

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

CAYO FELIPE BARBOSA SOARES
FELIPE MORAES BRUNO

FORNECIMENTO DE ENERGIA SOLAR PARA RESIDÊNCIAS EM REGIÕES
REMOTAS DO NORDESTE BRASILEIRO

SÃO PAULO - SP
2018

**CAYO FELIPE BARBOSA SOARES
FELIPE MORAES BRUNO**

**FORNECIMENTO DE ENERGIA SOLAR PARA RESIDÊNCIAS EM REGIÕES
REMOTAS DO NORDESTE BRASILEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Tecnologia em Instalações Elétricas da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, como requisito para obtenção do título de Tecnólogo em Instalações Elétricas.

Orientador: Prof. Me. Romildo de Campos Paradelo Jr.

**SÃO PAULO - SP
2018**

**CAYO FELIPE BARBOSA SOARES
FELIPE MORAES BRUNO**

**FORNECIMENTO DE ENERGIA SOLAR PARA RESIDÊNCIAS EM REGIÕES
REMOTAS DO NORDESTE BRASILEIRO**

BANCA EXAMINADORA

**Prof. Me. Romildo de Campos Paradelo
Jr.**

Orientador

**Prof. Dra. Fernanda Alves Cangerana
Pereira**

Prof. Roberval Edmilson Piva Garcia

Aos nossos familiares, amigos e professores por toda ajuda que nos forneceram durante o período de elaboração deste trabalho.

Agradecemos ao nosso orientador pela paciência e pelos grandes ensinamentos.

“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano.”

Isaac Newton

“A melhor maneira de prever o futuro é criá-lo.”

Alan Kay

RESUMO

Nos dias atuais, é impensável imaginar a sociedade moderna sem energia elétrica, que é uma necessidade mundial e proporciona desenvolvimento, conforto e segurança. Porém, devido a fatores sociais e econômicos, há famílias que residem em zonas rurais e não possuem acesso à eletricidade, o que fomenta a desigualdade no Brasil. Este trabalho tem, portanto, a finalidade de viabilizar o fornecimento de energia através da luz solar para residências situadas em regiões afastadas do nordeste brasileiro, buscando medidas e soluções tecnológicas sustentáveis com o intuito de justificar a implantação de um sistema autônomo de energia provinda do Sol.

Palavras-chave: Energia fotovoltaica. Desenvolvimento sustentável. Energia renovável. Fontes alternativas. Eficiência energética.

ABSTRACT

Nowadays, it is unthinkable to imagine the modern society without electrical energy, which is a worldwide necessity and provides development, comfort and security. However, due to social and economic factors, there are families that live in rural areas and do not have access to electricity, which foments inequality in Brazil. This work has, therefore, the purpose of making feasible the supply of energy through the sunlight for residences located in regions far from the Brazilian northeast, seeking sustainable technological forms and solutions with the intention of justifying the implantation of an autonomous system of energy coming from the Sun.

Keywords: Photovoltaic energy. Sustainable development. Renewable energy. Alternative sources of energy. Energy efficiency.

LISTA DE SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABSOLAR: Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

CA: Corrente Alternada

CC: Corrente Contínua

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

CRESESB: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

DPS: Dispositivo de Proteção Contra Surto

EPE: Empresa de Pesquisa Energética

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MPPT: *Maximum Power Point Tracking*

NBR: Norma Brasileira

NG: Densidade de descargas atmosféricas para a terra

PV: *Photovoltaic*

PWM: *Pulse Width Modulation*

SIN: Sistema Interligado Nacional

SINDUSCON: Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo

STC: *Standard Test Condition*

UDEL: *University of Delaware*

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Estrutura do Sol..... | 19 |
| Figura 2 – Bandas de Energia..... | 21 |
| Figura 3 – Estrutura básica de uma célula fotovoltaica | 22 |
| Figura 4 – Sistema <i>on-grid</i> com medidor bidirecional | 23 |
| Figura 5 – Sistema híbrido | 24 |
| Figura 6 – Sistema <i>off-grid</i> | 24 |
| Figura 7 – Valor médio diário de irradiação nas cinco regiões do Brasil | 27 |
| Figura 8 – Blocos que compõem um sistema fotovoltaico isolado domiciliar | 29 |
| Figura 9 – Conexão de células fotovoltaicas em série | 30 |
| Figura 10 – Esquema de funcionamento de um controlador de carga do tipo série.. | 35 |
| Figura 11 – Esquema de funcionamento de um controlador de carga do tipo shunt. | 35 |
| Figura 12 – Esquema de funcionamento de um controlador de carga com MPPT ... | 36 |
| Figura 13 – Ligação do controlador de carga..... | 37 |
| Figura 14 – Onda senoidal, modificada e quadrada..... | 39 |
| Figura 15 – String box, contendo: chave seccionadora, DPS, fusíveis e disjuntor.... | 40 |
| Figura 16 – Topologia tipo Y | 41 |
| Figura 17 – Localização geográfica do município de Paulistana..... | 47 |
| Figura 18 – Projeto da instalação elétrica | 49 |
| Figura 19 – DPS específico para sistemas fotovoltaico..... | 55 |
| Figura 20 – Representação do sistema fotovoltaico..... | 60 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Tensões nominais e VOC de módulos Standard..... | 31 |
| Tabela 2 – Potencial Fotovoltaico x Consumo Residencial entre regiões | 46 |
| Tabela 3 – Irradiação solar diária média na cidade de Paulistana, PI..... | 48 |
| Tabela 4 – Irradiação solar diária média na cidade de Paulistana, PI no plano inclinado. | 48 |
| Tabela 5 – Tabela de carga..... | 50 |
| Tabela 6 – Energia necessária diariamente | 51 |
| Tabela 7 – Tarifas em baixa tensão para o Grupo B de consumidores no mês de junho de 2018 | 62 |
| Tabela 8 – Fluxo de Caixa..... | 65 |
| Tabela 9 – Tarifa Social | 66 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 – Matriz de Energia Elétrica no Brasil | 25 |
| Gráfico 2 – Comparação entre variabilidade de irradiação solar média anual entre regiões | 26 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 APRESENTAÇÃO E OBJETIVOS | 16 |
| 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 17 |
| | |
| 2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA | 18 |
| 2.1 A CONVERSÃO FOTOVOLTAICA | 19 |
| 2.2 TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS | 22 |
| 2.2.1 Sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição (<i>on-grid</i>) | 22 |
| 2.2.2 Sistema híbrido | 23 |
| 2.2.3 Sistema fotovoltaico fora da rede de distribuição (<i>off-grid</i>) | 24 |
| 2.3 A ENERGIA SOLAR NO BRASIL | 25 |
| | |
| 3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÔNOMOS | 28 |
| 3.1 COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÔNOMO | 28 |
| 3.2 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS | 29 |
| 3.2.1 Características elétricas em <i>Standard Test Conditions</i> | 30 |
| 3.3 BATERIAS | 32 |
| 3.3.1 Sistemas de armazenamento de energia | 32 |
| 3.3.1.1 <i>Bateria de chumbo-ácido estacionária</i> | 33 |
| 3.3.2 Vida útil da bateria | 33 |
| 3.4 CONTROLADOR DE CARGA | 33 |
| 3.4.1 Funções do controlador de carga | 34 |
| 3.4.2 Formas de controle de carga | 34 |
| 3.4.2.1 <i>Controladores Série</i> | 35 |
| 3.4.2.2 <i>Controladores Shunt</i> | 35 |
| 3.4.2.3 <i>Controlador eletrônico PWM e MPPT</i> | 36 |
| 3.4.3 Modo de utilização do controlador de carga | 36 |
| 3.5 INVERSORES | 37 |
| 3.5.1 Características principais dos inversores | 37 |
| 3.5.2 Tipos de inversores | 38 |
| 3.5.2.1 <i>Inversores de onda quadrada e de onda senoidal modificada</i> | 39 |

| | |
|--|-----------|
| 3.5.2.2 <i>Inversor de onda senoidal pura</i> | 39 |
| 3.6 SISTEMA DE PROTEÇÃO ELÉTRICA..... | 39 |
| 3.6.1 Caixa de <i>strings</i> | 40 |
| 3.6.1.1 <i>Dispositivo de proteção contra surtos elétricos</i> | 40 |
| 3.7 CÁLCULO DA ENERGIA PRODUZIDA PELOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS..... | 42 |
| 3.7.1 Método da insolação | 42 |
| 3.7.2 Dimensionamento dos módulos | 43 |
| 3.7.3 Dimensionamento do banco de baterias | 43 |
| 4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO | 46 |
| 4.1 PROJETO..... | 49 |
| 4.1.1 Característica do sistema | 50 |
| 4.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA <i>OFF-GRID</i> | 51 |
| 4.2.1 Levantamento do consumo | 51 |
| 4.2.2 Dimensionamento do banco de baterias | 51 |
| 4.2.3 Dimensionamento dos módulos fotovoltaicos | 53 |
| 4.2.4 Dimensionamento do controlador de carga | 54 |
| 4.2.5 Dimensionamento da proteção..... | 54 |
| 4.2.5.1 <i>DPS</i> | 54 |
| 4.2.5.2 <i>Fusível</i> | 55 |
| 4.2.5.3 <i>Chave Seccionadora</i> | 56 |
| 4.3 DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES | 56 |
| 4.3.1 Pelo critério de máxima capacidade de condução | 56 |
| 4.3.2 Pelo critério da máxima queda de tensão | 58 |
| 4.3.3 Seção mínima admitida por norma..... | 58 |
| 4.4 DEFINIÇÃO DO SISTEMA..... | 59 |
| 5 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA E SOCIOAMBIENTAL PARA IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO <i>OFF-GRID</i>..... | 61 |
| 5.1 ORÇAMENTO ESTIMATIVO DO SISTEMA..... | 61 |
| 5.2 SIMULAÇÃO DE GASTO MENSAL COM ENERGIA ELÉTRICA | 62 |
| 5.2.1 Valor Presente Líquido e Taxa Interna de Retorno | 63 |
| 5.2.1.1 <i>Valor Presente Líquido (VPL)</i> | 63 |

| | |
|---|-----------|
| 5.2.1.2 <i>Taxa Interna de Retorno (TIR)</i> | 64 |
| 5.2.1.3 <i>Resultados</i> | 65 |
| 5.3 ANÁLISE SOCIOAMBIENTAL | 66 |
| 6 CONCLUSÃO E TÓPICOS PARA ESTUDOS FUTUROS..... | 68 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 70 |
| APÊNDICE A – DISTRIBUIÇÃO DOS CIRCUITOS ELÉTRICOS | 73 |
| APÊNDICE B – LOCALIZAÇÃO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS | 74 |
| APÊNDICE C – QUADRO DE CARGAS E DIAGRAMA UNIFILAR | 75 |
| APÊNDICE D – ORÇAMENTO ESTIMATIVO DO PROJETO DO SISTEMA <i>OFF-GRID</i> CONTEMPLANDO INSTALAÇÕES ELÉTRICAS | 76 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO E OBJETIVOS

A energia solar fotovoltaica vem ganhando destaque com passar do tempo devido à abundância em que é disponibilizada na crosta terrestre e dia após dia novas tecnologias são desenvolvidas para aumentar a eficiência na captação, armazenamento e transformação da luz solar em eletricidade. Também surge como uma rica fonte de energia renovável que serve como alternativa às fontes esgotáveis que prejudicam o meio ambiente.

O Brasil, como é admirado pelo seu clima tropical, possui os índices mais altos do mundo de irradiação média diária entre suas regiões e terá em 2024, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), aproximadamente 1,2 milhões de geradores de energia solar instalados em casas e empresas, o que representa 15% de toda a matriz energética do país e movimentará cerca de 100 bilhões de reais.

O nordeste brasileiro é uma das regiões com maior capacidade de geração solar no país, tendo como valor mínimo de irradiação comparado ao valor máximo de países da Europa, como a Alemanha. Apesar de toda esta aptidão natural de acesso à luz solar, grande parte da população vive em zonas rurais que não possuem infraestrutura para a chegada de energia elétrica em suas residências e como consequência, não possuem uma vida digna, ainda que haja a criação de uma Proposta de Emenda à Constituição (PEC) nº44, de 2017, que tornaria o acesso à energia elétrica um direito social para todos os brasileiros.

Este trabalho justifica-se pela alta demanda por fontes renováveis de energia no mundo e a aplicação das mesmas em causas sociais, como o fornecimento de energia à população carente. Tem como objetivo o dimensionamento de um sistema fotovoltaico *off-grid* para uma residência localizada no município de Paulistana, no Piauí, que possui cerca de 40% de sua população vivendo em região rural, e em específico uma análise de viabilidade econômica e socioambiental para a implantação deste sistema.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para alcançar o que foi proposto anteriormente, o presente trabalho está dividido em 6 capítulos.

O capítulo 1 faz uma apresentação do tema proposto, identificando os objetivos gerais, específicos e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 é destinado à energia fotovoltaica, apresentando os fundamentos da obtenção de energia elétrica a partir do Sol, bem como as partes constituintes deste processo, onde cada componente é apresentado em detalhes. Além disto, procura-se mostrar os tipos de sistemas destinados à captação e conversão da energia solar e a situação na qual o Brasil se encontra.

O capítulo 3 tem como finalidade apresentar um estudo aprofundado sobre o funcionamento do sistema *off-grid*, indicando as suas vantagens e desvantagens, servindo como ponto de partida para o capítulo 4 no qual é desenvolvido uma solução técnica aplicada ao município de Paulistana, no Estado do Piauí.

O capítulo 5 faz uma análise econômica e socioambiental do tipo de sistema que foi proposto e discutido no capítulo anterior.

E por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões bem como as sugestões de tópicos para estudos e desenvolvimentos futuros de outros trabalhos relacionados ao assunto proposto.

2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Desde o surgimento do planeta terra, o sol é indispensável para o fornecimento de energia à vida e responsável pelo ciclo da água. Com a presença de radiação solar e através do pigmento verde chamado clorofila, as plantas produzem glicose com o processo de fotossíntese e esta substância é responsável por alimentar não somente as plantas, mas também todos os seres vivos que as têm como alimento.

Dada a importância que o Sol sempre teve no que diz respeito aos seres vivos, o ser humano começou a utilizá-lo em seu favor, por exemplo, os gregos e romanos que conseguiram, com a arquitetura, projetar espaços aquecidos e iluminados pela luz solar. Somente em 1839 o efeito fotovoltaico foi descoberto pelo físico francês Alexandre-Edmond Becquerel, onde observou a diferença de potencial, na absorção de luz, causada nos terminais de uma célula eletroquímica.

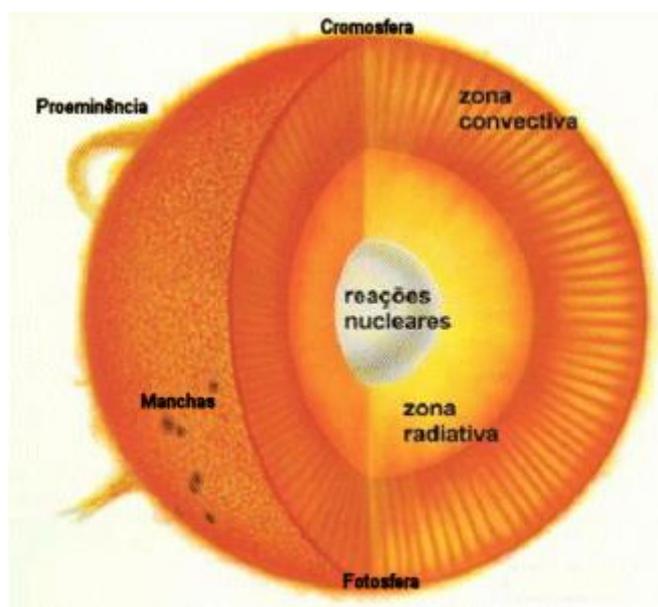
Em 1873, um cientista britânico chamado Willoughby Smith constatou que o elemento químico selênio quando exposto à luz, reagia à mesma e assim, em 1880, o inventor americano Charles Fritts criou a primeira célula fotovoltaica composta por selênio. Após um grande período sem avanços nas pesquisas sobre energia solar, apenas em 1950, cientistas norte-americanos nos Laboratórios Bells fizeram testes para saber como se comportava o silício em diversas situações, pois é o segundo elemento químico mais abundante na crosta terrestre. Descobriram que após o tratamento do silício com impurezas (processo chamado de dopagem), pôde-se criar uma junção PN, base para elementos semicondutores.

