



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ELETRICIDADE  
ENGENHARIA ELÉTRICA - ELETROTÉCNICA

Desenvolvimento de projeto orientativo para a instalação de um sistema fotovoltaico *on-grid*: Estudo de caso de um sistema fotovoltaico residencial na cidade de Manaus.

Leopoldino Lourenço Araújo da Silva Júnior

MANAUS-AM

2022

Leopoldino Lourenço Araújo da Silva Júnior

Desenvolvimento de projeto orientativo para a instalação de um sistema fotovoltaico *on-grid*: Estudo de caso de um sistema fotovoltaico residencial na cidade de Manaus.

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica - Telecomunicações da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, com ênfase em Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Renan Landau Paiva de Medeiros

MANAUS-AM

2022

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S586d Silva Júnior, Leopoldino Lourenço Araújo da  
Desenvolvimento de projeto orientativo para a instalação de um sistema fotovoltaico on-grid: estudo de caso de um sistema fotovoltaico residencial na cidade de Manaus. / Leopoldino Lourenço Araújo da Silva Júnior . 2022  
61 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Renan Landau Paiva de Medeiros  
TCC de Graduação (Engenharia Elétrica - Telecomunicações) -  
Universidade Federal do Amazonas.

1. Energia solar. 2. Fotovoltaico. 3. Energia renovável. 4. Inversor.  
5. Painel solar. I. Medeiros, Renan Landau Paiva de. II.  
Universidade Federal do Amazonas III. Título

Leopoldino Lourenço Araújo da Silva Júnior

Desenvolvimento de projeto orientativo para a instalação de um sistema fotovoltaico *on-grid*: Estudo de caso de um sistema fotovoltaico residencial na cidade de Manaus.

Monografia de Graduação apresentada à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica - Telecomunicações da Universidade Federal do Amazonas como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em 29 de abril de 2022.



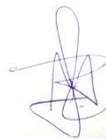
---

Prof. Dr. Renan Landau Paiva de Medeiros



---

Prof. Dr. Florindo Antonio de Carvalho Ayres Júnior



---

Prof. MSc. Rafael Silva Mendonça

MANAUS, AM

2022

# Agradecimentos

Quero agradecer em primeiro lugar, a DEUS, por ter dado saúde e uma família maravilhosa.

Minha esposa Ana Tereza, meus filhos Ana Clara e Leonardo, meus pais Maria Rodrigues e Leopoldino e irmãos por sempre acreditarem no meu potencial e apoiando meus sonhos com muito amor e carinho.

Ao professor orientador Prof. Dr. Renan Landau Paiva de Medeiros, que me deu o suporte necessário para a realização do trabalho, com paciência e amizade nos tantos momentos que precisei.

Aos meus amigos que sempre estiveram comigo e me apoiaram em todos os momentos.

# Resumo

Diante da necessidade de fontes alternativas para a matriz energética no Brasil. A energia solar fotovoltaica apresenta-se como umas das alternativas mais notáveis no que diz respeito ao custo de implementação e a efetiva proteção ecológica pois trata-se de uma fonte de energia renovável, limpa e pode ser considerada infinita.

Nesse viés, é apresenta-se neste trabalho técnicas de dimensionamento, entendimentos sobre viabilidade econômica e a instalação de um Sistema Solar Fotovoltaica conectada à Rede Elétrica da Cidade de Manaus - Am. Esta implementação só é possível, devido à alta capacidade solarimétrica existente no Brasil e a homologação das resoluções normativas nº 482/2014 e nº 687/2016 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), na qual inclui o sistema de compensação de crédito de energia elétrica para minigeração e microgeração de energia solar, tornando-se possível à instalação de sistemas geradores de energia fotovoltaica conectada à rede elétrica.

O estudo de caso oportunizou mostrar que o projeto instalado de sistemas fotovoltaicos é viável economicamente, apesar do alto investimento inicial que se faz necessário para aquisição da tecnologia, uma vez que é possível recuperar esse investimento muito mais rápido do que o esperado, sem a preocupação do aumento da tarifa, este fato fica bem claro no estudo de caso apresentado pois mostra a recuperação total do investimento em menos de 4 anos, visto que tem uma vida útil de 25 anos.

**Palavras-chave:** Energia Solar Fotovoltaica, Microgeração, Energia Elétrica.

# Abstract

Faced with the need for alternative sources for the energy matrix in Brazil. Photovoltaic solar energy presents itself as one of the most notable alternatives with regard to the cost of implementation and effective ecological protection because it is a renewable, clean source of energy and can be considered infinite.

In this bias, it is presented in this work dimensioning techniques, understandings about economic viability and the installation of a Photovoltaic Solar System connected to the Electricity Grid of the City of Manaus - Am. This implementation is only possible due to the high solarimetric capacity existing in Brazil and the approval of normative resolutions n<sup>o</sup> 482/2014 and n<sup>o</sup> 687/2016 of ANEEL (National Electric Energy Agency), which includes the energy credit compensation system for mini-generation and micro-generation of solar energy, making it possible to install photovoltaic energy generating systems connected to the electrical grid.

The case study made it possible to show that the installed project of photovoltaic systems is economically viable, despite the initial self-investment that is necessary for the acquisition of the technology, since it is possible to recover this investment much faster than expected, without the concern of the tariff increase, this fact is very clear in the case study presented as it shows the total recovery of the investment in less than 4 years, since it has a useful life of 25 years.

**Keywords: Photovoltaic Solar Energy, Microgeneration, Electric Energy.**

# Lista de Figuras

2.1	Forma de incidência da radiação solar na superfície.(Energês) . . . . .	5
2.2	Equipamentos de medição de radiação solar (researchgate.net). . . . .	6
2.3	Modelo de captuda de radiação solar ( <a href="https://www.romiotto.com.br/">https://www.romiotto.com.br/</a> ). . . . .	8
2.4	Modelo Junção p-n conectada a carga ( <a href="https://engehallrenovaveis.com.br/">https://engehallrenovaveis.com.br/</a> ). . . . .	8
2.5	Célula em operação ( <a href="https://engehallrenovaveis.com.br/">https://engehallrenovaveis.com.br/</a> ). . . . .	9
2.6	Célula de silício monocristalino (Fadigas (2012)). . . . .	10
2.7	Célula de silício policristalino (Fadigas (2012)). . . . .	10
2.8	Célula de silício amorfos (Fadigas (2012)). . . . .	11
2.9	Células em paralelo (Berticelli et al. (2017)). . . . .	11
2.10	Células em série (Berticelli et al. (2017)). . . . .	12
2.11	Células com diodo bypass (Berticelli et al. (2017)). . . . .	13
2.12	Células com diodo de bloqueio (Berticelli et al. (2017)). . . . .	13
2.13	Parametros de Voc, Isc, Pm, Vmp e Imp (Software PVSYST). . . . .	14
3.1	Aplicação de sistemas OffGrid ( <a href="http://www.luismnunes.com/">http://www.luismnunes.com/</a> ). . . . .	17
3.2	Aplicação de sistemas OffGrid. . . . .	19
3.3	Aplicação residencial, comercial e industrial (Portal Solar). . . . .	20
3.4	Exemplo de Sistema OnGrid (GridSolaris). . . . .	21
3.5	Exemplo de Sistema Híbrido (GridSolaris). . . . .	22
3.6	Exemplo de Sistema Híbrido atual (GridSolaris). . . . .	23
5.1	Grupo Tarifários - Tensão de Fornecimento (SGT/ANAEEEL). . . . .	32
5.2	CRESESB - <a href="http://www.cresesb.cepel.br/index.php">http://www.cresesb.cepel.br/index.php</a> . . . . .	33
5.3	Cálculo da potência necessária para atender a demanda. . . . .	35
5.4	Cálculo da quantidade de placa. . . . .	36
5.5	Cálculo da potência estimada do inversor. . . . .	36

---

6.1	Fatura de consumo de energia. . . . .	39
6.2	Irradiação solar - Base de dados PVSYST. . . . .	40
6.3	Gráficos mensais e anuais. . . . .	40
6.4	Indicação de pré-dimensionamento. . . . .	41
6.5	Estrutura metálica. . . . .	44
6.6	Diagrama unifilar. . . . .	49
6.7	Instalação da StringBox DC, AC e Inversor. . . . .	51
6.8	String Box DC. . . . .	51
6.9	Inversor GroWatt de 8k. . . . .	52
6.10	String Box AC. . . . .	52
6.11	Instalação das Placas. . . . .	53
6.12	Baixa de barramento. . . . .	53
6.13	Medidor de energia da carga. . . . .	54
6.14	Planta em operação. . . . .	54
6.15	Geração em outubro de 2021. . . . .	55
6.16	Geração em novembro de 2021. . . . .	55
6.17	Geração em dezembro de 2021. . . . .	55
6.18	Geração em janeiro de 2022. . . . .	55
6.19	Geração em fevereiro de 2022. . . . .	56
6.20	Geração em março de 2022. . . . .	56
6.21	Geração em abril de 2022. . . . .	56
6.22	Histórico de consumo com sistema em operação. . . . .	56
6.23	Fatura de energia compensada pela geração. . . . .	57

