semicondutor intrínseco, ou seja, no seu estado puro, é dopado para a formação da região tipo *P*. Adiciona-se material dopante do tipo receptor, o que leva a uma deficiência de elétrons conhecida como “lacunas” ou “buracos” na banda de valência, caracterizando uma região com uma densidade de carga positiva. A existência de lacunas permite que haja um mecanismo de condução distinto do tipo *N*. Quando a dopagem produz lacunas no semicondutor, um elétron proveniente de uma ligação covalente só poderá transitar para um ponto do cristal onde haja uma lacuna disponível (WENDLING, 2011).

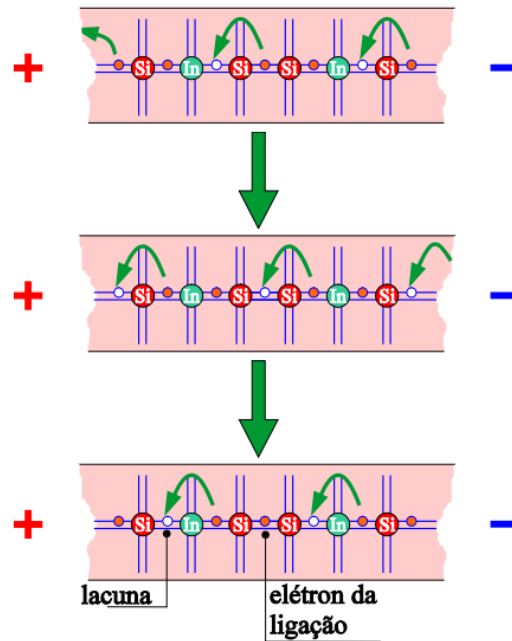
**Figura 12** - Inserção de átomos com a deficiência de um elétron na rede cristalina do átomo de silício.



Fonte: WENDLING, 2011.

O movimento de elétrons de valência ocorre do polo negativo para o polo positivo. As lacunas em um semicondutor dopado se comportam como cargas positivas que podem transitar em um cristal submetido a uma tensão externa aplicada, conforme mostrado na Figura 13.

**Figura 13** - Movimento de elétrons em um semicondutor do tipo P.



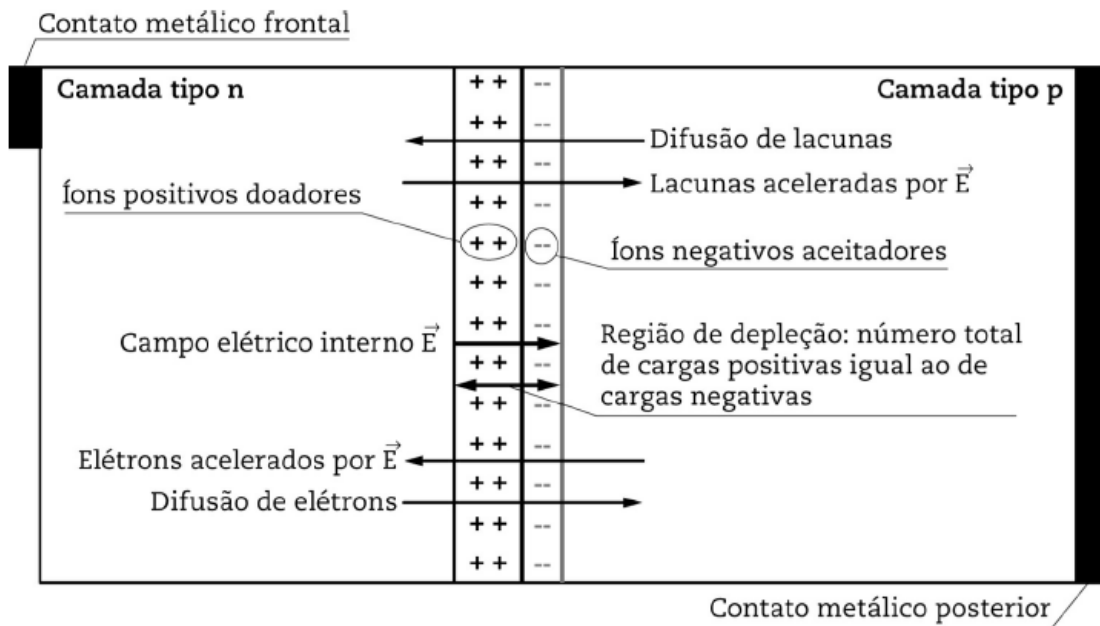
Fonte: WENDLING, 2011.

### 2.3.3 Junção PN

Entende-se por junção o contato íntimo entre dois materiais que possuem estruturas energéticas internas diferentes. Podem ser executadas entre dois metais, entre um metal e um semicondutor, entre dois semicondutores ou através do contato íntimo entre dois cristais dopados com impurezas de polaridades opostas, embora pertencentes ao mesmo semicondutor extrínseco, neste último caso, o dispositivo é chamado de junção PN. A junção PN refere-se ao contato ou ligação produzida nos semicondutores através da dopagem com impurezas de polaridades opostas (VERONESE, 2012).

Na junção *PN* surge um campo elétrico em razão dessa difusão de elétrons e lacunas, o qual se opõe à difusão original de cargas, criando uma barreira de potencial numa região de transição entre as camadas chamada de região de depleção (em reconhecimento à diminuição da mobilidade dos portadores de carga na região). Nessa situação, a corrente associada ao fluxo de elétrons e lacunas compensa a corrente originada pelo campo elétrico, levando o semiconductor a um estado de equilíbrio elétrico, conforme a Figura 14 (ZILLES et al., 2012).

**Figura 14** - Junção *PN* com detalhe da região de depleção, da difusão e da ação do campo elétrico interno sob elétrons e lacunas.



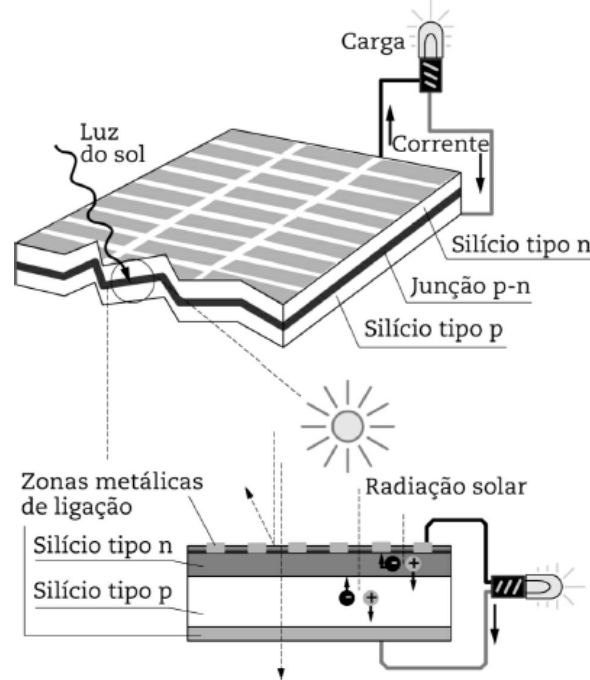
Fonte: ZILLES et al., 2012.

Quando um material semiconductor com junção *PN* é exposto a luz (fótons) com energia maior que o *gap* do campo elétrico formado, quebrando o estado de equilíbrio, ocorrerá a excitação de pares de elétrons/lacunas, ou seja, quando um elétron da banda de valência é atingido por um fóton, ele absorve a energia deste e, se essa energia for suficiente para libertá-lo de sua ligação química, ele passa para a banda de condução, criando um par elétron-lacuna.

Com a incidência de mais fótons, mais pares elétron-lacuna são formados e separados pelo campo, ocorrendo, assim, um desequilíbrio nas correntes da junção e o estabelecimento de uma diferença de potencial decorrente do acúmulo de portadores de carga em cada lado da junção (elétrons na região *n* e lacunas na região *p*).

Se em cada lado da junção forem conectados terminais metálicos e estes forem interligados por um condutor, estabelece-se uma corrente elétrica chamada de fotocorrente, a qual estará presente enquanto houver radiação solar incidindo no semiconductor. A Figura 15 ilustra o processo de conversão fotovoltaica com o aproveitamento da corrente fotogerada (ZILLES et al., 2012).

**Figura 15** - Representação do processo de conversão fotovoltaica.

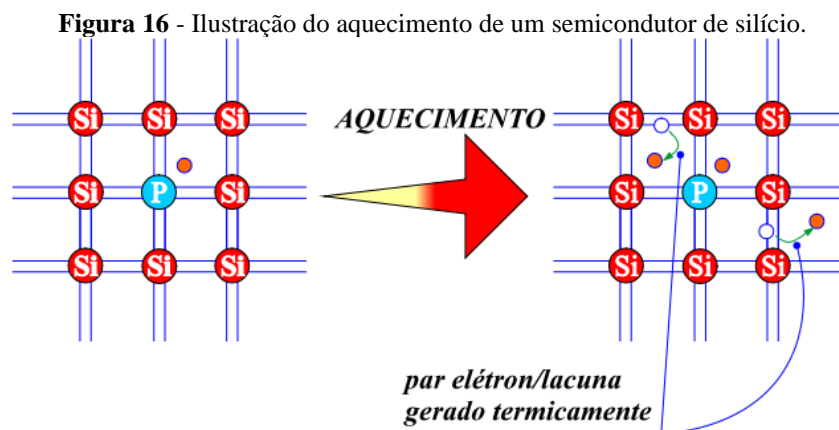


Fonte: ZILLES et al., 2012.

A separação dos portadores de carga através da junção *PN*, promove o efeito fotovoltaico – a criação de uma corrente elétrica em um material semiconductor quando exposto a determinada frequência de radiação luminosa, como nas células fotovoltaicas expostas ao sol. O efeito fotovoltaico ocorre em qualquer diodo semiconductor que seja exposto a radiação, portanto, as células fotovoltaicas podem ser entendidas essencialmente como diodos de grande área otimizados para o aproveitamento do efeito fotovoltaico (PINHO; GALDINO, 2014).

#### 2.3.4 Influência térmica

Quando a temperatura de um material semiconductor aumenta, sua condutividade também aumenta, devido a liberação de elétrons na camada de valência, que formam um par elétron/lacuna, conforme mostrado na Figura 16 (WENDLING, 2011).



Fonte: WENDLING, Marcelo 2011.

Analisando as propriedades de materiais semicondutores, nota-se que o número de elétrons ou lacunas em um semicondutor, cresce com o aumento do número de átomos de impurezas introduzidas no cristal. Com o aumento do número de portadores de carga, aumenta-se a condutividade elétrica do material. Dessa forma, torna-se possível alterar de forma controlada a condutividade elétrica de um semicondutor, efetuando-se a dosagem adequada da quantidade de dopagem do cristal durante a etapa de fabricação. Essa característica de controle externo de condutividade possibilita o uso de cristais semicondutores como matéria prima na fabricação de componentes eletrônicos, como diodos, transistores e circuitos integrados (WENDLING, 2011).

## 2.4 Células fotovoltaicas

A célula fotovoltaica, ou célula solar, é um dispositivo composto por um material semicondutor capaz de converter a radiação solar (luz) diretamente em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Existem diversos tipos de células solares, que podem ser classificadas de acordo com os materiais utilizados em seu processo de fabricação. Os principais tipos de células fotovoltaicas são produzidos em silício, devido ao seu custo-benefício se comparado a outros materiais semicondutores, podendo ser cristalino, monocristalino (mono-Si), policristalino (multi-Si) e silício amorfo (a-Si) (Portal Solar, 2021).

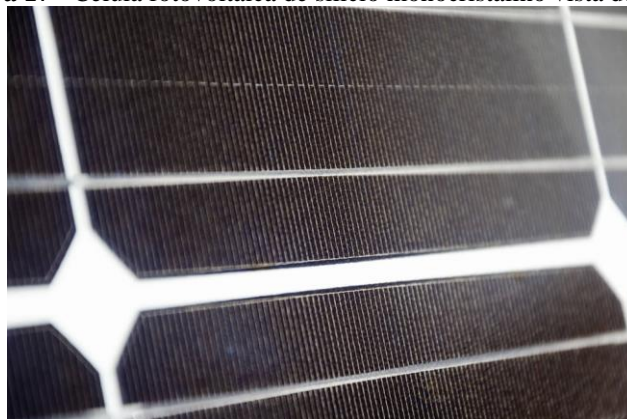
Uma célula fotovoltaica é a unidade básica de um bloco fotovoltaico. Ela pode ser considerada como um dispositivo de dois terminais, que conduz como um diodo quando a célula não é excitada por luz, ou que gera uma diferença de potencial quando exposta a luz. A célula é, usualmente, uma fina camada de material semicondutor de cerca de  $100\text{ cm}^2$  de área. A superfície é tratada para que o mínimo de luz visível seja refletido e possui aparência escura. Uma rede de contatos metálicos é impressa na superfície para fazer contato elétrico (DIENSTMANN, 2009).

Existem muitos tipos de células fotovoltaicas e elas variam dependendo dos materiais que as constituem e de sua natureza. Abaixo estão listados os principais tipos de células fotovoltaicas.

### 2.4.1 Células monocristalinas

As células monocristalinas são a primeira geração de células fotovoltaicas. Essa geração engloba células de silício policristalino (p-Si) e silício monocristalino (m-Si), célula representada na Figura 17, também foram as primeiras células solares criadas, e até hoje são consideradas as mais confiáveis pela indústria.

**Figura 17** - Célula fotovoltaica de silício monocristalino vista de perto.



**Fonte:** Aldo.blog, 2021.

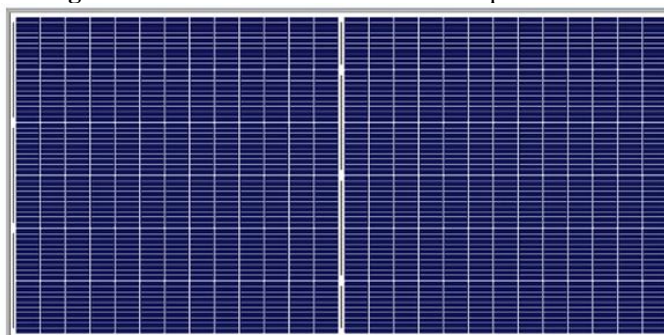
A produção de uma célula solar monocristalina requer materiais puros e com uma estrutura de cristal perfeita. Por isso, necessita de uma grande quantidade de energia para ser produzida e seu custo tende a ser mais alto, em compensação, seu rendimento é significativo, de aproximadamente 16%, podendo chegar até 23%, células mais modernas podem apresentar um rendimento maior.

A fabricação de uma célula monocristalina se dá a partir de um único cristal. Como ela é desenvolvida a partir de um lingote redondo, suas pontas também são arredondadas (COGERA ENERGIA, 2019).

#### 2.4.2 Células policristalinas

As células policristalinas, célula representada na Figura 18, apesar de também fazerem parte da primeira geração, são diferentes das células monocristalinas. Sua produção é mais barata e seu rendimento é inferior, ficando entre 11% e 13% na média, podendo obter até 18% em laboratório. Ao contrário das células fotovoltaicas monocristalinas, sua formação, como nome já sugere, se dá a partir de múltiplos cristais. E essa imperfeição da fonte resulta em um menor rendimento. É possível identificar as células policristalinas por meio de sua coloração azul e por suas pontas quadradas (COGERA ENERGIA, 2019).

**Figura 18** - Painel fotovoltaico de silício policristalino.

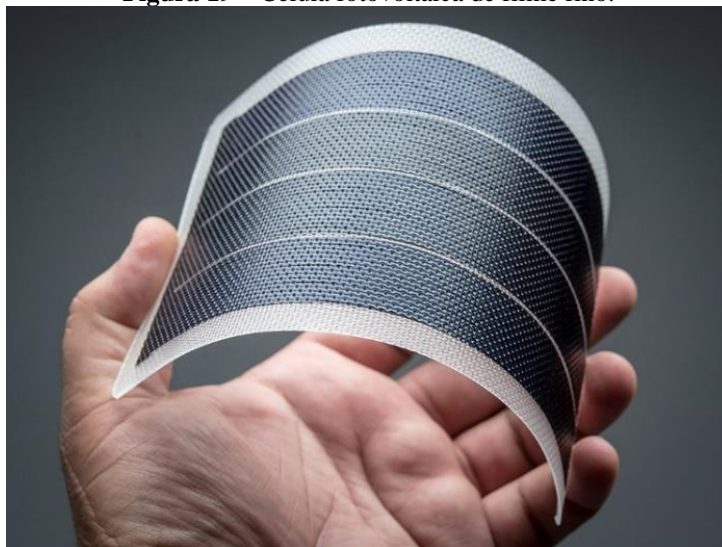


**Fonte:** Soft Solar, 2021.

### 2.4.3 Células de silício amorfo ou de filme fino

As células de silício amorfo são películas muito finas, sem restrição de tamanho ou forma. Podem até mesmo ser flexíveis ou transparentes. Neste caso, uma fina camada de material é aplicada sobre uma superfície (que pode, inclusive, ser irregular ou até flexível). Geralmente a eficiência é menor, porém o custo também é menor e a flexibilidade de aplicação é bastante diferenciada, painel contendo células de filme fino é representado na Figura 19.

**Figura 19** – Célula fotovoltaica de filme fino.



**Fonte:** AliExpress, 2023.

Como a fabricação da Célula fotovoltaica de filme fino não requer muito material ou energia, são células mais baratas do que qualquer outro tipo de célula fotovoltaica. O fato de serem finas permite que essas células sejam muito usadas em materiais de construção, mas elas também duram menos do que as células de silício cristalizado, durando apenas 10 anos enquanto as células monocristalinas e policristalinas duram em torno de 20 anos (COGERA ENERGIA, 2019).

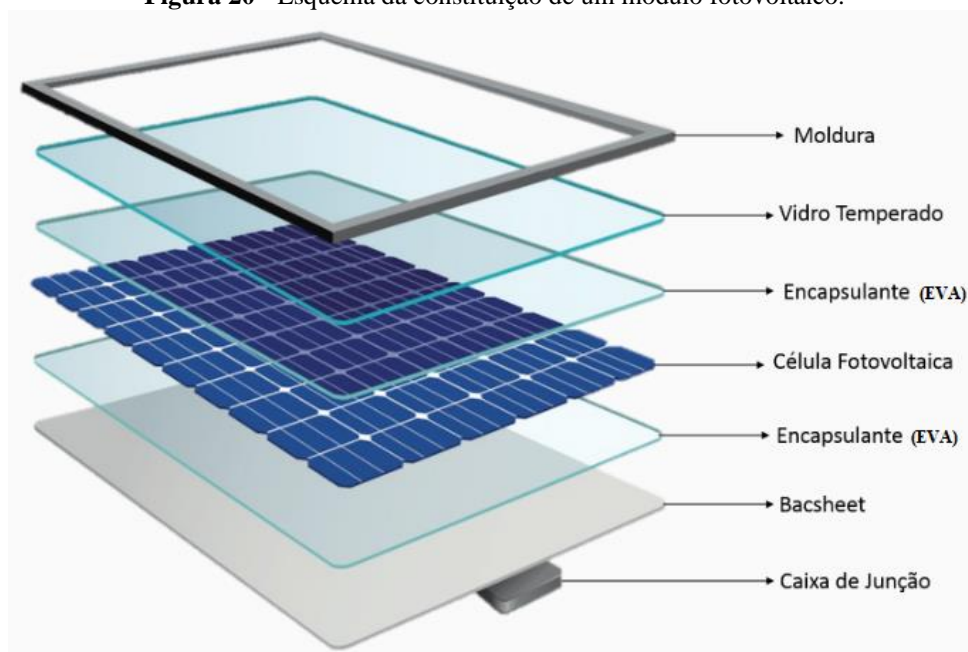
### 2.5 Módulo fotovoltaico

Define-se como módulo fotovoltaico qualquer dispositivo capaz de converter energia solar em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico, sendo a célula fotovoltaica o dispositivo que constitui a unidade básica (ZILLES et al., 2012). O módulo fotovoltaico é o dispositivo responsável por captar a luz emitida pelo sol e transformá-la em energia elétrica, que então poderá ser utilizada por uma residência ou empresa. O módulo fotovoltaico tem a função de converter a energia fotovoltaica – gerada pela luz solar – em energia elétrica. Além disso, ele produz energia sem a movimentação das placas, o que contribui para que a vida útil da estrutura seja prolongada (Portal Solar, 2021).

Todo painel solar é composto por uma série de camadas, a fim de criar um sistema propício para geração de energia. A primeira camada de um painel é a moldura de alumínio, ela serve para manter todos os outros componentes unidos e seguros em um mesmo lugar. Logo após, é possível observar o vidro temperado, que tem por função proteger a placa fotovoltaica da ação de agentes como granizo e chuvas fortes.

A placa fotovoltaica, propriamente dita, vem depois, envolvida em ambos os lados por um fino filme plástico denominado *EVA*, que engloba a placa de silício e tem por função proteger a placa do contato direto com o vidro e o fundo protetor. Por último, temos a caixa de junção, que tem por função proteger todo o sistema de danos causados pela corrente reversa, os componentes de um painel fotovoltaico estão ilustrados na Figura 20.

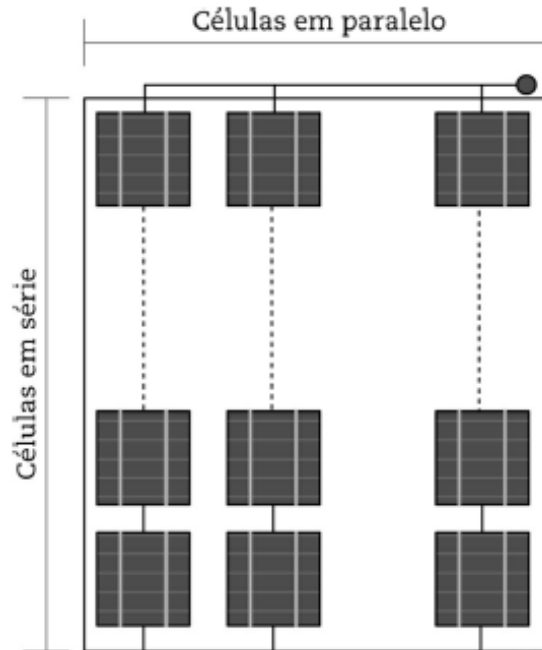
**Figura 20** - Esquema da constituição de um módulo fotovoltaico.



**Fonte:** Minha Casa Solar, 2019

A célula fotovoltaica atinge valores de tensão da ordem de 0,5V a 1,5V, segundo as várias tecnologias existentes, que são incompatíveis com equipamentos elétricos de condicionamento de potência e armazenamento de energia. Assim, é necessária a adoção de alternativas para tornar esse dispositivo aplicável para a geração de energia em quantidades consideráveis para o uso contínuo, uma dessas alternativas é apresentada na Figura 21.

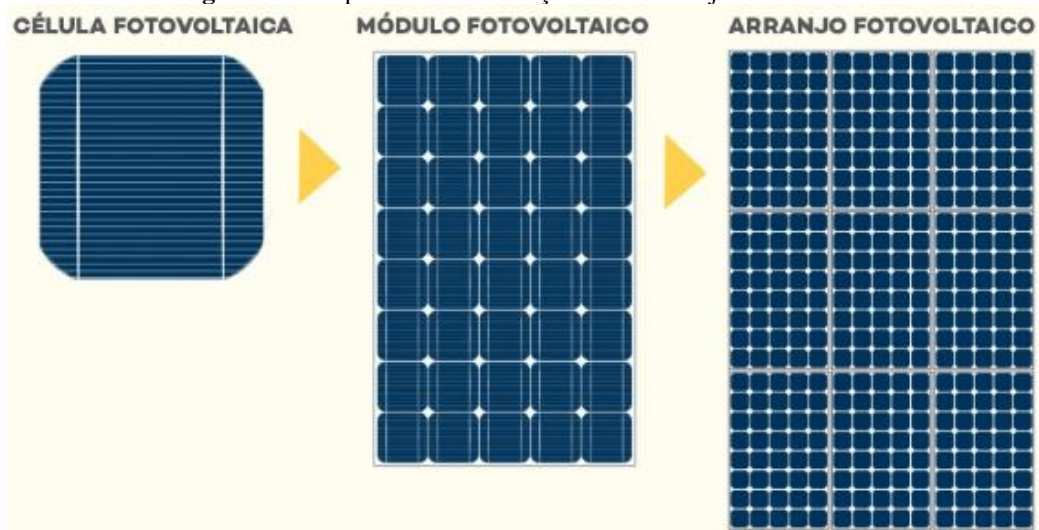
É necessário a associação de várias células em série e/ou paralelo, como ilustra a Figura 21, para se obter tensões e correntes utilizáveis na prática. Além do mais, a conexão e os módulos devem estar protegidos contra intempéries, uma vez que as células fotovoltaicas são objetos frágeis e sensíveis à corrosão (ZILLES et al., 2012).

**Figura 21** - Conexão de células em série e paralelo.

Fonte: ZILLES et al., 2012

O agrupamento de células, comumente chamados de módulos, podem ser fabricados em diversas potências, capazes de gerar corrente em baixa tensão quando expostos à luz. Esses módulos constituem a unidade básica de geradores fotovoltaicos de maior potência, à medida que a energia requerida aumenta (ZILLES et al., 2012).