A partir do século XX, o avanço na tecnologia de materiais semicondutores teve grande importância para a indústria da energia solar no mundo. Esta forma de obter recursos energéticos do Sol se expandiu para diversas áreas, tendo aplicações em geração de eletricidade, setores militares e aeroespaciais dentre outros.

2.1 A CONVERSÃO FOTOVOLTAICA

O Sol é a principal fonte de energia, sendo a estrela mais próxima do planeta Terra e a que mais se tem conhecimento. É uma grande esfera de gás incandescente e no seu núcleo acontece a geração através de reações termonucleares. Sua estrutura é composta por reações nucleares, zona radiativa, zona convectiva, fotosfera, manchas, cromosfera e proeminência, conforme pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura do Sol



Fonte: Astronomia e Astrofísica - UFRGS (2018)

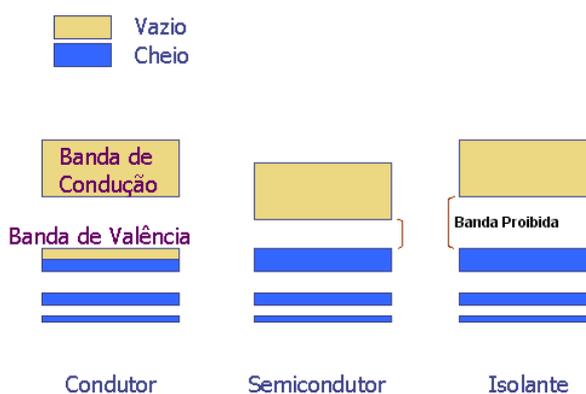
A fotosfera é a camada visível do sol, com 330 km de espessura e temperatura de 5785 Kelvin (K). Logo abaixo há a zona convectiva, responsável por transportar, através da convecção, a energia interna para a superfície solar. Embaixo desta zona existe a zona radiativa, local onde a energia caminha por fótons. O núcleo fica encarregado de produzir as reações nucleares que geram toda energia solar. A cromosfera não é visível, pois possui baixa radiação em relação à fotosfera e tem uma temperatura média de 15 mil K. A região mais externa é chamada de coroa e só pode ser vista durante os eclipses totais. (ASTRO UFRGS, 2018)

Para um estudo eficaz dos sistemas de energia fotovoltaica, é importante entender os fatores atribuídos ao Sol. A insolação é um fator determinante para indicar a quantidade de energia propagada por esta estrela em um determinado período e sua maior parte ocorre em uma região do espectro que possui comprimento de onda entre 0,25 e 4,0 μm . (JOHN BALFOUR et al., 2013). A insolação necessita de quatro fatores, sendo eles: a elevação do Sol em relação ao céu, a quantidade de radiação solar absorvida pela Terra, a radiação refletida de volta para o espaço e a constante solar, que segundo Pinho (2014), é a irradiância solar incidente num plano perpendicular à direção de propagação no topo da atmosfera terrestre.

A inclinação do eixo da Terra é de $23^{\circ} 27'$, aproximadamente. Como consequência, há as estações do ano onde para cada período existe maior ou menor índice de radiação solar e a duração dos dias, podendo ser mais longa ou mais curta. Em relação à variação anual dos raios solares sobre a Terra, há os solstícios e equinócios. Nos solstícios que ocorrem em 21 ou 22 de junho e 21 ou 22 de dezembro, o Sol atinge seu maior grau de afastamento angular sobre a linha do Equador, o que ocasiona dias mais longos. Já os equinócios ocorrem em 22 ou 23 de setembro e 21 ou 22 de março, onde os dias e as noites possuem mesma duração.

Com a energia propagada pelo Sol em forma de radiação, existe um fenômeno chamado efeito fotovoltaico. É a capacidade de certos materiais em transformar a energia obtida nos fótons pela radiação luminosa incidente em energia elétrica. Este efeito ocorre em materiais semicondutores que possuem características de um isolante e de um condutor e que permitem alterar seus atributos através de um processo chamado de dopagem. Os fótons com energia suficiente para superar o *gap* (banda proibida) conseguem “mover” os elétrons da banda de valência para a banda de condução, onde os elétrons conseguem se mover livremente pelo material. A Figura 2 mostra a diferença entre as bandas de energia entre condutor, semicondutor e isolante.

Figura 2 – Bandas de Energia



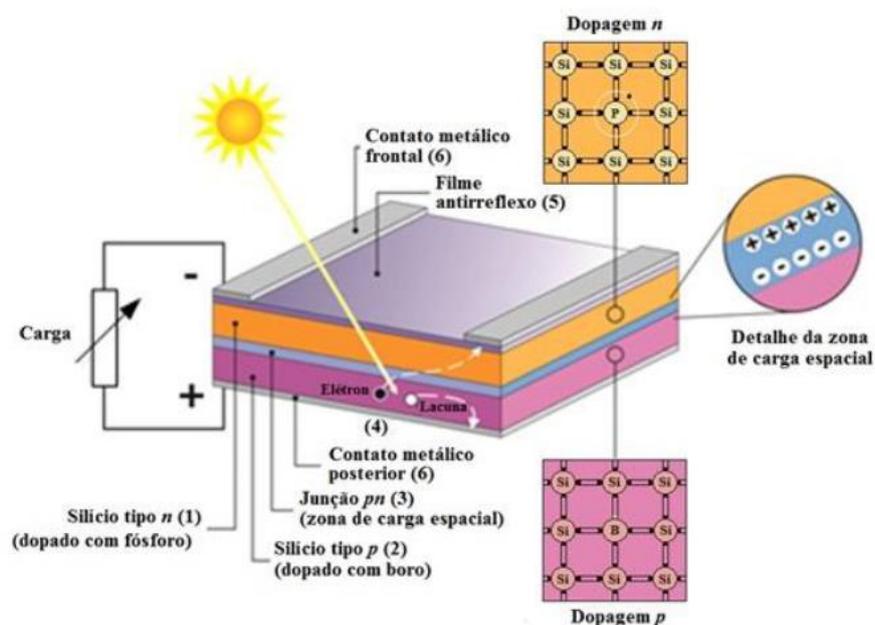
Fonte: UDEL (2018)

Entre os semicondutores utilizados para geração fotovoltaica o mais utilizado é o silício. Com o processo de dopagem, que consiste em introduzir reduzidas quantidades de outros materiais chamados de impurezas, foi possível alterar as propriedades deste semicondutor, formando assim uma junção PN.

Na junção PN ocorre a passagem dos elétrons do lado N (doador) para lado P (receptor), ocasionando a criação de um campo elétrico entre os lados, devido ao acúmulo de lacunas do lado doador e o acúmulo de elétrons do lado receptor. Com o equilíbrio uma zona com cargas positivas e negativas é criada e é denominada zona de depleção.

Ao expor uma junção PN a fótons que possuem uma energia maior que a banda proibida, ocorrerá a fotogeração de pares elétron-lacuna. Se isto ocorrer fora da zona de depleção, onde o campo não é nulo, estes serão separados e acelerados pelo campo elétrico e haverá a geração de uma corrente elétrica. Então, se um condutor for conectado às extremidades do material semicondutor, passará a conduzir elétrons. A Figura 3 mostra a estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício.

Figura 3 – Estrutura básica de uma célula fotovoltaica



Fonte: Manual de engenharia FV – CRESESB (2014)

2.2 TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

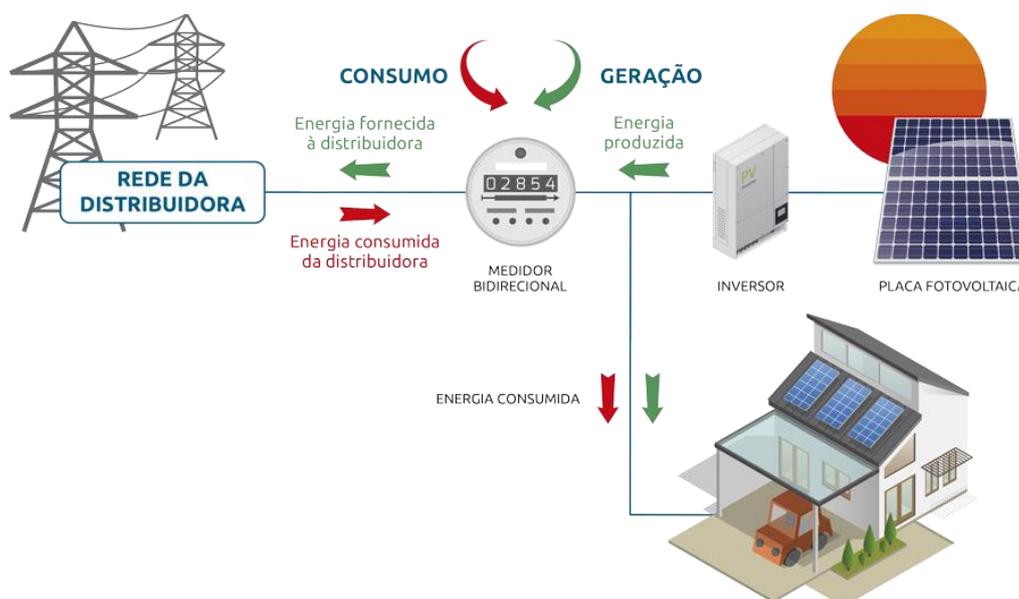
Existem atualmente três tipos principais de sistemas fotovoltaicos no mercado e estes dependem da finalidade do projeto a ser executado e a viabilidade econômica para a instalação.

2.2.1 Sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição (*on-grid*)

Neste tipo de sistema geralmente não há o uso de baterias para armazenamento. A energia gerada pelo conjunto solar é enviada para um inversor de corrente contínua para corrente alternada DC/AC de onda senoidal, que sincroniza o sinal de tensão e frequência com os valores nominais da rede de distribuição, como mostrado na Figura 4.

A vantagem desta instalação é a possibilidade de ter o abatimento na fatura, da energia gerada e entregue à rede de distribuição primária da concessionária. Isto é feito através de um medidor bidirecional, que consegue medir o fluxo energético de ambos os lados.

Figura 4 – Sistema *on-grid* com medidor bidirecional

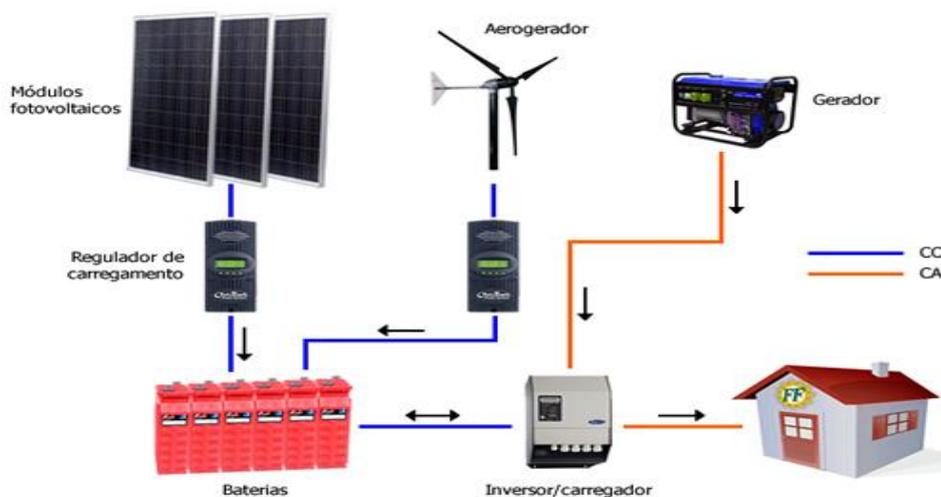


Fonte: INOVACARE (2018)

2.2.2 Sistema híbrido

Este sistema é comumente utilizado para conjuntos elétricos de médio e grande porte, onde há um número elevado de consumidores ou enorme demanda de potência. É composto, além de módulos fotovoltaicos, por aerogerador (energia eólica), gerador (diesel) etc. que possam suprir o carregamento das baterias no caso de um dia nublado. Este sistema é ilustrado em detalhes na Figura 5.

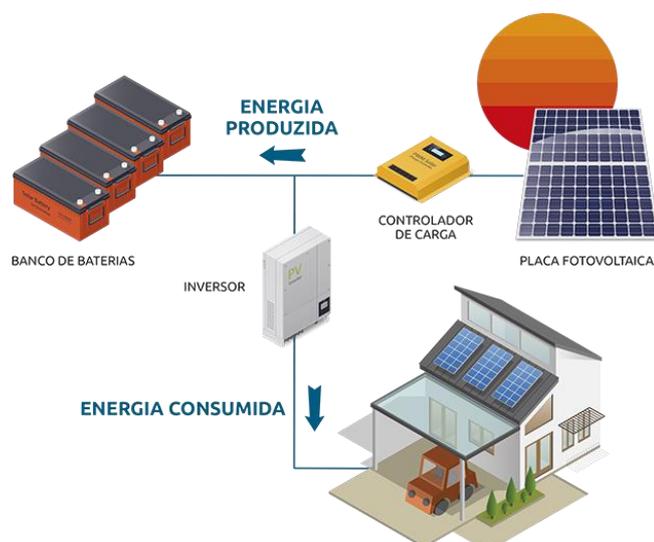
Figura 5 – Sistema híbrido



Fonte: FF SOLAR (2018)

2.2.3 Sistema fotovoltaico fora da rede de distribuição (*off-grid*)

É um sistema autônomo que não depende da rede elétrica e geralmente possui banco de baterias para armazenamento. Seu uso é recomendado para áreas remotas, onde não há rede de distribuição ou para locais onde as condições climáticas sejam favoráveis à sua instalação. O armazenamento precisa ser adequadamente dimensionado, para que não haja perda de carga. O esquema que ilustra o seu funcionamento é mostrado na Figura 6.