# Lista de Tabelas

5.1	Potencial anual médio de energia solar. . . . .	31
5.2	Cálculo de consumo. . . . .	33
5.3	Irradiação solar média. . . . .	34
5.4	Cálculo das perdas. . . . .	35
6.1	Características elétricas do painel fotovoltaico BYD. . . . .	42
6.2	Especificações Técnicas de Entrada CC do Inversor MIN8000MTL-S. . . .	43
6.3	Especificações Técnicas de Entrada CA do Inversor MIN8000MTL-S. . . .	43

# Lista de Abreviaturas e Siglas

<b>CA</b>	Corrente alternada
<b>CC</b>	Corrente contínua
<b>Voc</b>	Voltagem de circuito aberto
<b>Isc</b>	Corrente de curto circuito
<b>Pm</b>	Potência máxima
<b>Vmp</b>	Voltagem de Potência Máxima
<b>Imp</b>	Corrente de Máxima Potência
<b>QT</b>	Queda de Tensão
<b>V</b>	Volts
<b>W</b>	Watts
<b>MPPT</b>	Rastreamento do ponto de máxima potência
<b>SP</b>	Sol pleno
<b>HSP</b>	Hora de sol pleno
<b>QP</b>	Quantidade de Placas
<b>CMM</b>	Consumo médio mensal
<b>CMA</b>	Consumo médio anual
<b>A</b>	Área de seção transversal
<b>L</b>	Comprimento do cabo
<b>CRESESB</b>	Centro de Referência para Energias Solares e Eólicas
$\rho$	Resistividade elétrica

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Contextualização . . . . .	1
1.2	Objetivos . . . . .	1
1.2.1	Objetivo geral . . . . .	1
1.2.2	Objetivos específicos . . . . .	2
1.3	Estrutura do trabalho . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Revisão de sistema Fotovoltaico</b>	<b>3</b>
2.1	Introdução . . . . .	3
2.2	Embasamento Teórico . . . . .	4
2.2.1	Histórico de Evolução . . . . .	4
2.2.2	Conhecimentos Fundamentais . . . . .	4
2.2.3	Disponibilidade de Radiação . . . . .	6
2.2.4	Processo de conversão das Células fotovoltaicas . . . . .	7
2.2.5	Tipos de Células fotovoltaicas . . . . .	9
2.2.6	Representação dos módulos fotovoltaicas . . . . .	11
2.2.7	Principais características dos módulos fotovoltaicos . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Tipos de sistemas fotovoltaicos e dispositivos</b>	<b>16</b>
3.1	Introdução . . . . .	16
3.2	Modelos de sistemas fotovoltaicos . . . . .	17
3.2.1	Sistemas isolados ou autônomos: OffGrid . . . . .	17
3.2.2	Sistemas conectado à rede: OnGrid ou Grid-Tie . . . . .	19
3.2.3	Sistemas híbridos. . . . .	21

---

<b>4</b>	<b>Legislação de sistemas fotovoltaicos conectado a rede</b>	<b>24</b>
4.1	Introdução . . . . .	24
4.2	Resoluções Regulamentares . . . . .	24
4.2.1	Resolução 482/2012 e 687/2015 (atualização da 482) . . . . .	24
4.3	Normas de Instalação e Comissionamento . . . . .	27
<b>5</b>	<b>Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos conectados a rede</b>	<b>30</b>
5.1	Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos OnGrid . . . . .	30
5.1.1	Quanto a posição geográfica e inclinação de painéis . . . . .	31
5.1.2	Quanto a capacidade de injeção a rede . . . . .	31
5.1.3	Quanto a necessidade da carga. . . . .	32
5.2	Conclusão . . . . .	37
<b>6</b>	<b>Estudo de caso de aplicação de um sistema fotovoltaico residencial na cidade de Manaus</b>	<b>38</b>
6.1	Estudo de Caso . . . . .	38
6.2	Irradiação na Cidade de Manaus - Referencia 2021 . . . . .	39
6.3	Dimensionamneto . . . . .	40
6.3.1	Definição de Equipamentos . . . . .	41
6.4	Conclusão . . . . .	50
<b>7</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>58</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>60</b>

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Contextualização

A matriz energética brasileira é predominantemente hídrica. Existem outras matrizes energética como o carvão, petróleo e gás natural, entretanto essas matrizes não são fontes renováveis. Neste sentido busca-se constantemente /novas tecnologias que possibilitem o uso das fontes energéticas de forma racional. Seguindo esse raciocínio, com a evolução tecnológica, está sendo possível usufruir de matrizes energéticas que não degradam a natureza e são renováveis, como por exemplo fontes eólicas e solares.

Diante disso, com o avanço da tecnologia, o uso da energia solar como fonte energética alternativa tem se mostrado muito promissora e até de fácil implementação quando comparado as matrizes hidrelétricas e termelétricas. Com os benefícios alcançado atualmente com a geração distribuída, essa modalidade está em constante expansão, o mercado tem recebido este movimento de forma muito positiva e a tendência é que sistemas de micro e mini geração se popularizem no Brasil.

### 1.2 Objetivos

#### 1.2.1 Objetivo geral

Este estudo foi proposto por se tratar de um tema super atual e de grande relevância na sociedade em geral e no meio ambiente tendo em vista que é uma ótima opção de matriz energética de energia limpa, renovável e com grande disponibilidade.

### 1.2.2 Objetivos específicos

O tema proporciona ao graduando de engenharia elétrica a possibilidade de aquisição de conhecimentos teóricos e práticos, tendo em vista que tal conhecimento pode lhe posicionar de forma vantajosa no mercado de trabalho. Este estudo garante ainda uma visão diferenciada da movimentação do mercado ao qual se submeterá.

Logo espera-se com este estudo proporcione:

- Grandes conhecimentos de dimensionamentos de sistemas fotovoltaicos e integração a atividades relacionada ao desenvolvimento da matriz energética brasileira;
- Oportunidade de implementação de projetos no seguimento residencial, comercial e industrial;
- a integração com novas fontes de conhecimento para que este seja cada dia mais aprofundado e desenvolvido.

### 1.3 Estrutura do trabalho

A atividade estará organizada na seguinte estrutura:

- Capítulo 2: Será apresentada uma breve fundamentação teórica no que diz respeito aos principais conceitos e características;
- Capítulo 3: Será apresentado os tipos de sistemas fotovoltaico existentes e suas aplicações;
- Capítulo 4: Será apresentado aspectos legais e regulamentários associados a geração e distribuição de energia;
- Capítulo 5: Será apresentado procedimentos necessários para um bom dimensionamento do sistema fotovoltaico;
- Capítulo 6: Será apresentado, através de um estudo de caso implementado, o dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado a rede em Manaus-AM.
- Capítulo 7: Será apresentado os resultados obtidos com a implementação do estudo de caso que foi tomado como modelo.

# Capítulo 2

## Revisão de sistema Fotovoltaico

Neste capítulo, será apresentado a fundamentação teórica a qual necessitaremos para o desenvolvimento do trabalho proposto.

### 2.1 Introdução

Atualmente, com o desenvolvimento tecnológico, é possível aproveitar a energia do sol como fonte de calor para aquecimento ou para a produção de eletricidade disponível na luminosidade dos raios solares. Nos capítulos seguintes, a ênfase será dada no aproveitamento da energia solar para a produção de eletricidade pelo efeito fotovoltaico. Este processo se dá a partir da captação da luz solar e conversão direta dela em corrente elétrica. A corrente produzida pelo efeito é tratada por equipamentos (dispositivos e conversores), sendo possível assim armazená-la em baterias ou usá-la diretamente em sistemas conectados. A luz do sol é captada através dos conjuntos de células devidamente arranjadas formando assim os painéis fotovoltaicos, esses por sua vez, possuem além das células fotovoltaicas, componentes eletrônicos como diodos e transistores, os quais são responsáveis pela proteção e encaminhamento da corrente elétrica para que ela possa fluir com segurança e efetividade (BEZERRA (2021)). Esses processos serão mais detalhados no decorrer do capítulo.

## 2.2 Embasamento Teórico

### 2.2.1 Histórico de Evolução

O efeito fotovoltaico é conhecido desde o século XIX, quando em 1839 Becquerel demonstrou a possibilidade de conversão da radiação luminosa em energia elétrica mediante a incidência de luz em um eletrodo mergulhado em uma solução de eletrólito. Foi observado o mesmo comportamento em um sólido, o selênio, em 1877 por Adams e Day na Inglaterra. Em 1883 aparece a primeira célula solar produzida com selênio, com eficiência de conversão de aproximadamente 1%.

Na década de 30, Lange, Grondahl e Schottkl, contribuíram bastantes para se obter uma clara compreensão do efeito fotovoltaico em junção do estado sólido. Em 1941, Ohl obtém a primeira fotocélula de silício monocristalino. No ano de 1949, Billing e Plessnar medem a eficiência de fotocélulas de silício cristalino, ao mesmo tempo em que a teoria da junção P-N de Shockely é divulgada. Em 1954 surge a fotocélula de silício com as características semelhantes às encontradas hoje com eficiência de 6% (Villalva and Gazoli (2012)).