No geral, são usadas 36, 60 ou 72 células fotovoltaicas interligadas em série para montar um módulo fotovoltaico. De forma geral, entende-se que a célula solar é a unidade básica de fabricação, o módulo solar é o conjunto de células fotovoltaicas e o conjunto de módulos conectados forma um arranjo fotovoltaico. A Figura 22 ilustra a célula, módulo e arranjo fotovoltaico.

**Figura 22** - Esquema da constituição de um arranjo fotovoltaico.

Fonte: NeoSolar, 2021.

## 2.6 Sistema de backup de energia

Um sistema de backup de energia é um sistema que fornece energia elétrica para uma instalação ou equipamento em caso de interrupção na rede elétrica principal. Em geral, os sistemas de backup de energia são instalados em locais onde a interrupção no fornecimento de energia pode ter consequências graves, tais como hospitais, centros de processamento de dados, aeroportos, centros de comunicação e outros edifícios comerciais críticos.

Existem vários tipos de sistemas de backup de energia, incluindo baterias, geradores a diesel, geradores de gás natural e sistemas de energia solar. Cada tipo de sistema é projetado para fornecer energia elétrica de acordo com a necessidade específica do local ou equipamento que está sendo atendido. Algumas das opções mais comuns são:

- ✓ **Geradores:** os geradores são uma fonte de energia elétrica de backup confiável e podem ser usados para alimentar uma casa ou empresa inteira em caso de falha de energia elétrica. Eles podem ser alimentados por combustíveis fósseis como gasolina, diesel, gás natural ou propano.
- ✓ **Baterias:** as baterias de backup são frequentemente usadas em conjunto com painéis solares e sistemas de energia renovável. Essas baterias são capazes de armazenar energia durante o dia, quando há luz solar disponível, e fornecê-la quando for necessário.
- ✓ **UPS:** um sistema de energia ininterrupta (UPS) é um dispositivo eletrônico que fornece energia elétrica de backup para equipamentos eletrônicos críticos, como computadores, servidores e outros dispositivos eletrônicos. Os UPS usam baterias para fornecer energia de backup por um curto período até que a energia principal seja restaurada.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser usados como de backup de energia. Esses sistemas geram eletricidade a partir da luz solar e podem fornecer essa energia instantaneamente para a carga ou armazenar em baterias para uso posterior.

É essencial levar em conta a capacidade de armazenamento, autonomia, manutenção e os custos de instalação e operação de qualquer sistema de backup de energia.

## 2.7 Sistemas fotovoltaicos de Geração Distribuída (GD)

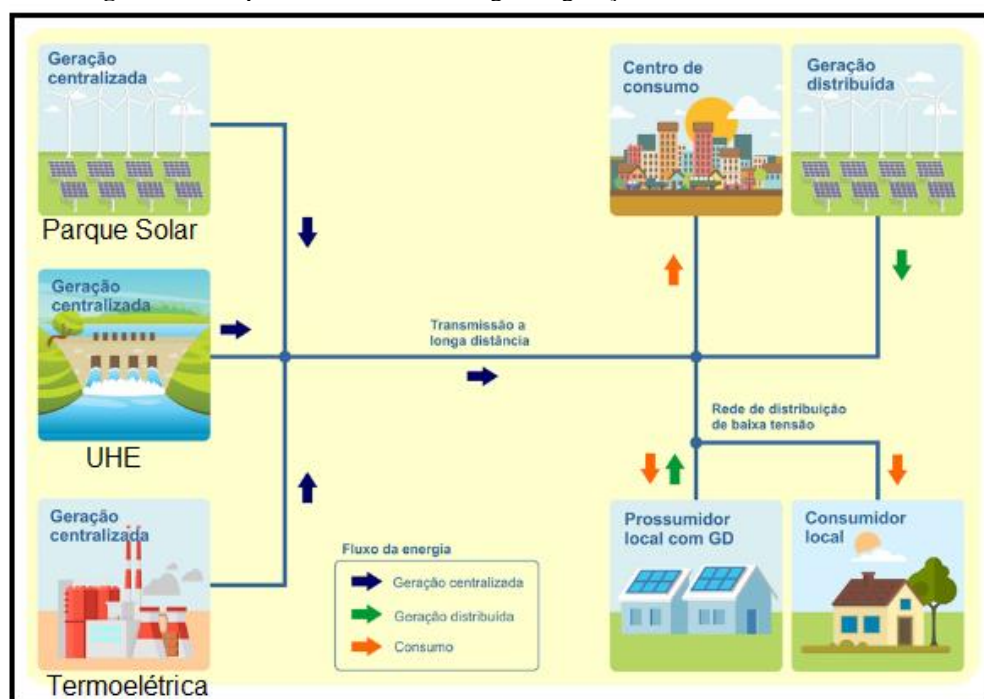
A Geração Distribuída (GD) foi criada em 2004, no Brasil, pelo Decreto Lei No. 5.163 do Governo Federal e tornou-se amplamente acessível à sociedade brasileira através da Resolução Normativa No. 482/2012 da ANEEL, que permitiu o acesso à rede de distribuição de baixa tensão por consumidores comuns, visando produzir energia elétrica para autoconsumo. A RN 482/2012 foi posteriormente revisada e ampliada pela RN 1059/2023.

A geração distribuída pode ser definida como uma fonte de energia elétrica gerada no local de consumo ou próximo dele. Diversas fontes de energia sustentáveis, como a energia solar, eólica, hídrica e biomassa podem fazer parte da geração distribuída.

A geração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica é classificada em microgeração (potência instalada menor ou igual a 75 kW) e minigeração (potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5MW).

O sistema de geração distribuída é uma técnica de geração descentralizada, que usa geradores de pequeno porte e se contrapõe ao modelo tradicional de geração centralizada. O modelo centralizado corresponde ao uso de grandes usinas (como hidrelétricas e termelétricas) distantes dos centros de consumo, e requer o transporte da energia por linhas de transmissão de longa distância. O fluxo de geração centralizada e descentralizada é apresentado na Figura 23.

**Figura 23** - Esquema do fluxo de energia da geração distribuída e centralizada.



Fonte: Canal Solar, 2021.

A geração distribuída apresenta vantagens econômicas, ambientais e sociais, tais como:

- ✓ **Redução de perdas:** a geração de energia pode ser produzida no próprio local onde será consumida ou perto dos centros de consumo, reduzindo perdas com transmissão.
- ✓ **Ampliação de investimentos:** a geração distribuída incentiva pessoas e empresas a produzir sua própria energia. Os investimentos são feitos a partir de recursos próprios ou financiados.
- ✓ **Expansão da matriz energética:** a geração distribuída permite um aumento rápido da oferta de energia elétrica no país, o que resulta na redução do custo e no aumento da disponibilidade de energia elétrica no país.

- ✓ **Energia limpa:** a geração distribuída incentiva o uso de fontes limpas e alternativas, tornando a geração de eletricidade mais sustentável.
- ✓ **Geração de empregos:** ao incentivar a instalação de centenas de milhares de pequenos geradores de energia elétrica, a GD estimula investimentos, cria empregos locais e movimentam diversos setores da economia, desde a fabricação até a instalação dos sistemas.

A geração distribuída para sistemas fotovoltaicos é classificada de acordo com a aplicação. Os sistemas fotovoltaicos podem ser utilizados de forma isolada ou conectados à rede elétrica. A aplicação depende do local de instalação e da finalidade do sistema.

### 2.7.1 Sistema fotovoltaico conectado à rede de energia elétrica (on-grid) – SFCR

O Sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição (SFCR) opera em paralelo com a rede de eletricidade e é empregado em locais atendidos por energia elétrica e, gera eletricidade com o objetivo de reduzir ou eliminar o consumo da rede pública ou mesmo gerar excedente de energia (VILLALVA, 2015).

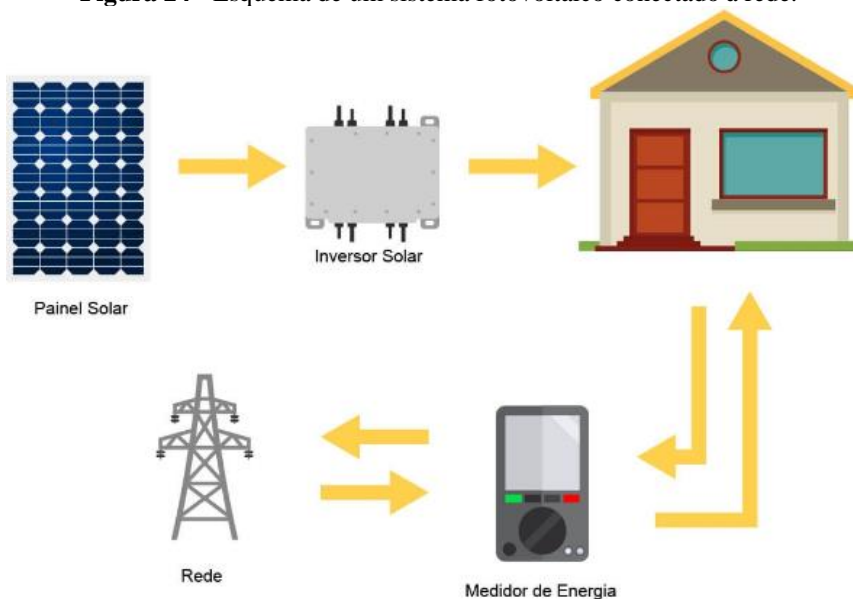
O SFCR é constituído pelo arranjo fotovoltaico, cabeamento elétrico para os componentes em corrente contínua (CC) e para os componentes corrente alternada (CA), estrutura de suporte para os módulos, string box CC e CA, seguidor de ponto de potência máxima (SPPM - controlador que visa aumentar a eficiência do processo de carga ou MPPT – do inglês *Maximum Power Point Tracking*), inversor, dispositivos de proteção, supervisão e controle (PINHO; GALDINO, 2014).

O sistema on-grid dispensa o uso de baterias, pois a energia produzida pode ser consumida diretamente pela carga, ou injetada na rede elétrica convencional, para ser consumida pelas unidades consumidoras conectadas ao sistema de distribuição. Este sistema é basicamente de um único tipo e é aquele em que o gerador fotovoltaico representa uma fonte complementar ao sistema elétrico ao qual está conectado. (PINHO; GALDINO, 2014).

A diferença do sistema on-grid para o off-grid é o destino da energia gerada em excesso: enquanto o sistema off-grid pode armazenar a energia em baterias solares, o sistema on-grid transfere para a rede elétrica, por meio do relógio bidirecional, gerando créditos de energia para serem usados posteriormente.

O sistema on-grid dispõe de um medidor de energia bidirecional, capaz de medir a energia injetada na rede e a energia consumida da concessionária. A Figura 24 exemplifica um esquema simplificado de um sistema conectado à rede.

**Figura 24** - Esquema de um sistema fotovoltaico conectado à rede.



Fonte: NeoSolar, 2023.

### 2.7.2 Sistema fotovoltaico autônomo ou isolado (off-grid) – SFI

O sistema fotovoltaico off-grid, também conhecido como sistema autônomo ou isolado da rede, é um sistema de energia solar que funciona independentemente da rede elétrica pública. O sistema representa uma solução para instalações em lugares remotos, sendo a fonte principal do fornecimento de energia ou ser uma fonte alternativa (backup), isto é, alimentar as cargas do local apenas na ausência da energia elétrica proveniente da concessionária, em momentos de apagão (PETERLINI, 2022).

O sistema off-grid é composto pelo arranjo fotovoltaico, inversor, controlador de carga, cabeamento elétrico para os componentes CC e para os componentes CA, string box CC e CA, dispositivos de proteção e supervisão e bateria quando houver armazenamento de energia.

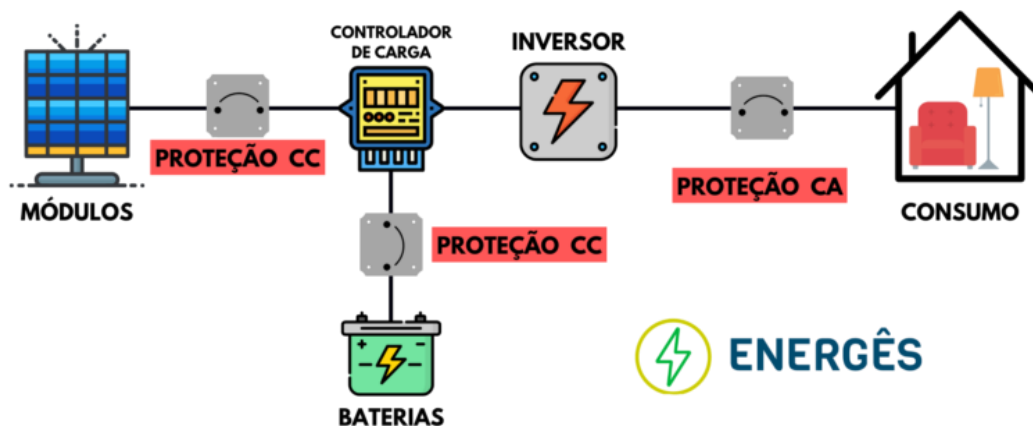
Os sistemas isolados podem apresentar algumas classificações ou configurações técnicas, a classificação ocorre em função da presença ou não de unidades de armazenamento e em função de produção ou não de corrente alternada. As configurações mais comuns são:

- ✓ **Carga CC sem armazenamento:** a energia elétrica gerada é consumida de forma instantânea por equipamentos elétricos que operam em corrente contínua.
- ✓ **Carga CC com armazenamento:** a energia elétrica é consumida por equipamentos elétricos que operam em corrente contínua, havendo ou não geração fotovoltaica simultânea. Para que isto seja possível, a energia elétrica deve ser armazenada em baterias.
- ✓ **Carga CA sem armazenamento:** a energia elétrica gerada é consumida de forma instantânea por equipamentos elétricos que operam em corrente alternada. Sendo necessário utilizar um inversor entre o arranjo fotovoltaico e a carga.

- ✓ **Carga CA com armazenamento:** a energia elétrica é consumida por equipamentos elétricos que operam em corrente alternada, havendo ou não geração fotovoltaica simultânea. Nessa configuração, a energia elétrica é armazenada em baterias e, utiliza-se um inversor entre o arranjo fotovoltaico e a carga.

O esquema de geração de energia de um sistema fotovoltaico off-grid com carga CA e com armazenamento é apresentado na Figura 25.

**Figura 25** - Esquema de um sistema fotovoltaico autônomo com carga CA e com armazenamento.



Fonte: Adaptado de Energês, 2020.

No caso do sistema fotovoltaico autônomo com baterias o fornecimento de energia é ininterrupto, a não ser que haja um período sem radiação solar maior que o tempo de autonomia das baterias. O tempo de autonomia do sistema varia de acordo com o número de baterias utilizadas. A escolha do número de baterias é importante para que não haja falta de fornecimento de energia elétrica (NEOSOLAR, 2023).

## 2.8 Componentes do sistema off-grid

Para o funcionamento de um sistema fotovoltaico off-grid é indispensável a utilização de certos elementos em conjunto, atuando no processo de armazenamento e distribuição da energia elétrica gerada (RIBEIRO, 2020).

### 2.8.1 Módulo fotovoltaico

O módulo fotovoltaico capta a radiação solar e a converte em energia elétrica, o módulo é formado por um conjunto de células fotovoltaicas associadas em série e/ou paralelo, dependendo das tensões e/ou correntes que são determinadas em projeto.

As características elétricas e mecânicas do módulo estão presentes na folha de especificação técnica (datasheet) disponibilizada pelo fabricante. O módulo fotovoltaico pode ser identificado pela sua potência elétrica de pico  $W_p$  (watt-pico).

A potência máxima do módulo fotovoltaico ( $P_{mp}$ ), em *STC* - do inglês *Standard Test Conditions*, equivale ao produto da tensão de máxima potência ( $V_{mp}$ ) e da corrente de máxima potência ( $I_{mp}$ ). A tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) do módulo é a máxima tensão produzida. A tensão gerada pode ser medida por um voltímetro nos terminais do módulo quando ele está desconectado do sistema (sem corrente elétrica circulando). A corrente de curto-circuito máxima ( $I_{SC}$ ) obtida pelo módulo pode ser medida por um amperímetro, quando a tensão elétrica nos terminais do módulo for igual à zero (PINHO; GALDINO, 2014).

A condição padrão (STC) para se obter as curvas características do módulo é definida a partir de uma radiação de  $1000 \text{ W/m}^2$  e uma temperatura de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  na célula, porque a eficiência da célula é reduzida com o aumento da temperatura (CAGNON, 2009).

A quantidade de módulos conectados em série determina a tensão de operação do sistema em corrente contínua. A corrente é definida pela conexão em paralelo de módulos individuais ou de conjuntos de módulos conectados em série chamados de strings. A potência instalada, normalmente especificada em CC, é dada pela soma da potência nominal dos módulos individuais.

O conjunto de módulos é chamado de gerador fotovoltaico e constitui a primeira parte do sistema, é responsável pelo processo de captação da irradiação solar e sua transformação em energia elétrica. A Figura 26 apresenta um módulo de 565 Wp (PEREIRA; OLIVEIRA, 2011).

**Figura 26** - Módulo fotovoltaico de 565 Wp.



**Fonte:** Jinko, 2023.

### 2.8.2 Controlador de carga

O controlador de carga assegura o correto carregamento das baterias, evita sobrecargas e descargas profundas e garante maior vida útil. O controlador de carga é responsável por gerenciar os níveis de tensão e corrente que serão direcionadas a bateria. Quando a bateria está com pouca carga, o controlador evita que ela seja descarregada totalmente e a mantém dentro das condições ideais de funcionamento ao controlar a carga incidente (MARINHO et al., 2016).

Para fazer a regulação do armazenamento de carga da bateria, o controlador de carga solicita, em uma série de intervalos, energia da bateria para que sua vida útil não seja comprometida por longos períodos de inatividade, mesmo que a geração de energia seja suficiente para atender ao consumo (RIBEIRO, 2020).

Nos circuitos de um controlador de carga, é obtida a tensão das baterias, determinando seu estado atual de carregamento além de controlar a intensidade da corrente. Em períodos de baixa insolação, os controladores de carga possuem a função de isolar o painel do resto do sistema para evitar que as baterias descarreguem, já que a potência dos painéis solares nesses períodos é quase nula (MARINHO et al., 2016). Em períodos de insolação excessiva, o controlador de carga evita o sobrecarregamento das baterias, devido a geração de tensão maior que a tensão de carga das mesmas (GASQUET, 1997).

De acordo com o Manual de Engenharia Fotovoltaica (PINHO e GALDINO, 2014), os controladores de carga devem desconectar os módulos solares quando a bateria alcançar a carga completa e interromper o fornecimento de energia quando a bateria atingir o estado mínimo de segurança. E dependendo do tipo de controlador, é possível monitorar o desempenho do sistema além de acionar alarmes quando é identificado algum problema.

O controlador de carga é composto por dois circuitos: (a) circuito de controle e (b) circuito de comutação. O circuito de controle monitora as grandezas físicas do sistema como a tensão, corrente e temperatura da bateria, verifica essas informações e gera sinais de controle que são utilizados para comandar o circuito de comutação. E o circuito de comutação é composto por chaveamento através de semicondutores que controlam a tensão e/ou a corrente de carga e descarga da bateria (ou banco de baterias) (ROSEMBACK, 2004).

As principais funções atribuídas aos controladores de carga em um sistema fotovoltaico são: (a) providenciar o carregamento completo das baterias, (b) impedir sobrecarga na bateria, (c) bloquear corrente reversa entre módulo e bateria e (d) prevenir descargas totais (MARINHO et al., 2016).

#### 2.8.2.1 Controlador de carga PWM

O controlador de carga do tipo PWM (*Pulse Width Modulation*) significa modulação por largura de pulso. O controlador mantém uma bateria em sua carga máxima por meio de pulsos de tensão de alta frequência, com isso, consegue conferir o status da carga da bateria e ajustar os pulsos enviados. A Figura 27 ilustra um controlador de carga do tipo PWM.

**Figura 27** - Controlador de carga PWM.

Fonte: Minha Casa Solar, 2018.

### 2.8.2.2 Controlador de carga MPPT

O controlador de carga do tipo MPPT (*Maximum Power Point tracking*) significam ponto rastreador de potência máxima, este tipo de controlador busca o ponto de máxima potência do módulo, isso faz com que ele aproveite o máximo da potência que o módulo tem a oferecer. E tem a capacidade de monitorar a produção da energia e reduzir as perdas do sistema, resultando em maior eficiência. A Figura 28 ilustra um controlador de carga do tipo MPPT.

**Figura 28**- Controlador de carga do tipo MPPT.

Fonte: NeoSolar, 2023.

### 2.8.3 Bateria

No sistema off-grid com armazenamento é necessário o uso de baterias estacionárias para fazer o armazenamento da energia produzida. As baterias estacionárias são produzidas para suportar ciclos de descarga mais severos, dessa forma, são os modelos mais indicados para sistema off-grid com armazenamento. Convencionalmente, são mais utilizadas as baterias de baterias de íon-lítio e as de chumbo-ácido (MELO; LEMOS, 2022).

A bateria de LiFePO4 (Lítio Ferro Fosfato), bateria ilustrada na Figura 29, foi especialmente desenvolvida para substituir as baterias de ácido, gel ou AGM, mais utilizadas atualmente. Com seu design estratégico para cada aplicação permite otimização de espaço, peso e escalabilidade. Além de serem consideradas um bem durável e tolerante às diversas variações do ambiente em que estão inseridas, tais como: altas e baixas temperaturas. As baterias de Lítio são carregadas com tensão constante, controlada em cada célula individualmente, a partir da regulação da corrente de carga, com controladores bastante sofisticados (ALDO, 2023).



**Fonte:** La Casa Solar, 2023.

#### 2.8.4 Inversor Off-grid

O inversor é responsável pela conversão de energia contínua (CC) em corrente alternada (CA), o inversor solar estabelece a ligação entre o gerador fotovoltaico e a carga CA. A sua principal função consiste em converter o sinal elétrico CC por meio do acionamento alternado de dispositivos de chaveamento, do gerador fotovoltaico num sinal elétrico CA. A Figura 30 ilustra um inversor off-grid (PINHO; GALDINO, 2014).

**Figura 30** - Inversor solar off-Grid 5kVA 48V 220V - Growatt.



**Fonte:** Aldo, 2023.

Alguns aspectos determinam a qualidade dos inversores e devem ser avaliados pelo aumento de custo ser diretamente proporcional a qualidade e eficiência do inversor de acordo com esses parâmetros. Dois desses parâmetros seriam a forma da onda, pois ela depende do método de conversão e da filtragem utilizada para eliminar os harmônicos indesejáveis resultantes da conversão deixando a distorção harmônica total inferior a 5%, e a eficiência de conversão do inversor, principalmente por ela não ser constante e seu valor depender da potência demandada pela carga empregada e seu fator de potência (RIBEIRO, 2020).

As principais características elétricas na entrada do inversor (lado CC) são os parâmetros do módulo fotovoltaico, ( $P_{mp}$ ,  $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ ,  $V_{OC}$  e  $ISC$ ), precisamente pelo inversor ser alimentado pelos módulos fotovoltaicos. Na saída do inversor (lado CA), as principais características elétricas são: tensão nominal de saída ( $V_{ca}$ ); potência nominal de saída ( $PN_{ca}$ ); corrente máxima de saída ( $I_{ca}$ ) e frequência nominal ou da instalação ( $f_{ca}$ ) (MORAES, 2022).

#### 2.8.4.1 Inversor off-grid Interativo

O inversor off-grid interativo com a rede possui sistema de monitoramento e controlador de carga internos, dispensando o uso de um controlador de carga externo, como ocorre nos sistemas off-grid clássicos, isto significa que não é necessário dimensionar o controlador de carga, pois o inversor possui um controlador de carga interno do tipo MPPT (Aldo, 2023).

O inversor off-grid interativo possui uma entrada CA para a conexão com a rede elétrica ou a conexão de um gerador a diesel. O inversor é off-grid possui uma entrada para alimentação CA. Caso exista no local, a alimentação CA pode ser utilizada como um apoio para carregar o banco de baterias ou alimentar as cargas, realizando-se um *by-pass* (desvio). O inversor é desviado por uma chave interna e a entrada CA pode alimentar diretamente as cargas quando a tensão da rede ou um gerador estiver presente (Aldo, 2023).

A entrada da rede elétrica está separada da saída para as cargas em conectores diferentes, sendo que a conexão da entrada CA com a saída é realizada internamente, conforme o modo de operação do inversor. A interação com a rede através da entrada CA permite que o inversor off-grid seja usado como um sistema de backup em locais que já são atendidos pela rede elétrica (Aldo, 2023).

O inversor off-grid interativo com a rede difere do inversor solar híbrido (que também possui conexão para baterias), pois ele não injeta excedente de energia na rede elétrica. O inversor off-grid interativo não tem a capacidade de injetar de volta na rede elétrica a energia que foi armazenada nas baterias.

O inversor off-grid interativo difere do inversor off-grid tradicional, pois possui uma entrada CA que permite o carregamento das baterias e a alimentação direta das cargas, funcionando como sistema de backup. O inversor também pode ser usado em sistemas totalmente off-grid, que utilizam apenas módulos fotovoltaicos e baterias.