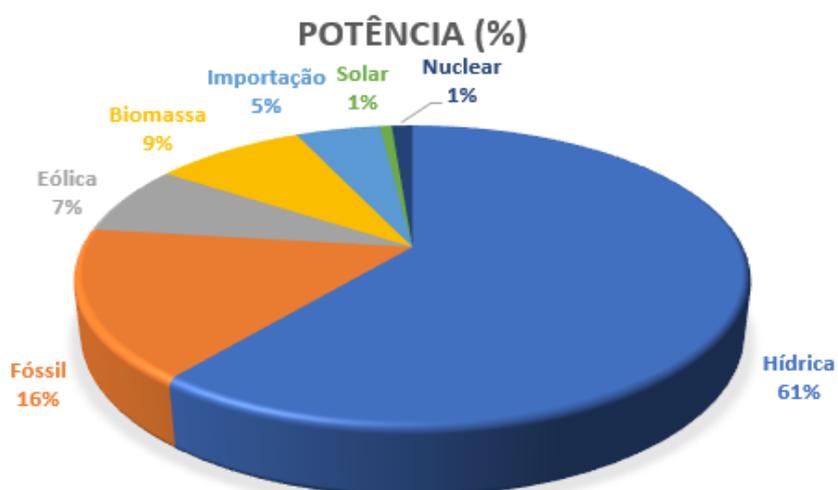
Figura 6 – Sistema *off-grid*

Fonte: INOVACARE (2018)

2.3 A ENERGIA SOLAR NO BRASIL

A energia elétrica produzida em território nacional é majoritariamente advinda de usinas hidroelétricas, conforme ilustrado no Gráfico 1 (ANEEL, 2018). Como as hidrelétricas e termelétricas são consideradas fontes firmes capazes de atender a demanda de carga do Sistema Interligado Nacional (SIN), fontes alternativas, como a fotovoltaica, dependem das condições meteorológicas do local onde são instaladas para obtenção de energia, como a disponibilidade de ventos fortes, no caso da eólica.

Gráfico 1 – Matriz de Energia Elétrica no Brasil



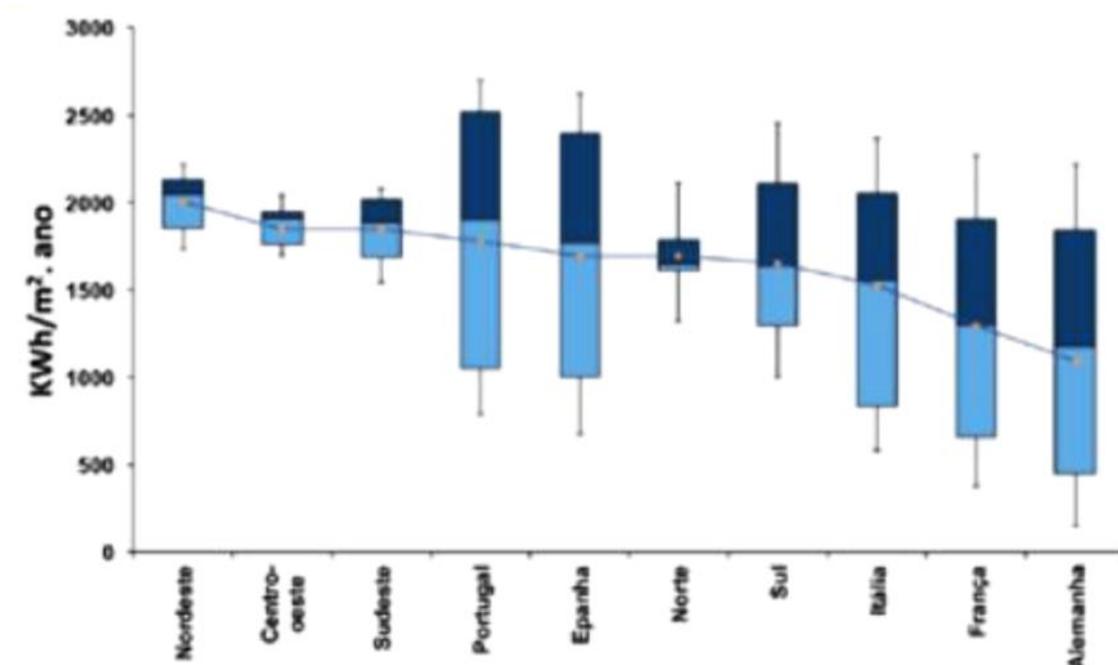
Fonte: ANEEL (2018)

O Brasil possui uma matriz energética muito limpa porque a predominância está na geração hídrica. Aos poucos este cenário está mudando, devido ao fato de ocorrerem diversas crises hídricas, o que acaba culminando o uso de outros tipos de geração que causa o aumento do preço do kWh.

Como o país possui um imenso território, tem altos índices de incidência de radiação solar, sendo o local ideal para a exploração deste tipo de energia em seus quatro cantos. Para se ter uma ideia, o local que possui a menor média anual de irradiação solar no Brasil corresponde a uma região na Alemanha que possui a maior média (O Setor Elétrico ed. 145, 2018).

Observando o Gráfico 2, uma das grandes vantagens que o Brasil tem para a exploração da energia solar é a baixa variabilidade de irradiação em suas diversas regiões, permitindo uma geração mais eficiente ao longo do tempo.

Gráfico 2 – Comparação entre variabilidade de irradiação solar média anual entre regiões



Fonte: O Setor Elétrico, ed. 145 (2018)

Juntando a isto, o Atlas Brasileiro de Energia Solar lançado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em 2017, mostra o valor médio diário de irradiação nas cinco regiões do Brasil, demonstrando que a região Nordeste possui o maior potencial solar, conforme ilustrado na Figura 7.

No início de janeiro de 2018 a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) informou que o Brasil havia ultrapassado a marca de 1 gigawatt de capacidade instalada em usinas de energia solar em operação, devido aos leilões realizados pelo governo brasileiro entre 2014 e 2015 (Nexo Jornal, 2018). Mesmo com toda esta capacidade, o presidente da ABSOLAR Rodrigo Sauaia (apud Nexo Jornal, 2018) disse que “o Brasil está mais ou menos 15 anos atrasado em relação ao setor fotovoltaico em outros países.”

Figura 7 – Valor médio diário de irradiação nas cinco regiões do Brasil



Fonte: O Setor Elétrico, ed. 145 (2018)

Segundo Pinho (2014), em relação aos módulos fotovoltaicos o país não apresenta atratividade para a indústria, já que precisaria de um mercado na casa de centenas de MWp para se tornar viável. Com isso, há poucas empresas atualmente no mercado de sistemas fotovoltaicos e o grande vilão é a falta de incentivo pelo governo brasileiro porque quando o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) foi instituído pela Lei nº 10.438/2002, a geração fotovoltaica não foi contemplada.

3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÔNOMOS

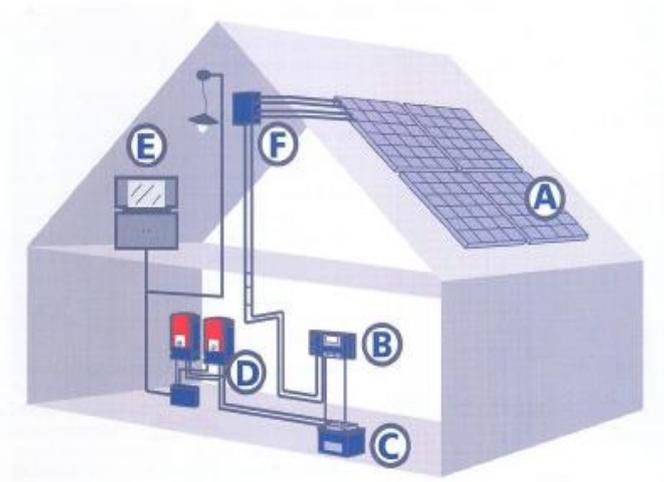
Conhecidos como sistemas isolados (*off-grid*), os sistemas autônomos devem ser empregados em locais onde não há distribuição de rede elétrica e são utilizados para guarnecer residências, zonas rurais, pousadas ou qualquer outro lugar onde não exista infraestrutura de transmissão e distribuição.

No Brasil, muitos lugares sofrem com a falta de eletricidade, em consequência de se localizarem em regiões isoladas. Para locais assim, o sistema fotovoltaico *off-grid* pode ser empregado e é uma excelente alternativa para geração local de eletricidade. Os sistemas fotovoltaicos demandam pouca manutenção, não geram barulho, são ecológicos e não precisam de abastecimento de combustível. Substituem geradores a diesel e possuem a vantagem de redução de ruídos e de poluição (VILLALVA, 2015).

3.1 COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÔNOMO

O sistema fotovoltaico autônomo é composto por uma placa ou agrupamento de placas fotovoltaicas, controlador de carga, bateria e dependendo da aplicação, um inversor de tensão contínua para tensão alternada, pelo motivo dos módulos fotovoltaicos gerarem tensão em corrente contínua. Portanto, precisam converter para tensão e corrente alternada, de acordo com a necessidade do projeto. Com o uso de baterias, é necessário atribuir ao sistema fotovoltaico um controlador de carga próprio para aplicações autônomas. Os blocos que compõem um sistema *off-grid* estão indicados na Figura 8.

Figura 8 – Blocos que compõem um sistema fotovoltaico isolado domiciliar



Fonte: Steca - CRESESB (2014).

Na representação da Figura 8, observa-se que os blocos dos componentes do sistema off grid correspondem a:

- A - Módulo fotovoltaico;
- B - Controlador de carga;
- C - Banco de baterias;
- D - Inversores;
- E - Cargas CA (dispositivos elétricos);
- F - Caixa de conexão.

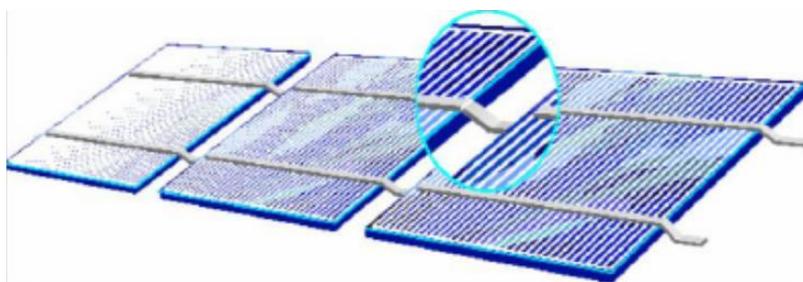
3.2 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Segundo Souza (2016), a base dos módulos fotovoltaicos são as células solares, constituídas por materiais semicondutores que são responsáveis pela conversão da energia solar em eletricidade. Uma única célula não possui a capacidade elevada de geração e faz-se necessária a associação entre elas em série, paralelo ou uma combinação de ambas, para que os valores necessários

de tensão e corrente sejam alcançados. Desta forma, os fabricantes juntam várias células e as encapsulam para formarem os módulos fotovoltaicos.

A geração de uma célula de silício cristalizado é baixa, produzindo tensões em torno de 0,46 a 0,56 V e uma corrente próxima de 30 mA/cm². Fabricantes que buscam um potencial de geração maior, frequentemente associam as células em série, como mostra a Figura 9, com o intuito de conseguir construir módulos com tensão nominal de 12 V, conectando aproximadamente entre 30 a 40 células.

Figura 9 – Conexão de células fotovoltaicas em série



Fonte: Blue Sol Energia Solar (2016)

3.2.1 Características elétricas em *Standard Test Conditions*

Para que não exista divergências entre fabricantes de módulos fotovoltaicos, uma parte importante para ser levada em consideração, são as características elétricas em *Standard Test Conditions* (STC), pois estabelecem parâmetros a serem seguidos e trazem confiança e eficiência na projeção de um sistema fotovoltaico.

A sigla STC (*Standard Test Conditions*) refere-se às condições padronizadas de teste do módulo. Todos fabricantes de módulos fotovoltaicos realizam testes nas mesmas condições, que são padronizadas por organismos internacionais de certificação. Assim é possível comparar módulos de diversos fabricantes de acordo com os mesmos critérios. (VILLALVA, 2015, p. 81)

Comercialmente há os módulos non-standard que são mais adequados aos sistemas fotovoltaicos conectados à rede, porém, para sistemas fotovoltaicos isolados, sugere-se a utilização de módulos standard porque possuem números padronizados de células. Possuindo as seguintes características:

Tensão nominal: Tensão projetada para o módulo gerar, diretamente ligada à quantidade de células fotovoltaicas, como mostra a Tabela 1:

Tabela 1 – Tensões nominais e V_{oc} de módulos Standard

| Número de células | Tensão nominal | Tensão em circuito aberto (V_{oc}) |
|--------------------------|-----------------------|--|
| 18 células | 6 V | 9,2 V |
| 36 células | 12 V | 17,4 V |
| 72 células | 24 V | 40,15 V |

Fonte: Blue Sol Energia Solar (2016)

Tensão de máxima potência (V_{MP}): Tensão máxima que o módulo gerará em seu ponto de máxima potência.

Tensão de circuito aberto (V_{oc}): Tensão máxima que o módulo consegue fornecer com o circuito aberto.

Corrente de curto-circuito (I_{sc}): Corrente máxima fornecida pelo módulo suportada quando os terminais estão em curto, geralmente 5% da corrente máxima.

Corrente de máxima potência (I_{MP}): Corrente no ponto de máxima potência, fornecida nos terminais do módulo.

Potência máxima (P_{MP}): Máxima potência fornecida pelo módulo na condição padronizada de teste pelo STC. É o produto da corrente de máxima potência (I_{MP}) pela tensão de máxima potência (V_{MP}).

Eficiência do módulo (η): Padronizados por organizações nacionais, como o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) no Brasil

ou internacionais como o STC, é a razão entre a potência de entrada e a potência de saída.

3.3 BATERIAS

Em sistemas autônomos, defendido por Pinho (2014), torna-se inevitável a utilização de dispositivos de armazenamento, por causa da geração e do consumo de energia não coincidirem, assim como a radiação solar que pode sofrer variações ao longo do dia e ser nula ou falha, por causa de dias chuvosos ou nublados. A existência de uma bateria proporciona fornecimento constante de energia para o consumidor e evita também desperdícios de energia produzida no momento que o consumo é baixo.

Devido à tensão de saída do módulo não ser constante e poder variar, as baterias funcionam como uma conexão entre o módulo e o restante do sistema, fornecendo uma tensão de serviço constante às cargas CC ou inversores CC/CA.

3.3.1 Sistemas de armazenamento de energia

Para formação de bancos de baterias, é necessário realizar uma associação em série ou em paralelo, onde em série conseguirá um aumento da tensão e em paralelo um aumento da corrente, que possibilita o fornecimento de mais corrente elétrica com a mesma tensão.

Empregando uma conexão em série a tensão do banco de baterias é somada e a corrente de uma única bateria é a mesma de todo o conjunto. Ela é utilizada em bancos para fornecer maiores tensões e as baterias normalmente são encontradas no mercado pelos valores de tensão de: 12 V, 24 V e 48 V.

No mercado atual existem diversos tipos de baterias que podem ser empregadas para cada finalidade, sendo que o dimensionamento incorreto pode acabar encarecendo o projeto, Além de acarretar em um sistema ineficiente.

3.3.1.1 *Bateria de chumbo-ácido estacionária*

A bateria de chumbo-ácido estacionária é comumente utilizada em sistemas fotovoltaicos autônomos porque possui um custo baixo, vida útil relativamente longa e é facilmente encontrada comercialmente. É construída para suportar correntes constantes por longos períodos de tempo e projetada por placas metálicas mais grossas podendo até mesmo suportar sobrecorrentes, porém é feita para trabalhar com correntes baixas e frequentes.

Qualquer sistema de armazenamento fotovoltaico necessita de lugares adequadamente destinados para baterias, sendo estes locais ventilados e seguros ou até mesmo caixas seladas que permitam a contenção contra vazamentos e ventilação e que a manutenção seja restrita para profissionais qualificados. (BALFOUR, 2016).

3.3.2 Vida útil da bateria

Como assegura Villalva (2015), a determinação da vida útil da bateria é definida pelo ciclo de carga e descarga. Neste contexto, fica claro que o máximo valor de ciclos depende do percentual de aproveitamento ou um ciclo inteiro de carga e descarga. O mais importante, contudo, é constatar que em cada ciclo existe um desgaste das placas metálicas que são imersas na solução ácida. Já que há consumo do material conforme a sua utilização, não é exagero afirmar que a temperatura de trabalho é um fator a ser observado também. Assim, deve-se atribuir métodos para conseguir obter uma vida útil maior, tal como manter a carga quando não está em utilização, controlar a temperatura no ambiente da instalação e o uso indispensável do controlador de carga.