### 2.2.2 Conhecimentos Fundamentais

Segundo Berticelli et al. (2017) a transmissão da energia do Sol para a Terra se dá através da radiação eletromagnética, sendo que 97% da radiação solar está contida entre comprimentos de onda de 0,3 a 3,0  $\mu\text{m}$ , o que caracteriza como uma radiação de ondas curtas.

Para a análise da radiação na superfície terrestre é importante o conhecimento da intensidade da radiação e de sua composição. A radiação solar incidente no limite superior da atmosfera sofre uma série de reflexões, dispersões e absorções durante o seu percurso até o solo devido as flutuações climáticas. A incidência total da radiação solar sobre um corpo localizado no solo é a soma das componentes direta, difusa e refletida (figura 1). Radiação direta é a radiação proveniente diretamente do disco solar e que não sofreu nenhuma mudança de direção além da provocada pela refração atmosférica. Radiação difusa é aquela recebida por um corpo após a direção dos raios solares ter sido modificada por reflexão ou espalhamento na atmosfera. A radiação refletida depende das características do solo e da inclinação do equipamento.

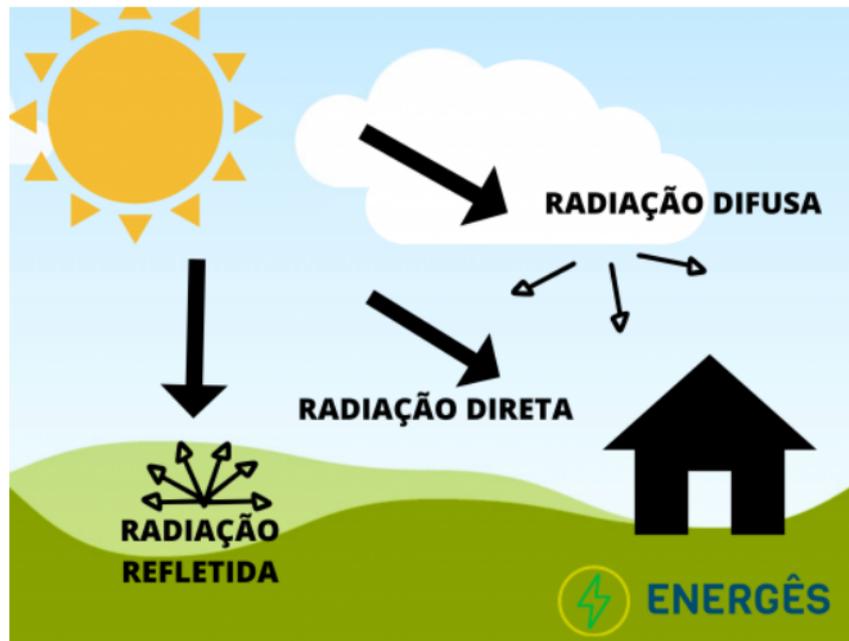


Figura 2.1: Forma de incidência da radiação solar na superfície.(Energês)

Existem vários instrumentos de medição da radiação solar podendo-se destacar:

- Heliógrafo – mede o período de tempo em que a radiação solar supera um dado valor de referência. O heliógrafo opera a partir da focalização da radiação solar sobre uma carta que, como resultado da exposição, é enegrecida. O comprimento desta região mede o chamado número de horas de brilho de Sol.
- Piranômetros – São instrumentos que medem a radiação total, ou seja, a radiação que vem de todas as direções no hemisfério. Destacam-se os piranômetros fotovoltaicos e termoelétricos.
- Piroheliômetros – É um instrumento utilizado para medir a radiação direta. Ele se caracteriza por possuir uma pequena abertura de forma a “ver” apenas o disco solar e a região vizinha, denominada circunsolar.
- Actinógrafos – São utilizados para medição da radiação total ou sua componente difusa, possuindo o sensor e registrador na mesma unidade. Consiste essencialmente em um receptor com três tiras metálicas, a central de cor preta e as laterais brancas. As tiras brancas estão fixadas e a preta está livre em uma extremidade, e irão se curvar, quando iluminadas, em consequência dos diferentes coeficientes de dilatação dos metais que as compõem.

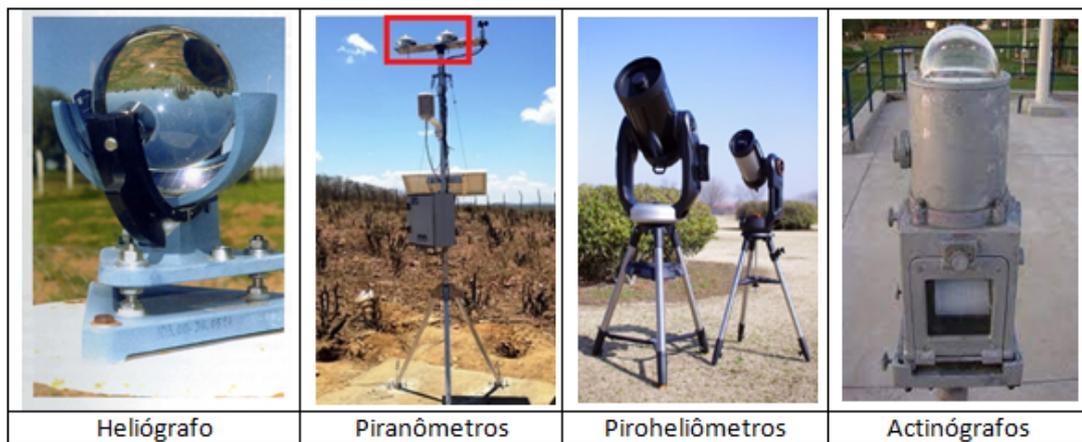


Figura 2.2: Equipamentos de medição de radiação solar (researchgate.net).

Os dados solarimétricos são apresentados habitualmente na forma de energia coletada ao longo de um dia, sendo este parâmetro uma média mensal ao longo de muitos anos.

As unidades de medição mais frequentes são langley por dia (ly/dia), wathhora por metro quadrado ( $\text{Wh}/\text{m}^2$ ) e warr por metro quadrado ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

Estando com céu aberto sem nuvens, a iluminação máxima observada ao meio-dia num local situado ao nível do mar se eleva a  $1\text{kW}/\text{m}^2$ . Atinge  $1,05\text{kW}/\text{m}^2$  a 1000 metros de altura e  $1,1\text{kW}/\text{m}^2$  nas altas montanhas. A intensidade fora da atmosfera se eleva a  $1,377\text{kW}/\text{m}^2$  e é chamada de constante solar (Munoz Escribano et al. (2018)).

O Brasil possui um ótimo índice de radiação solar, principalmente o nordeste brasileiro. Na região do semiárido temos os melhores índices, com valores típicos de  $200\text{a}250\text{W}/\text{m}^2$  de potência contínua, o que equivale entre  $1752\text{kWh}/\text{m}^2$  a  $2190\text{kWh}/\text{m}^2$  por ano de radiação incidente. Isto coloca o local entre as regiões do mundo com maior potencial de energia solar (Baptista and Santos (2010)).

### 2.2.3 Disponibilidade de Radiação

Para um sistema fotovoltaico ser projetado precisaremos estimar a quantidade de energia que poderá ser coletada na localidade desejada. Nas estações solarimétricas é possível coletar dados de radiação solar global, média mensal, sempre no plano horizontal. Com essas informações podemos criar uma escala temporal que nos permita avaliar o desempenho dos equipamentos solares em condições mais próximas da realidade, uma vez que podemos levar em conta a variação da radiação incidente em períodos de tempo compatíveis com as horas de trabalho dos equipamentos (BAJAY et al. (2018)).

Os dados da radiação solar podem ser apresentados em termos de fluxo de potência instantânea em kW ou energia com diversos períodos de integração – kWh por unidade de área. A forma mais comum de apresentação dos dados de radiação é através de valores médios mensais para a energia acumulada ao longo do dia. Uma forma bastante conveniente de se expressar o valor acumulado de energia solar ao longo de um dia é através do número de horas de Sol Pleno. Esta grandeza reflete o número de horas em que a radiação solar deve permanecer constante e igual a  $1\text{kW}/\text{m}^2$  de forma que a energia resultante seja equivalente à energia acumulada para o dia e local em questão. Mostra-se abaixo, um exemplo de cálculo de número de horas de Sol Pleno (SP) para um caso em que a energia diária acumulada é de  $6\text{kWh}/\text{m}^2$  (Fadigas (2012)).

$$PS = \frac{6\text{kWh}/\text{m}^2}{1\text{kW}/\text{m}^2} = 6[h/dia] \quad (2.1)$$

#### 2.2.4 Processo de conversão das Células fotovoltaicas

Como dito anteriormente, a energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade através do efeito fotovoltaico. Na natureza, alguns materiais se comportam diferente ao receberem a incidência de luz proveniente do sol. Os semicondutores são esses materiais, que tem a característica de possuírem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução totalmente vazia à temperaturas muito baixas (Azevedo Jr et al. (2019)).