### 2.8.5 String Box

A string box é uma caixa de junção que reúne dispositivos para proteção do sistema fotovoltaico. São utilizadas duas strings box no sistema: uma para o lado CC, conectada entre o arranjo fotovoltaico e o inversor, e outra para o lado CA, conectada entre o inversor e a carga.

O correto dimensionamento dos dispositivos de proteção que integram a string box contribui para a eliminação ou minimização de falhas. Além dos dispositivos de proteção integrados aos equipamentos fotovoltaicos, a instalação de dispositivos de proteção externos deve ser prevista, como fusível, chave seccionadora, disjuntor termomagnético, dispositivo de proteção contra surtos (DPS). A Figura 31 ilustra uma string box (PINHO; GALDINO, 2014).

**Figura 31** - String Box CC - Clamper.



Fonte: Clamper, 2023.

A string box contém os seguintes componentes:

- ✓ **Invólucro:** caixa onde estarão os dispositivos de proteção e as conexões elétricas;
- ✓ **Chave seccionadora ou disjuntor:** permite a conexão ou desconexão do sistema fotovoltaico;
- ✓ **Dispositivos de proteção contra surtos (DPS):** dispositivo que detecta sobretensões transitórias na rede elétrica;
- ✓ **Dispositivo de proteção contra sobrecorrente (fusíveis e/ou disjuntor):** proteção contra sobrecorrente e curtos-circuitos;
- ✓ **Cabos CC e CA:** conexão elétrica do lado CC e do lado CA.

## 2.9 Fatores que influenciam a geração fotovoltaica

Alguns fatores podem limitar ou influenciar a eficiência de conversão de energia do sistema fotovoltaico.

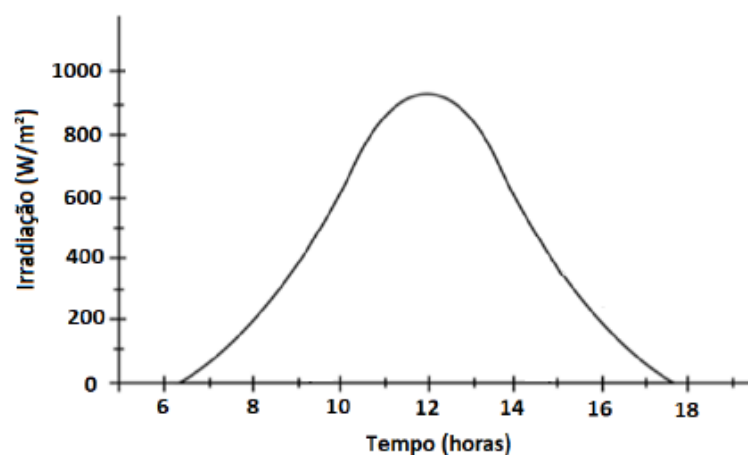
### 2.9.1 Incidência solar e temperatura

Os módulos fotovoltaicos devem ser instalados de forma que recebam o máximo possível de luz solar direta, e para isso a direção adequada é fundamental. A incidência pode variar de acordo com a região do país e a direção do telhado. A variação de irradiância solar (intensidade luminosa) e temperatura durante o dia afetam diretamente a eficiência das células fotovoltaicas, pois é gerada uma corrente elétrica que aumenta linearmente com o aumento da irradiância solar incidente no plano do módulo.

A irradiância, também chamada de irradiação, é uma grandeza utilizada para a realizar a avaliação da radiação solar que chega há uma determinada superfície e sua unidade é expressa por  $W/m^2$  (watt por metro quadrado). Na superfície terrestre a irradiância, em condições atmosféricas ótimas, ou seja, sem nuvens, é próximo de  $1000 W/m^2$  e fora da atmosfera terrestre é cerca de  $1353 W/m^2$  (VILLALVA, 2015).

A Figura 32 apresenta a curva de irradiância ao longo de um dia e, a área abaixo da curva indica o valor da energia recebida do sol durante um dia para um determinado local. Esse valor pode ser definido em Horas de Sol Pleno (HSP) ou Horas de Sol Pico. O HSP reflete o número de horas, por dia, em que a irradiância permanece igual a  $1000 W/m^2$ . A média anual de energia acumulada por dia de determinado município, no plano horizontal, é de  $4,24 kWh/m^2/dia$  e esse valor, expresso em HSP, é igual a  $4,24 h/dia$ , ou seja, durante um dia temos  $4,24$  horas em que a irradiância é igual a  $1000 W/m^2$  (NETO,2017).

**Figura 32** – Perfil da irradiância solar ao longo de um dia.



**Fonte:** Adaptado de NETO, 2017.

O aumento da irradiância solar incidente e/ou da temperatura ambiente produz um aumento na temperatura das células e, conseqüentemente, tende a reduzir a eficiência dos módulos fotovoltaicos. A tensão da célula diminui significativamente com o aumento da temperatura e sua corrente sofre uma pequena elevação, quase desprezível, com o aumento da irradiância e, a partir de um determinado valor elevado de temperatura na célula, a tensão do módulo começa a diminuir (PINHO; GALDINO, 2014).

A capacidade de geração de energia dos módulos fotovoltaicos é diretamente proporcional à luminosidade incidente e inversamente proporcional à temperatura, ou seja, em temperaturas mais baixas as tensões são maiores e em temperaturas mais altas as tensões são menores, os painéis solares apresentam um desempenho melhor quando são instalados em regiões com temperaturas amenas (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

### 2.9.2 Sombreamento

Além da incidência solar e da temperatura dos módulos fotovoltaicos, o sombreamento sobre eles também pode comprometer a geração de energia. Por isso, é fundamental fazer a implementação das placas solares levando em conta um local do telhado no qual não incida qualquer tipo de sombra, ou o mínimo possível de sombreamento.

Segundo especialistas, as células fotovoltaicas que sofrem com sombras param de gerar corrente elétrica e passam a funcionar como uma resistência, limitando a corrente em série de todas as outras células do sistema. Caso o problema não seja resolvido, pode acabar queimando as células que estão sofrendo com o sombreamento, afetando toda a geração de energia do sistema. Para evitar os problemas de sombreamento, a melhor opção é escolher um local sem incidência de sombra, entre as 9h da manhã até as 3h da tarde, período no qual há maior incidência solar e, portanto, maior potencial para produção de energia.

### 2.9.3 Microfissuras

A presença de microfissuras nos módulos solares pode influenciar na eficiência do sistema fotovoltaico, podendo ser invisíveis a olho nu, são capazes de prejudicar o desempenho do módulo como um todo. As microfissuras geralmente são causadas por excesso de pressão sobre as placas, o que pode acontecer durante o transporte ou manuseio inadequado desses equipamentos e, até mesmo na instalação dos módulos (SOLFÁCIL, 2020).

As microfissuras podem gerar ponto quente (*hotspots*) que podem causar a perda da energia gerada pelo módulo. Os *hotspots* são pontos de aquecimento, que podem ocorrer como uma consequência das microfissuras ou até mesmo do sombreamento (SOLFÁCIL, 2020).

#### 2.9.4 Sujeira no módulo fotovoltaico

O acúmulo de poeira, poluição e dejetos no módulo fotovoltaico pode impedir o correto funcionamento das células solares, pois causa interferência na incidência de luz e, assim, reduz a eficiência dos módulos e a geração. Pelo menos uma vez ao ano deve ocorrer a manutenção preventiva do sistema, bem como a limpeza dos painéis, porém, se o sistema está instalado em um local onde chove pouco, o indicado é que os painéis sejam limpos a cada 6 meses.

#### 2.9.5 Tolerância elétrica do sistema fotovoltaico

Há diversos índices informados pelos fabricantes no que diz respeito ao funcionamento dos componentes de um sistema solar. Um deles está relacionado à tolerância e incompatibilidade elétrica de potência. Esse tipo de informação é obtido por meio de testes realizados na fábrica, com o uso de um simulador solar, sobre irradiância solar incidente de  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura de células de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , condições padrão as quais todos os módulos fotovoltaicos devem ser submetidos (SOLFÁCIL, 2020).

É comum existir uma tolerância com potência negativa, como -3%, o que é válido tanto para a tensão quanto para a corrente nominal. A partir disso, é possível concluir que tais características elétricas variam entre as unidades, o que muda conforme a associação a módulos em diferentes níveis de tensão, potência e corrente. Até mesmo usando equipamentos idênticos e com excelente qualidade, é comum observar certa perda de eficiência no funcionamento dos módulos, ou seja, é sempre recomendável a utilização de módulos de mesma potência, mesmo fabricante e mesmas características constituintes em um sistema fotovoltaico. É preciso seguir as orientações fornecidas pelo fabricante, do contrário, é possível que ocorra alguma perda de energia em função do uso inadequado dos equipamentos (SOLFÁCIL, 2020).

#### 2.9.6 Perdas no inversor

Parte da energia gerada pelos módulos não é aproveitada. Isso se deve ao fato de que uma pequena parte da energia gerada se perde durante os processos de conversão e chaveamento, que acontecem no inversor solar. Alguns fabricantes disponibilizam tabelas de eficiência referente aos inversores, facilitando uma previsão por parte dos consumidores da energia que será perdida nessas etapas. É importante observar a relação entre a potência máxima que adentra no inversor, e a potência real fornecida pelo arranjo fotovoltaico, para assim saber qual seu impacto na eficiência do sistema (SOLFÁCIL, 2020).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Dimensionamento dos componentes

O sistema de backup a partir da geração fotovoltaico deve ser dimensionado para receber a energia irradiada pelo sol e captada pelo módulo fotovoltaico e, assim, atender a necessidade de uma demanda de carga. O dimensionamento de um sistema fotovoltaico off-grid é baseado em alguns fatores importantes, como o tipo de carga elétrica que será alimentada, o consumo diário de energia, o tempo de autonomia necessário (ou seja, quantos dias o sistema precisa funcionar sem receber energia solar) e a localização geográfica do sistema (NETO, 2017).

A seguir estão as principais etapas para dimensionar um sistema fotovoltaico off-grid:

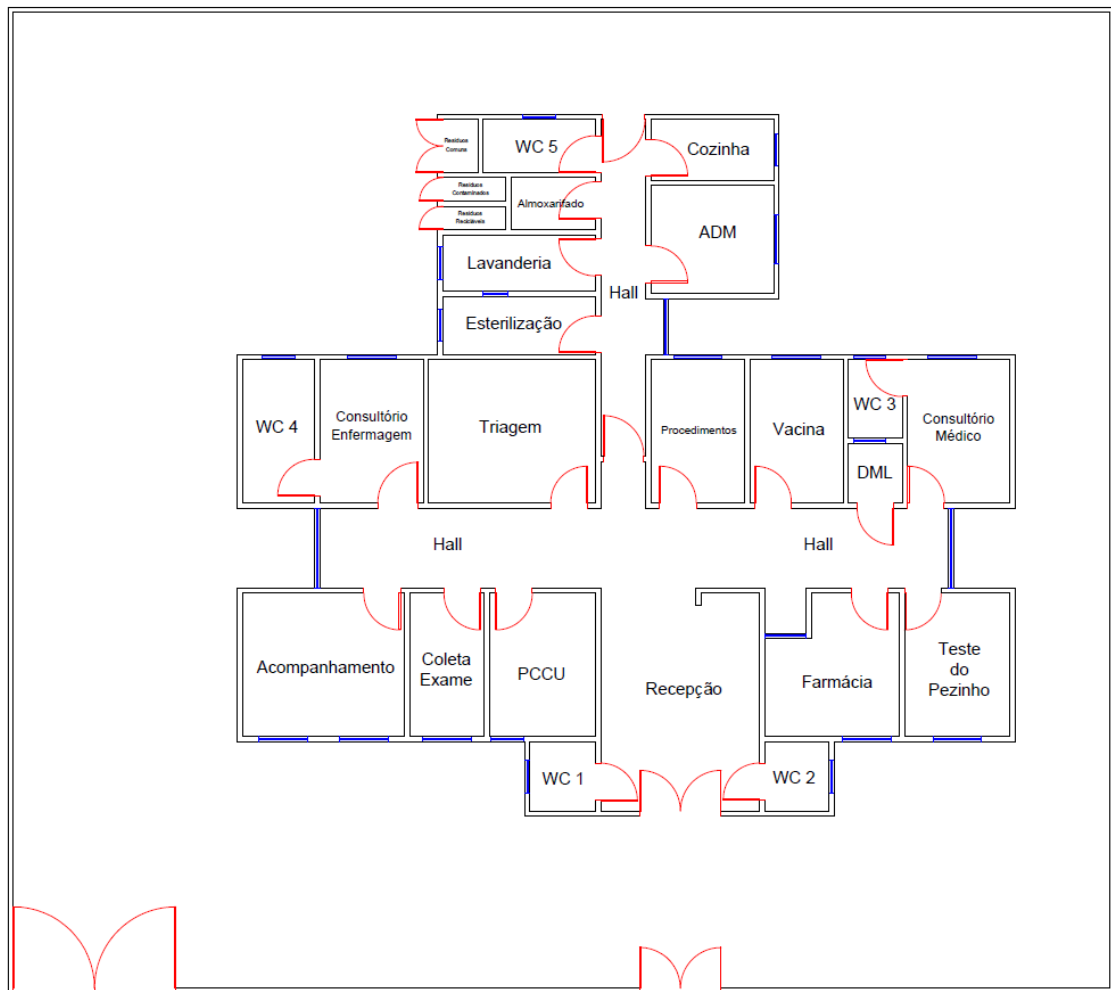
- 1. Levantamento de carga:** devem ser listados todos os equipamentos elétricos que serão alimentados pelo sistema fotovoltaico e o tempo médio de uso diário de cada equipamento. A potência em watts (W) de todos os equipamentos deverá ser somada para obter a carga elétrica total em watts-horas/dia (Wh/dia).
- 2. Autonomia do sistema:** o número de dias que o sistema é alimentado pelo banco de baterias sem a necessidade de recarga.
- 3. Dimensionamento do banco de baterias:** o tamanho do banco de baterias depende do consumo diário de energia e do tempo de autonomia.
- 4. Escolha dos módulos fotovoltaicos:** a escolha da potência dos painéis solares depende do consumo diário e do local onde o sistema será instalado. É importante determinar um arranjo fotovoltaico com potência suficiente para carregar o banco de baterias durante o dia.
- 5. Dimensionamento do controlador de carga:** o dimensionamento do controlador de carga depende da potência dos painéis. Em geral, recomenda-se escolher um controlador de carga com capacidade de 20% a 30% maior do que a potência dos painéis.
- 6. Dimensionamento do inversor:** o dimensionamento do inversor considera a carga elétrica gerada e o pico de potência dos módulos. Recomenda-se escolher um inversor com capacidade de 20% a 30% maior do que a carga elétrica máxima do arranjo fotovoltaico.
- 7. Dimensionamento dos cabos e conexões:** os cabos devem ser dimensionados de acordo com o tipo de isolamento, a corrente que irá passar por eles, a distância entre os componentes e o local de instalação.
- 8. Dimensionamento dos dispositivos de proteção:** os dispositivos de proteção são fundamentais para garantir a segurança e a eficiência do sistema, prevenir contra choque elétrico, sobrecorrente, sobreaquecimento, surtos de corrente e tensão.

**9. Dimensionamento do esquema de aterramento:** tem como função proteger os equipamentos elétricos, usuários e garantir o bom funcionamento da instalação.

### 3.1.1 Levantamento de carga

O levantamento de carga de uma instalação é um processo importante que envolve a identificação e a quantificação dos equipamentos elétricos que consomem energia elétrica na edificação. Foi identificado (*in loco*) que a UBS São Benedito possui fornecimento bifásico com condutores (fase e neutro) de seção  $10 \text{ mm}^2$ . A Figura 33 apresenta a planta baixa da UBS.

**Figura 33** - Planta baixa da UBS São Benedito.



**Fonte:** Elaborada pelos autores, 2022.

A partir da entrevista com a enfermeira coordenadora foi realizado o levantamento de carga, identificando as cargas prioritárias e não prioritárias. A demanda prioritária de energia refere-se à identificação das cargas elétricas que são consideradas essenciais (cargas críticas) para as operações da unidade de saúde. Com base na identificação da potência das cargas prioritárias e seu tempo de uso diário é possível determinar a potência adequada do sistema de backup.

A potência consumida é a quantidade de energia que um equipamento consome em um determinado período, já o tempo de uso diário é o número de horas por dia em que o equipamento é utilizado. Com essas informações é possível calcular a carga total da instalação, que é a soma de todas as cargas individuais.

A partir dessas informações, foi feito o levantamento de carga prioritária da UBS, conforme a Tabela 1.

**Tabela 1** - Levantamento de carga prioritária da unidade básica de saúde - São Benedito.

LEVANTAMENTO DE CARGA PRIORITÁRIA						
Local	Carga	Quantidade	Potência (W)	Potência total (W)	Uso Horas/dia	Consumo (Wh/dia)
Recepção	Lâmpada led bulbo	3	15	45	12	540
	Computador	1	22	22	8	176
WC 1	Lâmpada led bulbo	1	10	10	2	20
WC 2	Lâmpada led bulbo	1	10	10	2	20
C. médico	Lâmpada led bulbo	2	15	30	4	120
	Computador	1	22	22	4	88
WC 3	Lâmpada led bulbo	1	10	10	0,5	5
DML	Lâmpada led bulbo	1	10	10	1	10
Teste do pezinho	Lâmpada led bulbo	2	15	30	8	240
Farmácia	Lâmpada led bulbo	2	15	30	8	240
Vacina	Lâmpada led bulbo	2	15	30	8	240
	Computador	1	22	22	8	176
	Geladeira	1	50	50	18	900
Procedimentos	Lâmpada led bulbo	2	15	30	8	240
Triagem	Lâmpada led bulbo	4	15	60	8	480
	Balança pediátrica	1	5	5	2	10
C. Enfermagem	Lâmpada led bulbo	2	15	30	8	240
	Computador	1	22	22	8	176
WC 4	Lâmpada led bulbo	1	10	10	1	10
Preventivo	Lâmpada led bulbo	2	15	30	8	240
	Foco	1	15	15	2	30
Coleta exame	Lâmpada led bulbo	1	15	15	8	120
Acompanhamento	Lâmpada led bulbo	2	15	30	2	60
Hall 1	Lâmpada led bulbo	4	15	60	4	240
Hall 2	Lâmpada led bulbo	2	15	30	4	120
ADM	Lâmpada led bulbo	1	15	15	8	120
	Computador	1	22	22	8	176
Esterilização	Lâmpada led bulbo	1	15	15	4	60
	Autoclave	1	100	100	1	100
	Estufa	1	550	550	1	550
Almoxarifado	Lâmpada led bulbo	1	15	15	1	15
Lavanderia	Lâmpada led bulbo	1	15	15	4	60
WC 5	Lâmpada led bulbo	1	10	10	2	20
Cozinha	Lâmpada led bulbo	1	15	15	4	60
	Geladeira	1	50	50	18	900
				<b>1.465</b>		<b>6.802</b>

Fonte: Elaborada pelos autores, 2022.

O sistema fotovoltaico deve ser capaz de atender o consumo diário de 6.802 W para equipamentos ligados em tensão monofásica (127 V).

### 3.1.2 Consumo diário de energia

A autonomia determinada para o sistema da UBS foi de dois (2) dias, conforme recomendação de autonomia para unidades de saúde. A energia consumida da unidade é de 6802 Wh/dia, conforme apresentado na Tabela 1. O cálculo da energia consumida é apresentado na Equação 1:

$$EC = C_d \cdot \text{Autonomia} \quad (1)$$

Onde,

**EC** = energia consumida [Wh];

**C<sub>d</sub>** = Consumo diário [Wh/dia]

**Autonomia** = tempo de autossuficiência do sistema [dia].

Substituindo,

$$EC = 6.802 \cdot 2$$

$$EC = 13.604 \text{ Wh}$$

O consumo total do sistema será de 13.604 Wh.

### 3.1.3 Dimensionamento do banco de baterias

O primeiro componente a ser dimensionado é o banco de baterias que deve ser suficiente para armazenar a energia necessária aos equipamentos. As baterias devem prover a energia necessária para garantir a autonomia proposta da instalação, durante períodos em que não há geração de energia solar suficiente.

O banco de baterias deve acumular a energia que será utilizada em dias de pouca irradiação (nublados e chuvosos) e nos períodos noturnos. O correto dimensionamento do banco de baterias garante que haja energia suficiente para alimentar as cargas. O cálculo para determinar a energia armazenada no banco de baterias é feito por meio da Equação 2.

$$EA(\text{Wh}) = \frac{EC}{(\eta_{CC}/CA \cdot DOD_{\max} \cdot E_e)} \quad (2)$$

Onde,

**EA** = a energia armazenada no banco de baterias [Wh];

**EC** = a energia consumida [Wh];

$\eta_{CC/CA}$  = a eficiência total entre o consumo em CC no banco de baterias e o consumo em CA. (perdas na descarga da bateria, perdas ôhmicas ou transmissão);

$DOD_{max}$  = a profundidade de descarga máxima para proteger o banco de baterias de descarga profunda (20%, 50%, 80%, 90% etc.);

$E_e$  = a eficiência do inversor.

A Tabela 2 apresenta as características da bateria que será utilizada no projeto, retirada do Anexo A. Com base no custo-benefício, optou-se por utilizar a bateria de lítio A48100 da fabricante *Dyness*. A bateria A48100 emprega a tecnologia LiFePO4 (lítio-ferro-fosfato), que é uma das mais eficientes e seguras dentre as diversas tecnologias de baterias existentes.

**Tabela 2** - Características da bateria A48100 – Dyness.

Características da Bateria A48100	
Tipo de bateria	(Lítio) LiFePO4
<b>Energia nominal da bateria</b>	4.8 kWh
<b>Capacidade Nominal</b>	100 Ah
<b>Tensão nominal</b>	48 V
<b>Taxa de carga recomendada</b>	0,5C
<b>Área(m<sup>2</sup>)</b>	0,3 m <sup>2</sup>
<b>Peso(k<sub>g</sub>)</b>	45 K <sub>g</sub>
<b>Profundidade de descarga</b>	90%
<b>Vida útil</b>	> 6000 Ciclos

**Fonte:** Adaptada do datasheet da bateria A48100 – Dyness,2023.

A capacidade de armazenamento de energia é 4,8 kWh, a capacidade de armazenamento de carga de 100 Ah e a tensão nominal da bateria de 48 V.

A taxa de carga e descarga é de 0,5C, ou seja, se a bateria tem uma capacidade de 100 Ah e tem uma taxa de 0,5C, ela pode ser carregada com uma corrente máxima de 50 A. A corrente nominal máxima é 50 A, porém o equipamento suporta uma corrente de pico de até 75 A, quando isso eventualmente for necessário.

O número de ciclos suportado pelo aparelho é 6000, isso significa que o banco de baterias pode ser carregado e descarregado integralmente 6000 vezes. Considerando que o equipamento será carregado e descarregado integralmente todos os dias (uma situação extrema), a bateria terá uma durabilidade de 16 anos. Como, em geral, a carga e a descarga não ocorrem integralmente e diariamente na maior parte das aplicações, espera-se uma durabilidade superior a 16 anos, compatível com a expectativa de vida da maior parte dos sistemas fotovoltaicos.

A energia consumida no período de autonomia de dois dias foi calculada na seção 3.1.2. O valor de  $E_e$  consta no *datasheet* do inversor no Anexo B.

Substituindo,

$$EA(\text{Wh}) = \frac{13.604}{(0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,95)}$$

$$\mathbf{EA(\text{Wh}) = 17.679,01}$$

A energia a ser armazenada no banco de baterias é de 17.679,01 Wh. A capacidade de carga do banco de baterias é determinada conforme a Equação 3.

$$CBB(\text{Ah}) = \frac{EA}{V_{\text{banco}}} \quad (3)$$

Onde,

**CBB** = a capacidade de carga do banco de baterias em ampère-hora [Ah];

**EA** = a energia armazenada no banco de baterias [Wh];

**V<sub>banco</sub>** = a tensão do banco de baterias [V].

Conforme mostra a Tabela 2, a tensão da bateria é de 48V e as baterias do banco serão ligadas em paralelo.

Substituindo,

$$CBB(\text{Ah}) = \frac{17.679,01}{48}$$

$$\mathbf{CBB(\text{Ah}) = 368,31}$$

A capacidade de carga do banco de baterias é de 368,31 Ah. Para determinar a quantidade de baterias do sistema será utilizada a Equação 4.

$$NB = \frac{CBB}{C_{\text{bateria}}} \quad (4)$$

Onde,

**NB** = o número de baterias em paralelo;

**CBB** = a capacidade de carga do banco de baterias em ampère-hora [Ah]

**C<sub>bateria</sub>** = a capacidade de carga de cada bateria em ampère-hora [Ah].

Conforme a Tabela 2, a capacidade de carga de cada bateria é de 100 Ah.

Substituindo,

$$NB = \frac{368,31}{100}$$

$$NB = 3,683127572$$

Serão utilizadas quatro (4) baterias em paralelo para o sistema fotovoltaico off-grid. A Figura 34 apresenta a ligação das baterias.



**Fonte:** Elaborada pelos autores, 2023.

#### 3.1.4 Dimensionamento dos módulos fotovoltaicos

O dimensionamento dos módulos fotovoltaicos é baseado na quantidade de energia necessária para alimentar os equipamentos elétricos da instalação e é um processo importante para garantir que o sistema seja capaz de fornecer energia elétrica suficiente para atender às necessidades da carga a qual foi destinado. A quantidade de módulos fotovoltaicos que irá formar o sistema depende diretamente da potência do conjunto de cargas a ser alimentada (NETO, 2017).