3.4 CONTROLADOR DE CARGA

Aos sistemas fotovoltaicos autônomos deve ser atribuída a utilização de um controlador ou regulador de carga. O controlador de carga é instalado entre o painel fotovoltaico e a bateria e é responsável pela gestão da carga e por impedir o descarregamento excessivo, além de evitar que a bateria seja sobrecarregada.

São indispensáveis por atuarem como um dispositivo de proteção, protegendo o sistema de cargas e descargas excessivas porque no caso de falha a bateria poderá sofrer danos irreversíveis. Controladores mais avançados possuem o recurso de rastreamento do ponto máximo de potência do módulo ou do conjunto de módulos fotovoltaicos, maximizando ainda mais a eficiência do sistema. (PINHO, 2014)

3.4.1 Funções do controlador de carga

O controlador de carga apresenta as seguintes funções:

Proteção contra sobrecarga: O controlador de carga é encarregado de forma constante a monitorar os valores de tensões nos terminais da bateria, impedindo que a mesma acabe sobrecarregando.

Proteção contra descarga excessiva: Conhecida como função de desconexão com baixa tensão, a proteção de descarga excessiva abre o circuito e impede o consumo de energia, quando atingidos níveis cruciais de carga. Essa interrupção normalmente acontece próximo dos 10,5 V nas baterias de chumbo-ácido estacionária.

Gerenciamento da carga da bateria: Alguns controladores possuem a capacidade de gerenciar o perfil de carga de cada tipo de bateria. Essa característica é fornecida por um controlador de carga mais avançado.

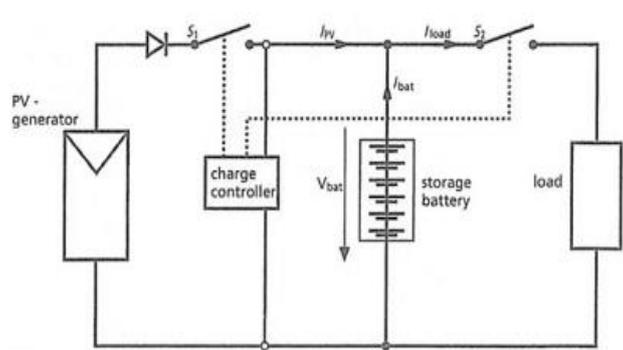
3.4.2 Formas de controle de carga

Os controladores podem se diferenciar pela forma que gerenciam a carga e são classificados como: Série, Shunt ou Controladores com MPPT (*Maximum Power Point Tracking* – rastreamento do ponto de máxima potência).

3.4.2.1 Controladores Série

Quando as baterias atingem níveis de máxima tensão de carga, o controlador as desconecta, fazendo com que a carga seja alimentada somente pelos módulos. Quando existir uma insuficiência tanto do conjunto de armazenamento quanto dos módulos, o controlador abrirá as duas chaves e protegerá a carga de sobretensões, conforme indicado na Figura 10.

Figura 10 – Esquema de funcionamento de um controlador de carga do tipo série

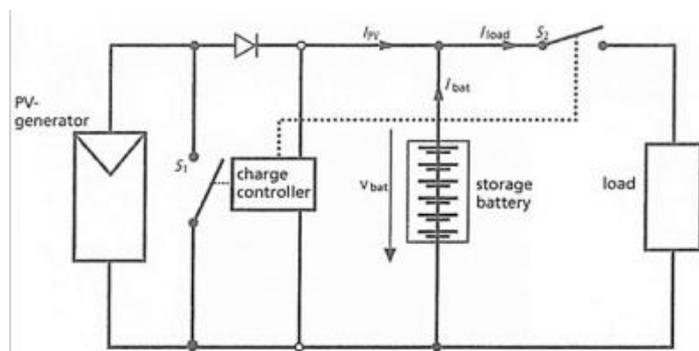


Fonte: Blue Sol Energia Solar (2016)

3.4.2.2 Controladores Shunt

Muito similar ao controlador série e difere apenas nas posições das chaves, onde agora ficam em paralelo com o módulo e as baterias. Ao atingir os níveis de carga máxima na bateria, a chave fecha e interrompe o carregamento da mesma quando alimentada pelo módulo fotovoltaico, de acordo com a Figura 11.

Figura 11 – Esquema de funcionamento de um controlador de carga do tipo shunt

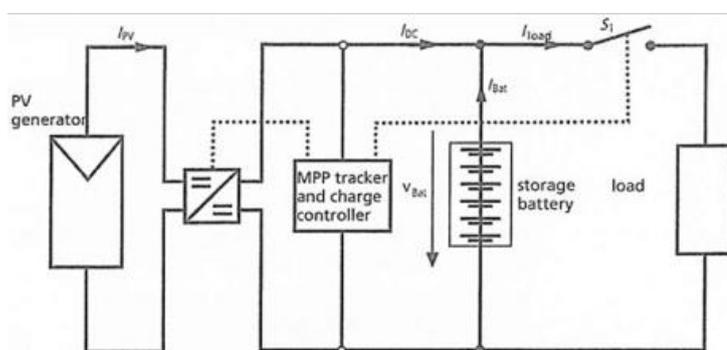


Fonte: Blue Sol Energia Solar (2016)

3.4.2.3 Controlador eletrônico PWM e MPPT

Por último, o controlador com MPPT é tecnologicamente mais avançado e é o mais caro disponível no mercado porque ele possui o recurso PWM (*Pulse Width Modulation* – modulação de largura de pulso) que aumenta a vida útil da bateria e a eficiência do circuito. Além disto, com o MPPT é possível o sistema trabalhar no seu ponto máximo de potência, qualquer que seja a condição de radiação solar ou temperatura de trabalho do módulo, conforme mostra a Figura 12.

Figura 12 – Esquema de funcionamento de um controlador de carga com MPPT

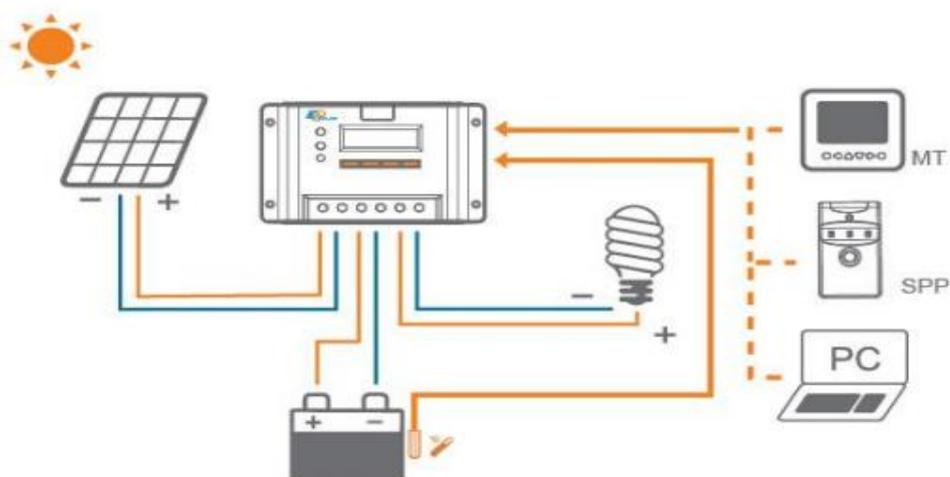


Fonte: Blue Sol Energia Solar (2016)

3.4.3 Modo de utilização do controlador de carga

Como ilustrado na Figura 13, todos os componentes do sistema devem ser conectados ao controlador e um módulo fotovoltaico ou um dispositivo consumidor alimentado por tensão contínua jamais deve ser ligado diretamente na bateria. Essa conexão entre o controlador e o consumidor necessita ser feita, pois, ao atingir níveis elevados de carga o controlador tem a função de chavear o circuito, desconectando-o do mesmo. Caso seja feita uma ligação direta, perde-se o recurso da proteção. (SOUZA, 2016).

Figura 13 – Ligação do controlador de carga



Fonte: Minha Casa Solar (2018)

3.5 INVERSORES

Os inversores transformam a corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). Neste contexto, para Balfour (2016), fica claro que empregar o inversor é necessário, para que assim seja possível uma maior aplicação de dispositivos que necessitem de corrente alternada. O dimensionamento está ligado com a quantidade de dispositivos que necessitam de corrente alternada, dependendo da potência do sistema a ser alimentado. Importante ressaltar que os sistemas isolados utilizam um inversor específico e é diferente dos sistemas que interagem com a rede de distribuição.

3.5.1 Características principais dos inversores

Os inversores apresentam as seguintes características técnicas, tais como:

Potência nominal: Potência que o inversor é capaz de fornecer. É determinada de acordo com os equipamentos elétricos a serem alimentados.

Potência máxima: Capacidade de fornecer corrente em situações de sobrecarga. Torna-se útil para dimensionamento de motores, devido à sua alta corrente elétrica na partida.

Tensão de entrada V_{cc} : são valores padronizados para entrada do inversor, de: 12 V, 24 V e 48 V. Os mesmos valores específicos para controladores de carga e baterias.

Tensão de saída V_{CA} : Tensão de saída em corrente alternada que é fornecida pelo inversor. Deve ser escolhida de acordo com a aplicação. Comercialmente encontram-se tensões de 110 V e 220 V.

Frequência de saída: Valor da frequência em tensão alternada necessária para os equipamentos, em 60 Hz ou 50 Hz.

Regulação de tensão: Variação relativa em percentual da tensão de saída do inversor quando o consumidor está ligado.

Eficiência: É a relação entre a potência de saída e a potência de entrada do inversor.

Forma de onda de saída: Forma de onda da tensão alternada produzida pelo inversor e é encontrada no mercado em três tipos: onda senoidal pura, onda senoidal modificada e onda quadrada.

Distorção harmônica: Parâmetro que mede a pureza da tensão alternada, indicando a presença de componentes harmônicas.

3.5.2 Tipos de inversores

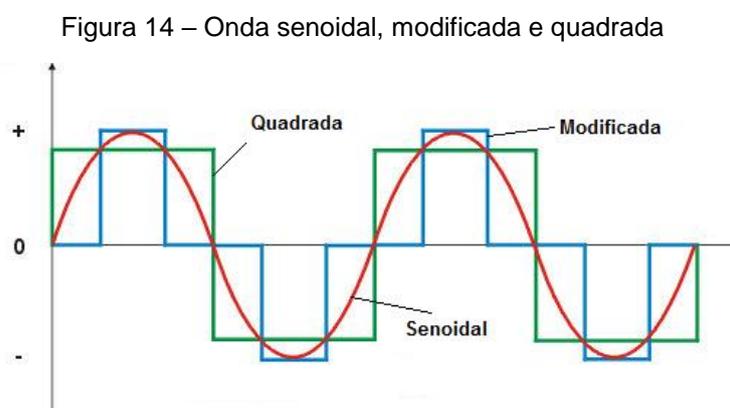
Os inversores podem se diferenciar pelos seus principais tipos e são classificados como:

3.5.2.1 Inversores de onda quadrada e de onda senoidal modificada

Comercialmente mais baratos, produzem ondas muito mais distorcidas quando comparadas com a onda senoidal pura e possuem grande quantidade de harmônicas indesejadas. São comumente empregados para alimentação de eletrodomésticos, lâmpadas e aparelhos eletrônicos que não são sensíveis à distorção de tensão e conseguem operar normalmente. Não são recomendados para aplicações de equipamentos críticos que exigem uma alta confiabilidade e qualidade.

3.5.2.2 Inversor de onda senoidal pura

Estes inversores são dispositivos que conseguem produzir um formato de onda senoidal quase perfeita com baixas distorções, indicados para alimentação de dispositivos eletrônicos que necessitam de confiabilidade, porém são mais caros que de inversores de onda quadrada ou senoidal modificada, a figura 14 ilustra as formas de onda senoidal pura, quadrada e modificada.



Fonte: Sol Central (2018)

3.6 SISTEMA DE PROTEÇÃO ELÉTRICA

A instalação de um sistema fotovoltaico não se restringe apenas ao dimensionamento do número de módulos e inversores, com o intuito de atingir o consumo necessário para suprir a demanda de uma residência. Seja qual for a instalação elétrica, deve-se tomar cuidados com a proteção de equipamentos que compõem o sistema elétrico e a segurança das pessoas, minimizando ou

até mesmo eliminando eventuais riscos ligados à eletricidade. (RESENDE, 2018).

3.6.1 Caixa de *strings*

Para uma melhor proteção do sistema fotovoltaico, utiliza-se a instalação de uma caixa denominada *string box*, geralmente localizada próximo aos inversores. Nela são instalados fusíveis ou disjuntores, chaves seccionadoras e dispositivos de proteção contra surtos (DPS), que tem o objetivo de proteger tanto o lado de corrente contínua (entrada do inversor), quanto ao lado de corrente alternada (saída do inversor para o quadro de distribuição). Sua representação está na Figura 15.

Figura 15 – *String box*, contendo: chave seccionadora, DPS, fusíveis e disjuntor.



Fonte: Energia Solar PHB (2018)

3.6.1.1 *Dispositivo de proteção contra surtos elétricos*

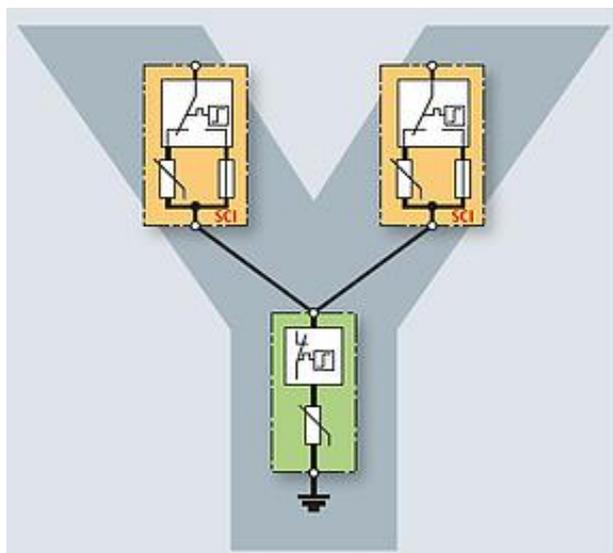
O Brasil é o país com maior incidência de raios no mundo, porém como afirma Santos (2017), a norma ABNT NBR 5419:2015 não obriga a utilização dos DPS. Obrigatório é garantir que, para dada edificação, o risco existente de perdas de vidas humanas, serviços públicos, bens de valor cultural e prejuízos econômicos fiquem abaixo de um valor considerado, pelos critérios da norma e assim assegurar que os surtos de correntes ou de sobretensões transitórias não ocasionem prejuízos e perdas irreparáveis. A norma ABNT NBR 5410:2004, justifica a adoção obrigatória do DPS em caso de a edificação estar situada em

regiões com mais de 25 dias de trovoadas por ano, e serem alimentadas de forma total ou parcial por linhas aéreas.