A célula fotovoltaica de silício cristalino, é composta por duas camadas de silício dopadas com diferentes impurezas. A camada n orientada para o sol está dopada negativamente com elementos do V grupo da tabela periódica, como por exemplo o fósforo, e a camada p inferior, está dopada positivamente com elementos do III grupo da tabela periódica como por exemplo o boro, nas suas partes frontal e posterior são impressos contatos metálicos. A parte frontal da célula fotovoltaica é feita de nitreto de silício ou de dióxido de titânio, deverá ser translúcida quanto possível. Aqui os contatos são essencialmente aplicados na forma de uma grelha fina e a reflexão da luz solar pode ser reduzida até abaixo de 5%, com o depósito por vapor de uma camada mais fina (camada de antirreflexo). As perdas podem ser ocasionadas pela recombinação, reflexão e pelo sombreamento entre os contatos frontais, na célula solar. Uma parte da energia não aproveitada é absorvida e transformada em calor (Villalva and Gazoli (2012)).

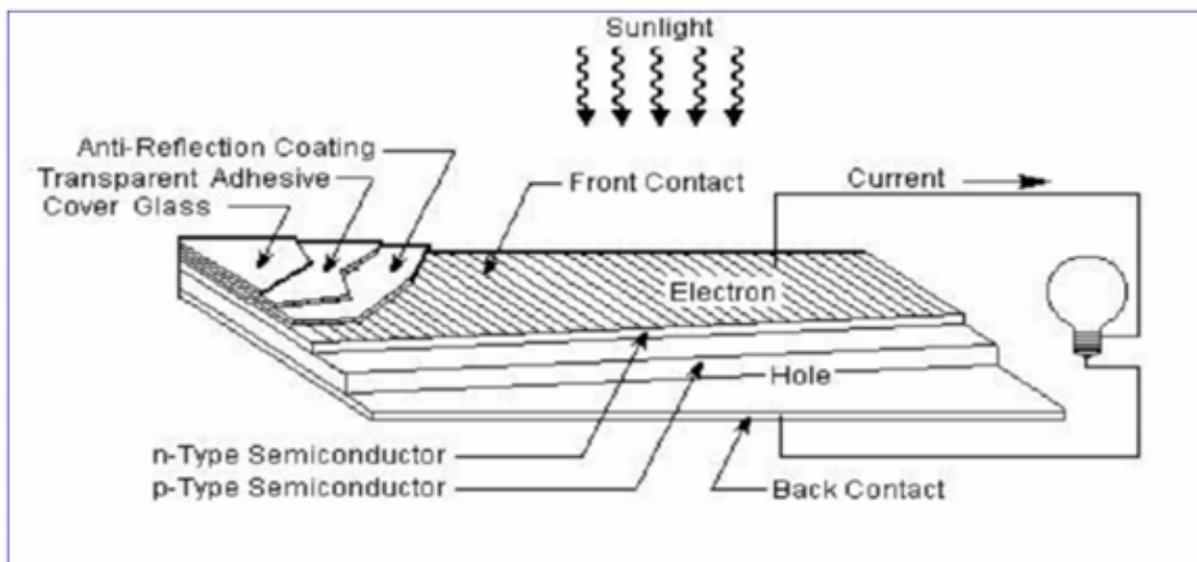


Figura 2.3: Modelo de captura de radiação solar (<https://www.romiotto.com.br/>).

A radiação solar sobre a célula fotovoltaica, na superfície n, tem parte dela refletida, atravessada e outra é absorvida pela célula fotovoltaica, sendo que os fótons da radiação solar incidente absorvida pela célula, contendo energia atinge os elétrons que se encontram na banda de valência (banda de menor energia comparando com a banda de condução), transmitindo-lhes energia suficiente para saltar para a banda de condução deixando lacunas.

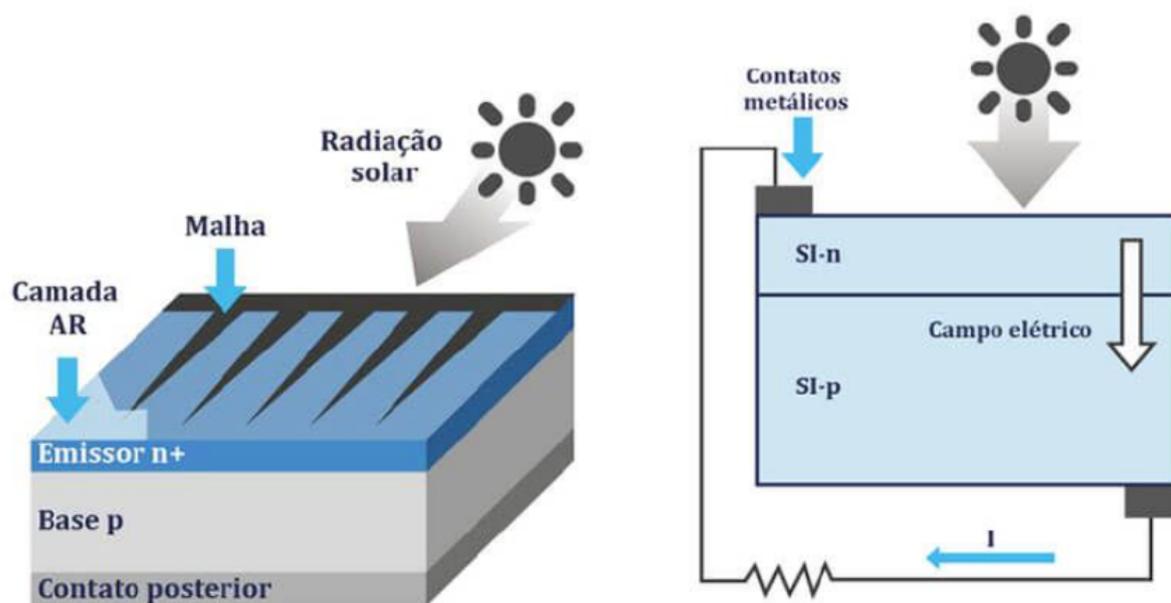


Figura 2.4: Modelo Junção p-n conectada a carga (<https://engehallrenovaveis.com.br/>).

Devido criação da junção p-n surge o campo elétrico e ocorre o intercâmbio dos portadores entre os componentes p-n durante o processo de difusão dos portadores em maioria. Segundo condição da equação (2.2) faz com que as cargas elétricas das impurezas aceitadoras e ionizadas deixem de ser compensadas originando deste modo a criação da carga volumétrica negativa na componente p e positiva na componente n. Quando é atingido o equilíbrio na junção p-n e ligando os terminais a um circuito que se fecha exteriormente estabelece-se a diferença de potencial na célula fotovoltaica dada pela expressão (2.3), gerando-se deste modo a corrente elétrica que circula através da carga elétrica (BAJAY et al. (2018)).

$$E_{f_n} > E_{f_p} \quad (2.2)$$

$$U_n - U_p = (E_{f_n} - E_{f_p})/q \quad (2.3)$$

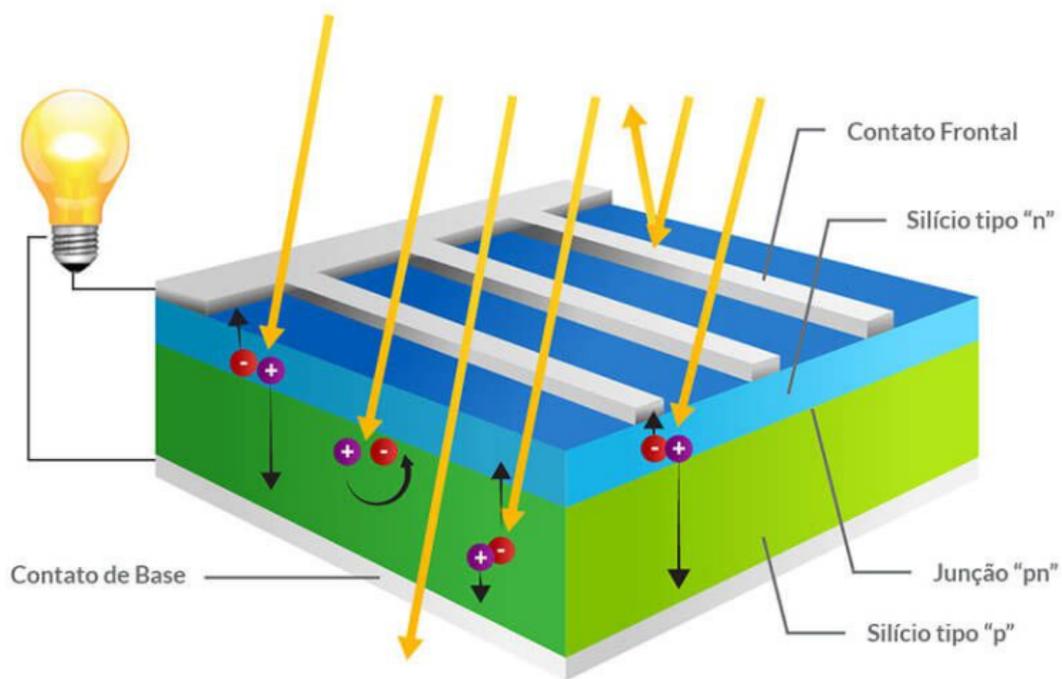


Figura 2.5: Célula em operação (<https://engehallrenovaveis.com.br/>).