Para o correto dimensionamento é necessário considerar a capacidade de geração de energia do painel fotovoltaico. A capacidade é expressa em watts-pico (Wp), que é a quantidade máxima de energia que o painel pode gerar em condições ideais de insolação. Além disso, é importante levar em consideração a eficiência do painel fotovoltaico, o ângulo e a orientação do painel em relação ao sol, e outros fatores que podem afetar a produção de energia do sistema fotovoltaico.

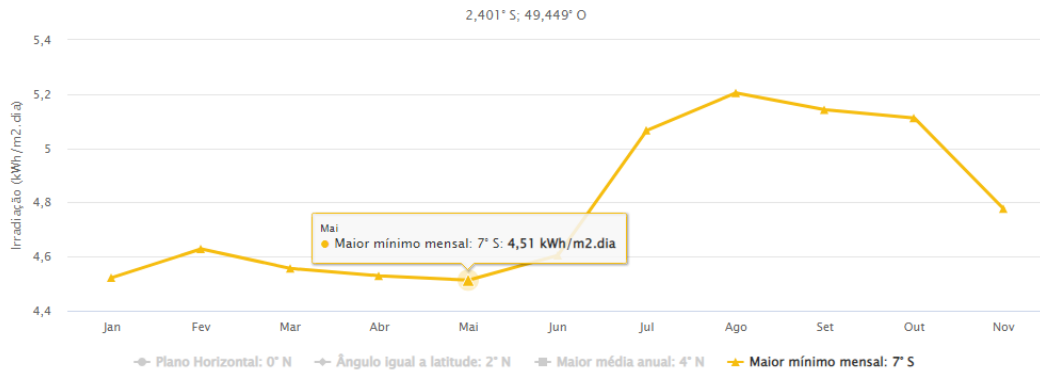
No dimensionamento do sistema fotovoltaico deste projeto foi utilizado o método da insolação para saber a quantidade necessária de módulos para atender a UBS. Neste método, utilizou-se as informações do *SunData* no site do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB), para saber o potencial solar da região onde o sistema será instalado. Para melhor aproveitamento da incidência solar é recomendado que os módulos sejam instalados voltados para o sul, conforme mostra a Figura 35.

**Figura 35** - Insolação da região de instalação do sistema fotovoltaico.

Estação: Cameta  
Município: Cameta, PA - BRASIL  
Latitude: 2,401° S  
Longitude: 49,449° O  
Distância do ponto de ref. ( 2,43469° S; 49,44088° O ) :3,9 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m <sup>2</sup> .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	4,38	4,55	4,57	4,66	4,75	4,92	5,02	5,27	5,28	5,08	4,96	4,60	4,84	,90
✓	Ângulo igual a latitude	2° N	4,33	4,52	4,57	4,68	4,81	5,00	5,09	5,32	5,28	5,06	4,90	4,54	4,84	,99
✓	Maior média anual	4° N	4,28	4,49	4,56	4,71	4,86	5,07	5,16	5,37	5,29	5,03	4,85	4,48	4,84	1,09
✓	Maior mínimo mensal	7° S	4,52	4,63	4,56	4,53	4,51	4,60	4,73	5,07	5,20	5,14	5,11	4,78	4,78	,69

Irradiação Solar no Plano Inclinado –Cameta–Cameta, PA-BRASIL



Fonte: CRESESB, 2023.

Para este dimensionamento foi considerado o maior mínimo mensal, o ângulo que fornece o maior valor médio diário anual de radiação solar e é utilizado quando se deseja ter uma medida conservadora, e onde o fornecimento contínuo de energia elétrica é crítico para a atividade fim por isso procura-se minimizar o risco de falta de energia.

As características do módulo fotovoltaico também são parâmetros importantes, pois ajudarão a definir qual a geração do sistema. O fabricante disponibiliza o *datasheet* com as características mecânicas e elétricas dos módulos nas condições-padrão de teste STC (*Standard Test Conditions*).

- ✓ **Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ):** é o valor da tensão elétrica, em volts (V), medida quando não há cargas conectadas ao módulo;
- ✓ **Corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ):** é a corrente elétrica, em ampères (A), quando os terminais do módulo estão conectados entre si formando um curto-circuito;
- ✓ **Corrente de máxima potência ( $I_{mp}$ ):** é a corrente elétrica máxima produzida pelo módulo em STC;
- ✓ **Tensão de máxima potência ( $V_{mp}$ ):** é tensão máxima que o módulo pode fornecer em STC;
- ✓ **Potência de pico ( $P_{mp}$ ):** é a máxima potência que o módulo pode fornecer em STC;
- ✓ **Eficiência do módulo ( $\eta$ ):** é a eficiência do módulo em converter a energia luminosa em energia elétrica;
- ✓ **Classificação máxima do dispositivo de proteção em série:** é capacidade máxima de corrente do dispositivo de proteção CC.

Serão utilizados neste projeto módulos fotovoltaicos de 565  $W_p$ . De acordo com o *datasheet* fornecido pela fabricante Jinko Solar, os módulos possuem as seguintes características retiradas do Anexo C, conforme a Tabela 3.

**Tabela 3** - Características dos módulos utilizados no projeto

Características dos módulos de 565 $W_p$ (JKM565N-72HL4-V) – Tiger Neo	
<b>Tipo de Célula</b>	Monocristalina do tipo N
<b>Número de células</b>	144 (6 · 24)
<b>Largura (m)</b>	2,278 m
<b>Espessura (m)</b>	0,035 m
<b>Altura(m)</b>	1,134 m
<b>Área(m<sup>2</sup>)</b>	2,5832 m <sup>2</sup>
<b>Peso(k<sub>g</sub>)</b>	28 K <sub>g</sub>
<b>Rendimento –<math>\eta</math> – (%)</b>	21,87%
<b>Tensão máxima de energia (<math>V_{mp}</math>) - STC</b>	41,92 V
<b>Corrente de potência máxima (<math>I_{mp}</math>) - STC</b>	13,48 A
<b>Tensão de circuito aberto (<math>V_{oc}</math>) - STC</b>	50,60 V
<b>Corrente de curto-circuito (<math>I_{sc}</math>) - STC</b>	14,23 A
<b>Classificação máxima do dispositivo de proteção em série</b>	25 A

**Fonte:** Adaptado do datasheet de Tiger Neo N-type 72HL4-(V) 555-575 Watt – Jinko Solar, 2023.

O dimensionamento do arranjo fotovoltaico para sistemas off-grid leva em consideração o tipo de controlador de carga escolhido, no caso deste projeto, o controlador de carga escolhido foi o MPPT. Para um controlador do tipo MPPT é utilizada a Equação 5 para determinar a energia produzida diariamente pelo módulo fotovoltaico.

$$EP = I \cdot A \cdot \eta \quad (5)$$

Onde,

**EP** = a energia produzida diariamente pelo módulo fotovoltaico [Wh];

**I** = a irradiação solar no mês mais crítico  $[kWh/m^2 \cdot dia]$ ;

**A** = a área do módulo  $[m^2]$ ;

**$\eta$**  = o rendimento do módulo.

Considerando a irradiação no maior mínimo mensal para o município de Cametá, a irradiação correspondente ao mês de maio que apresenta o valor de  $4,51 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$ , conforme apresentado Figura 35.

Substituindo,

$$EP = 4,51 \cdot 2,5832 \cdot 0,2187$$

$$EP = \mathbf{2,5479 \text{ Wh/dia}}$$

Considerando que os módulos serão instalados em um local com condições e variáveis diferentes daquelas obtidas em laboratório, ou seja, em um cenário real é adotado um fator de perda de 20% na geração dos módulos. A energia real produzida diariamente pelo módulo fotovoltaico é calculada pela Equação 6.

$$EP_{\text{Real}} = EP \cdot 0,8 \quad (6)$$

Substituindo,

$$EP_{\text{Real}} = 2,5479 \cdot 0,8$$

$$EP_{\text{Real}} = \mathbf{2,0383 \text{ kWh/dia}} \text{ ou } \mathbf{2.038,3 \text{ Wh/dia}}$$

Após a determinação da energia produzida diariamente pelo módulo fotovoltaico, será necessário definir a quantidade total de módulos a serem utilizados no sistema, portanto, utilizaremos a Equação 7.

$$Q_{MF} = \frac{EC}{EP} \quad (7)$$

Onde,

**QMF** = a quantidade total de módulos fotovoltaicos;

**EC** = a energia consumida diariamente [Wh/dia];

**EP** = a energia produzida diariamente pelo módulo fotovoltaico [Wh/dia].

Substituindo,

$$Q_{MF} = \frac{6802}{2038,32}$$

$$Q_{MF} = \mathbf{3,337054378}$$

$$Q_{MF} = \mathbf{4}$$

Para definir o tipo de ligação dos módulos (série ou paralelo) deve-se respeitar as características do controlador de carga e do inversor utilizado no projeto. Na ligação em série a corrente do arranjo fotovoltaico é a corrente do módulo e a tensão é a soma da tensão de cada módulo. Já na ligação em paralelo a tensão do arranjo é a tensão do módulo e a corrente é a soma da corrente de cada módulo.

Os módulos serão ligados em série para obedecer aos critérios a seguir. No primeiro critério a tensão do arranjo deve estar limitada a tensão da faixa de operação do inversor (120 ~ 250 Vcc). A tensão do módulo fotovoltaico é de 41,92 V e com a associação em série dos quatro módulos a tensão do arranjo será de 167,68 V<sub>CC</sub> e corrente de 13,48 A. Em razão da corrente fornecida pelo arranjo fotovoltaico o carregamento das baterias será em cerca de 7,5h, pois (100/13,48 = 7,41).

No segundo critério a tensão do arranjo fotovoltaico deve ser, no mínimo, 50% maior que a tensão do banco de baterias (48 V), como apresentado na Equação 8.

$$T_A = V_B \cdot 1,5 \quad (8)$$

Onde,

$T_A$  = a tensão do arranjo fotovoltaico [V];

$V_B$  = a tensão do banco de baterias [V].

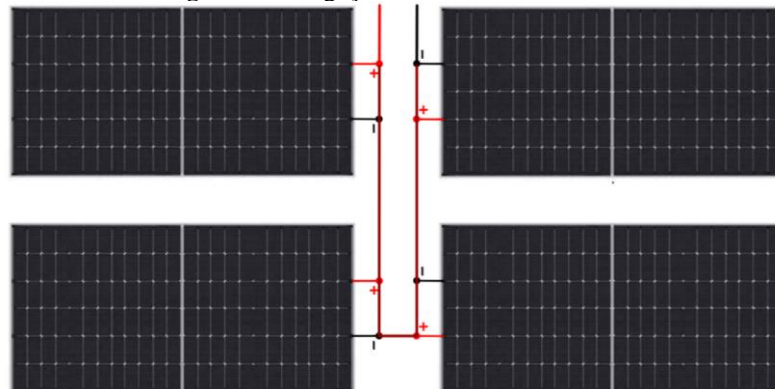
Substituindo,

$$T_A = 48 \cdot 1,5$$

$$T_A = 72 \text{ V}_{CC}$$

No terceiro critério a corrente do arranjo fotovoltaico deve estar limitada a corrente de 80 A (corrente de carga solar máxima) que o controlador suporta. A Figura 36 apresenta a ligação em série dos módulos fotovoltaicos.

**Figura 36** – Ligação dos módulos em série.



Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

### 3.1.5 Dimensionamento do controlador de carga

Neste projeto, será utilizado o inversor off-grid SPF 3000TL LVM-ES que já possui controlador do tipo MPPT integrado. O tipo de ligação dos módulos foi definido observando as características do controlador de carga apresentadas na Tabela 4, retiradas do Anexo B.

**Tabela 4** - Características do controlador de carga utilizado no projeto.

<b>Características do Controlador de carga – Inversor SPF 3000TL LVM-ES</b>	
<b>Carga Solar</b>	
<b>Potência máxima da matriz FV</b>	4000W
<b>Faixa MPPT (Tensão Operacional)</b>	120 ~ 250 Vcc
<b>Número de MPPT independentes/String por MPPT</b>	1/1
<b>Tensão máxima de circuito aberto do arranjo fotovoltaico</b>	250 V
<b>Corrente de carga solar máxima</b>	80 A

Fonte: Adaptado do datasheet de SPF 3000TL LVM-ES – Growatt, 2023.

### 3.1.6 Dimensionamento do Inversor

Com base no dimensionamento dos itens anteriores e nas especificações do projeto foi adotado o inversor off-grid interativo SPF 3000TL LVM-ES, um inversor solar multifuncional independente, integrado com um controlador de carga solar MPPT. A Tabela 5 apresenta as principais características do inversor, retiradas do Anexo B.

**Tabela 5** - Características do inversor utilizado no projeto

<b>Inversor off-grid interativo SPF 3000TL LVM-ES</b>	
<b>Especificações do Inversor</b>	
<b>SPF</b>	Indica que o inversor é off-grid
<b>3000</b>	Potência nominal do inversor em kW
<b>TL</b>	<i>Transformerless</i> – indica que o inversor não possui transformador integrado
<b>LV</b>	<i>Low Voltage</i> – indica que o inversor trabalha com baixa voltagem (127 V)
<b>M</b>	Indica que o inversor possui controlador de carga do tipo MPPT
<b>ES</b>	Indica que o inversor pode operar sem banco de baterias
<b>Tensão da bateria</b>	48 V

<b>Tipo de bateria</b>	Lítio/Chumbo Ácido
<b>Saída do Inversor</b>	
<b>Potência nominal</b>	3000VA/3000W
<b>Eficiência de pico (%)</b>	90%
<b>Carga CA</b>	
<b>Corrente de carga</b>	40 A
<b>Tensão de entrada CA</b>	120 V
<b>Faixa de frequência</b>	50Hz/60Hz

Fonte: Adaptado do datasheet de SPF 3000TL LVM-ES – Growatt, 2023.

### 3.2 Dimensionamento dos condutores elétricos

O dimensionamento dos condutores elétricos, cabo de cobre, é realizado conforme as definições e parâmetros da NBR 5410. Três critérios são apresentados pela norma:

- ✓ Seção mínima;
- ✓ Condução de corrente;
- ✓ Queda de tensão.

#### 3.2.1 Seção mínima

Segundo a NBR 5410 a seção mínima do condutor é:  $1,5 \text{ mm}^2$  para circuito de iluminação;  $2,5 \text{ mm}^2$  para circuito de força.

#### 3.2.2 Condução de corrente

Para o critério de condução de corrente é necessário calcular a corrente elétrica corrigida através da Equação 9.

$$I_c = \frac{I_{\text{sistema}}}{I_{ta} \cdot I_{ac}} \quad (9)$$

Onde,

$I_c$  = corrente elétrica corrigida [A];

$I_{\text{sistema}}$  = corrente elétrica do sistema [A];

$I_{ta}$  = fator de temperatura ambiente;

$I_{ac}$  = fator de agrupamento do circuito.

### 3.2.3 Queda de tensão

Nesse critério é calculada a queda de tensão do trecho através da Equação 10.

$$\Delta V\% = \frac{2 \cdot I_c \cdot l \cdot R_c}{V} \cdot 100 \quad (10)$$

Onde,

$\Delta V\%$  = queda de tensão (%)

$I_c$  = corrente elétrica corrigida (A)

$l$  = comprimento do condutor (m)

$R_c$  = resistência elétrica do condutor ( $\Omega/m$ )

$V$  = tensão operacional (V)

### 3.2.4 Dimensionamento dos trechos

#### 3.2.4.1 Arranjo fotovoltaico – Inversor

##### 3.2.4.1.1 Seção mínima

Por se tratar de circuito de força a seção do condutor deve ser  $2,5 \text{ mm}^2$ .

##### 3.2.4.1.2 Condução de corrente

A corrente  $I_{\text{sistema}}$  é a corrente de curto-circuito  $I_{sc}$  da associação série dos módulos fotovoltaicos. O fator de temperatura ambiente é obtido na Tabela 40 da NBR 5410, para uma temperatura ambiente de  $45^\circ \text{ C}$  e isolamento XLPE. O fator de agrupamento do circuito é obtido na Tabela 42 da NBR 5410, com um circuito agrupado em feixe.

Substituindo,

$$I_c = \frac{I_{\text{sistema}}}{I_{ta} \cdot I_{ac}}$$

$$I_c = \frac{14,23}{0,87 \cdot 1}$$

$$I_c = \mathbf{16,36 \text{ A}}$$

Com o valor de  $I_c$  calculado, método de referência B1 e número de circuitos carregados igual a 2 é determinada a seção do condutor na Tabela 37,  $1 \text{ mm}^2$ .

##### 3.2.4.1.3 Queda de tensão

A distância  $l$  é a medida em metros do arranjo fotovoltaico ao inversor. A tensão  $V_{cc}$  é a tensão mínima operacional do inversor. A resistência elétrica  $R_c$  é a resistência de um cabo solar de  $4 \text{ mm}^2$  ( $4 \text{ mm}^2$  é a menor bitola usual do mercado fotovoltaico).

Substituindo,

$$\Delta V\% = \frac{2 \cdot I_c \cdot l \cdot R_c}{V_{cc}} \cdot 100$$

$$\Delta V\% = \frac{2 \cdot 16,36 \cdot 15 \cdot 0,00509}{120} \cdot 100$$

$$\Delta V\% = 2,08$$

Segundo este critério é permitido até 5% de queda de tensão.

Analisando os valores obtidos com os três critérios, o condutor utilizado será de  $4 \text{ mm}^2$ .

#### 3.2.4.2 Banco de baterias - Inversor

A seção do condutor de conexão da bateria é determinada pelo fabricante. O manual da bateria, modelo A48100, estabelece bitola de  $25 \text{ mm}^2$ .

#### 3.2.4.3 Inversor – Carga

##### 3.2.4.3.1 Seção mínima

Por se tratar de circuito de força a seção do condutor deve ser  $2,5 \text{ mm}^2$ .

##### 3.2.4.3.2 Condução de corrente

A corrente  $I_{sistema}$  é a corrente total da carga. De acordo com a Tabela 1, a potência total das cargas prioritárias é 1.465 W e a tensão de alimentação 127 V. A corrente nominal total é calculada conforme a Equação 11.

$$I = \frac{P}{V} \quad (11)$$

Onde,

$I$  = corrente nominal [A];

$P$  = potência total das cargas prioritárias [W];

$V$  = tensão de alimentação em rede monofásica [V].

Substituindo,

$$I = \frac{1.465}{127}$$

$$I = 11,54 \text{ A}$$

O fator de temperatura ambiente é obtido na Tabela 40, para uma temperatura ambiente de 45° C e isolamento PVC. O fator de agrupamento do circuito é obtido na Tabela 42, com um circuito agrupado em feixe.

Substituindo,

$$I_c = \frac{I_{\text{sistema}}}{I_{ta} \cdot I_{ac}}$$

$$I_c = \frac{11,54}{0,79 \cdot 1}$$

$$I_c = \mathbf{14,61 A}$$

Com o valor de  $I_c$  calculado, método de referência B1 e o número de circuitos carregados igual a 2 é determinada a seção do condutor na Tabela 36, 1,5 mm<sup>2</sup>.

#### 3.2.4.3.3 Queda de tensão

A distância  $l$  é a medida em metros do inversor ao barramento de alimentação da carga. A tensão  $V_{ca}$  é a tensão operacional em corrente alternada. A resistência elétrica  $R_c$  é a resistência de um condutor PVC de 2,5 mm<sup>2</sup> (2,5 mm<sup>2</sup> é a menor bitola para circuito de força). Substituindo,

$$\Delta V\% = \frac{2 \cdot I_c \cdot l \cdot R_c}{V_{ca}} \cdot 100$$

$$\Delta V\% = \frac{2 \cdot 14,61 \cdot 10 \cdot 0,00741}{120} \cdot 100$$

$$\Delta V\% = \mathbf{1,70}$$

Segundo esse critério é permitido até 5% de queda de tensão.

Com a análise dos valores obtidos com os critérios e considerando as particularidades da instalação, o condutor utilizado será de 4 mm<sup>2</sup>.

### 3.3 Dimensionamento dos dispositivos de proteção

Todo sistema elétrico precisa ser instalado com dispositivos de proteção, seja contra sobrecargas, curto-circuito ou outros surtos elétricos. Por isso, é fundamental dimensionar dispositivos de proteção e, assim garantir segurança e integridade do sistema de backup.

### 3.3.1 Proteção contra sobrecorrente

#### 3.3.1.1 Arranjo fotovoltaico

O dispositivo de proteção contra sobrecorrente protege as strings do arranjo fotovoltaico. O projeto dispõe de uma string com quatro módulos ligados em série. As especificações do módulo são apresentadas na Tabela 6.

**Tabela 6** – Especificações do módulo

Especificações do Módulo	
Tensão de circuito aberto	$V_{oc} = 50,60 V$
Corrente de curto-circuito	$I_{sc} = 14,23 A$
Corrente máxima de classificação do dispositivo em série	$I_{MÁX} = 25 A$

**Fonte:** Adaptado do datasheet de Tiger Neo N-type 72HL4-(V) 555-575 Watt – Jinko Solar, 2023.

O dispositivo de proteção deve atender simultaneamente as condições apresentadas nas Equações 11 e 12.

$$1,5 \cdot I_{sc} < I_n < 2,4 \cdot I_{sc} \quad (12)$$

$$I_n \leq I_{MÁX} \quad (13)$$

Onde,

$I_n$  = corrente nominal do dispositivo [A];

$I_{sc}$  = corrente de curto-circuito do módulo [A];

$I_{MÁX}$  = corrente máxima de classificação do dispositivo em série com o módulo [A].

Substituindo,

$$\begin{aligned} 1,5 \cdot I_{sc} < I_n < 2,4 \cdot I_{sc} \\ 1,5 \cdot 14,23 < I_n < 2,4 \cdot 14,23 \\ \mathbf{21,35 A < I_n < 34,15 A} \end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned} I_n &\leq I_{MÁX} \\ \mathbf{I_n &\leq 25 A} \end{aligned}$$

A tensão do dispositivo de proteção precisa ser maior que a tensão da string, cada módulo possuiu tensão  $V_{oc} = 50,60 V$ , assim, a tensão da string é de 202,4 V.

É mais comum no país a instalação de fusíveis em circuitos CC, mas há a possibilidade de utilizar disjuntores. Assim, o fusível utilizado será de 25 A, tipo gPV próprio para sistemas fotovoltaicos com proteção em sobrecargas e curto-circuito, tensão de 1000 Vcc.

### 3.3.1.2 Bateria

A bateria possui proteção contra sobrecorrente durante o carregamento e a descarga.

Quando a corrente de carga é maior que 90 A, o modo de proteção limitadora de corrente é ativado, a corrente é limitada a 1 A e a proteção é habilitada após o atraso nominal de 10 segundos. A proteção permanece habilitada até que a corrente fique abaixo de 90 A.

Quando a corrente de descarga é maior que 100A, a campainha da bateria é alarmada e o sistema para de descarregar após 15 segundos. A proteção é atuada e a descarga será retomada após 60 segundos, se a corrente estiver em condições normais de operação.

### 3.3.2 Proteção contra surtos

O surto elétrico ocorre de uma onda transitória de tensão, ou seja, uma corrente ou potência que traz uma taxa de variação elevada em um curto período. Um surto elétrico, normalmente, surge de descargas atmosféricas (raios), de manobras de rede ou, da alternância entre liga e desliga de equipamentos.

O Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS) é o equipamento que detecta sobretensões transitórias na rede elétrica. Para proteger a rede elétrica e os equipamentos, o dispositivo atua com um desvio da descarga para o sistema de aterramento.

O DPS que protege o inversor tanto do lado CA como do lado CC não pode estar a mais de 10 metros do inversor, pois durante uma descarga atmosférica poderá surgir corrente induzida no circuito entre a proteção e o equipamento.

O dispositivo de proteção contra surtos deve possuir autoproteção ao final de sua vida útil que garanta a desconexão em qualquer condição de operação do arranjo fotovoltaico.

As grandezas elétricas de operação e proteção do DPS são:

**Classe** = são classificados em tipos I, II e III em função da zona de proteção contra raios;

$U_c$  = tensão máxima aplicada aos terminais do DPS sem comprometer seu funcionamento;

$U_p$  = valor da limitação de tensão dos terminais do DPS;

$I_n$  = valor de um impulso de corrente com forma de onda 8/20  $\mu$ s;

$I_{MÁX}$  = valor máximo de um impulso de corrente com forma de onda 8/20  $\mu$ s que o dispositivo pode funcionar com segurança.

O dimensionamento do DPS para sistema fotovoltaico segue os critérios da NBR 5410. A seção 5.4.2 da norma, determina uso de dispositivo de proteção de sobretensão transitória quando a instalação for alimentada por linha total ou parcialmente aérea e se situar em região sob condições de influências externas AQ2 (mais de 25 dias de trovoadas por ano).

A linha de alimentação da UBS é aérea e, de acordo com o anexo B.2 da NBR 5419 o município de Cametá registra 100 dias de trovoadas por ano.

### 3.3.2.1 Arranjo fotovoltaico – Inversor

O trecho em corrente contínua deve possuir DPS que proteja os dois polos do sistema. Para dimensionar o DPS é necessário determinar.