Deve ser provida proteção contra sobretensões transitórias, com o uso dos meios indicados em 5.4.2.1.2, nos seguintes casos: a) quando a instalação for alimentada por linha total ou parcialmente aérea, ou incluir ela própria linha aérea, e se situar em região sob condições de influências externas AQ2 (mais de 25 dias de trovoadas por ano); b) quando a instalação se situar em região sob condições de influências externas AQ3. (NBR 5410:2004, item 5.4.2.1.1, p 69)

Num sistema fotovoltaico deve-se instalar este equipamento na parte CC no interior da *string-box*, e ainda Segundo Moura (2017), a instalação de DPS fotovoltaicos precisa estar em conformidade com a norma europeia EN 50539: *low-voltage surge protective devices* que atribui a obrigatoriedade da desconexão do DPS através do rompimento de um fusível interno e da topologia tipo Y, correspondendo na aplicação de dois DPS em série, ilustrado na Figura 16, onde devido essa aplicação resulta: no aumento da impedância do sistema, a impossibilidade do curto ser mantido na atuação de DPS e o aumento da resistência em caso falha de isolamento do sistema fotovoltaico.

Figura 16 – Topologia tipo Y



Fonte: NORTHSUN Engenharia (2017)

3.7 CÁLCULO DA ENERGIA PRODUZIDA PELOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Para dimensionar o sistema fotovoltaico é fundamental ter ciência da quantidade de energia que é produzida diariamente pelos módulos. Desta forma, são atribuídos métodos os quais podem ser utilizados para aplicar em um projeto, conhecendo as condições de insolação do local e as características do módulo utilizado.

3.7.1 Método da insolação

Esse método pode ser aplicado a partir de dados sobre a energia provinda do Sol disponível no local da instalação, A energia solar diária é determinada na forma de insolação e expressa em watt-hora por metro quadrado por dia ($\text{Wh/m}^2/\text{dia}$). Os valores diários de insolação de uma determinada região geográfica podem ser encontrados a partir de mapas solarimétricos disponíveis em sites e livros de instituições dedicadas à realizar medições de insolação, como é o caso do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), no qual foram utilizados os dados obtidos para realização deste trabalho, disponíveis no site <http://www.cresesb.cepel.br/>.

O método da insolação para calcular energia produzida é considerado confiável, quando são utilizados controladores de cargas com o recurso de MPPT, pois neste método a produção de energia fica limitada à capacidade do sistema e tem como base a energia solar disponível diariamente para cálculo, onde se espera extrair o máximo do sistema projetado.

Os valores disponíveis em mapas solarimétricos referem-se a uma média de insolação anual, onde os valores diários de insolação são somados e divididos pelo número de dias, sendo estes iguais a 365 (um ano). Porém, por se tratar de uma média anual, no verão os valores de insolação são maiores e no inverno podem diminuir drasticamente. Devido a isso, pode haver uma falta de energia no inverno e excesso no verão, tornando o sistema ineficiente.

Desta forma, para a realização dos cálculos de forma que haja um dimensionamento confiável, deve-se utilizar os dados do mês com a pior insolação do ano, para garantir o abastecimento até nos meses com menores índices. (VILLALVA, 2015).

3.7.2 Dimensionamento dos módulos

Para o dimensionamento do módulo fotovoltaico é preciso levar em consideração duas de suas características, que são: dimensões e eficiência. Esses valores são fornecidos pelo fabricante.

Assim, os valores de energia fotovoltaica produzida pelo módulo são calculados a partir da Equação 1:

$$E_p = E_s \times A_M \times \eta_M \quad (1)$$

Sendo:

E_p = Energia produzida pelo módulo diariamente [Wh];

E_s = Insolação diária [Wh/m²/dia];

A_M = Área da superfície do módulo [m²];

η_M = Eficiência do módulo

O número total de módulos necessários para o sistema é calculado de acordo com a Equação 2:

$$N = \frac{E_C}{E_P} \quad (2)$$

Sendo:

N = Numero de módulos empregados no sistema;

E_C = Energia consumida [Wh];

E_P = Energia produzida pelo módulo diariamente [Wh].

3.7.3 Dimensionamento do banco de baterias

O número de baterias em série pode ser determinado pela Equação 3:

$$N_{BS} = \frac{V_{BANCO}}{V_{BAT}} \quad (3)$$

Em que:

N_{BS} = Número de baterias ligadas em série;

V_{BANCO} = Tensão do banco de baterias [V];

V_{BAT} = Tensão da bateria utilizada [V].

A capacidade do banco de baterias é determinada de acordo com a Equação 4:

$$C_{BANCO} = \frac{E_A}{V_{BANCO}} \quad (4)$$

Em que:

C_{BANCO} = Corresponde à capacidade de carga do banco de baterias em ampère.hora [Ah];

E_A = Energia de armazenamento no banco de baterias [Wh];

V_{BANCO} = Tensão do banco de baterias [V].

A energia armazenada é calculada pela Equação 5:

$$E_A = \frac{E_C}{P_D} \quad (5)$$

Em que:

E_A = Energia de armazenamento no banco de baterias [Wh];

E_C = Energia consumida [Wh];

P_D = Profundidade de descarga permitida.

O número de conjuntos paralelos é determinado pela Equação 6:

$$N_{BP} = \frac{C_{BANCO}}{C_{BAT}} \quad (6)$$

Em que:

N_{BP} = Número de conjuntos de baterias ligadas em paralelo;

C_{BANCO} = Capacidade de carga do banco de baterias em ampère.hora [Ah];

C_{BAT} = Capacidade de carga de cada bateria em ampère-hora [Ah].

A energia elétrica consumida por um aparelho eletroeletrônico é calculada por:

$$E_C = P \times T \quad (7)$$

Em que:

E_C = Energia consumida [Wh];

P = Potência em watts [W];

T = Tempo de uso em horas [h].

4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

A energia elétrica produzida no nordeste brasileiro até então vinha majoritariamente de usinas hidrelétricas. Porém, com as recentes crises hídricas e anos de baixa pluviosidade, este cenário está mudando e favorecendo as energias renováveis, tal como a fotovoltaica.

O potencial solar na região nordeste é um dos maiores em território nacional, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e é apresentado na Tabela 2. Os dados representam uma relação entre o potencial fotovoltaico residencial e o consumo residencial anual no ano de 2013, de acordo com a região. Nota-se que o Nordeste possui a maior relação percentual do país com destaque para o estado do Piauí que possui o maior valor da região nordeste.

Tabela 2 – Potencial Fotovoltaico x Consumo Residencial entre regiões

| Região | Potencial Fotovoltaico Residencial (GWh/ano) | Consumo Residencial Anual 2013 (GWh) | Potencial Fotovoltaico/Consumo Residencial |
|--------------|--|--------------------------------------|--|
| BRASIL | 287.505 | 124.896 | 230% |
| SUL | 43.844 | 19.671 | 223% |
| SUDESTE | 123.122 | 63.947 | 193% |
| CENTRO-OESTE | 23.696 | 9.902 | 239% |
| NORTE | 19.403 | 7.413 | 262% |
| NORDESTE | 77.440 | 23.963 | 323% |
| Alagoas | 4.424 | 1.227 | 361% |
| Bahia | 20.674 | 6.144 | 336% |
| Ceará | 12.527 | 3.751 | 334% |
| Maranhão | 8.935 | 2.563 | 349% |
| Paraíba | 5.738 | 1.603 | 358% |
| Pernambuco | 12.352 | 4.563 | 271% |
| Piauí | 4.862 | 1.328 | 366% |
| Rio G. Norte | 4.862 | 1.805 | 269% |
| Sergipe | 3.066 | 979 | 313% |

Fonte: Caderno Setorial – Banco do Nordeste (2016)

O Piauí hoje abriga o maior parque solar da América Latina, nomeado de Parque Solar Nova Olinda, na cidade de Ribeira do Piauí, a 380 km de Teresina, com área de 690 hectares e com 930 mil placas solares. (G1, 2017). Mesmo com toda

esta infraestrutura de geração, muitas famílias que moram em regiões afastadas do centro urbano sofrem com a falta de estrutura para a chegada de energia elétrica no local, o que acaba criando a necessidade da elaboração de sistemas fotovoltaicos isolados da rede para atender este público, já que o custo para levar uma linha de transmissão até estes pequenos consumidores seria inviável.

O município escolhido para a realização do projeto fotovoltaico proposto neste trabalho é o de Paulistana, localizado no sudeste do Estado do Piauí, situado a cerca de 450 km de distância da capital, conforme a Figura 17.

Figura 17 – Localização geográfica do município de Paulistana



Fonte: Wikipédia (2018)

Possui as seguintes coordenadas geográficas:

Latitude: 08° 08' 37" S

Longitude: 41° 08' 59" W

Em conformidade com o último censo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2010, a cidade possuía 19785 habitantes e mais de 40% da população trabalha em zona rural.

Segundo o programa Sun Data criado pelo CRESESB, que tem como objetivo calcular a irradiação solar diária média mensal de qualquer local do território nacional, a cidade de Paulistana possui a irradiação apresentada na Tabela 3. Percebe-se que a média para este município está acima da média para a região nordeste, assim como o mês de pior irradiação que não deixa a desejar, conforme ilustrada na Figura 7 do capítulo 2.

Tabela 3 – Irradiação solar diária média na cidade de Paulistana, PI

| Município | UF | Irradiação solar diária média [kWh/m ² .dia] | | | | | | | | | | | | Média |
|------------|----|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez | |
| Paulistana | PI | 5,90 | 5,67 | 5,74 | 5,40 | 5,14 | 5,03 | 5,42 | 6,23 | 6,56 | 6,62 | 6,44 | 6,12 | 5,86 |

Fonte: Sun Data – CRESESB, Adaptada (2018)

Já no plano inclinado estes valores aumentam e confirmam que o município tem muito a ser desenvolvido com a tecnologia de energia solar fotovoltaica com sistemas isolados da rede elétrica, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Irradiação solar diária média na cidade de Paulistana, PI no plano inclinado.

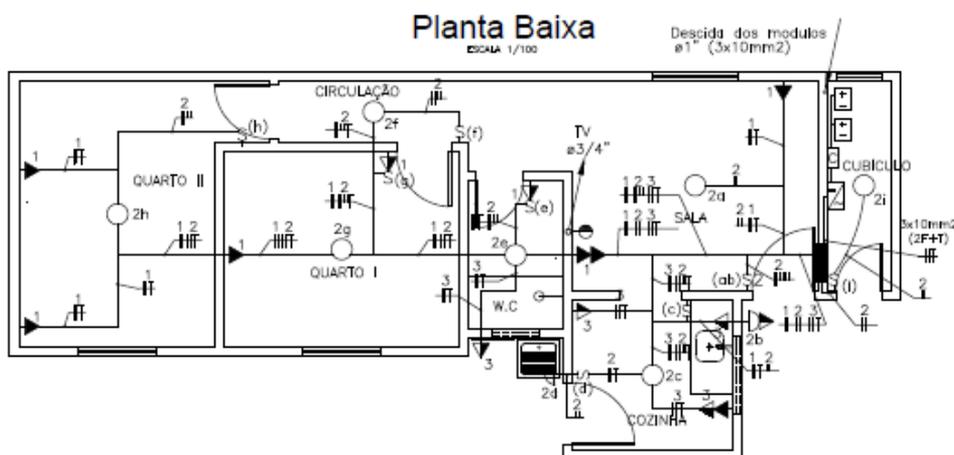
| Irradiação solar média mensal [kWh/m ² .dia] | | |
|---|------------|-------|
| Ângulo | Inclinação | Média |
| Plano Horizontal | 0° N | 5,86 |
| Ângulo igual a latitude | 8° N | 5,90 |
| Maior média anual | 8° N | 5,90 |
| Maior mínimo mensal | 10° N | 5,90 |

Fonte: Sun Data – CRESESB (2018)

4.1 PROJETO

O projeto de uma instalação fotovoltaica autônoma será desenvolvido a partir de uma planta arquitetônica do Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo (SINDUSCON), para habitações populares do programa social Minha Casa Minha Vida da Caixa Econômica Federal, conforme ilustrado na Figura 18. Estas residências possuem área de 52m² com 2 quartos, 1 banheiro, sala e cozinha e são construídas para 4 moradores. Esse tipo de planta foi escolhido por se tratar de uma moradia popular e convencional, atendendo aos requisitos que o projeto estabelece. Para fazer o levantamento de carga e consumo da residência, é importante desenvolver o projeto elétrico, apresentado em detalhes nos Apêndices A e C.

Figura 18 – Projeto da instalação elétrica



Fonte: SINDUSCON (2018)

Para o projeto elétrico foi realizado o levantamento de carga, representado na Tabela 5 a seguir. Com os circuitos e suas respectivas fiações e disjuntores.

Tabela 5 – Tabela de carga

| Circuito | Lâmpada (W) | | Tomadas (W) | | Total (W) | Disjuntor (A) | Fiação (mm ²) |
|--------------------------|-------------|--|-------------|-----|-----------|---------------|---------------------------|
| | LED-12 | | 100 | 600 | | | |
| 1 | | | 10 | | 1000 | 10 | 1,5 |
| 2 | 8 | | | | 96 | 6 | 2,5 |
| 3 | | | 2 | 3 | 2000 | 16 | 2,5 |
| 4 | Reserva | | - | - | - | 10 | - |
| Potência total instalada | | | | | 3096 | 25 | 10 |

Fonte: Autoria própria (2018)

4.1.1 Característica do sistema

Cada sistema fotovoltaico possui suas particularidades, onde há a necessidade de determinar os componentes que devem ser empregados. Desta forma, os pontos que devem ser considerados no dimensionamento de um sistema fotovoltaico são:

- Utilização de módulos de 36 células, com saída de 12 V com potência de pico entre 140 W e 150 W, pois são mais apropriados para sistemas fotovoltaicos autônomos;
- Uso de baterias de chumbo ácido de 12 V, por possuírem um custo menor e serem acessíveis comercialmente, com descarga máxima de 50% possibilitando uma vida útil maior;
- Uso de controlador de carga com PWM, por aumentar a vida útil da bateria e pela eficiência do circuito;
- O banco de baterias deve ter uma autonomia de um dia de uso;
- A tensão de alimentação da instalação dos aparelhos é de 220 V e a tensão do banco de baterias é de 24 V para que haja uma redução na corrente do projeto, resultando em uma economia no dimensionamento do banco de baterias.

4.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA *OFF-GRID*

4.2.1 Levantamento do consumo

Considerando o fator de demanda igual a 1 e representando o pior caso, foi feito o levantamento do consumo dos eletrodomésticos presentes em uma residência convencional, conforme apresentado na Tabela 6, quantificando a energia necessária diariamente para alimentação da residência.

Tabela 6 – Energia necessária diariamente

| Aparelhos | Potencia (W) | Tempo de utilização diária | Números de dias de uso | Consumo diário em Wh |
|-----------------------|--------------|----------------------------|------------------------|----------------------|
| Refrigerador | 200 | 10h (*) | 30 | 2000 |
| Iluminação LED | 96 | 8h | 30 | 768 |
| Televisor LED 32" | 60 | 5h | 30 | 300 |
| Lavadora de roupa 8kg | 250 | 1h | 15 | 250 |
| Ferro de passar | 1000 | 1h | 15 | 1000 |
| Micro-ondas | 1300 | 20min | 30 | 433 |
| Total (W) | 2906 | | | |
| Energia consumida: | | | | 4751 |
| Consumo mensal: | | | | 123780 |

(*) O tempo médio de utilização para geladeiras e freezers se refere ao período em que o compressor fica ligado para manter o interior na temperatura desejada.

Fonte: Aatoria própria (2018)

4.2.2 Dimensionamento do banco de baterias

O dimensionamento do sistema de armazenamento será através do levantamento da energia necessária para o consumo diário. O banco de baterias deverá respeitar os seguintes critérios:

- Ter a autonomia de um dia, caso não haja produção de energia devido aos dias chuvosos ou nublados. Os altos índices de insolação e baixos níveis de chuvas permitem que o tempo do sistema permanecer desabastecido diminua, reduzindo o custo de implantação do banco de baterias.