## 2.2.5 Tipos de Células fotovoltaicas

As células fotovoltaicas podem ser encontradas de três modelos, monocristalino, policristalino e amorfo, os quais são diferenciados pelos processos de fabricação, bem como os materiais usados.

- Células de silício monocristalino obtém-se a partir de barras cilíndricas de silício monocristalino produzidas em fornos especiais. As células são obtidas por corte das barras em forma de pastilhas finas. A sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade superior 12%.

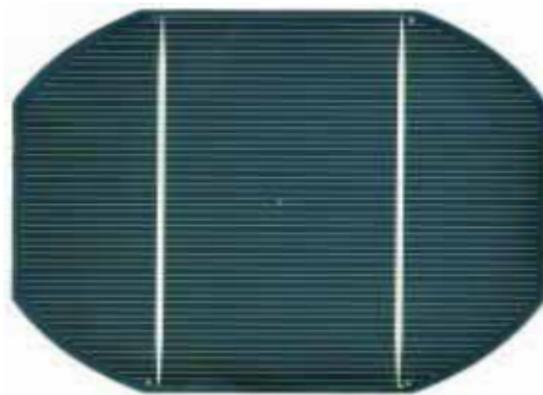


Figura 2.6: Célula de silício monocristalino (Fadigas (2012)).

- As células de silício policristalino são produzidas a partir de blocos de silício obtidos por fusão de silício puro em moldes especiais. Uma vez nos moldes, o silício esfria lentamente e solidifica-se. Neste processo, os átomos não se organizam num único cristal, forma-se uma estrutura policristalina com superfícies de separação entre os cristais. Sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade é ligeiramente menor do que nas de silício monocristalino.

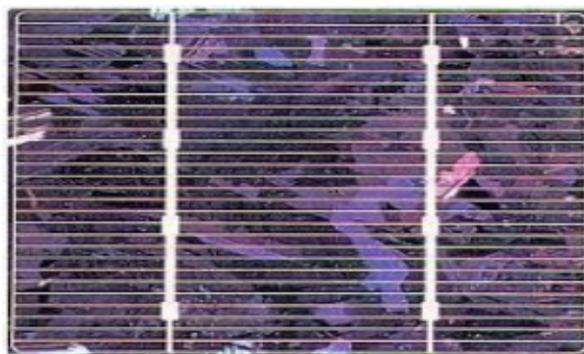


Figura 2.7: Célula de silício policristalino (Fadigas (2012)).

- As células de silício amorfos são obtidas por meio da deposição de camadas finas de silício sobre superfícies de vidro ou metal. Sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade varia entre 5% e 7%.

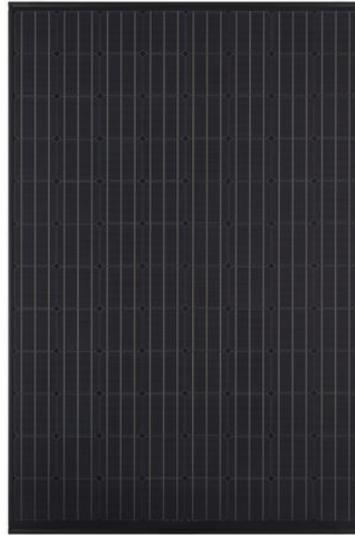


Figura 2.8: Célula de silício amorfos (Fadigas (2012)).

## 2.2.6 Representação dos módulos fotovoltaicas

Com tensão e corrente muito pequena na célula fotovoltaica, faz-se necessário agrupar várias células para que seja possível alcançar tensão e corrente úteis. O arranjo das células nos módulos pode ser feito conectando-as em série ou em paralelo, respeitando os limites de tensão e corrente de cada célula.

Ao conectar as células em paralelo, somam-se as correntes de cada módulo e a tensão do módulo é exatamente a tensão da célula. A corrente produzida pelo efeito fotovoltaico é contínua. Pelas características típicas das células (corrente máxima por volta de 3A e tensão muito baixa, em torno de 0,7V) este arranjo não é utilizado salvo em condições muito especiais.

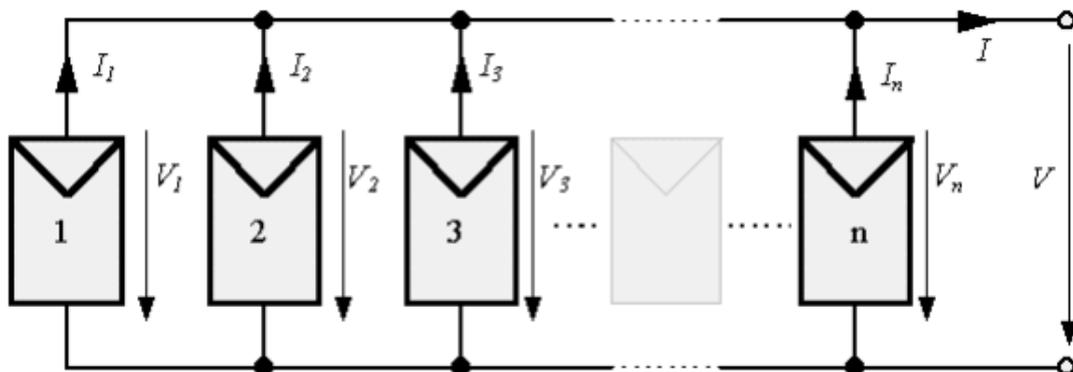


Figura 2.9: Células em paralelo (Berticelli et al. (2017)).

A conexão mais comum de células fotovoltaicas em módulos é o arranjo em série. Este consiste em agrupar o maior número de células em série onde somam-se a tensão de cada célula chegando a um valor final, por exemplo, de 12V o que possibilita a carga de acumuladores (baterias) que também funcionam na faixa dos 12V.

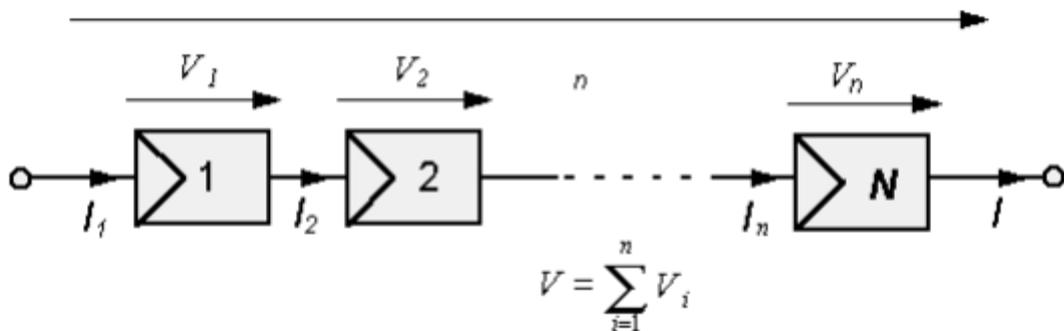


Figura 2.10: Células em série (Berticelli et al. (2017)).

Quando uma célula fotovoltaica dentro de um módulo, por algum motivo, estiver encoberta a potência de saída do módulo cairá drasticamente que, por estar ligada em série, comprometerá todo o funcionamento das demais células no módulo. Para que toda corrente de um módulo não seja limitada por uma célula de pior desempenho (o caso de estar encoberta), usa-se um diodo de passo ou de “bypass”. Este diodo serve como um caminho alternativo para a corrente e limita a dissipação de calor na célula defeituosa. Geralmente o uso do diodo bypass é feito em grupamentos de células o que, torna muito mais barato comparado ao custo de se conectar um diodo em cada célula.