#### ✓ **Classe:**

O DPS de classe II (com onda 8/20 $\mu$ s) é adequado à proteção contra os efeitos das descargas indiretas. É utilizado para proteção de descargas atmosféricas indiretas, ou ainda na prevenção contra sobretensões de manobra.

#### ✓ **U<sub>c</sub>:**

A tensão de operação contínua deve ser igual ou superior aos valores indicados na tabela 49 da NBR 5410. Para o esquema de aterramento TN-S com DPS conectado entre fase-terra, conforme a Equação 13.

$$U_c = 1,1 \cdot U_0 \quad (14)$$

Onde,

$U_0$  = tensão fase–neutro

A string possuiu quatros módulos ligados me série, cada módulo possuiu tensão  $V_{oc} = 50,60 V$ , assim, a tensão da string é 202,4 V.

Substituindo,

$$U_c = 1,1 \cdot 202,4$$

$$U_c = \mathbf{222,64 V}$$

Assim, a tensão  $U_c$  do DPS deve ser maior ou igual a 222,64 V.

#### ✓ **U<sub>p</sub>:**

O nível de proteção do DPS deve ser compatível com a categoria II de suportabilidade a impulsos indicada na tabela 31 da NBR 5410, a tensão de impulso suportável deve ser menor que 1,5 kV.

#### ✓ **I<sub>n</sub>:**

A NBR 5410 determina que para DPS destinado à proteção contra sobretensões de origem atmosférica transmitidas pela linha externa de alimentação e contra sobretensões de manobra, a corrente nominal de descarga  $I_n$  não deve ser inferior a 5 kA.

Os fabricantes de DPS atribuem parâmetros mais criteriosos para determinar  $I_n$ . A Siemens, por exemplo, considera o nível cerâmico da região. O nível cerâmico corresponde ao número de dias de trovoadas registrado em um ano. A Equação 14 calcula o nível de exposição a sobretensões.

$$F = Td \cdot (1,6 + 2LBT + \delta) \quad (15)$$

Onde,

**F** = nível de exposição a sobretensões de origem transitórias;

**Td** = nível cerâmico local;

**LBT** = comprimento da linha aérea que alimenta a instalação. Valores  $\geq 0,5$  km,  $LBT = 0,5$ ;

**$\delta$**  = coeficiente que indica a situação da linha aérea e da edificação.

De acordo com o Anexo D o nível cerâmico  $Td = 100$  e o coeficiente  $\delta = 0,75$ . O comprimento da linha é maior que 0,5 km,  $LBT = 0,5$ .

Substituindo,

$$F = 100 \cdot (1,6 + 2 \cdot 0,5 + 0,75)$$

$$\mathbf{F = 335}$$

Para o nível de exposição em que  $F > 80$  a corrente nominal de descarga  $I_n = 20 \text{ kA}$ .

✓  **$I_{MÁX}$** :

A instalação está localizada na zona rural e sob influência de elevado número de trovoadas por ano. Neste cenário é recomendável utilizar DPS igual ou superior a 60 kA.

### 3.3.2.2 Inversor – Carga

Para dimensionar o DPS é necessário determinar:

✓ **Classe**:

O DPS de classe II (com onda 8/20 $\mu$ s) é adequado à proteção contra os efeitos das descargas indiretas. É utilizado para proteção de descargas atmosféricas indiretas, ou ainda na prevenção contra sobretensões de manobra.

✓  $U_c$ :

A tensão de operação contínua deve ser igual ou superior aos valores indicados na tabela 49 da NBR 5410. Para o esquema de aterramento TN-S com DPS conectado entre fase-terra, segue a Equação 13,  $U_c = 1,1 \cdot U_0$ .

Substituindo,

$$U_c = 1,1 \cdot 127$$

$$U_c = 139,7 \text{ V}$$

Os valores de tensão  $U_c$  usuais no mercado são 175, 275 e 460 V. Assim, o DPS de 175 V é a melhor indicação.

✓  $U_p$ :

O nível de proteção do DPS deve ser compatível com a categoria II de suportabilidade a impulsos indicada na tabela 31 da NBR 5410, a tensão de impulso suportável em rede 127 V deve ser menor que 1,5 kV.

✓  $I_n$ :

A NBR 5410 determina que para DPS destinado à proteção contra sobretensões de origem atmosférica transmitidas pela linha externa de alimentação e contra sobretensões de manobra, a corrente nominal de descarga  $I_n$  não deve ser inferior a 5 kA.

Os fabricantes de DPS atribuem parâmetros mais criteriosos para determinar  $I_n$ . A Siemens, por exemplo, considera o nível cerâmico da região. O nível cerâmico corresponde ao número de dias de trovoadas registrado em um ano. A Equação 14,  $F = Td \cdot (1,6 + 2LBT + \delta)$  calcula o nível de exposição a sobretensões.

Substituindo,

$$F = 100 \cdot (1,6 + 2 \cdot 0,5 + 0,75)$$

$$F = 335$$

Para o nível de exposição em que  $F > 80$  a corrente nominal de descarga  $I_n = 20 \text{ kA}$ .

✓  $I_{MÁX}$ :

A instalação está localizada na zona rural e sob influência de elevado número de trovoadas por ano. Neste cenário é recomendável utilizar DPS igual ou superior a 60 kA.

## 3.3.2.3 Entrada

Para dimensionar o DPS é necessário determinar:

✓ **Classe:**

O DPS de classe II (com onda 8/20 $\mu$ s) é adequado à proteção contra os efeitos das descargas indiretas. É utilizado para proteção de descargas atmosféricas indiretas, ou ainda na prevenção contra sobretensões de manobra.

✓  **$U_c$ :**

A tensão de operação contínua deve ser igual ou superior aos valores indicados na tabela 49 da NBR 5410. Para o esquema de aterramento TN-S com DPS conectado entre fase-terra, segue a Equação 13,  $U_c = 1,1 \cdot U_0$ .

Substituindo,

$$U_c = 1,1 \cdot 127$$

$$U_c \mathbf{139,7 V}$$

Os valores de tensão  $U_c$  usuais no mercado são 175, 275 e 460 V. Assim, o DPS de 175 V é a melhor indicação.

✓  **$U_p$ :**

O nível de proteção do DPS deve ser compatível com a categoria III de suportabilidade a impulsos indicada na tabela 31 da NBR 5410, a tensão de impulso suportável em rede fase-terra 127 V deve ser menor que 2,5 kV.

✓  **$I_n$ :**

A NBR 5410 determina que para DPS destinado à proteção contra sobretensões de origem atmosférica transmitidas pela linha externa de alimentação e contra sobretensões de manobra, a corrente nominal de descarga  $I_n$  não deve ser inferior a 5 kA.

Os fabricantes de DPS atribuem parâmetros mais criteriosos para determinar  $I_n$ . A Siemens, por exemplo, considera o nível cerâmico da região. O nível cerâmico corresponde ao número de dias de trovoadas registrado em um ano. A Equação 14,  $F = Td \cdot (1,6 + 2LBT + \delta)$  calcula o nível de exposição a sobretensões.

Substituindo,

$$F = 100 \cdot (1,6 + 2 \cdot 0,5 + 0,75)$$

$$\mathbf{F = 335}$$

Para o nível de exposição em que  $F > 80$  a corrente nominal de descarga  $I_n = 20 \text{ kA}$ .

✓  $I_{MÁX}$ :

A instalação está localizada na zona rural e sob influência de elevado número de trovadas por ano. Neste cenário é recomendável utilizar DPS igual ou superior a 60 kA.

### 3.3.3 Chave seccionadora

Os dispositivos de manobra devem apresentar corrente nominal igual ou superior a do respectivo dispositivo de proteção contra sobrecorrente da string box CC, tensão maior que a tensão do arranjo fotovoltaico e número de polos compatível com o sistema. Assim, a chave seccionadora utilizada será bipolar, com corrente suportada de 25 A e tensão de 500 V.

### 3.3.4 Disjuntor CA

Para dimensionar o disjuntor entre o inversor e a carga são utilizados os valores de saída do inversor, conforme a Equação 11. A potência do inversor é 3.000 W e a tensão 127 V.

$$I = \frac{P}{V}$$

Substituindo,

$$I = \frac{3.000}{127}$$

$$I = \mathbf{23,62\ A}$$

A corrente do disjuntor CA deve ser superior a corrente máxima de saída do inversor. Logo, será utilizado um disjuntor monopolar de 25 A.

### 3.3.5 Disjuntor CC

Para proteção entre o banco de baterias e o controlador de carga é necessário dimensionar um disjuntor CC, conforme a Equação 11. A potência do inversor é 3000 W e a tensão do banco de baterias é 48 V.

Substituindo,

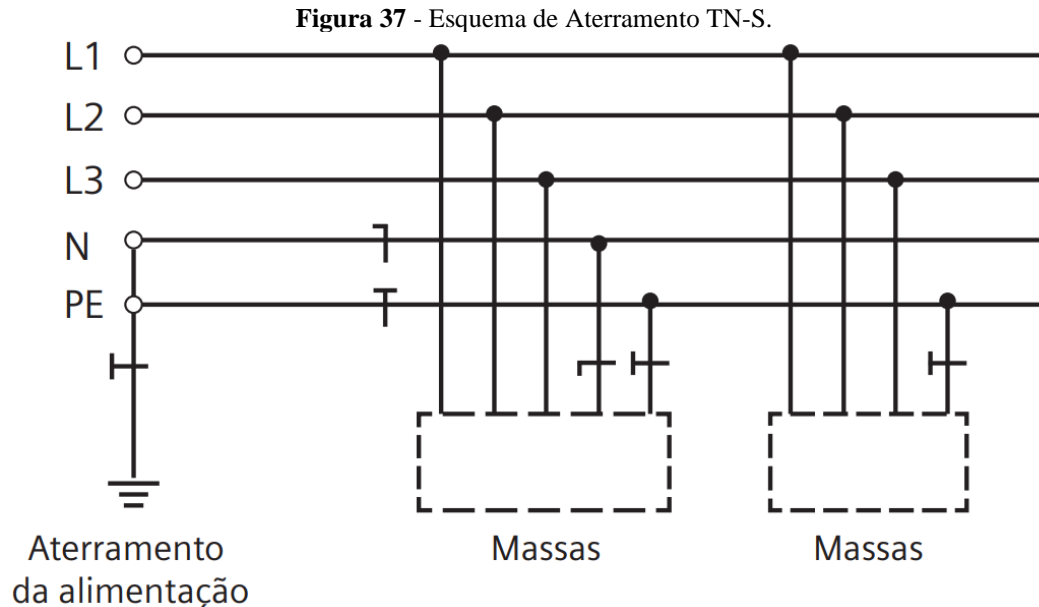
$$I = \frac{3.000}{48}$$

$$I = \mathbf{62,5\ A}$$

Logo, será utilizado um disjuntor CC bipolar de 63 A.

### 3.4 Esquema de Aterramento

O aterramento tem como função proteger os equipamentos elétricos, usuários e também garantir o bom funcionamento do circuito. Neste projeto, será empregado o esquema de aterramento TN-S, conforme a Figura 37.



Fonte: Siemens, 2021.

Essa configuração de aterramento possui um ponto da alimentação (neutro) diretamente aterrado, sendo as massas ligadas a esse ponto através de condutores de proteção. No esquema TN-S o condutor neutro e o condutor de proteção são distintos.

#### 3.4.1 Condutor de proteção (PE)

Para determinar a seção do condutor de proteção será utilizada a tabela 58 da NBR 5410. A seção mínima do condutor de proteção será igual a seção do condutor de fase S quando  $S \leq 16 \text{ mm}^2$ ; os condutores fase determinados na seção 3.2 possuem seção menor que  $16 \text{ mm}^2$ . Logo, a seção dos condutores de proteção será a mesma seção dos condutores fase.

#### 3.4.2 Condutor de equipotencialização

De acordo com as recomendações do item 6.4.4 da NBR 16690 o condutor utilizado para aterrar partes metálicas expostas do sistema fotovoltaico deve ter uma seção mínima de  $6 \text{ mm}^2$ . Assim, a seção do condutor de equipotencialização do inversor, módulos fotovoltaicos, estrutura de fixação dos módulos e bateria será de  $6 \text{ mm}^2$ .

### 3.4.3 Condutor de aterramento

A seção do condutor de aterramento é determinada de acordo com as recomendações das Tabelas 52 e 58 da NBR 5410.

A Tabela 58 determina que a seção mínima do condutor de aterramento será igual a seção do condutor de fase S quando  $S \leq 16 \text{ mm}^2$ ; a seção dos condutores do ramal de entrada (fase e neutro) é  $10 \text{ mm}^2$ . A Tabela 52 determina seção mínima de  $2,5 \text{ mm}^2$  para condutor de aterramento enterrado no solo, protegido contra corrosão e contra danos mecânicos. Logo, a seção do condutor de aterramento será  $10 \text{ mm}^2$ .

### 3.4.4 Eletrodo de aterramento

O material e a dimensão do eletrodo de aterramento devem ser selecionados de modo a resistir à corrosão e apresentar resistência mecânica adequada. Segundo a Tabela 51 da NBR 5410, para haste de aço com seção circular e com superfície revestida de cobre por eletrodeposição, as dimensões mínimas são de 15 mm de diâmetro e 2000  $\mu\text{m}$  de espessura média do revestimento.

A fim de garantir baixa resistência ôhmica, a distância mínima entre as hastes deve ser o comprimento da haste. Considerando as particularidades do sistema, serão utilizadas três hastes de 2,4 m de comprimento com distância entre si de 3 metros.

### 3.4.5 Barramento de equipotencialização principal (BEP)

O BEP é o barramento destinado a servir de via de interligação de todos os elementos inclusos na equipotencialização principal. A equipotencialização é o conjunto de medidas utilizadas na proteção contra descargas atmosféricas com o objetivo de reduzir as tensões causadas por elas, não a zero, mas a níveis que possam ser suportados para as instalações e seus equipamentos. Os elementos envolvidos na equipotencialização serão o barramento PE, os módulos fotovoltaicos, a estrutura de fixação dos módulos, as baterias e o inversor. O BEP será uma barra de cobre de 10 cm de comprimento padrão para esse tipo de aplicação.

## 3.5 Circuito de comando para transferência automática

Com a transferência automática, as cargas prioritárias são alimentadas pela rede ou pelo backup de energia, dependendo do modo de operação em que se encontra o sistema. Quando a rede convencional falha, o comando faz a transferência para o backup e somente as cargas prioritárias são alimentadas. Quando a rede (fonte principal) é reestabelecida, o comando faz a transferência para a rede e todas as cargas da instalação são alimentadas pela rede elétrica.

O circuito de comando é dividido em circuito de potência e circuito de controle. A seguir são descritas as etapas do projeto do circuito de comando para transferência automática.

O relé falta de fase é ligado na fase da rede e do inversor, a função desse relé é monitorar a presença ou não de energia elétrica. Os contatores fazem a manobra da rede e do inversor, para maior segurança dessa operação é necessário intertravamento elétrico e mecânico. A saída dos contatores (conectada em jumper) é ligada à carga prioritária (1F + N).

O intertravamento é utilizado para evitar acionamento simultâneo das fontes de alimentação (curto-circuito). O intertravamento elétrico é realizado na lógica do comando, ao adicionar o contato normalmente fechado do inversor em série com o contato normalmente aberto da rede e o contato normalmente fechado da rede em série com o contato normalmente aberto do inversor. O intertravamento mecânico é realizado na estrutura física, uma peça é acoplada entre os dois contatores.

São utilizados temporizadores com retardo na energização para evitar acionamentos desnecessários e garantir que seja entregue energia estável para a carga. No modo automático, o temporizador (T2) entrega rede para a carga após 20s e o temporizador (T1) entrega inversor para a carga após 20s. No modo manual, o temporizador (T2) entrega rede para a carga após 20s e o temporizador (T3) entrega inversor para a carga após 20s.

Para proteção do circuito são adicionados dispositivos de proteção (fusível e disjuntor). E para identificação da operação (rede ou inversor) são adicionados sinaleiros de sinalização. O sistema deve dispor de uma botoeira de emergência para desabilitar o sistema quando necessário.

O acionamento prioritário é o automático, mas é crucial prever a possibilidade de acionamento manual. São utilizadas duas chaves comutadoras, com blocos adicionais para não ocorrer acionamento involuntário.

Para determinar as características da chave comutadora é necessário saber os valores de corrente e tensão das cargas prioritárias. A tensão é 127 V e a corrente foi determinada pela Equação 11 na seção 3.2.4.3.2,  $I = 11,54$  A. Assim, a chave comutadora empregada será de 3 polos (rede, off, inversor) com tensão de trabalho 127 V e corrente de proteção de 16 A.

Serão utilizados dois contatores: a tensão de trabalho será 127 V; a corrente de trabalho precisa ser maior que o valor de  $I = 11,54$  A determinado na seção 3.2.4.3. Assim, a tensão dos contatores será 127 V e a corrente 15 A.

Os dispositivos de proteção, fusível e disjuntor, são utilizados para proteger o circuito, a corrente de trabalho deve ser maior que a corrente do circuito das cargas prioritárias. Assim, a corrente dos dispositivos de proteção será 16 A.

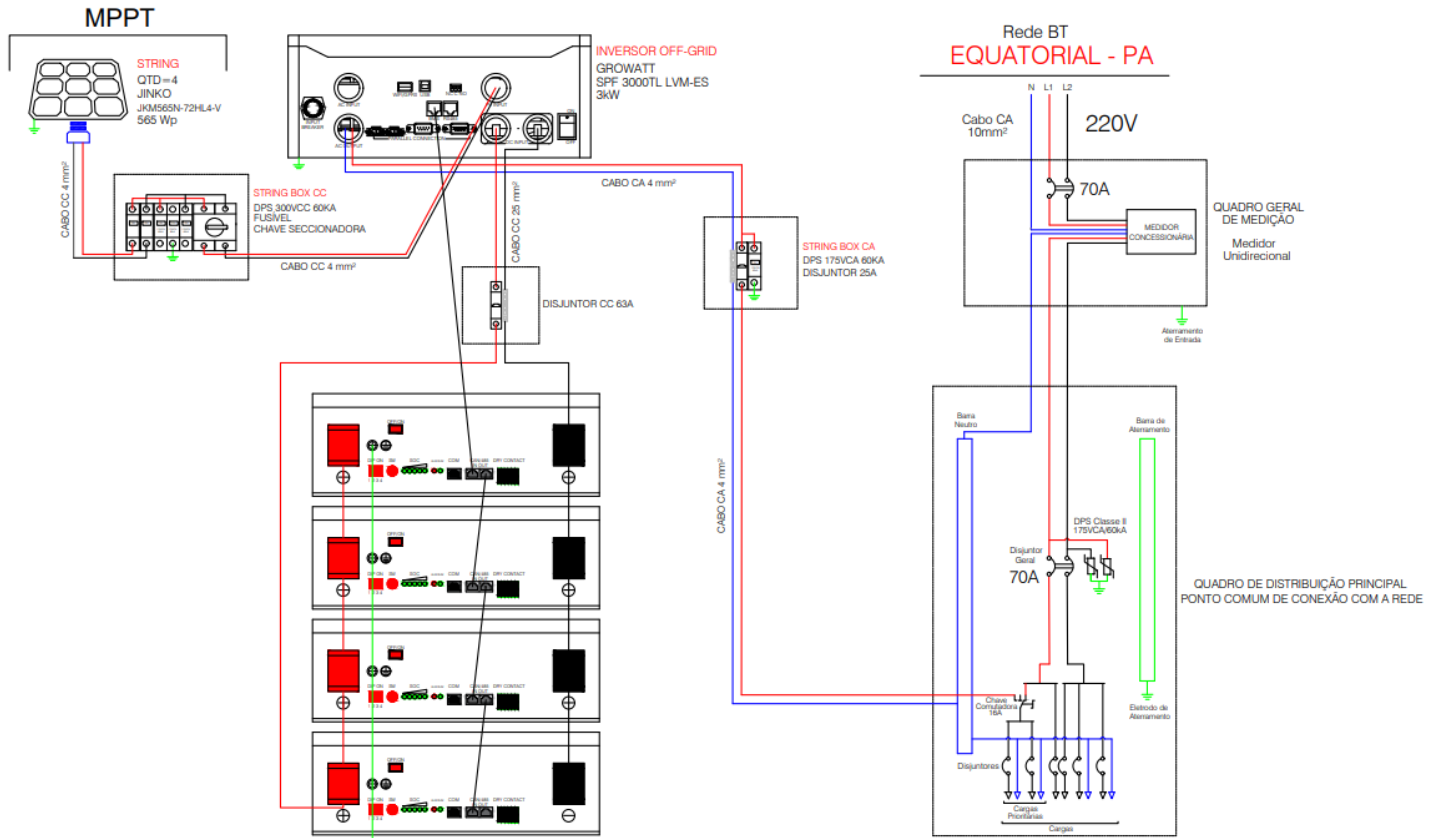
O sistema projetado realiza a transferência automática para o sistema de backup quando houver falha da rede elétrica convencional, evitando que as cargas prioritárias para o funcionamento da UBS deixem de ser alimentadas. Nesse tipo de sistema é necessário fazer a seleção das cargas prioritárias e utilizar uma chave comutadora para realizar a transferência da alimentação. No software *CadeSimu* foi realizada a simulação do circuito de comando. O circuito é apresentado na seção 4.2.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Sistema de backup

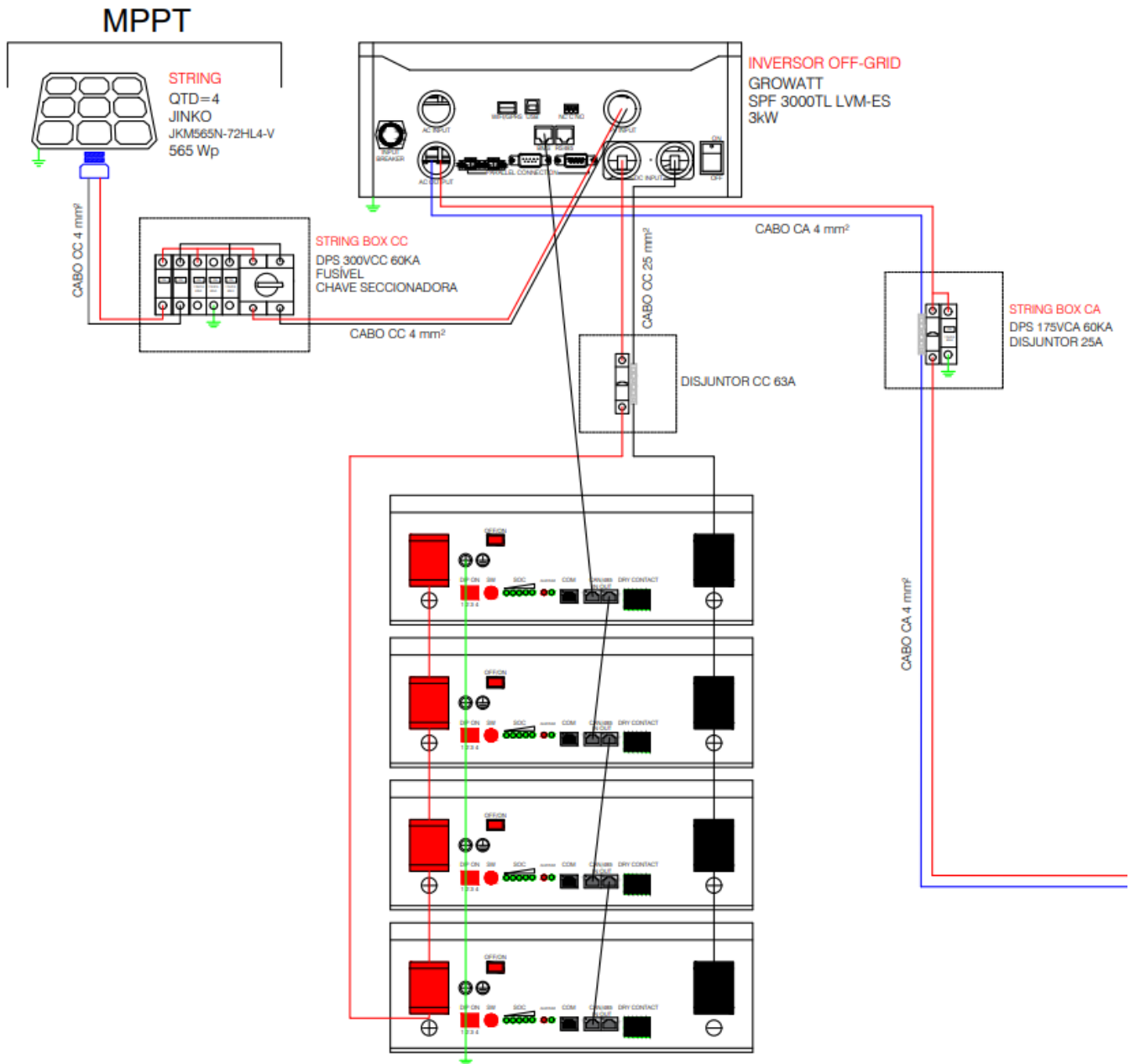
A partir da metodologia apresentada no capítulo 3 foi realizado o dimensionamento do sistema de backup a partir da geração fotovoltaica para a unidade básica de saúde São Benedito. As Figuras 38, 39 e 40 apresentam o diagrama multifilar do projeto.