- Profundidade de descarga das baterias será de 50%, desta forma, quando definido um dia sem o carregamento do banco de baterias e ao final desse período, o sistema ainda terá 50% da capacidade de armazenamento, pois são poucos os períodos em Paulistana – PI com baixos índices de isolamento, onde não há necessidade de períodos mais longos e também a diminuição do custo do projeto.

Energia consumida diariamente:

$$E_C = 4751 \text{ Wh}$$

Capacidade do banco de baterias:

$$C_{\text{BANCO}} = \frac{4751}{24} = 197,96 \text{ Ah}$$

Ao atribuir a capacidade de profundidade de descarga de 50%:

$$C_{\text{BANCO}} = \frac{197,96}{0,5} = 395,92 \text{ Ah}$$

Será empregado baterias estacionarias Freedom DF2000 115 Ah 12 V, onde colocando duas em série, fornecerá 230 Ah. Assim determina-se o número de baterias em paralelo:

$$N_{\text{BP}} = \frac{395,92}{230} = 1,72$$

Para o fornecimento em 24 V, é atribuído dois conjuntos de baterias em paralelo.

4.2.3 Dimensionamento dos módulos fotovoltaicos

A partir das características atribuídas para o projeto, será utilizado o painel fotovoltaico Komaes Modelo KM150W, com as seguintes Informações técnicas:

- Potência máxima ($P_{m\acute{a}x}$): 150 W
- Tensão de máxima potência (V_m): 18,28 V
- Corrente de máxima potência (I_m): 8,21 A
- Tensão em circuito aberto (V_{oc}): 21,90 V
- Corrente de curto-circuito (I_{sc}): 8,93 A
- Quantidade de células: 36 unidades
- Dimensões ($A \times L \times C$): 1480 x 680 x 35 mm
- Eficiência: 14,9%
- Peso: 11,6 kg

- E_s - Insolação diária em Paulistana (Média Anual)
5900 Wh/m²/dia

- A_M - Área da superfície do módulo
1,0064m²

- η_M - Eficiência do módulo
14,9%

- E_p = Energia produzida pelo módulo diariamente [Wh]

$$E_p = 5900 \cdot 1,0064 \cdot 14,9\% = 884,73 \text{ Wh}$$

O número total de módulos necessários para o sistema é:

$$N = \frac{4751}{884,73} = 5,37 \text{ módulos}$$

Os resultados passaram de cinco módulos fotovoltaicos, mas será necessário utilizar seis, pois os módulos fornecem uma tensão de 12 V e o banco de baterias está dimensionado para 24 V, então será realizada de dois módulos em série para ter 24 V e três conjuntos de dois módulos em paralelo para suprir a corrente necessária.

4.2.4 Dimensionamento do controlador de carga

As características do controlador de carga dependem das especificações da tensão de operação e corrente de curto-circuito dos módulos. A corrente de curto do modelo Komaes KM150W é de 8,93 A e os seis modelos resultam em uma corrente de 53,58 A. Para garantir que a corrente máxima do controlador nunca seja ultrapassada, será implantado um fator de segurança de 10%. Logo, o valor de corrente será $53,58 \times 1,1 = 58,94$ A.

Nesse projeto o controlador deve operar na tensão nominal de 24 V e suportar a corrente máxima de 60 A.

4.2.5 Dimensionamento da proteção

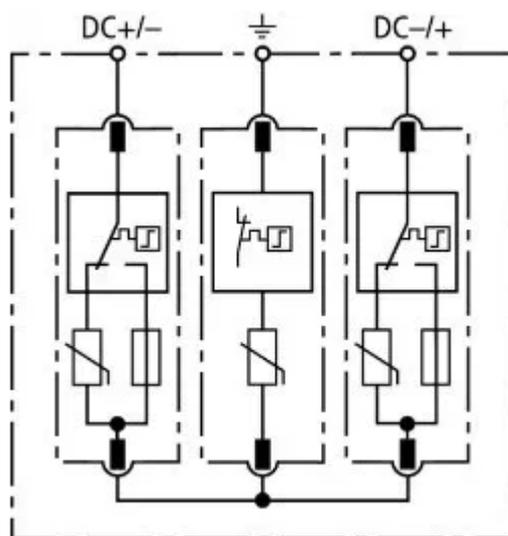
Durante o processo de dimensionamento do sistema fotovoltaico, deve-se ter uma atenção especial para que a tensão do conjunto de placas fotovoltaicas conectadas no inversor não seja superior à sua máxima tensão de entrada, o que ocasionará a queima do inversor.

4.2.5.1 DPS

Através de dados fornecidos pelo INPE, onde a densidade de descargas atmosféricas para a terra (N_G) é 1,9 km²/ano, correspondendo aproximadamente 19 dias de trovoadas por ano, a norma ABNT NBR 5410:2004 não obriga a instalação de dispositivos de proteção contra surtos. Porém levando em conta o custo relativo do DPS frente ao custo dos inversores, módulos fotovoltaicos, controladores, baterias e a instalação elétrica, não existe razão para dispensar o uso deste item de segurança, mas será atribuído somente no lado CC e não dimensionado após o inversor.

Como descrito anteriormente, será utilizado o DPS para fins fotovoltaicos de corrente contínua com 3 polos, ilustrado na Figura 19, onde possui internamente fusível de segurança, proporcionando a descontinuação do curto-circuito e o aumento da resistência do sistema por estar ligado em série, com as seguintes características:

Figura 19 – DPS específico para sistemas fotovoltaico.



Fonte: Universo Lambda (2018)

Modelo: DPS3-500Vcc - Soprano

Norma técnica: IEC 61643-1:2007

Número de polos: 3

Classe I/II de Tensão de Aplicação

Tensão: 1000 V

Corrente máxima: 12,5 kA

4.2.5.2 Fusível

As correntes de curto-circuito em sistemas fotovoltaicos são próximas das correntes nominais dos conjuntos de módulos fotovoltaicos. Por isso, será necessário adotar como referência o valor de corrente de máxima potência do módulo,

empregando os fusíveis gPV, onde o 'g' representa a proteção contra sobrecarga e curto-circuito e o 'PV' do inglês *photovoltaics*, ideal para circuitos fotovoltaicos.

Será utilizado 6 fusíveis gPV de 10x38 mm, 1000 V_{CC}, será utilizado com as seguintes características:

- Intensidade: 8 A
- Tensão: 1000 V
- Máxima corrente de curto-circuito: 30 kA

4.2.5.3 Chave Seccionadora

A chave seccionadora será responsável por realizar o isolamento do módulo com o sistema fotovoltaico e o inversor contará com uma proteção de sobrecarga na qual o disjuntor não será empregado.

Utilizando a chave seccionadora fotovoltaica Schneider Eletric modelo C60NA DC, com as seguintes características:

- Modelo: Schneider Eletric C60NA DC
- Tensão de operação: 700 V_{CC}
- Corrente de operação nominal: 60 A
- Corrente nominal de curta duração: 600 A
- Número de polos: 2P

4.3 DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES

Será dimensionado em detalhes o circuito 2 de iluminação, porém, foram utilizados os mesmos critérios para os demais circuitos do projeto. Está apresentado nos Apêndices A e C.

4.3.1 Pelo critério de máxima capacidade de condução

Por este critério, utiliza-se a Equação 8:

$$I_B = \frac{P}{V.FP} \quad (8)$$

Onde:

I_B = Corrente de projeto [A];

S = Potência aparente [VA];

V = Tensão nominal do circuito [V];

FP = Fator de potência da carga.

Como apresentado na Tabela 5, com 8 lâmpadas de LED de 12 W, com um total de 96 W, possuindo um fator de potência de 0,5, desta forma, ao empregar a equação 8:

$$I_B = \frac{96}{220 \cdot 0,5} = 0,87 \text{ A}$$

Através da Tabela 36 da norma ABNT NBR 5410:2004, a capacidade de condução de corrente (I_z) com 2 condutores carregados, dentro de eletroduto de seção circular embutido em alvenaria, de um cabo com seção de 1,5 mm² é de 17,5 A.

Atribuindo os fatores de correção de temperatura e de agrupamento dos condutores, com a finalidade de obter uma corrente de projeto fictícia, a Equação 9 é aplicada.

$$I_B' = \frac{I_B}{F_1 \cdot F_2} \tag{9}$$

Sendo:

I_B' = Corrente de projeto fictícia [A];

I_B = Corrente de projeto [A];

F_1 = Fator de correção de temperatura para 35°C;

F_2 = Fator de correção de agrupamento.

Desta forma,

$$I_b' = \frac{0,87}{0,94 \cdot 0,7} = 1,32 \text{ A}$$

4.3.2 Pelo critério da máxima queda de tensão

Para obtenção da queda tensão percentual em circuitos uniformemente distribuídos pelo comprimento e considerando que I_B faça um percurso correspondente à distância média, será utilizada a Equação 10, com uma queda de tensão admissível de 2%.

$$S_{MIN} = \frac{2\rho \cdot l_{médio} \cdot I_b}{\Delta V_{max\%} \cdot V_{nom}} \cdot 100\% \quad (10)$$

Onde:

S_{MIN} = Seção mínima do condutor [mm^2];

ρ = Resistividade de condutor [Ωm];

$l_{MÉDIO}$ = Comprimento médio do circuito [m];

I_B = Corrente de projeto [A];

ΔV = Queda de tensão admissível [%];

V_{NOM} = Tensão do circuito [V].

Desta forma,

$$S_{MIN} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 30 \cdot 0,87}{56 \cdot 4,4} = 0,21 \text{ mm}^2$$

4.3.3 Seção mínima admitida por norma

A ABNT NBR 5410:2004 determina que para circuito de iluminação a seção mínima dos condutores deve ser de $1,5\text{mm}^2$.

Portanto,

Capacidade de condução de corrente= 1,5 mm²

Máxima queda de tensão = 0,5 mm²

Seção mínima admitida por norma = 1,5 mm²

Será adotada a seção de 1,5 mm².

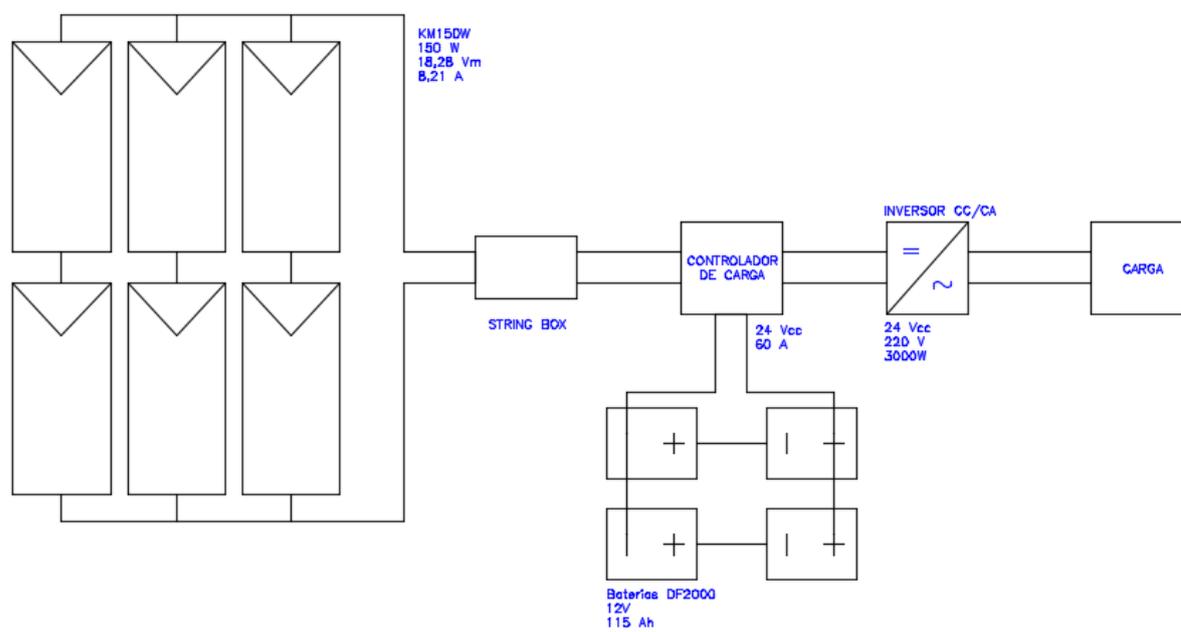
4.4 DEFINIÇÃO DO SISTEMA

O inversor a ser utilizado será de acordo com a somatória das potências ativas dos dispositivos no sistema, apresentados na Tabela 6, onde resulta em 2906 W com uma tensão de 220 V, comum nos eletrodomésticos e aparelhos que serão alimentados.

A Figura 20 apresenta o dimensionamento do projeto e os dispositivos utilizados no sistema.

- 6 - Módulos fotovoltaicos KOMAES, KM150W;
- 4 - Baterias Freedom Df2000 115 Ah / 12 V;
- 1 - Controlador de carga 24 V / 60 A;
- 1 - Inversor CC/CA 24 V_{CC} / 220 V / 3000 W;
- Suporte para apoio das baterias;
- Cabo de cobre fotovoltaico com isolamento de 1000V;
- 1 - DPS Soprano Modelo: DPS3 / 1000 V_{CC};
- 6 - Fusíveis gPV – 10 A / 1000 V / 20 kA;
- 1 - Chave seccionadora fotovoltaica Schneider C60NA DC.

Figura 20 – Representação do sistema fotovoltaico



Fonte: Autoria própria (2018)

5 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA E SOCIOAMBIENTAL PARA IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID

O estudo sobre a viabilidade econômica e socioambiental de um sistema fotovoltaico *off-grid* é essencial para comparar este meio de obtenção de energia elétrica com os mais usuais, como através de uma linha de distribuição de uma concessionária local.

Este capítulo tem como objetivos: estimar a aquisição de um sistema *off-grid* para uma residência considerando aquisição de materiais e serviços em instalações elétricas, realizar a demonstração de gastos mensais com energia elétrica de acordo com o consumo, calcular o Valor Presente Líquido (VPL) do sistema fotovoltaico *off-grid*, assim como a Taxa Interna de Retorno (TIR), além de uma análise socioambiental que forneça uma visão ampla dos impactos causados por esta mudança de obtenção de energia.

5.1 ORÇAMENTO ESTIMATIVO DO SISTEMA

Para iniciar a análise, foi feito um orçamento estimativo de um sistema *off-grid* contemplando componentes para a instalação elétrica da residência, tais como: tomadas, cabos, disjuntores etc. O orçamento abordou o custo de aquisição dos materiais de instalações elétricas e que fazem parte da captação, do armazenamento, do controle de carga e da inversão da energia solar para energia elétrica. Além disto, será apresentado o custo dos projetos, assim como da mão de obra necessária para implementação.

Os valores foram obtidos através de consultas em sites de fornecedores e orçamento de empresa, de acordo com o que foi especificado no subcapítulo 4.4, onde há a relação das partes integrantes deste sistema a serem implantadas. Para alguns materiais de instalações elétricas foi utilizado o Boletim Referencial de Custos da Companhia Paulista de Obras e Serviços (CPOS) 172 com vigência a partir de 16/03/2018 como referência para obtenção dos custos.

O orçamento final foi estimado em R\$ 20.214,13 para efetivação do conjunto em uma residência doméstica simples, conforme exposto no Apêndice D.