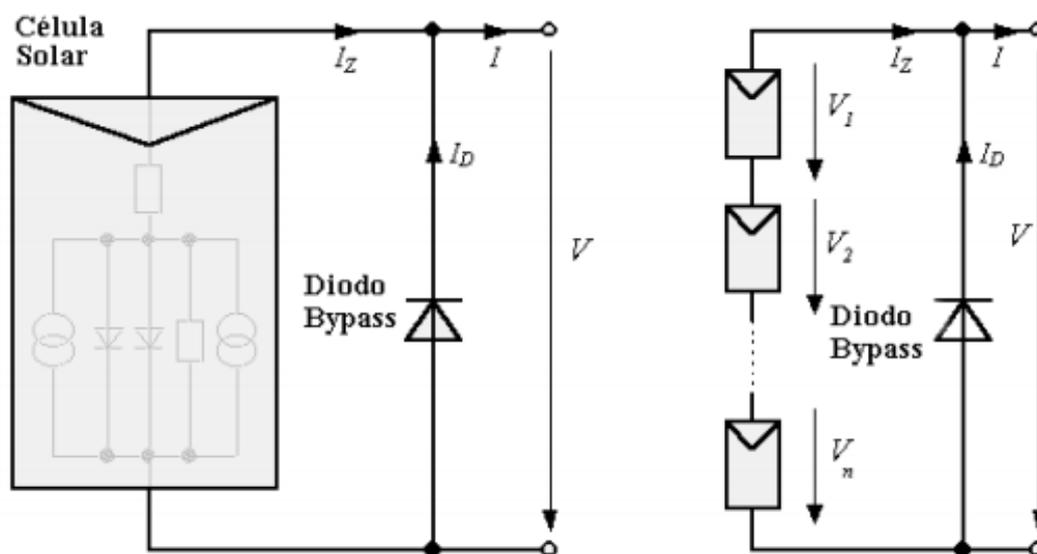


Figura 2.11: Células com diodo bypass (Berticelli et al. (2017)).

Um possível problema que pode acontecer é quando surge uma corrente negativa fluindo pelas células, ou seja, ao invés de gerar corrente, o módulo passa a receber muito mais do que produz. Esta corrente pode causar queda na eficiência das células e, em caso mais drástico, a célula pode ser desconectada do arranjo causando assim a perda total do fluxo de energia do módulo. Para evitar esses problemas, usa-se um diodo de bloqueio impedindo assim correntes reversas que podem ocorrer caso liguem o módulo diretamente em um acumulador ou bateria (Berticelli et al. (2017)).

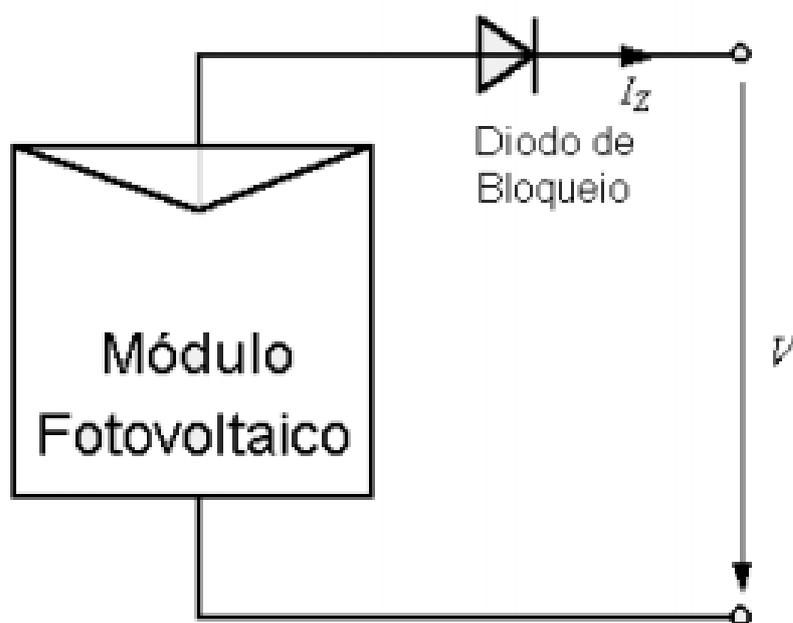


Figura 2.12: Células com diodo de bloqueio (Berticelli et al. (2017)).

## 2.2.7 Principais características dos módulos fotovoltaicos

Normalmente, a potência dos módulos fotovoltaicos é apresentada pela potência de pico. Entretanto existem outros parâmetros elétricos que caracterizam melhor a funcionalidade dos módulos. As principais características elétricas dos módulos fotovoltaicos são as seguintes:

- Voltagem de Circuito Aberto ( $V_{oc}$ )
- Corrente de Curto Circuito ( $I_{sc}$ )
- Potência Máxima ( $P_m$ )
- Voltagem de Potência Máxima ( $V_{mp}$ )
- Corrente de Potência Máxima ( $I_{mp}$ )

A condição padrão para se obter as curvas características dos módulos é definida para radiação de  $1000\text{W}/\text{m}^2$  (radiação recebida na superfície da Terra em dia claro, ao meio-dia), e temperatura de  $25^\circ\text{C}$  na célula (a eficiência da célula é reduzida com o aumento da temperatura) (Villalva (1983)).

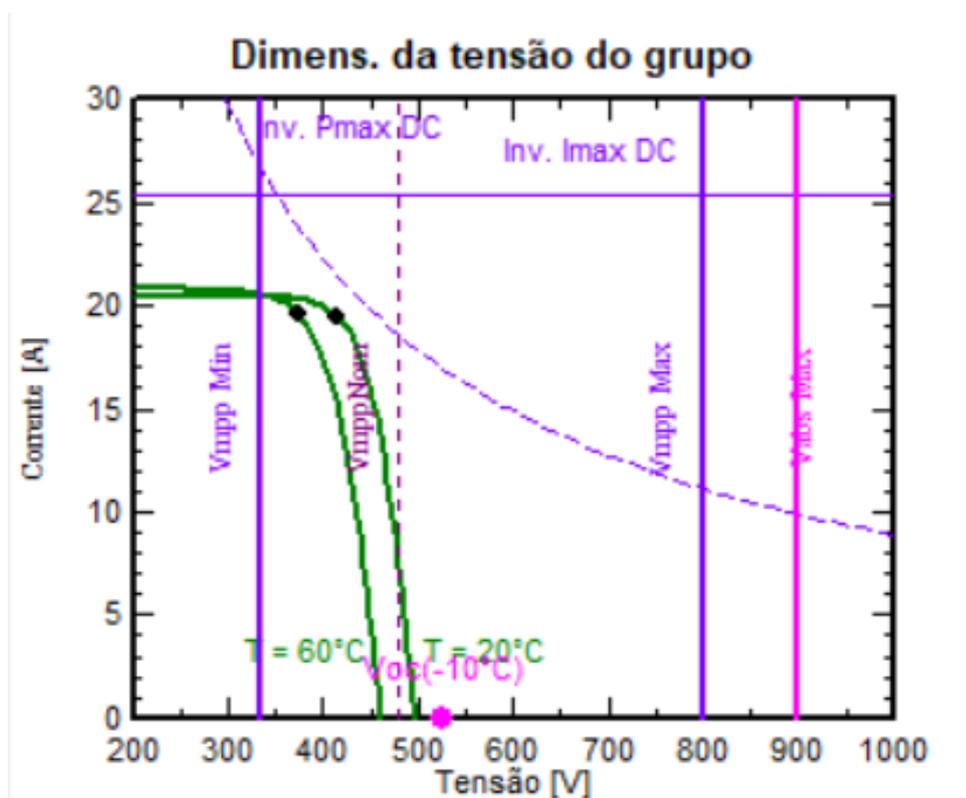


Figura 2.13: Parâmetros de  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $P_m$ ,  $V_{mp}$  e  $I_{mp}$  (Software PVSYSY).

*Os principais fatores que influenciam nas características elétricas de um painel é a Intensidade Luminosa e a Temperatura das Células. A corrente gerada nos módulos aumenta linearmente com o aumento da Intensidade luminosa. Por outro lado, o aumento da temperatura na célula faz com que a eficiência do módulo caia abaixando assim os pontos de operação para máxima potência gerada.*

# Capítulo 3

## Tipos de sistemas fotovoltaicos e dispositivos

Esse capítulo aborda informações relativas aos tipos de sistemas fotovoltaicos existentes (OnGrid, OffGrid, ZeroGrid e Híbridos), além da descrição dos dispositivos necessários a cada aplicação.

### 3.1 Introdução

Devido à crescente diminuição das chuvas e conseqüente redução da energia gerada por hidrelétrica, sendo necessidade da utilização de termoelétricas, aumentou-se bastante o preço da energia elétrica, fazendo com que haja uma busca por energia renovável (e acessível) e sustentável por meio da tecnologia dos mais diversos tipos. A energia solar fotovoltaica tem grande potencial em praticamente todo o território nacional, em razão dos elevados índices de incidência da radiação solar em vários dos estados brasileiros, deste modo constituindo-se uma excelente fonte de eletricidade limpa e renovável.

Antes de fazer uso da energia solar precisamos saber quais são os tipos de geradores fotovoltaicos existente no mercado e só assim será possível identificar, através de suas limitações, o modelo adequado para a aplicação desejada. Atualmente o mercado disponibiliza os modelos conectados à rede (ditos OnGrid ou Grid-Tie), isolados ou autônomos (ditos OffGrid) e os híbridos.

Os sistemas fotovoltaicos são compostos basicamente por painéis solares e seus dispositivos de proteção DC, inversores de frequência responsáveis pela conversão da energia

DC/AC e dispositivos de proteção AC, dentre outros componentes elétricos, os quais serão apresentados detalhadamente nos seus respectivos tópicos no decorrer do capítulo.