**Figura 38** - Diagrama multifilar do sistema de backup.



Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

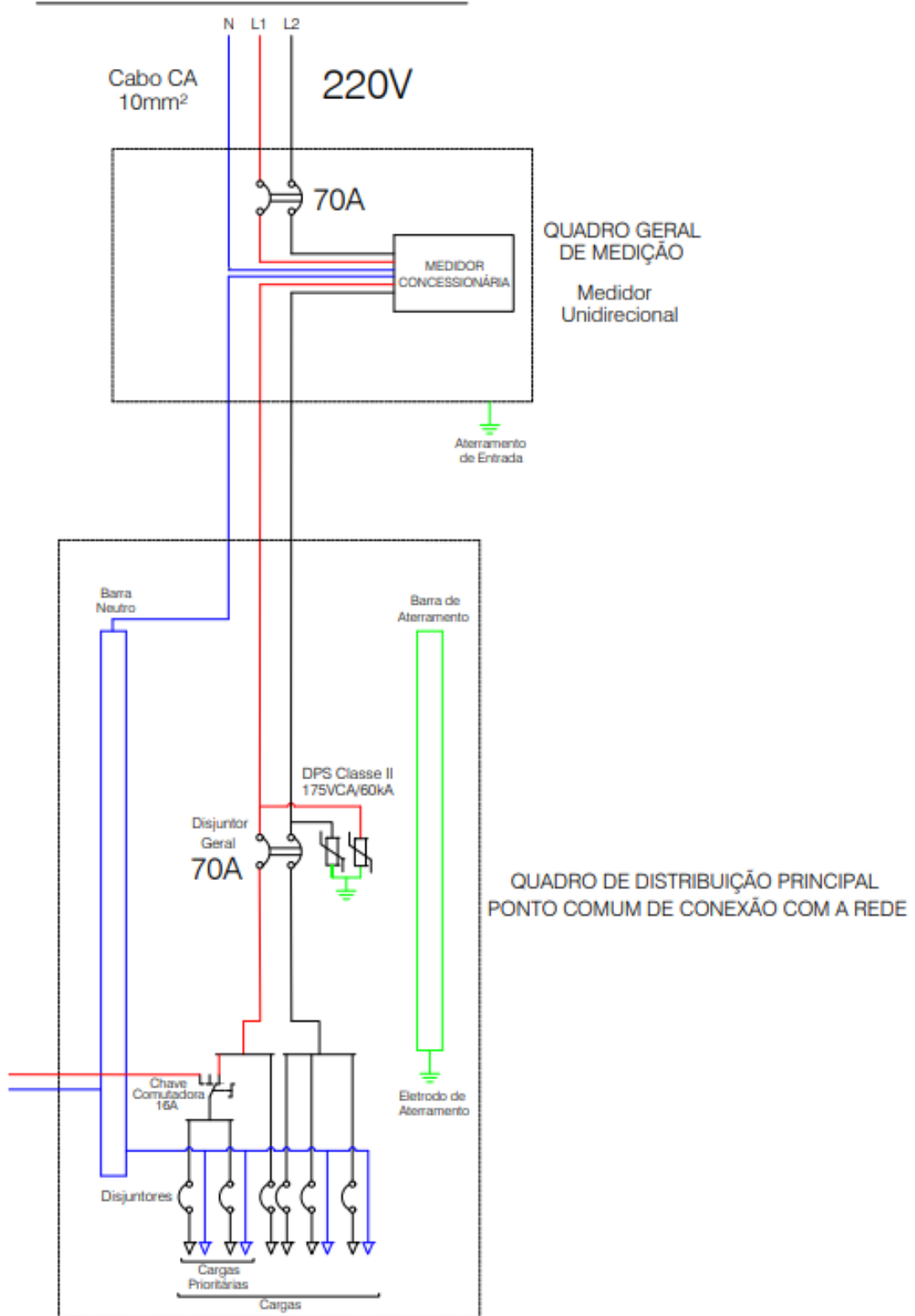
Figura 39 - Diagrama multifilar do sistema de backup ampliado.



Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

**Figura 40** - Diagrama multifilar do sistema de backup ampliado.

Rede BT  
**EQUATORIAL - PA**

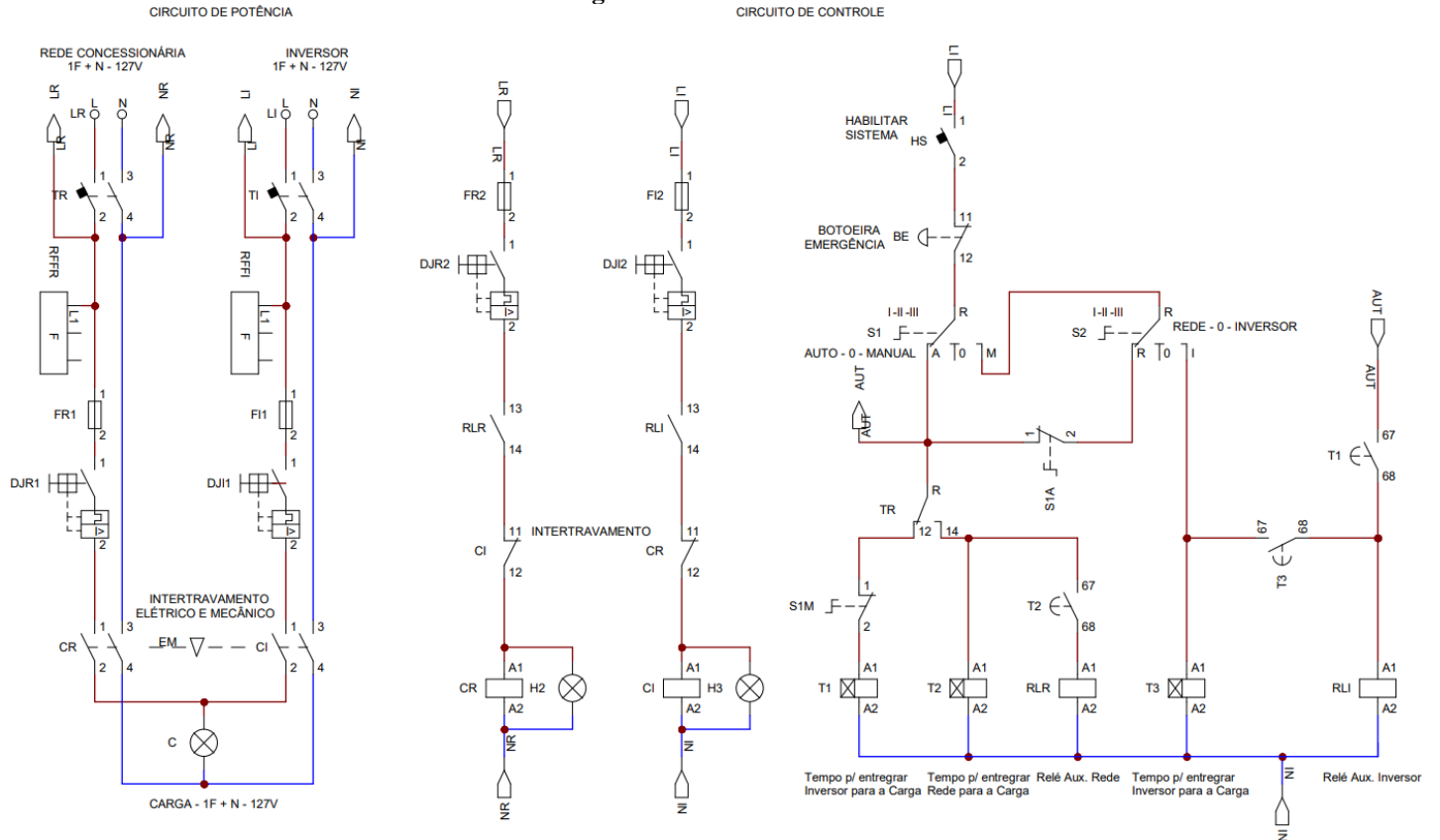


**Fonte:** Elaborada pelos autores, 2023.

## 4.2 Circuito de comando

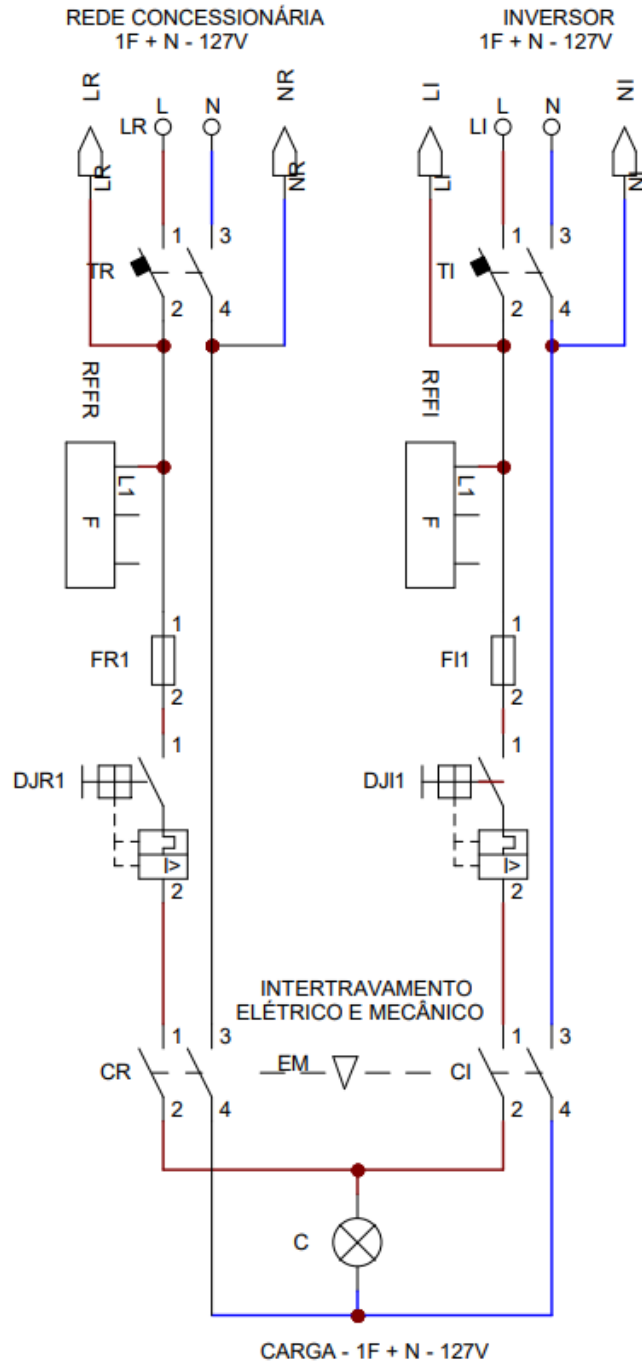
No software *CadeSimu* foi realizado o projeto do circuito de comando para transferência automática da fonte de alimentação da carga, conforme as Figura 41, 42 e 43.

**Figura 41** – Circuito de comando.



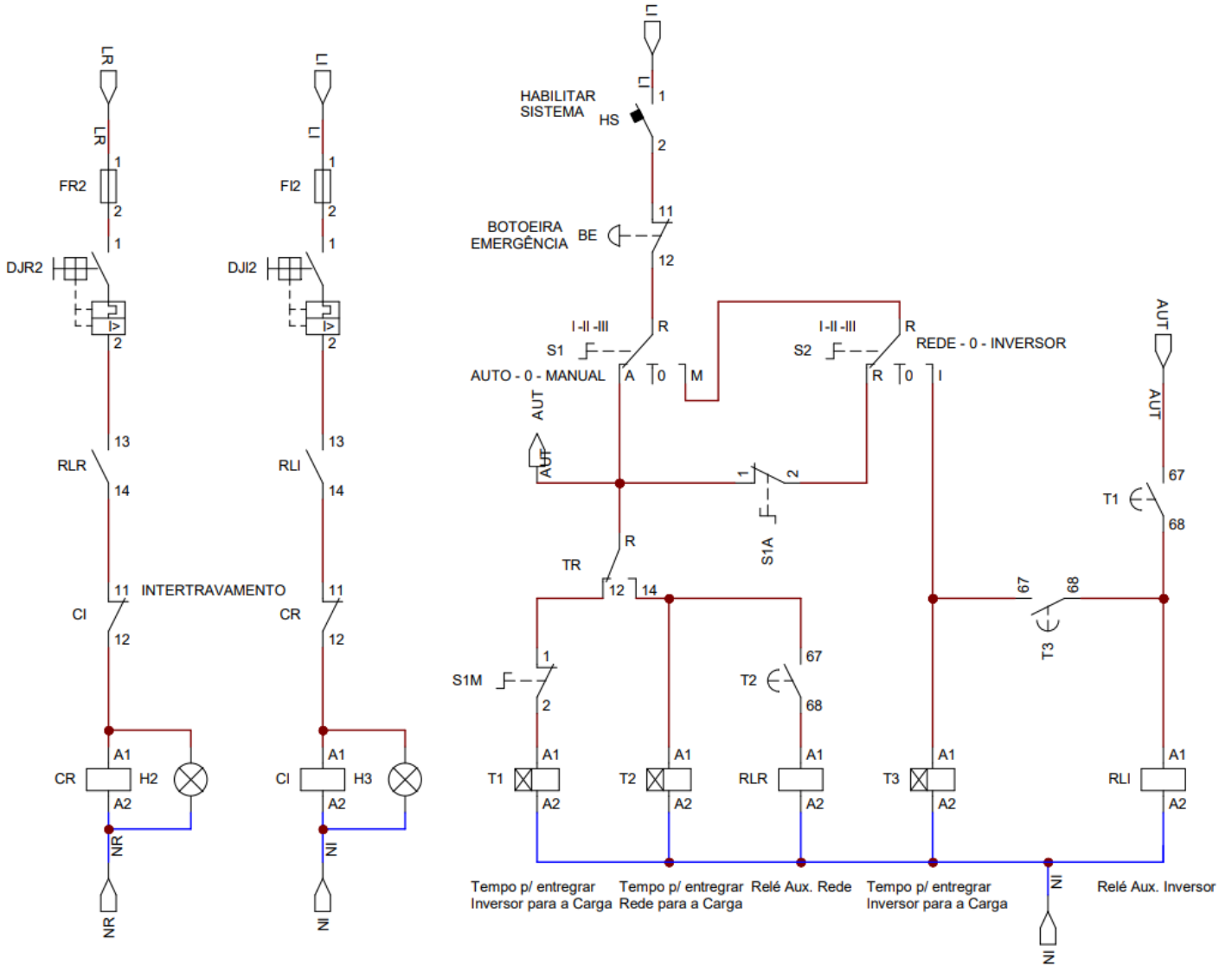
Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

**Figura 42** – Circuito de comando (potência) ampliado.



**Fonte:** Elaborada pelos autores, 2023.

Figura 43 – Circuito de comando (controle) ampliado.

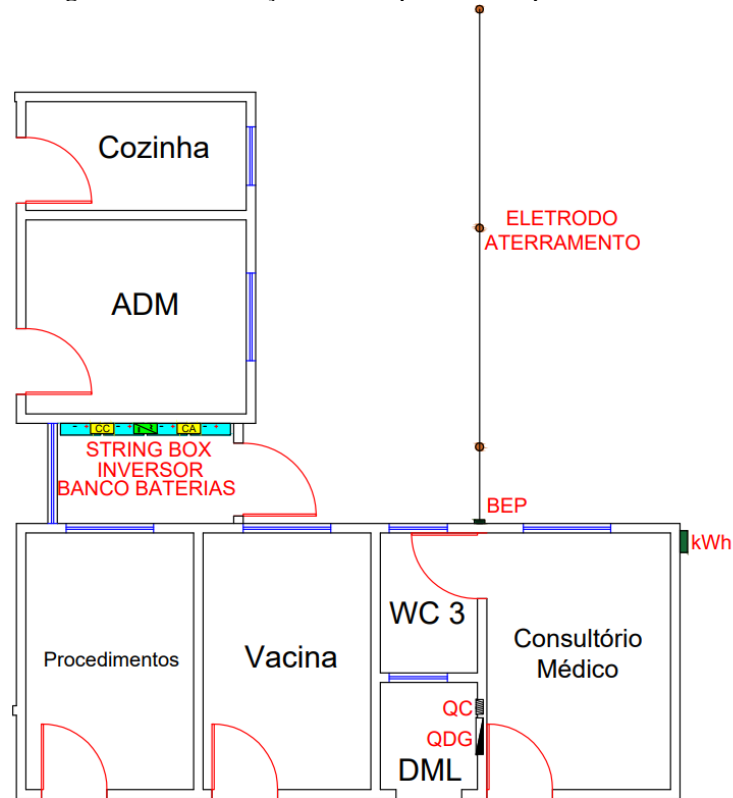


Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

### 4.3 Localização dos componentes na planta baixa

A Figura 44 apresenta a distribuição dos componentes dimensionados na planta baixa da UBS.

**Figura 44** - Localização dos componentes na planta baixa.

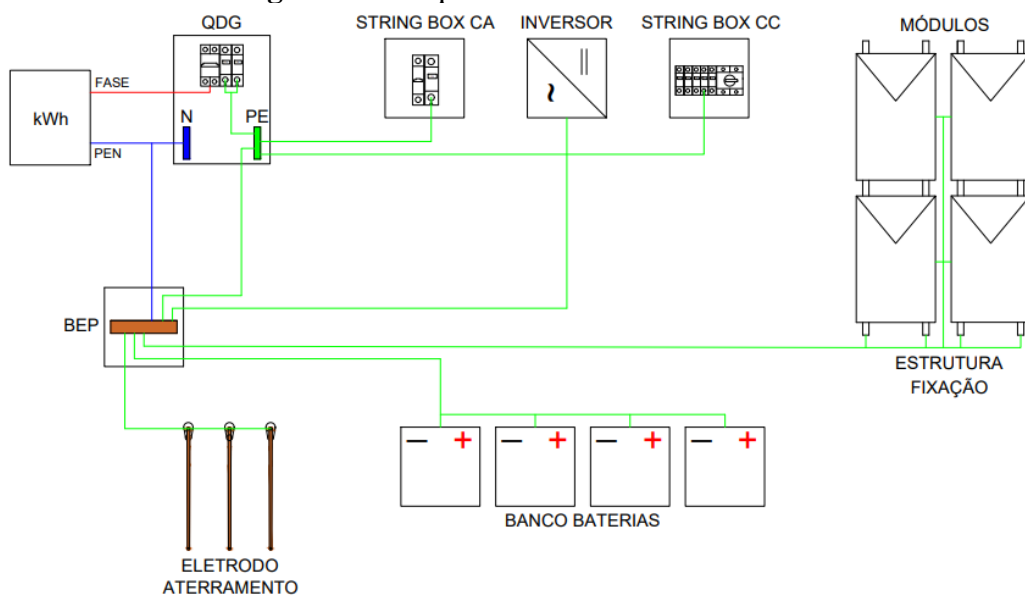


Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

### 4.4 Esquema de aterramento

A Figura 45 apresenta o diagrama do esquema de aterramento projetado para o sistema.

**Figura 45** - Esquema de aterramento TN-S.



Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

#### 4.5 Simulação do local de instalação dos módulos

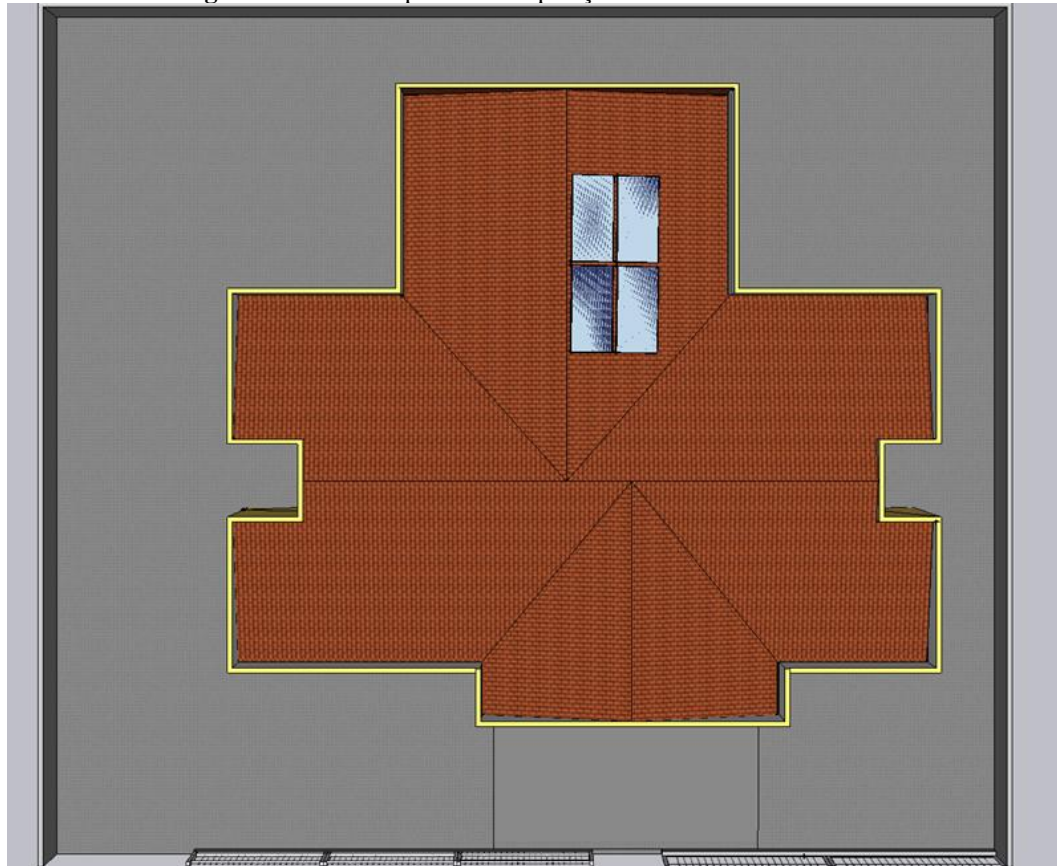
Na seção 3.1.4, para melhor aproveitamento da incidência solar, é orientado que os módulos sejam instalados voltados para o sul. Foi realizado, no software *SketchUp*, a simulação da disposição dos módulos fotovoltaicos no telhado da UBS, conforme as Figuras 46 e 47.

**Figura 46** – Vista frontal da disposição dos módulos no telhado.



**Fonte:** Elaborada pelos autores, 2023.

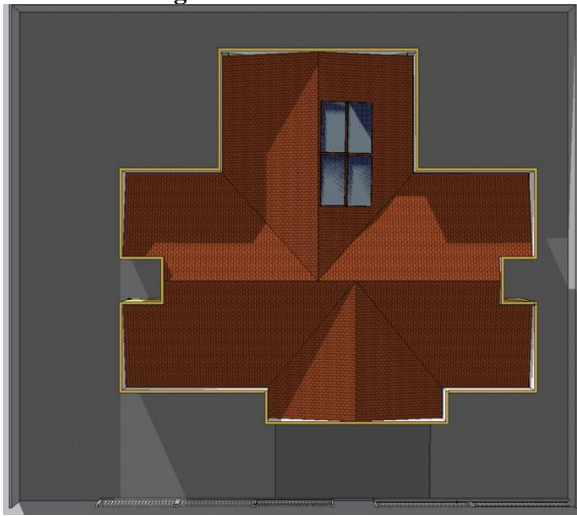
**Figura 47** – Vista superior da disposição dos módulos no telhado.



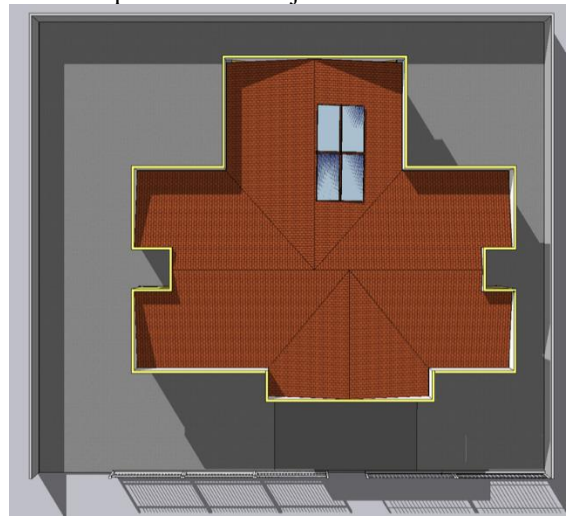
**Fonte:** Elaborada pelos autores, 2023.

A simulação da análise de sombreamento nos módulos é apresentada na Figura 48.

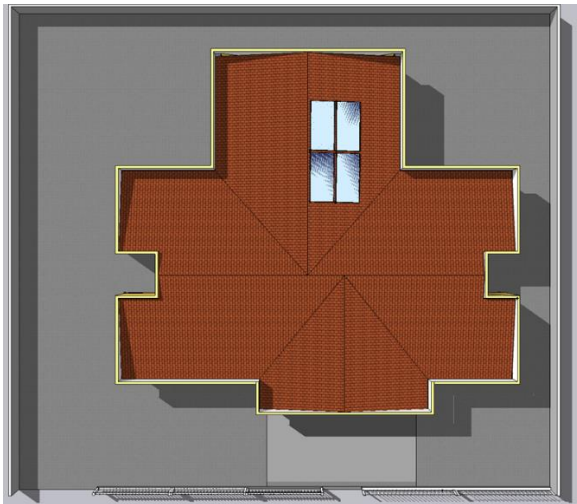
**Figura 48** - Análise de sombreamento nos módulos para o dia 15 de junho 2022.