5.2 SIMULAÇÃO DE GASTO MENSAL COM ENERGIA ELÉTRICA

Considerando a Tabela 6 do Capítulo 4, que aborda a quantidade de energia necessária diariamente para a alimentação da iluminação e dos aparelhos eletrodomésticos, a residência em questão irá consumir 123,78 kWh de energia por mês, considerando que a lavadora de roupas de 8 kg e o ferro de passar serão utilizados durante 15 dias no mês.

O custo mensal em reais pode ser obtido consultando o histórico de tarifas da concessionária Eletrobrás Distribuição Piauí, que distribui energia elétrica no município de estudo deste trabalho, conforme ilustrado na Tabela 7.

Tabela 7 – Tarifas em baixa tensão para o Grupo B de consumidores no mês de junho de 2018



Tarifas BAIXA TENSÃO (GRUPO B) Junho de 2018

BANDEIRA DE APLICAÇÃO DESTE MÊS: VERMELHA

Resolução em vigência: **REH ANEEL - 2305/2017**

| Faixa de consumo | R\$ / kWh | | |
|-----------------------------------|-------------------|---|--|
| | TARIFA HOMOLOGADA | TARIFA COM ICMS DE 20%- Consumo até 200kWh | TARIFA COM ICMS DE 25%- Consumo Acima de 200kWh |
| B1 Residencial BAIXA RENDA | | | |
| De 00 a 30 KWH | 0,207624 | 0,275326 | 0,294878 |
| De 31 a 100 KWH | 0,355926 | 0,471988 | 0,505505 |
| De 101 a 220 KWH | 0,533889 | 0,707982 | 0,758257 |
| Acima de 220 | 0,593210 | 0,786646 | 0,842508 |

Fonte: Eletrobrás Distribuição Piauí (2018)

De acordo com a ANEEL (2010) - Resolução Normativa nº 414, o Grupo B é um agrupamento composto de consumidores cuja tensão de fornecimento é inferior a 2,3 kV, possuindo tarifa monômnia, em que são faturados somente pelo consumo de kWh e são subdivididos nos seguintes subgrupos:

- a) B1 – Residencial
- b) B2 – Rural

c) B3 – Demais classes

d) B4 – Iluminação pública

A casa em questão proposta neste trabalho se enquadra no subgrupo de consumidores B1 de baixa renda, na faixa de consumo de 101 a 220 kWh. O cálculo efetuado para obter o gasto mensal em reais é apresentado na equação 8.

$$G_m = C_m \times T_{vm} \quad (8)$$

Onde:

G_m = Gasto mensal em reais (R\$);

C_m = Consumo mensal de energia (kWh).

T_{vm} = Tarifa vigente do mês com ICMS de 20%.

Utilizando a equação 8, o seguinte resultado foi obtido:

$$G_m = 123,78 \times 0,707982 \cong 87,63 \text{ reais}$$

Portanto, o gasto mensal que a residência teria com energia elétrica de acordo com o consumo proposto, considerando impostos, seria de **R\$ 87,63 mensais**.

5.2.1 Valor Presente Líquido e Taxa Interna de Retorno

Para efetuar esta análise, duas técnicas muito utilizadas em administração financeira serão utilizadas, sendo elas apresentadas a seguir.

5.2.1.1 Valor Presente Líquido (VPL)

É uma técnica de análise de orçamentos de capital, obtida subtraindo-se o investimento inicial de um projeto do valor presente das entradas de caixa, descontadas a uma taxa igual ao custo de capital. Um VPL positivo significa que o

projeto vale mais do que ele custa e um VPL negativo significa que o projeto custa mais do que ele vale. (GITMAN, 2002).

É calculado conforme a Equação 9:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FCt}{(1+k)^t} - FCo \quad (9)$$

Onde:

VPL = investimento realizado no momento zero (R\$);

FCt = fluxo de caixa de cada período t (R\$);

k = taxa mínima de atratividade (% ao período);

t = período estimado para o empreendimento.

Para realizar os cálculos, serão considerados: um fluxo de caixa de R\$ 1.051,56 anual (desconsiderando a inflação energética), uma taxa mínima de atratividade de 4,55% referente à caderneta de poupança para o mês de junho de 2018 e um prazo estimado de 25 anos que corresponde ao período, em média, de garantia dos painéis solares.

5.2.1.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)

É a taxa de desconto que iguala o valor presente das entradas de caixa ao investimento inicial referente a um projeto resultando em um VPL = R\$ 0. (GITMAN, 2002).

É calculado conforme a Equação 10:

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FCt}{(1+TIR)^t} - FCo \quad (10)$$

Onde:

FCt = fluxo de caixa de cada período t (R\$);
 TIR = taxa interna de retorno (% ao período);
 t = período estimado para o empreendimento.

Para realizar os cálculos, serão considerados um fluxo de caixa de R\$ 1.051,56 anualmente (desconsiderando a inflação energética) e um período estimado de 25 anos que corresponde ao período, em média, de garantia dos painéis solares.

5.2.1.3 Resultados

Os resultados obtidos serão mostrados a seguir, conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Fluxo de Caixa

| Ano | Fluxo | Ano | Fluxo |
|-----|----------------|-----|--------------|
| 0 | -R\$ 14.982,36 | 13 | R\$ 1.051,56 |
| 1 | R\$ 1.051,56 | 14 | R\$ 1.051,56 |
| 2 | R\$ 1.051,56 | 15 | R\$ 1.051,56 |
| 3 | R\$ 1.051,56 | 16 | R\$ 1.051,56 |
| 4 | R\$ 1.051,56 | 17 | R\$ 1.051,56 |
| 5 | R\$ 1.051,56 | 18 | R\$ 1.051,56 |
| 6 | R\$ 1.051,56 | 19 | R\$ 1.051,56 |
| 7 | R\$ 1.051,56 | 20 | R\$ 1.051,56 |
| 8 | R\$ 1.051,56 | 21 | R\$ 1.051,56 |
| 9 | R\$ 1.051,56 | 22 | R\$ 1.051,56 |
| 10 | R\$ 1.051,56 | 23 | R\$ 1.051,56 |
| 11 | R\$ 1.051,56 | 24 | R\$ 1.051,56 |
| 12 | R\$ 1.051,56 | 25 | R\$ 1.051,56 |

Fonte: Autoria própria (2018)

Portanto,

k (taxa mínima de atratividade) = 4,55%

TIR (taxa interna de retorno) = 4,89%

VPL (valor presente líquido) = R\$ 590,26

O Valor Presente Líquido e a Taxa Interna de Retorno tornam viável a aplicação do sistema off-grid para a situação proposta.

5.3 ANÁLISE SOCIOAMBIENTAL

A ideia proposta neste trabalho é levar a energia elétrica às pessoas que moram em regiões onde não há infraestrutura de transmissão e distribuição da mesma. O sistema fotovoltaico *off-grid* poderia entrar em pauta no programa social Luz Para Todos, criado em 2003, com o objetivo de levar energia às regiões rurais e às casas que ainda não a possuem e assim aumentar a renda familiar, reduzir a desigualdade social proporcionada pela falta de acesso à informação e propiciar um desenvolvimento humano e sustentável.

Tabela 9 – Tarifa Social

| ÍNDICES DA TARIFA SOCIAL PARA CONSUMIDORES ENQUADRADOS NA SUBCLASSE BAIXA RENDA | |
|---|----------|
| CONSUMO KWH/MÊS | DESCONTO |
| Até 30 | 65% |
| De 31 a 100 | 40% |
| De 101 a 220 | 10% |
| Superior a 220 | 0% |
| ÍNDICES DA TARIFA SOCIAL PARA CONSUMIDORES QUILOMBOLAS E INDÍGENAS | |
| CONSUMO KWH/MÊS | DESCONTO |
| Até 50 | 100% |

Fonte: Politize! (2018)

O programa Luz Para Todos poderia fazer parceria com empreendedores do PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas), que possui como objetivo aumentar a participação de fontes alternativas renováveis na produção de energia elétrica e elaborar um plano que torne viável a locação de um sistema *off-grid* completo pelas pessoas que moram em regiões rurais, seguindo os mesmos critérios

da Tarifa Social, porém ao invés de reduzir o valor da fatura pelo gasto de energia mensal, seria reduzido o valor do aluguel, conforme a Tabela 9.

Já na parte ambiental a energia solar fotovoltaica, utilizando o sistema *off-grid*, possui vantagens como causar um mínimo impacto ambiental, que é definido pela Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) Nº 001, de 23 de janeiro de 1986 como “qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:

I - a saúde, a segurança e o bem-estar da população;

II - as atividades sociais e econômicas;

III - a biota;

IV - as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;

V - a qualidade dos recursos ambientais.”

Sendo assim, para este sistema ser totalmente ecológico é necessário que haja o correto descarte das baterias que chegarem ao final da vida útil. Desestimular o uso de fontes de energias não renováveis é um exemplo de impacto ambiental positivo, como usinas termelétricas que necessitam de carvão mineral para geração e com isso a combustão do carvão libera gás metano (CH₄) o que acaba contribuindo para o efeito estufa. Também diminui o uso de usinas hidrelétricas devido aos períodos de seca, que acabam esvaziando os reservatórios.

6 CONCLUSÃO E TÓPICOS PARA ESTUDOS FUTUROS

A captação de energia através de painéis fotovoltaicos é uma das formas mais democráticas de oferecer eletricidade para a população que vive em áreas onde não há infraestrutura de distribuição de concessionárias locais.

Os fatores que ainda limitam a adoção de um sistema fotovoltaico por parte dos consumidores são a baixa eficiência de absorção das células e falta de produção em escala para que o valor passado ao cliente final tenha um preço reduzido e competitivo. Outro fator importante para difundir esta tecnologia entre as pessoas é o incentivo governamental para a criação de cursos em universidades, como já é feito na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) através da Escola de Extensão (EXTECAMP) e fomentar pesquisas e iniciações científicas que tenham como objetivo melhorar esta fonte de energia renovável, como a busca por baterias mais ecológicas.

Tendo em vista que o sistema *off-grid* possui um elevado custo com base no orçamento apresentado nos capítulos anteriores, o seu investimento é viável para residências onde o consumo de energia é baixo e são situadas em locais remotos. No quesito socioambiental esta configuração de sistema é ideal para massificar a disponibilidade de energia em regiões isoladas, sem quase agredir o meio ambiente.

Com base nos dados levantados durante a realização deste trabalho, o município de Paulistana, no Estado do Piauí, possui índice de irradiação médio diário suficiente para tornar o município um exemplo de como deve ser aproveitada a luz solar para trazer desenvolvimento social e econômico à sua população, pois grande parte ainda vive em zona rural e não tem acesso à energia elétrica.

Conclui-se que a criação de políticas públicas sobre a disponibilidade e o uso da energia solar seria a melhor maneira de coletivizar e acolher a parte dos habitantes que vivem à margem da sociedade por não possuir condições de ter uma vida digna.

Como tópicos para estudos futuros, as principais sugestões de continuidade deste trabalho consistem em um estudo aprofundado interdisciplinar da viabilidade financeira do sistema *off-grid*, assim como descobrir uma forma que torne viável sua locação para a população de baixa renda, aplicando conceitos e métodos que são

ensinados, entre o curso de Tecnologia em Instalações Elétricas em conjunto com o curso de Administração ou Economia.

Outros tópicos relevantes para a continuação da temática levantada por este trabalho consistem em: fazer um estudo utilizando células fotovoltaicas com maior eficiência para aumentar a consolidação do sistema, desenvolver um protótipo de painel solar que tenha a função *solar tracker*, capaz de funcionar com o mesmo princípio de um girassol e estudar a implementação de energia fotovoltaica em regiões que possuem como fonte de alimentação um grupo gerador acionado por motor diesel, elaborando assim uma comparação entre os impactos causados pela poluição atmosférica e o uso de energia limpa, como a solar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Alceu Ferreira. **Energia solar fotovoltaica**. São Paulo: UNESP, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419**: Proteção contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro: 2015.

BALFOUR, John; SHAW, Michael; NASH, Nicole Bremer. **Introdução ao projeto de sistemas fotovoltaicos** – 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

BRASIL, Presidência da República. **Lei no. 10.438/2002**. Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa). Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/L10438.htm> Acesso em: 24 de junho de 2018.

BRASIL. **Proposta de Emenda Constitucional nº 44**, de 07 de dezembro de 2017. Altera o art.. 6º da Constituição da República Federativa do Brasil para que o acesso à energia elétrica seja direito social. Torna o acesso à energia elétrica um direito social para todos os brasileiros. In: CONSTITUIÇÃO DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. Distrito Federal: 2017.

COTRIM, Ademaro Alberto M, B. **Instalações Elétricas** – 5. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

CREDER, Hélio. **Instalações Elétricas** – 16. ed. São Paulo: LTC, 2015.

FONTES, Ruy. **Energia solar na construção do imóvel: tudo o que você precisa saber**. Disponível em: <<http://blog.bluesol.com.br/energia-solar-na-construcao/>> Acesso em: 05 de Abril de 2018.

GITMAN, Lawrence J. **Princípios de Administração Financeira** – 7. ed. HARBRA, 2002.

LAMBERTS, Roberto. et al. **Casa Eficiente: Consumo e Geração de Energia**. Florianópolis: UFSC, 2010.

MARTINS, Paulo. **Futuro promissor** – 124. ed. São Paulo: Revista Potência, 2016.

MERELES, Carla. **Luz para todos: Você conhece esse programa social?** Disponível em: < <http://www.politize.com.br/luz-para-todos-programa-social/>> acesso em: 14 de junho de 2018.

MOURA, Caio. **Proteção contra sobretensões em sistemas fotovoltaicos de baixa tensão - parte 3: dps ca x dps cc.** Disponível em: <<https://www.northsun.com.br/single-post/protecao-contrasobretensoes-em-sistemas-fotovoltaicos-de-baixa-tensao---parte-3-dps-ca-x-dps-cc/>> Acesso em: 28 de junho de 2018.

NERY, Noberto. **Instalações Elétricas: Princípios e aplicações** – 2. ed. São Paulo: Érica, 2012.

PEREIRA, Enio Bueno. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

PINHO, João; GALDINO, Marco. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: CRESESB, 2014.

Resende, Carlos. **Por que utilizar DPS em sistemas fotovoltaicos?** Disponível em: <<http://shareenergy.com.br/por-que-utilizar-dps-em-sistemas-fotovoltaicos/>> Acesso em: 10 de Junho de 2018.

RIBEIRO, Laudicena de Fátima. **Regras básicas para apresentação formal de trabalhos.** Londrina: UEL, 2016.

RIVAS, Katherine. **Energia fotovoltaica deve movimentar R\$ 100 bilhões até 2030 no Brasil.** Disponível em: <<http://envolverde.cartacapital.com.br/energia-fotovoltaica-deve-movimentar-r-100-bilhoes-ate-2030-no-brasil/>> Acesso em: 25 de junho de 2018.

ROCHA, Bruno. **Dispositivos de segurança para energia solar.** Disponível em: <<http://www.hsp-solar.com/energia-solar-seguranca/>> Acesso em: 10 de junho de 2018.

ROSA, Taís Hemann da. **Direito fundamental social de acesso à energia elétrica.** Rio Grande do Sul: PUCRS, 2014.

SALVADORETTI, José Luiz. Et al. **Laboratório de energia solar – LABSOL.** Disponível em: < <http://www.solar.ufrgs.br/#Pessoal01>> Acesso em: 01 de maio de 2018.