Em todos os tipos de geração fotovoltaica o inversor tem um papel superimportante na conversão da energia, uma vez que este recebe a energia em corrente contínua e a converte em corrente alternada entregando dentro da tensão e frequência padrão dos equipamentos elétricos que consumirão esta energia (Berticelli et al. (2017)).

## 3.2 Modelos de sistemas fotovoltaicos

### 3.2.1 Sistemas isolados ou autônomos: OffGrid

A principal característica do sistema off grid (sistema isolado) é o fato de não estar conectado à rede elétrica, ou seja, ele produz toda a energia que consome por meio de baterias e da produção dos painéis solares. São indicados para locais remotos onde não se tem acesso à rede elétrica das concessionárias de energia e é usado principalmente, para eletrificação de cercas, de postes de luz, bombeamento de água ou ainda para edificações para alimentar cargas essenciais.

Dentre os sistemas isolados, existem muitas configurações possíveis. As configurações mais comuns são:

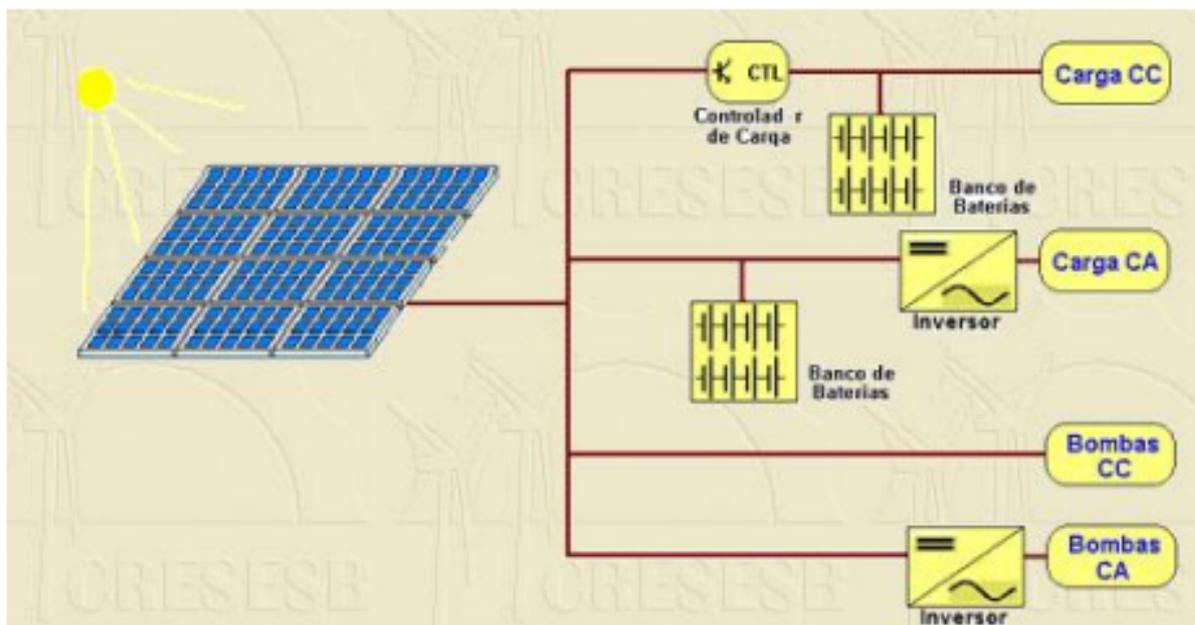


Figura 3.1: Aplicação de sistemas OffGrid (<http://www.luismnunes.com/>).

- Carga CC sem armazenamento – A energia elétrica é usada no momento da geração por equipamento que operam em corrente contínua.
- Carga CC com armazenamento – É o caso em que se deseja utilizar equipamentos elétricos, em corrente contínua, independentemente de haver ou não geração fotovoltaica simultânea. Para que isto seja possível, a energia elétrica deve ser armazenada em baterias.
- Carga CA sem armazenamento – Da mesma forma como apresentado para o caso CC, pode-se usar equipamentos que operem em corrente alternada sem o uso de baterias, bastando, para tanto, a introdução de um inversor entre o arranjo fotovoltaico e o equipamento a ser usado.
- Carga CA com armazenamento – Para alimentação de equipamentos que operem em corrente alternada é necessário que se utilize um inversor. Um caso típico de aplicação destes sistemas é no atendimento de residências isoladas que, por possuírem um nível de conforto superior àquelas alimentadas em corrente contínua, permitem o uso de eletrodomésticos convencionais.

Nesse tipo de sistema, a energia produzida é armazenada em baterias, a fim de garantir seu funcionamento em períodos com pouca ou nenhuma incidência de luz solar, como os dias chuvosos, nublados e à noite. Durante o dia, quando a geração de energia excede o consumo, esse excedente é enviado à bateria para ser usado no momento em que o consumo é maior que a produção (Villalva (1983)).

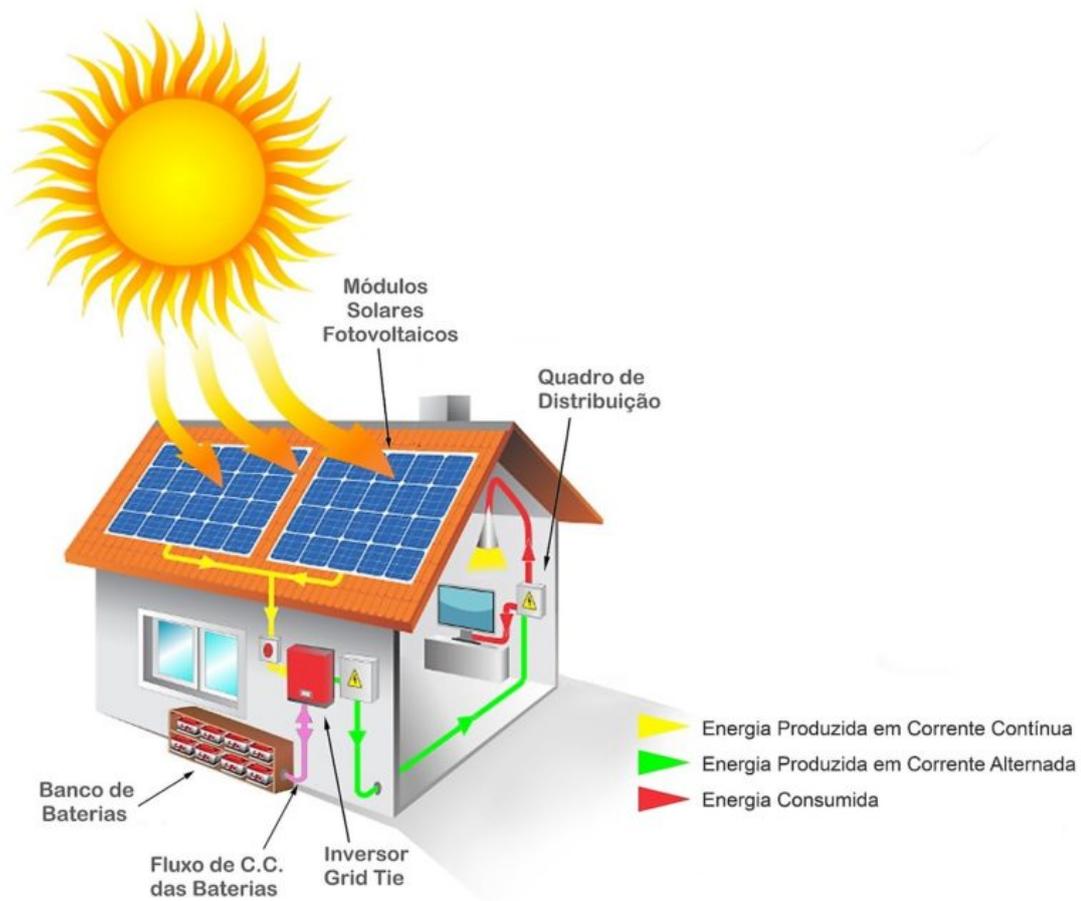


Figura 3.2: Aplicação de sistemas OffGrid.

Esse modelo é dividido em três blocos (gerador, condicionador de potência e armazenamento) onde cada um tem funções específicas para que o sistema funcione adequadamente. O bloco gerador é constituído pelo painel solar, estrutura de fixação e cabos. O bloco condicionador de potência é constituído pelo inversor solar e o controlador de carga, uma observação é que este inverso não conta com o sistema de anti-ilhamento uma vez que não está conectado à rede da concessionária. Já o bloco de armazenamento é composto pelo banco de baterias solares (Villalva (1983)).

### 3.2.2 Sistemas conectado à rede: OnGrid ou Grid-Tie

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede elétrica ou on-grid ou grid-tie, apresentam-se como mais populares, comparados aos outros modelos. Este tem a capacidade de atender pequenas, médias e grandes necessidades de geração (Residenciais, Comerciais e Industriais) sendo possível atender edificações em áreas urbanas e rurais, as quais possuam

disponibilidade de rede elétrica.