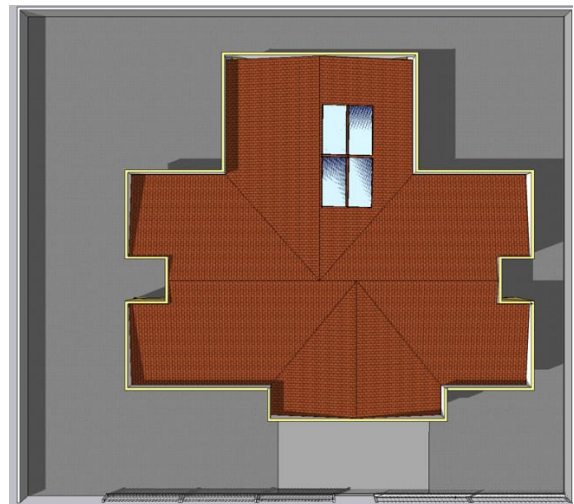
(a) sombreamento às 7h.



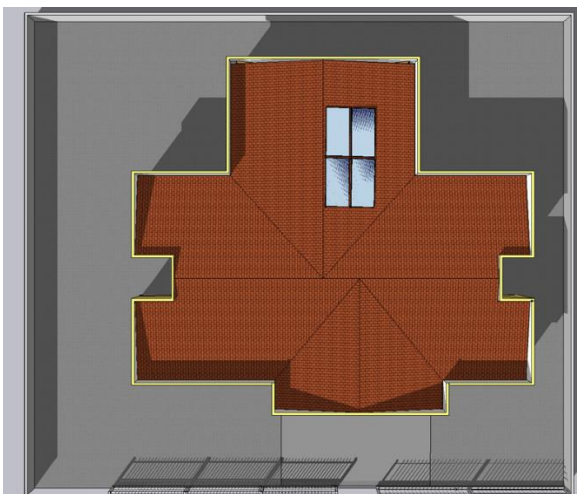
(b) sombreamento às 9h.



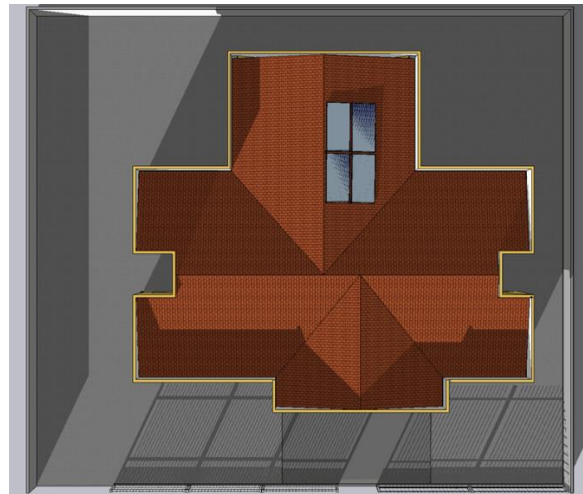
(a) sombreamento às 11h.



(b) sombreamento às 13h.



(a) sombreamento às 15h.



(b) sombreamento às 17h.

**Fonte:** Elaborada pelos autores, 2023.

#### 4.6 Simulação do local de instalação

O banco de baterias, o inversor e as strings box requerem um local adequado para sua instalação. O local precisa ser ventilado, protegido da chuva e ficar localizado o mais próximo possível do quadro geral de distribuição. No software *SketchUp*, foi simulado o local de instalação e a disposição desses componentes, conforme a Figura 49.

**Figura 49** – Local de instalação e disposição.



Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

#### 4.7 Análise de custo do sistema de backup

Em continuidade ao trabalho, foi realizado o orçamento da mão de obra e dos materiais necessários para a execução do projeto, conforme detalha a Tabela 7.

A seleção dos componentes para este projeto foi realizada por meio de uma cotação entre empresas especializadas em energia solar. O critério adotado foi o custo-benefício, uma vez que, para além do valor do equipamento em si, foi considerado o valor do frete para cada componente conforme mostra a Tabela 7.

Após estudo de mercado, constatou-se que as empresas especializadas em instalação de sistemas fotovoltaicos off-grid determinam o valor da mão de obra em função do valor dos principais componentes do sistema fotovoltaico, podendo variar entre 20% e 40%. Neste trabalho, foi adotado o custo de mão de obra de 38,8%. Essa porcentagem é justificada pela complexidade da instalação e manutenção do sistema fotovoltaico off-grid.

Tabela 7 – Orçamento para implementação do sistema de backup.

ORÇAMENTO PARA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE BACKUP FOTOVOLTAICO						
Item	Equipamentos e Materiais	Fabricante	Fornecedor	Quant.	Val. Unit.	Val. Total
<b>COMPONENTES FOTOVOLTAICOS</b>						
1º	PAINEL SOLAR JKM565N-72HL4-V	JINKO	ALDO SOLAR	4	R\$1.649,00	R\$6.596,00
2º	KIT FIXACAO 4 PAINES – (PARAFUSO MADEIRA)	ROMAGNOLE	ALDO SOLAR	1	R\$254,50	R\$254,50
3º	PERFIL DE ALUMINIO 2,40 M 4 PAINES	ROMAGNOLE	ALDO SOLAR	1	R\$254,50	R\$254,50
4º	INVERSOR SOLAR OFF-GRID SPF3000TLLVM-	GROWATT	ALDO SOLAR	1	R\$7.290,00	R\$7.290,00
5º	CONECTORES MC4	STAUBLI	ALDO SOLAR	8	R\$29,00	R\$116,00
6º	BATERIA SOLAR LITIO A48100 48V LITIO LIFEPO4 4.8KWH	DYNESS	BELENERGY	4	R\$ 15.700,00	R\$62.800,00
<b>STRING BOX CC</b>						
7º	PORTA FUSÍVEL E FUSÍVEL DE 25 A, GPV, 1000 VCC	NELSTAR SOLAR	MERCADO LIVRE	1	R\$ 37,99	R\$ 37,99
8º	DPS T2, 300VCC, <1,5KA, 20KA, 60KA	CLAMPER	MAGAZINE LUIZA	1	R\$ 201,25	R\$ 201,25
9º	CHAVE SECCIONADORA BIPOLAR, 25A, 500VCC.	WEG	MERCADO LIVRE	1	R\$ 175	R\$ 175,00
10º	CABO SOLAR FOTOVOLTAICO 4 MM (PRETO)	CORTOX SOLAR	ALDO SOLAR	15 m	R\$10,90	R\$163,50
11º	CABO SOLAR FOTOVOLTAICO 4 MM (VERMELHO)	CORTOX SOLAR	ALDO SOLAR	15 m	R\$10,90	R\$163,50
12º	DISJUNTOR CC 63A	S/SOLAR	MERCADO LIVRE	1	R\$ 66,49	R\$ 66,49
<b>STRING BOX CA</b>						
13º	DPS T2, 175VCA, <1,4KA, 20KA, 60KA	CLAMPER	MERCADO LIVRE	1	R\$ 161,96	R\$ 161,96
14º	DISJUNTOR CA 25A, MONOPOLAR, CURVA C	WEG	MERCADO LIVRE	1	R\$ 14,90	R\$ 14,90
15º	CONDUTOR CA 4 MM (VERMELHO)	MEGATRON	LEROY MERLIN	10 M	R\$ 4,29	R\$ 42,90
16º	CONDUTOR CA 4 MM (AZUL)	MEGATRON	LEROY MERLIN	10M	R\$ 4,29	R\$ 42,90
<b>ESQUEMA DE ATERRAMENTO</b>						
17º	CONDUTOR DE PROTEÇÃO 4MM	NAMBEI	LEROY MERLIN	16 M	R\$ 4,80	R\$ 76,80

18°	CONDUTOR DE PROTEÇÃO 10MM	MEGATRON	LEROY MERLIN	1 M	R\$ 9,99	R\$ 9,99
19°	CONDUTOR DE ATERRAMENTO 10MM	MEGATRON	LEROY MERLIN	9 M	R\$ 9,99	R\$ 89,91
20°	CONDUTOR DE EQUIPOTENCIALIZAÇÃO 6MM	BELCABOS	LEROY MERLIN	20 M	R\$ 6,99	R\$ 139,80
21°	HASTE DE ATERRAMENTO 15,87MM X 2,4M	MULTISEG	MULTISEG	3	R\$ 55,12	R\$ 165,36

#### QUADRO DE DISTRIBUIÇÃO GERAL

22°	DPS T2, 175VCA, <1,4KA, 20KA, 60KA	CLAMPER	MERCADO LIVRE	1	R\$ 161,96	R\$ 161,96
-----	------------------------------------	---------	---------------	---	------------	------------

#### CIRCUITO DE COMANDO

23°	COMPONENTES DO CIRCUITO DE COMANDO				R\$ 1.000,00	R\$ 1.000,00
-----	------------------------------------	--	--	--	--------------	--------------

#### ADEQUAÇÃO ESTRUTURAL

24°	SERVIÇO DE ENGENHARIA CIVIL				R\$2.000,00	R\$2.000,00
-----	-----------------------------	--	--	--	-------------	-------------

#### MÃO DE OBRA

25°	MÃO DE OBRA ESPECIALIZADA PARA A IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO				R\$30.000,00	R\$30.000,00
-----	---	--	--	--	--------------	--------------

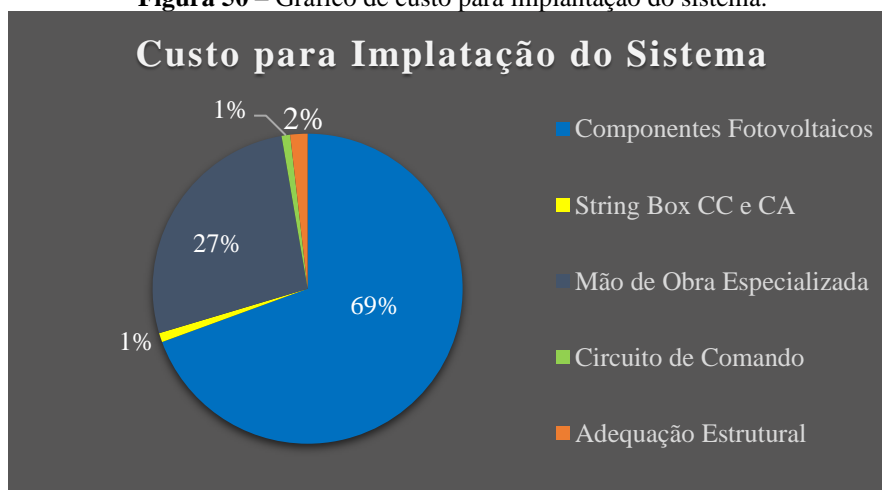
#### VALOR TOTAL DO SISTEMA

**R\$112.025,21**

Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

O gráfico da Figura 50 apresenta a proporção de custo do orçamento para implementação do sistema de backup fotovoltaico.

**Figura 50** – Gráfico de custo para implantação do sistema.



Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

#### 4.7.1 Justificativa para a escolha da bateria LiFePO<sub>4</sub>

Um aspecto importante deste trabalho foi a escolha do tipo de bateria a ser utilizada. A bateria de Li-íon, modelo A48100 da Dyness, possui tecnologia que utiliza íons de lítio para converter a energia química armazenada em eletricidade. Com esta bateria é possível realizar o descarregamento de até 90% da sua energia mantendo uma durabilidade mínima de 6.000 ciclos. São cerca de 16 anos de vida útil estimada, considerando a ciclagem diária típica da energia solar.

O investimento financeiro que essa bateria necessita é justificado por diversos fatores. As baterias de lítio têm uma tecnologia mais recente em relação às baterias de chumbo ácido. Além de possuir dispositivos eletrônicos integrados, a bateria pode ser controlada com mais precisão, permitindo que parâmetros como tensão, corrente e temperatura não ultrapassem os valores de trabalho projetados.

Como comparação, as baterias chumbo ácido convencionais suportam, em média, apenas 20% de descarga para uma vida útil de aproximadamente 1.000 ciclos - são apenas 2,7 anos de vida útil projetada, considerando ciclagem diária. Devido à baixa profundidade de descarga são necessárias até 8 vezes mais baterias de chumbo ácido (32 baterias) em comparação as baterias de lítio. Esse elevado número de baterias de chumbo ácido requer um estudo detalhado sobre o local de instalação, ventilação do local, perdas por aquecimento nos terminais de conexão.

As baterias de lítio são um investimento mais duradouro, com maior confiabilidade, eficiência e segurança, sem necessidade de substituição periódica do banco de baterias. Abaixo são apresentadas características que reforçam o uso deste tipo de bateria:

- ✓ **Alta densidade de energia:** possuem uma das mais altas densidades de energia disponíveis entre as baterias recarregáveis, o que significa que podem armazenar mais energia em um espaço menor;
- ✓ **Baixa taxa de autodescarga:** têm uma taxa de autodescarga significativamente menor do que outras baterias recarregáveis, como as baterias de chumbo-ácido, o que significa que podem reter a carga por mais tempo quando não estão em uso;
- ✓ **Ciclos de vida mais longos:** as baterias tendem a ter uma vida útil mais longa do que outras baterias recarregáveis, o que significa que precisam ser substituídas com menos frequência;
- ✓ **Maior eficiência energética:** podem ser carregadas e descarregadas com mais eficiência do que outras baterias recarregáveis, o que significa que perdem menos energia durante o processo de carga e descarga;

- ✓ **Menor impacto ambiental:** tendem a ser menos tóxicas do que outras baterias recarregáveis, como as baterias de chumbo-ácido, e podem ser recicladas com mais facilidade.

Em resumo, as baterias de íon-lítio oferecem uma combinação única de alta densidade de energia, baixa taxa de autodescarga, e longos ciclos de vida.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema projetado proporciona autonomia no fornecimento de energia elétrica para as cargas prioritárias da unidade básica de saúde. A implementação dessa tecnologia contribui para assegurar as condições mínimas para a oferta dos serviços de saúde prestados à população.

O desenvolvimento de um circuito de automação para realizar a transferência da fonte de alimentação é um fator relevante para este projeto, pois garante precisão e segurança do processo. O sistema projetado realiza a transferência automática para o sistema de backup quando houver falha da rede elétrica convencional, evitando que as cargas prioritárias para o funcionamento da UBS deixem de ser alimentadas.

A escolha do modelo de bateria - LiFePO<sub>4</sub> - com capacidade de armazenamento de energia de 4,8 kWh e operação em 48 V, foi essencial para atender às necessidades do projeto em termos de autonomia e eficiência. Essa escolha permitiu que a corrente de trabalho não fosse alta, reduzindo assim os custos com cabos de diâmetros maiores para suportar correntes altas e minimizando as perdas por aquecimento. A decisão estratégica de escolher a bateria de lítio permitiu otimizar o espaço de instalação, uma vez que apenas 4 baterias foram necessárias para o projeto, em contrapartida às 32 baterias de chumbo-ácido.

A escolha do inversor off-grid interativo é um diferencial deste projeto, pois o equipamento conta com uma entrada para alimentação CA que pode ser utilizada para conectá-lo à rede elétrica, por exemplo. Em um cenário crítico em que a autonomia do sistema é excedida, a alimentação CA pode ser utilizada como suporte para recarregar o banco de baterias.

Apesar de o custo inicial ser considerável (R\$112.025,21), o sistema projetado possui vida útil elevada. A durabilidade do banco de baterias será superior a 16 anos. Além disso, um sistema fotovoltaico off-grid bem projetado tem vida útil média de 25 anos. Sendo assim, a implementação de um sistema como este se mostra como uma solução financeiramente viável.

O estudo apresentado ressalta a importância de investir em tecnologias que priorizem o uso de energia renovável, como a energia fotovoltaica, uma forma eficaz de reduzir a dependência de fontes de energia fósseis e assim contribuir com a transição para uma economia de baixo carbono e mais sustentável.

Com base no conhecimento obtido neste trabalho, serão apresentadas sugestões para novos trabalhos na linha de pesquisa abordada: estudo de caso para adequação técnica da instalação elétrica da UBS São Benedito; estudo para implantação de sistema off-grid em unidades de saúde totalmente isoladas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, G. et al. **Implantação de Um Sistema de Fotovoltaico Off-Grid na Região do Pantanal Sul-Mato-Grossense**. IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais. São Paulo: São Bernardo do Campo, 2018.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **Electricity Market Report 2023**, 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Brasil Ultrapassa os 185 GW de Potência Instalada**, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482**, de 17 de abril de 2012. Brasília, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 1.059**, de 07 de fevereiro de 2023. Brasília, 2023.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Micro e Minigeração Distribuída**, 2022.

Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR). **Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil – Infográfico ABSOLAR**, 2023

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410**: Instalações elétricas de baixa tensão, 2ª ed. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419**: Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas, 2ª ed. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5444**: Símbolos gráficos para instalações elétricas prediais, 1ª ed. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16612**: Cabos de potência para sistemas fotovoltaicos, não halogenados, isolados, com cobertura, para tensão de até 1,8 kV C.C. entre condutores - Requisitos de desempenho, 2ª ed. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16690**: Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos, 1ª ed. Rio de Janeiro, 2019.

Atlas Solar Global. **Map and data downloads**. Energydata.Info, 2019.

BETONI, Marcel. **MC Elétrica**. Youtube. Disponível em: <<https://www.youtube.com/@MCEletrica>>. Acesso em 15 fevereiro 2023.

BRASIL. Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. **Lex**: Coletânea de Legislação e Jurisprudência, Brasília, p. 1, 2004.

CAGNON, J. **Análise do Comportamento da Bateria Utilizada em Sistemas Fotovoltaicos de Pequeno Porte**. (Faculdade de Ciências Agrônômicas) - Área de Concentração em Energia na Agricultura. Universidade Estadual Paulista - Campus de Botucatu. Botucatu, 2009.

CARACTERÍSTICAS do banco de baterias de lítio A48100 da Dyness. **Canal Solar**, 2022. Disponível em: < <https://canalsolar.com.br/caracteristicas-do-banco-de-baterias-de-litio-a48100-da-dyness/>>. Acesso em: 02 de mar. de 2023.

CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C. **Efeito Fotoelétrico no Desenvolvimento de Competências e Habilidades**. São Paulo, 2002.

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) / Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito (CRESESB). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 1999.

CLAMPER Solar SB 6E/2S 1040V 13,3A - 1000V. **Clamper**, 2023. Disponível em: < [https://www.lojaclamper.com.br/dps-clamper-solar-string-box-1000v-6e-2s/p?idsku=116&utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&keyword=&gclid=CjwKCAiA0cyfBhBREiwAAAtStHF8aQRGQnScLLtHpnSH03RAiP53jEW9qHs2KB9H9sOf0AvQF3uTuExoC-rcQAvD\\_BwE](https://www.lojaclamper.com.br/dps-clamper-solar-string-box-1000v-6e-2s/p?idsku=116&utm_source=google&utm_medium=cpc&keyword=&gclid=CjwKCAiA0cyfBhBREiwAAAtStHF8aQRGQnScLLtHpnSH03RAiP53jEW9qHs2KB9H9sOf0AvQF3uTuExoC-rcQAvD_BwE)>. Acesso em: 20 de fev. de 2023.

CONTROLADOR de carga solar - tipos (PWM E MPPT). **NeoSolar**, 2023. Disponível em: < <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/controladores-de-carga>>. Acesso em: 20 de fev. de 2023.

CONTROLADORES de carga: Diferenças entre as tecnologias MPPT e PWM. **Minha Casa Solar**, 2018. Disponível em: < <http://blog.minhacasasolar.com.br/controladores-de-carga/>>. Acesso em: 20 de fev. de 2023.

COSTA, Rodrigo. **Atom Elétrica**. Youtube. Disponível em: <<https://www.youtube.com/@atomeletrica>>. Acesso em 20 abril 2023.

DIENSTMANN, G. **Energia Solar: Uma Comparação de Tecnologias**. Tese (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.

DIFERENÇAS entre módulos monocristalinos e policristalinos. **Soft Solar**, 2021. Disponível em: <<https://www.softsolar.com.br/post/diferen%C3%A7as-entre-m%C3%B3dulos-monocristalinos-e-policristalinos>>. Acesso em: 03 de ago. de 2022.

DO início ao fim sistema solar fotovoltaico off-grid. **Energês**, 2020. Disponível em: < <https://energes.com.br/do-inicio-ao-fim-sistema-solar-fotovoltaico-off-grid/>>. Acesso em: 16 de fev. de 2023.

ELETOBRAS. **Especificações Técnicas dos Programas para Atendimento às Regiões Remotas dos Sistemas Isolados no âmbito do Programa Luz para Todos**. Ministério de Minas e Energia, 2017.

ENERGIA Solar Fotovoltaica: Tudo Sobre. **NeoSolar**, 2023. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/energia-solar-fotovoltaica>>. Acesso em: 14 de fev. de 2023.

EQUATORIAL ENERGIA. **NT. 001.EQTL: Fornecimento de Energia Elétrica em Baixa Tensão**. 2ª ed. Pará, 2019.

FARIAS, L. M; M. A. SELLITTO. **Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras.** Revista Liberato, 2011.

FRAGA, J. R. C. P. **Análise do Comportamento da bateria utilizada em Sistemas Fotovoltaicos de Pequeno Porte.** Tese de doutorado. Faculdade de Ciências Agrônômicas. Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho. São Paulo: Botucatu, 2009.

GASQUET, H. L. **Sistemas Fotovoltaicos.** Texas: El Paso, 1997.

GROWATT 3K Inverter. **BigBattery.** Disponível em:< <https://bigbattery.com/products/growatt-3k-inverter/> >. Acesso em: 20 de fev. de 2023.

O que é geração distribuída de energia elétrica? **Canal Solar**, 2021. Disponível em:< <https://canalsolar.com.br/o-que-e-geracao-distribuida-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 20 de fev. de 2023.

INVERSOR Solar Growatt. **Aldo**, 2023. Disponível em:< <https://www.aldo.com.br/loja/categoria/energia-solar/gerador-de-energia-solar-fotovoltaico/off-grid-interativo/growatt>>. Acesso em: 20 de fev. de 2023.

INVERSORES off-grid interativos com a rede para aplicações fotovoltaicas. **Canal Solar**, 2020. Disponível em:< <https://canalsolar.com.br/inversores-off-grid-interativos-com-a-rede-para-aplicacoes-fotovoltaicas/>>. Acesso em: 02 de mar. de 2023.

KASAP, S. O. **Principles of electronic materials and devices.** 4ª ed. Nova Iorque: The McGraw-Hill Companies, 2018.

LINS, L. R. P. **Dimensionamento de Sistema Fotovoltaico Off-Grid para Escritório Móvel.** Tese (Graduação em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, Ceará: Fortaleza, 2018.

LIRA, A. et al. **Contribuição dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica para a Redução de CO2 no Estado do Ceará.** Revista Brasileira de Meteorologia, 2019.

MANUAL Técnico. **Baterias Moura.** Disponível em:< <http://manoel.pesqueira.ifpe.edu.br/fmn/anterior/2010.2/infra/CLEAN>>. Acesso em: 18 de fev. de 2023.

MARINHO, B. et al. **Estudo e simulação de um controlador de carga para sistema fotovoltaico off-grid.** Santarém: Universidade Federal do Oeste do Pará, 2016.

MELO, R.; LEMOS, H. **Uma nova metodologia para o dimensionamento de sistemas off-grid com armazenamento.** Instituto Federal de Pernambuco. Brasília, 2022.

MÓDULO de painel solar de filme fino flexível. **AliExpress**, 2023. Disponível em:< <https://pt.aliexpress.com/item/32467347613.html>>. Acesso em: 18 de fev. de 2023.

MORAES, J. **Dimensionamento e Análise Estimada da Geração de Energia Elétrica Residencial/Monofásica Através do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) de**

**Baixa Tensão.** Tese (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará. Tucuruí, 2022.

MORENO, H. **Cabos Elétricos para Instalações Fotovoltaicas.** IFC/COBRECOM, 2019.

NETO, F. **Análise do Efeito das Variáveis Radiação Solar e Temperatura Ambiente no Dimensionamento de Um Sistema Fotovoltaico Off-Grid.** Tese (Graduação em Engenharia Elétrica) – Telemática da Universidade do Sul de Santa Catarina, Santa Catarina: Palhoça, 2017.

NEWTON, I. **Philosophiae Naturalis Principia Mathematica** (“**Mathematical Principles of Natural Philosophy**”), Londres, 1687.

NOVOS módulos fotovoltaicos nacionais e importados. **BYD**, 2023. Disponível em: < <https://www.byd.com.br/produtos/solar/>>. Acesso em: 18 de fev. de 2023.

OFF-GRID Interativo. **Aldo**, 2023. Disponível em:< <https://www.aldo.com.br/blog/o-que-sao-paineis-monocristalinos-e-quais-sao-suas-vantagens/>>. Acesso em: 04 de mar. de 2023.

OLIVEIRA, A. **Setor elétrico: desafios e oportunidades.** Brasília, DF: CEPAL. Escritório no Brasil/IPEA, 2011.