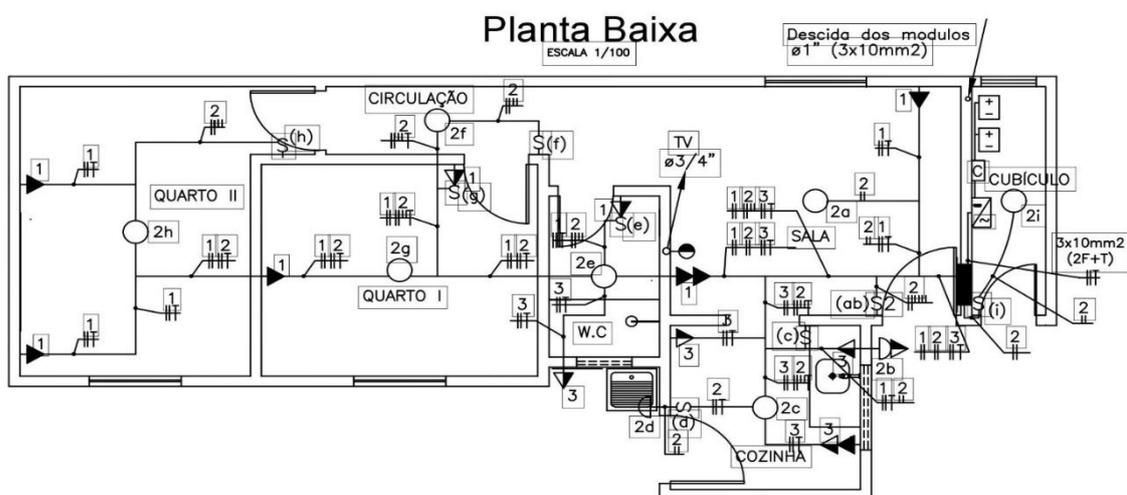
SANTOS, Sergio. **É obrigatório o uso do DPS?** Disponível em: <<https://www.osetoreletrico.com.br/e-obrigatorio-o-uso-do-dps/>> Acesso em: 12 de junho de 2018.

SOUZA, Ronildon di. **Os sistemas de energia solar fotovoltaica** – 1. ed. Ribeirão Preto: Blue Sol Energia Solar, 2016.

TEIXEIRA, Eduardo Fernandes. **Retorno de 20% ao ano? Veja um estudo de caso de energia solar.** Disponível em: < <https://carteirarica.com.br/energia-solar-investimento/>> acesso em: 24 de junho de 2018.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações** – 2. Ed. São Paulo: Érica, 2015.

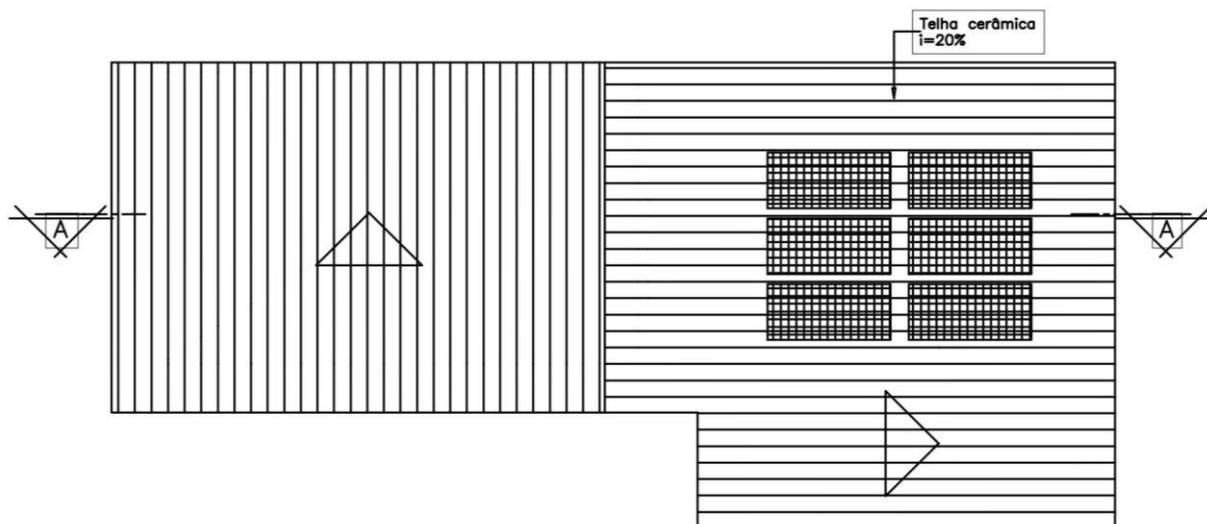
APÊNDICE A – DISTRIBUIÇÃO DOS CIRCUITOS ELÉTRICOS



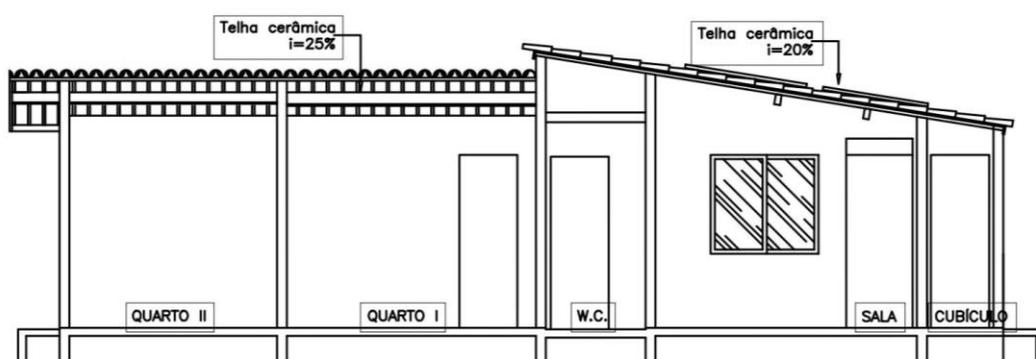
Legenda

- PONTO DE LUZ EMBUTIDO NO FORRO;
- ⊖ PONTO DE LUZ NA ALVENARIA COM PLAFON EM PVC E-27 (ARANDELA)
- ▲ TOMADA 2P+T 10A/250V PADRÃO BRASILEIRO, EM CAIXA 4"x2", h=1,10m DO PISO;
- ▲ TOMADA 2P+T 10A/250V PADRÃO BRASILEIRO, EM CAIXA 4"x2", h=0,50m DO PISO;
- ▲ TOMADA DUPLA 2P+T 10A/250V PADRÃO BRASILEIRO, EM CAIXA 4"x2", h=0,50m DO PISO;
- ▲ TOMADA 3P (CHUVEIRO), EM CAIXA 4"x2" TAMPA CEGA, h=2,00m DO PISO;
- ⊖ TOMADA 2P+T E UNIVERSAL, EM CAIXA 4"x2", h=1,10m DO PISO;
- ⊖ TOMADA PARA ANTENA COLETIVA DE TV, EM CAIXA 4"x2", h=0,50m DO PISO;
- ⊖ INTERRUPTOR SIMPLES CONJUGADO COM 1 TOMADA EM CAIXA 4"x2" A 1,10m DO PISO;
- ⊖ INTERRUPTOR SIMPLES COM 1 (UMA) SEÇÃO EM CAIXA 4"x2" A 1,10m DO PISO;
- ⊖ S2 INTERRUPTOR SIMPLES COM 2 (DUAS) SEÇÕES EM CAIXA 4"x2" A 1,10m DO PISO;
- INDICAÇÃO DE FIAÇÃO APARENTE SOB O MADEIRAMENTO FIXADA COM CLEATS;
- QUADRO EM PVC PARA ILUMINAÇÃO E FORÇA DE EMBUTIR, h=1,50m DO PISO AO CENTRO;
- ⊖ INVERSOR DE POTÊNCIA INSTALADO NA PAREDE, h=1,50m DO PISO AO CENTRO;
- ⊖ CONTROLADOR DE CARGA INSTALADO NA PAREDE, h=1,50m DO PISO AO CENTRO;
- + BATERIAS ESTACIONÁRIAS;
- INDICAÇÃO DE CONDUTORES FASE, NEUTRO, RETORNO E TERRA;
- INDICAÇÃO DE TUBULAÇÃO QUE DESCE E SOBE.

APÊNDICE B – LOCALIZAÇÃO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS



COBERTA – UNIDADE PADRÃO
ESCALA 1/100



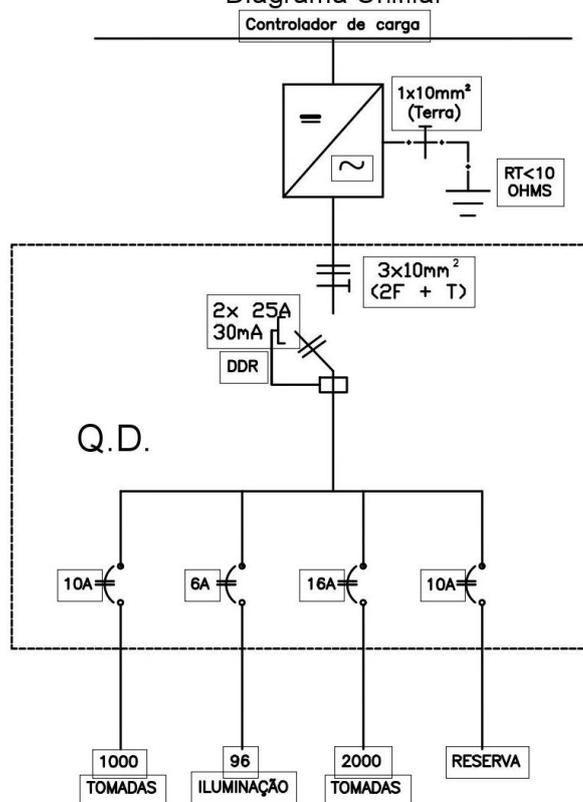
CORTE AA
ESCALA 1/100

APÊNDICE C – QUADRO DE CARGAS E DIAGRAMA UNIFILAR

Quadro de Cargas

| Circuito | Lâmpadas (W) | | Tomadas (W) | | Total (W) | Disjuntor (A) | Fiação (mm ²) |
|------------------------------|--------------|--|-------------|-----|-----------|---------------|---------------------------|
| | LED-12 | | 100 | 600 | | | |
| 1 | | | 10 | | 1000 | 10 | 1,5 |
| 2 | 08 | | | | 96 | 6 | 2,5 |
| 3 | | | 02 | 03 | 2000 | 16 | 2,5 |
| 4 | RESERVA | | | | | 10 | |
| Potência Total Instalada (W) | | | | | 3096 | 25 | 10 |

Diagrama Unifilar



APÊNDICE D – ORÇAMENTO ESTIMATIVO DO PROJETO DO SISTEMA OFF-GRID CONTEMPLANDO INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

| ASSUNTO: | | ORÇAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID CONTEMPLANDO INSTALAÇÕES ELÉTRICAS | | | | |
|--|---------|--|-------|--------|--------------|----------------------|
| ITEM | FONTE | DESCRIÇÃO DOS SERVIÇOS E MATERIAIS | UNID | QTD | PREÇO UNIT | TOTAL |
| 1 SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID | | | | | | |
| 1.1 | MERCADO | Panel Solar de 150W Komax | un | 6,00 | R\$ 403,00 | R\$ 2.418,00 |
| 1.2 | MERCADO | Bateria Freedom DF2000 115 Ah / 12V | un | 4,00 | R\$ 629,00 | R\$ 2.516,00 |
| 1.3 | MERCADO | Controlador de Carga Xantrex C60 60A 12/24V | un | 1,00 | R\$ 899,00 | R\$ 899,00 |
| 1.4 | MERCADO | Inversor Senoidal Epsolar SH3000-22 - 3000VA / 24Vcc / 220Vca | un | 1,00 | R\$ 3.809,00 | R\$ 3.809,00 |
| 1.5 | MERCADO | DPS Soprano Modelo: DPS3 / 1000vcc | un | 1,00 | R\$ 191,90 | R\$ 191,90 |
| 1.6 | MERCADO | 2 Fusíveis gPV – 10A / 1000V / 20KA | cj | 3,00 | R\$ 29,90 | R\$ 89,70 |
| 1.7 | MERCADO | Suporte para painel solar | un | 12,00 | R\$ 33,75 | R\$ 405,00 |
| 1.8 | MERCADO | Chave seccionadora fotovoltaica Schneider CBINA DC | un | 1,00 | R\$ 500,00 | R\$ 500,00 |
| | | | | | | R\$ 10.828,60 |
| 2 INSTALAÇÕES ELÉTRICAS | | | | | | |
| 2.1 | CPOS | Cabo de cobre de 1,5 mm ² , isolamento 750 V - isolamento em PVC 70°C | m | 140,00 | R\$ 0,68 | R\$ 95,20 |
| 2.2 | CPOS | Cabo de cobre de 2,5 mm ² , isolamento 750 V - isolamento em PVC 70°C | m | 192,00 | R\$ 1,06 | R\$ 203,52 |
| 2.3 | CPOS | Cabo de cobre de 10 mm ² , isolamento 750 V - isolamento em PVC 70°C | m | 2,00 | R\$ 3,70 | R\$ 7,40 |
| 2.4 | CPOS | Disjuntor termomagnético bipolar de 10A a 50A | un | 4,00 | R\$ 63,60 | R\$ 254,40 |
| 2.5 | MERCADO | Quadro de distribuição de embutir para 12 disjuntores DIN | un | 2 | R\$ 67,90 | R\$ 135,80 |
| 2.6 | CPOS | Eleiroduto de PVC corrugado flexível leve, diâmetro de 32 mm | m | 80,00 | R\$ 2,57 | R\$ 205,60 |
| 2.7 | CPOS | Eleiroduto metálico flexível com capa em PVC de 1" | m | 3,00 | R\$ 3,57 | R\$ 10,71 |
| 2.8 | CPOS | Dispositivo diferencial residual de 25 A x 30 mA - 2 polos | un | 1,00 | R\$ 129,12 | R\$ 129,12 |
| 2.9 | CPOS | Caixa em PVC de 4' x 2' | un | 22,00 | R\$ 1,76 | R\$ 38,72 |
| 2.10 | CPOS | Interruptor bipolar simples, 1 tecla dupla e placa | cj | 8,00 | R\$ 17,53 | R\$ 140,24 |
| 2.11 | CPOS | Tomada 2P+T de 10 A - 250 V, completa | cj | 14,00 | R\$ 7,67 | R\$ 107,38 |
| 2.12 | CPOS | Caixa em PVC octogonal de 4' x 4' | un | 7,00 | R\$ 4,63 | R\$ 32,41 |
| 2.13 | MERCADO | Plafon E27 de porcelana para lâmpadas | un | 9,00 | R\$ 3,13 | R\$ 28,17 |
| 2.14 | MERCADO | Lâmpada Bulbo LED 12W Base E27 | un | 9,00 | R\$ 15,90 | R\$ 143,10 |
| | | | | | | R\$ 1.531,77 |
| 3 MÃO DE OBRA E PROJETO | | | | | | |
| 3.1 | MERCADO | Projetos de Instalações Elétricas e Sistema Off-grid | un | 1,00 | R\$ 2.500,00 | R\$ 2.500,00 |
| 3.2 | MERCADO | Mão de obra especializada em sistema autônomo de energia solar | horas | 8,00 | R\$ 289,22 | R\$ 2.313,76 |
| 3.3 | MERCADO | Mão de obra especializada em instalações elétricas + auxiliar | horas | 16,00 | R\$ 200,00 | R\$ 3.200,00 |
| | | | | | | R\$ 7.853,76 |
| TOTAL GERAL | | | | | | R\$ 20.214,13 |