ONDAS eletromagnéticas: ganham energia ao aumentar a rapidez de propagação? **CREF**, 2019. Disponível em:< <https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=ondas-eletromagneticas-ganham-energia-ao-aumentar-a-rapidez-de-propagacao>>. Acesso em: 03 de ago. de 2022.

O que são painéis monocristalinos e quais são suas vantagens? **Aldo.blog**, 2021. Disponível em:< <https://www.aldo.com.br/blog/o-que-sao-paineis-monocristalinos-e-quais-sao-suas-vantagens/>>. Acesso em: 03 de ago. de 2022.

PAINEL solar fotovoltaico: guia completo. **Portal Solar**, 2021. Disponível em:<<https://www.portalsolar.com.br/painel-solar-fotovoltaico-guia-completo>>. Acesso em: 03 de ago. de 2022.

PAINEL solar fotovoltaico: guia completo. **Portal Solar**, 2021. Disponível em:<<https://www.portalsolar.com.br/painel-solar-fotovoltaico-guia-completo>>. Acesso em: 03 de ago. de 2022.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar.** 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

PEREIRA, F.; OLIVEIRA, M. **Curso técnico instalador de energia solar fotovoltaica.** Porto: Publindústria, 2011.

PETERLINI, G. **Segredos do Off-grid.** Sorocaba, 2022.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistema Fotovoltaico.** 2ª ed. Rio de Janeiro: CRESESB, 2014.

POTENCIAL Solar - SunData v 3.0. **CRESESB**, 2023. Disponível em:< <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 20 de fev. de 2023.

Lithium Battery 4.8Kw 48V Dyness A48100. **Baterías y Amperios**. Disponível em: <<https://bateriasyamperios.com/en/producto/bateria-litio-4800w-48v-dyness-a48100-2/>>. Acesso em: 20 de fev. de 2023.

PRODUTOS. **NeoSolar**, 2023. Disponível em: <[https://www.neosolar.com.br/loja/controlador-carga-mppt-40a-12-24-36-48v-epever-extra-4415n.html?gclid=Cj0KCQiAi8KfBhCuARIsADp-A55IB9ldYOYUshxG-j0MMt2q7DmgrpbyXjHY-MDbkUQFEgBdC00IzKAaAi2TEALw\\_wcB](https://www.neosolar.com.br/loja/controlador-carga-mppt-40a-12-24-36-48v-epever-extra-4415n.html?gclid=Cj0KCQiAi8KfBhCuARIsADp-A55IB9ldYOYUshxG-j0MMt2q7DmgrpbyXjHY-MDbkUQFEgBdC00IzKAaAi2TEALw_wcB)>. Acesso em: 18 de fev. de 2023.

RIBEIRO, G. **Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico Off-grid em um Motorhome**. Tese (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, UniCEUB – Centro Universitário de Brasília. Brasília, 2020.

ROSEMBACK, R.H. **Conversor CC-CC Bidirecional Buck-Boost atuando como Controlador de Carga de Baterias em um Sistema Fotovoltaico**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Juiz de Fora. Minas Gerais: Juiz de Fora, 2004.

SANTOS, Moacir. **FAM Engenharia**. Youtube. Disponível em: <<https://www.youtube.com/@FAMEngenharia>>. Acesso em 21 abril 2023.

SILVA, R. P. A. **Formação de Novos Municípios em Cametá: O Estudo do Território e das Representações Sociais Sobre a Proposta de Emancipação da Vila do Carmo do Tocantins**. Tese (Graduação em Licenciatura Plena em Geografia) – Faculdade de Geografia do Campus Universitário do Tocantins/Cametá, Pará: Cametá, 2018.

SIEMENS. **Dispositivos de Proteção contra Surtos - DPS 5SD7**. São Paulo, 2021.

DISPOSITIVOS de Proteção contra Surtos. **Eletric Schneider**, 2023. Disponível em: <<https://www.se.com/br/pt/work/local-content/dps-dispositivo-protecao-contrasurtos/#:~:text=A%20sigla%20DPS%20%C3%A9%20para,sobretens%C3%B5es%20transit%C3%B3rias%20na%20rede%20el%C3%A9trica>>. Acesso em: 17 de fev. de 2023.

TIPOS de Células Fotovoltaicas. **Cogera Energia**, 2019. Disponível em: <<https://cogera.com.br/tipos-de-celulas-fotovoltaicas/>>. Acesso em: 03 de ago. de 2022.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica e aplicações**. 1ª ed. São Paulo: Érica, 2012.

WENDLING, M. **Série Eletrônica**. Senai, 2011.

ZILLES, R. et al. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

10 fatores que influenciam na eficiência do sistema fotovoltaico. **Solfácil**, 2020. Disponível em: <<https://blog.solfacil.com.br/energia-solar/fatores-que-influenciam-na-eficiencia-do-sistema-fotovoltaico/>>. Acesso em: 13 de fev. de 2023.

## APÊNDICE A – LEVANTAMENTO DE CARGA

Local	Carga prioritária e não prioritária*	Quant.	Potência (W)	Potência total Carga prioritária (W)	Potência total Carga não prioritária (W)	Uso Horas/dia	Consumo C.P. (Wh/dia)	Consumo C.N.P. (Wh/dia)
Recepção	Lâmpada led bulbo	3	15	45		12	540	
	Computador	1	22	22		8	176	
WC 1	Lâmpada led bulbo	1	10	10		2	20	
WC 2	Lâmpada led bulbo	1	10	10		2	20	
C. médico	Lâmpada led bulbo	2	15	30		4	120	
	Computador	1	22	22		4	88	
	Ar-cond. 9000 BTUs*	1	950		950	4		3800
WC 3	Lâmpada led bulbo	1	10	10		0,5	5	
DML	Lâmpada led bulbo	1	10	10		1	10	
Teste do pezinho	Lâmpada led bulbo	2	15	30		8	240	
Farmácia	Lâmpada led bulbo	2	15	30		8	240	
	Ar-cond. 12000 BTUs*	1	1260		1260	8		10080
Vacina	Lâmpada led bulbo	2	15	30		8	240	
	Computador	1	22	22		8	176	
	Geladeira	1	50	50		18	900	
	Ar-cond. 9000 BTUs*	1	950		950	8		7600
Procedimentos	Lâmpada led bulbo	2	15	30		8	240	
	Ar-cond. 9000 BTUs*	1	950		950	8		7600
Triagem	Lâmpada led bulbo	4	15	60		8	480	
	Balança pediátrica	1	5	5		2	10	
	Ar-cond. 12000 BTUs*	1	1260		1260	8		10080
C. Enfermagem	Lâmpada led bulbo	2	15	30		8	240	
	Computador	1	22	22		8	176	
	Ar-cond. 9000 BTUs*	1	950		950	8		7600
WC 4	Lâmpada led bulbo	1	10	10		1	10	
Preventivo	Lâmpada led bulbo	2	15	30		8	240	
	Foco	1	15	15		2	30	
	Ar-cond. 12000 BTUs*	1	1260		1260	8		10080
Coleta exame	Lâmpada led bulbo	1	15	15		8	120	
Acompanhamento	Lâmpada led bulbo	2	15	30		2	60	
Hall 1	Lâmpada led bulbo	4	15	60		4	240	
Hall 2	Lâmpada led bulbo	2	15	30		4	120	
ADM	Lâmpada led bulbo	1	15	15		8	120	
	Computador	1	22	22		8	176	
	Ar-cond. 12000 BTUs*	1	1260		1260	8		10080
Esterilização	Lâmpada led bulbo	1	15	15		4	60	
	Autoclave	1	100	100		1	100	
	Estufa	1	550	550		1	550	
Almoxarifado	Lâmpada led bulbo	1	15	15		1	15	
Lavanderia	Lâmpada led bulbo	1	15	15		4	60	
WC 5	Lâmpada led bulbo	1	10	10		2	20	
Cozinha	Lâmpada led bulbo	1	15	15		4	60	
	Geladeira	1	50	50		18	900	
				1465	8840		6802	66920

## APÊNDICE B – DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE BATERIAS

DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE BATERIAS	
BATERIA LIFEPO4	BATERIA CHUMBO-ÁCIDO
48 V 100 Ah 90% PD	12 V C20 220 Ah 20% PD
$EC \text{ (Wh/dia)} = Cca \cdot \text{Autonomia}$ $EC = 6802 \cdot 2$ 13604  $EA \text{ (Wh)} = EC / (\eta_{CC/CA} \cdot DOD_{max} \cdot Ee)$ $EA = 13604 / (0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,95)$ 17679,01235  $CBB \text{ (Ah)} = EA / V_{banco}$ $CBB = 17679,01 / 48$ 368,3127572  $NBS = V_{banco} / V_{baterias}$ $NBS = 48 / 48$ 1  $NBP = CBB / C_{bateria}$ $NBP = 368,3127572 / 100$ 3,683127572  $NTB = NBS \cdot NBP$ $NTB = 1 \cdot 3,683127572$ 3,683127572	$EC \text{ (Wh/dia)} = Cca \cdot \text{Autonomia}$ $EC = 6802 \cdot 2$ 13604  $EA \text{ (Wh)} = EC / (\eta_{CC/CA} \cdot DOD_{max} \cdot Ee)$ $EA = 13604 / (0,9 \cdot 0,2 \cdot 0,90)$ 83975,30864  $CBB \text{ (Ah)} = EA / V_{banco}$ $CBB = 83975,30864 / 24$ 3498,971193  $NBS = V_{banco} / V_{baterias}$ $NBS = 24 / 12$ 2  $NBP = CBB / C_{bateria}$ $NBP = 3498,971193 / 220$ 15,90441452  $NTB = NBS \cdot NBP$ $NTB = 2 \cdot 15,90441452$ 31,80882903

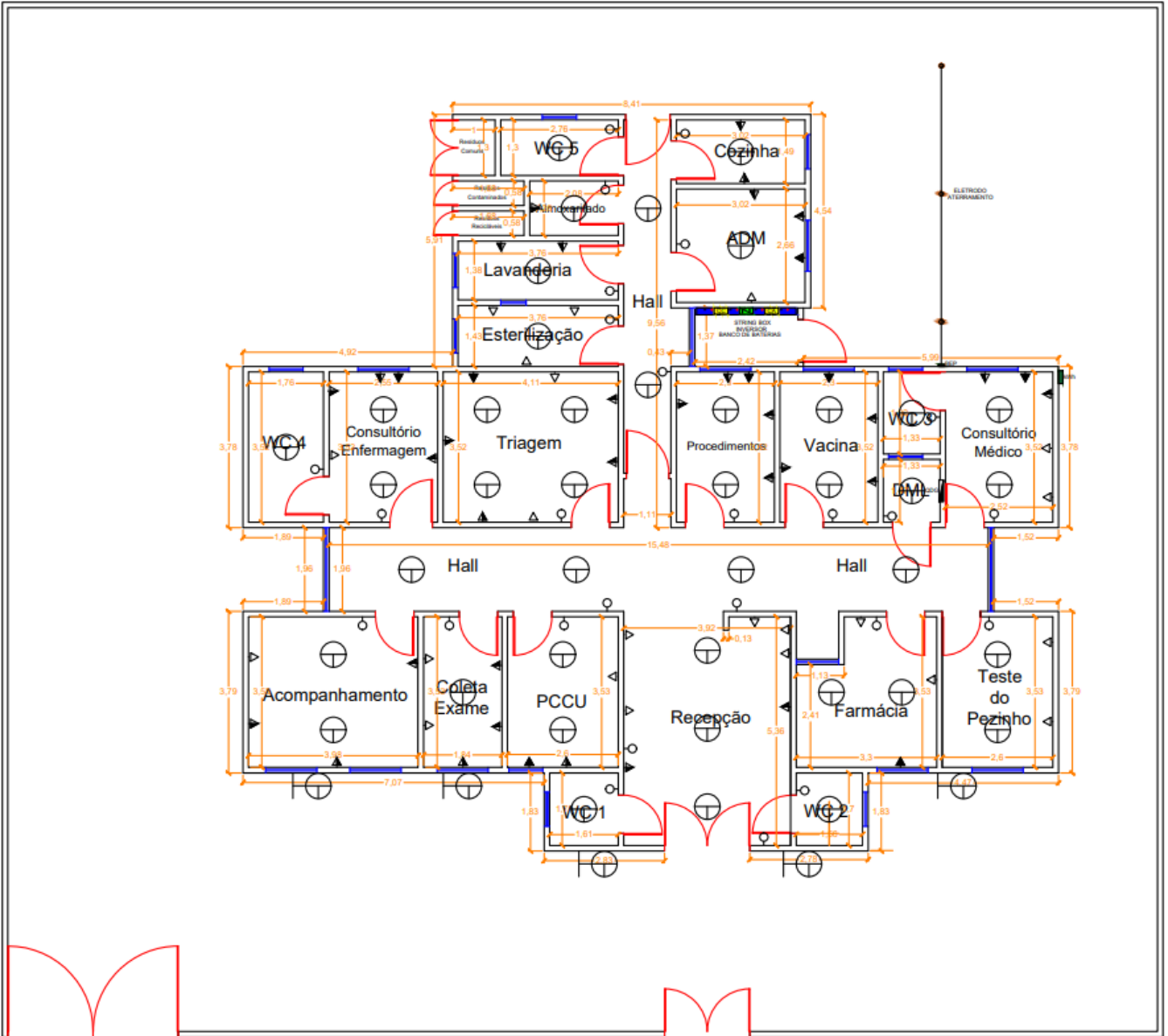
Cca Wh/Dia	AUT (DIAS)
6802	2

$\eta_{CC/CA}$	DODmax	Ee	Vbanco	Cbateria
0,95	0,9	0,9	48	100

$\eta_{CC/CA}$	DODmax	Ee	Vbanco	Vbateria	Cbateria
0,9	0,2	0,9	24	12	220

Cca	Consumo diário de referência em função do consumo mensal do sistema
Autonomia	Autonomia do sistema de 2 dias
$\eta_{CC/CA}$	Eficiência total entre o consumo em CC no banco de baterias e o consumo em CA. Considera: perdas na descarga da bateria, perdas ôhmicas (ou de transmissão)
DODmax	Profundidade de Descarga Máxima para proteger o banco de baterias de descarga profunda
Ee	Eficiência do inversor

APÊNDICE C – PLANTA BAIXA COMPLETA



## ANEXO A – DATASHEET DA BATERIA A48100





# A48100

SOLUÇÕES PARA RESERVAÇÃO DE ENERGIA

Mais seguro e confiável, maior eficiência, instalação no chão ou na parede, expansão flexível  
Dy Ness A48100 é mais e conómico, será feito para áreas residenciais e comerciais leves

### Caraterística e Vantagem



**Flexível para expansão**  
Disponível para conectada  
40 unidades em paralelo



**capacidade básica maior**  
4,8kWh por cada módulo



**Varição da temperatura ampla**  
-20-55°C



**Mais seguro**  
Sistema de monitorização  
de bateria e balanço



**várias opções de instalação**  
Instalado no chão e na parede  
e empilhável



**Compatibilidade forte**  
Adapte-se a vários inversores

☎ Tel: +66 029 8954 0338
🌐 Web: [www.dy-ness-tech.com](http://www.dy-ness-tech.com)
✉ Email: [sales@dy-ness-tech.com](mailto:sales@dy-ness-tech.com)

### Parâmetro Técnico

Modelo	A48100
Tipo de bateria	LiFePO4
Energia nominal de bateria	4.8 kWh
Capacidade Nominal	100 Ah
Tensão nominal	48 V
Tensão de carga cortada	54V
Tensão de descarga cortada	42V
Taxa de carga recomendada	0.5C
Corrente de carga / descarga recomendada	50A
Corrente de carga / descarga de potência máxima	75A
Corrente de carga / descarga de potência em pico	100A(15s)
Profundidade de descarga	90%
Peso líquido	45kg
Dimensão(C*L*A)	504*597*155mm
Varição de temperatura de carga	0-55°C
Varição de temperatura de descarga	-20-55°C
Comunicação	CAN/RS485/RS232
Garantia	10 anos
Fornecimento dos documentos de garantia	Sim
Vida útil <sup>(1)</sup>	>6000 Ciclos
Classe de proteção	IP20
Escalabilidade	Disponível para conectada 40 unidades em paralelo
Vantagem	Disponível em configurações off-line e híbridas, com design compacto
Inversor compatível	Victron/SMA/Goodwe/Imeon/Solis/SAJ/ Growatt/Luxpower/Voltron/Deye etc
Certificado e Norma de Segurança	CE/UN38.3, CEI-021está em aprovação

(1)Condição de teste: 0.2C carga/descarga, a 25°C, 80% Profundidade de descarga



Acender o seu dia e o noite

[www.dy-ness-tech.com](http://www.dy-ness-tech.com)



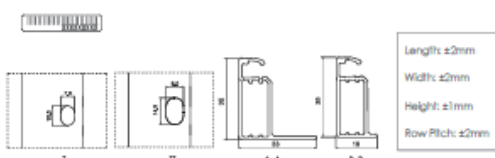
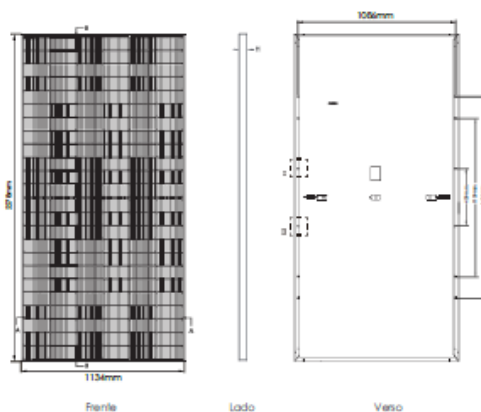



## ANEXO B – DATASHEET DO INVERSOR SPF 3000TL LVM-ES

Ficha de dados	SPF 3000TL LVM-ES
Tensão da bateria	48VDC
Tipo de bateria	Lítio/Chumbo-ácido
<b>SAÍDA DO INVERSOR</b>	
potência nominal	3000VA/ 3000W
capacidade paralela	Sim, 6 unidades no máximo
Regulação de tensão AC ( modo bateria )	100Vac/110Vac/120Vac @ 50/60Hz
Poder da onda	6000VA
Eficiência de pico	90%
Forma de onda	Pure sine wave
Tempo de transferência	10ms typical, 20ms Max
<b>CARGA SOLAR</b>	
Potência máxima da matriz FV	4000W
Faixa mppt @ tensão operacional	120VDC – 250VDC
Número de MPP trackers Independentes/Strings por MPP Trackers	1/1
Tensão máxima de circuito aberto do arranjo FV	250VDC
Corrente de carga solar máxima	80A
<b>CARGA AC</b>	
Corrente de carga	40A
Tensão de entrada AC	120VAC
Faixa de tensão seleccionável	95-140VAC (For Personal Computers) ; 65-140VAC (For Home Appliances)
Faixa de frequência	50Hz/60Hz (Auto sensing)
<b>FÍSICA</b>	
Grau de proteção	IP20
Dimensões (L/A/P)	320/470/135mm
Peso líquido	12
<b>OPERACIONAL</b>	
Humidade	5% to 95% Relative Humidity(Non-condensing)
Temperatura operacional	0°C - 50°C
Temperatura de armazenamento	-15°C - 60°C

## ANEXO C – DATASHEET DO MÓDULO 565 Wp

### Desenhos de engenharia

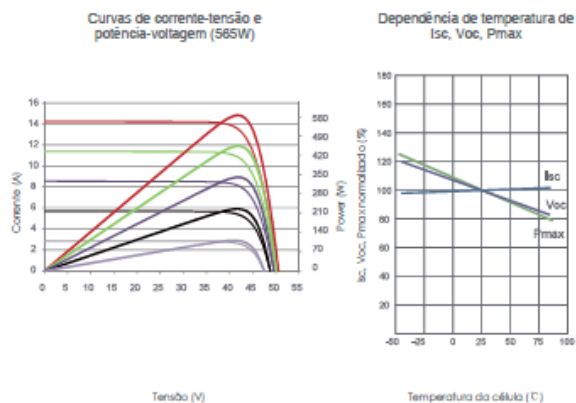


### Configuração de embalagem

(Dois paletes = uma pilha)

31 pcs/ paleta, 62 pcs/pilha, 620 pcs/container de 40'HG

### Desempenho elétrico e dependência de temperatura



### Características mecânicas

Tipo de célula	N type Mono-crystalline
Nº de células	144 (6×24)
Dimensões	2278×1134×35mm (89.69×44.65×1.38 inch)
Peso	28 kg (61.73 lbs)
Vidro frontal	3,2 mm, revestimento anti-reflexo, alta transmissão, baixo teor de ferro, vidro temperado
Quadro	Liga de Alumínio Anodizado
Caixa de Junção	Classificação IP68
Cabos de saída	TUV 1 × 4,0 mm <sup>2</sup> (+):400 mm, (-):200 mm ou comprimento personalizado

### ESPECIFICAÇÕES

Tipo de Módulo	JKM555N-72HL4 JKM555N-72HL4-V		JKM560N-72HL4 JKM560N-72HL4-V		JKM565N-72HL4 JKM565N-72HL4-V		JKM570N-72HL4 JKM570N-72HL4-V		JKM575N-72HL4 JKM575N-72HL4-V	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Potência máxima (Pmax)	555Wp	417Wp	560Wp	421Wp	565Wp	425Wp	570Wp	429Wp	575Wp	432Wp
Tensão máxima de energia (Vmp)	41.64V	39.12V	41.77V	39.25V	41.92V	39.38V	42.07V	39.51V	42.22V	39.60V
Corrente de potência máxima (Imp)	13.33A	10.67A	13.41A	10.73A	13.48A	10.79A	13.55A	10.85A	13.62A	10.92A
Tensão de circuito aberto (Voc)	50.34V	47.82V	50.47V	47.94V	50.60V	48.06V	50.74V	48.20V	50.88V	48.33V
Corrente de curto-circuito (Isc)	14.07A	11.36A	14.15A	11.42A	14.23A	11.49A	14.31A	11.55A	14.39A	11.62A
Eficiência do Módulo STC (%)	21.48%		21.68%		21.87%		22.07%		22.26%	
Temperatura de operação (°C)	-40°C~+85°C									
Tensão máxima do sistema	1000/1800VDC (IEC)									
Classificação máxima do fusível em série	25A									
Tolerância de potência	0~+3%									
Coefficientes de temperatura de Pmax	-0.30%/°C									
Coefficientes de temperatura de Voc	-0.25%/°C									
Coefficientes de temperatura de Isc	0.046%/°C									
Temperatura nominal da célula operacional (NOCT)	45±2°C									

## ANEXO D – SIEMENS: MAPA DE CURVAS ISOCERÂNICAS

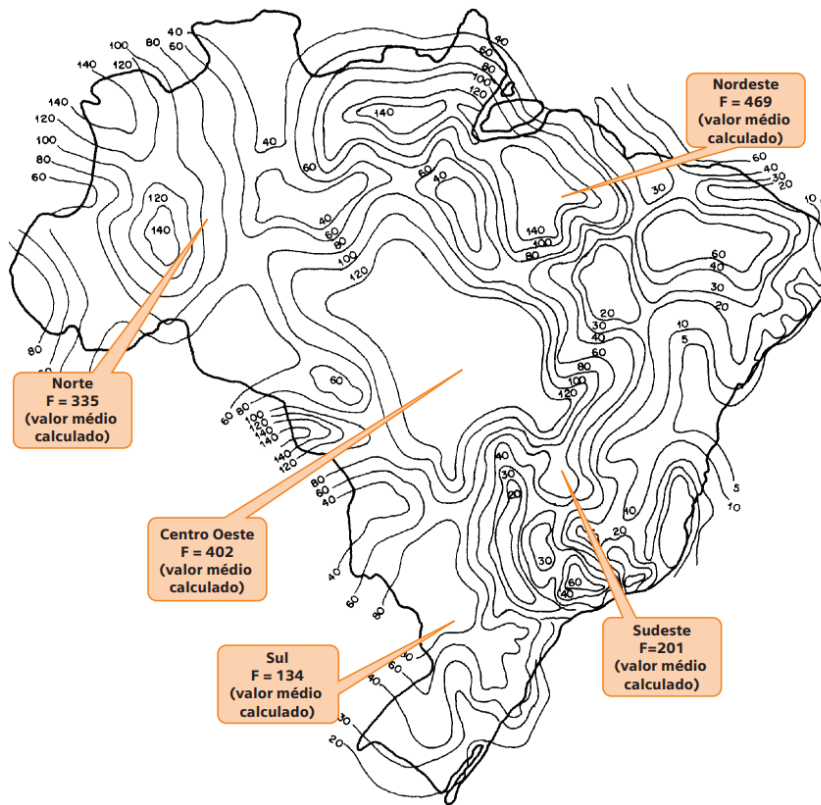


Tabela 1 -  $\delta$  - Situação da linha aérea (BT) e da edificação

Completamente envolvida por estruturas	Algumas estruturas próximas ou situação desconhecida
0	0,5
Terreno plano ou descampado	Sobre morro, presença de água superficial, área montanhosa
0,75	1

Tabela 2 - Seleção do DPS (classe II) Corrente nominal de descarga ( $I_n$ )

Nível de exposição F	$I_n$ (kA)
$F \leq 40$	5
$40 < F \leq 80$	10
$F > 80$	20