Figura 3.3: Aplicação residencial, comercial e industrial (Portal Solar).

O inversor trabalha em paralelo com a rede de distribuição, e por isso devem se comportar exatamente dentro dos requisitos exigido pela concessionaria. Devem operar dentro de uma estreita faixa de parâmetros que incluem: tensão (voltagem), frequência e capacidades de detecção de falta de energia. É importante salientar que devido a capacidade de detecção de falta de energia, o inversor desativa o funcionamento do sistema, através do procedimento de anti-ilhamento, o qual deixa o sistema inoperante até que a energia seja reestabelecida. Esse mecanismo tem o objetivo detectar alterações de frequência, mudança de fase ou queda de tensão, em qualquer um desses gatilhos haverá interrupção de energia mesmo que esteja de dia com sol intenso, uma vez que a aplicação desse sistema tem o objetivo de minimizar os gastos com energia elétrica e não independência da rede (Villalva (1983)).

O funcionamento do sistema de geração de energia solar começa a partir dos painéis solar captando a radiação solar, que é absorvida e transformada em energia elétrica.

O inversor que recebe a carga produzida pelos painéis, convertendo a energia solar em energia limpa, pronta para o consumo. O sistema conta com o quadro elétrico de proteção (string box), um sistema anti-surto para garantir a proteção do equipamento, o inversor também controla automaticamente o sistema gerador, a energia gerada é utilizada na unidade consumidora instantaneamente, caso não haja geração no momento, automaticamente passa-se á utilização da energia da rede da concessionária. O medidor bidirecional se faz necessário pois é responsável pelo registro de consumo e injeção de corrente junto a rede da concessionária (Fadigas (2012)).

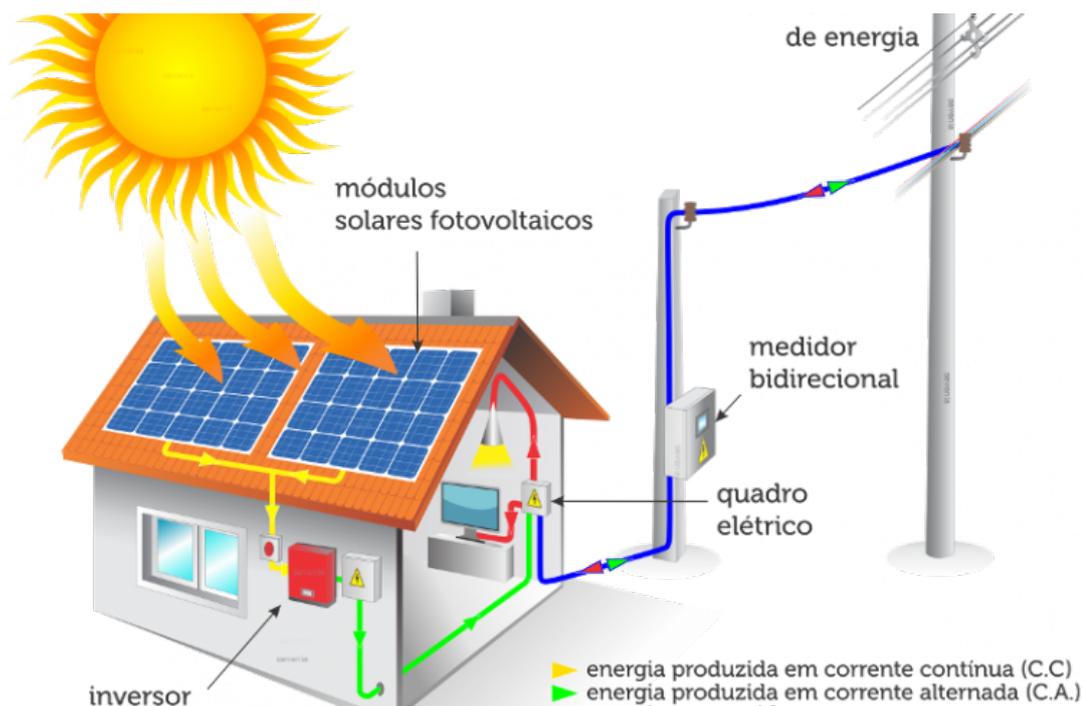


Figura 3.4: Exemplo de Sistema OnGrid (GridSolaris).

Este modelo se destaca tanto em relação aos custos quanto na flexibilidade do uso do sistema, por possibilitar a instalação do sistema em uma unidade diferente da unidade consumidora e mesmo assim receber o benefício da energia produzida. Neste aspecto podemos dizer que a unidade consumidora receberá o benefício da produção remoto, sendo necessário que a instalação do sistema seja feita dentro da rede da mesma concessionária (Villalva (1983)).

### 3.2.3 Sistemas híbridos.

Um sistema fotovoltaico híbrido, oferece uma gama de aplicações específicas, assim como sua composição de equipamentos que podem variar conforme a aplicação. É importante ressaltar que não se deve confundir os novos sistemas solares híbridos com modelos híbridos mais antigos, os quais usavam a energia solar e a eólica em conjunto.

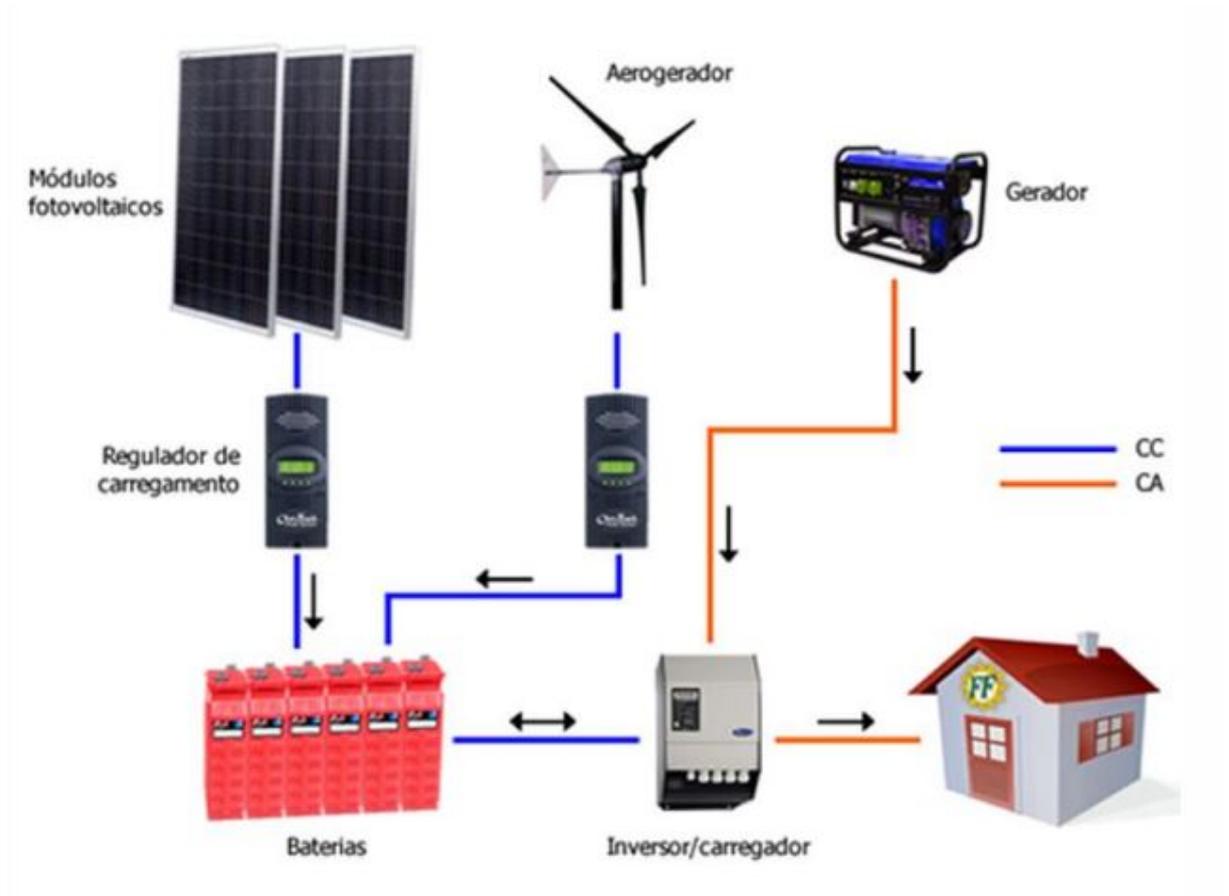


Figura 3.5: Exemplo de Sistema Híbrido (GridSolaris).

Os sistemas híbridos que serão apresentados nesta unidade, se caracterizam principalmente pela capacidade de gerar a energia elétrica por meio do sol, ao mesmo tempo, armazenar toda energia produzida em excesso, em baterias e tudo isso conectado à rede e usufruindo dela quando necessário.

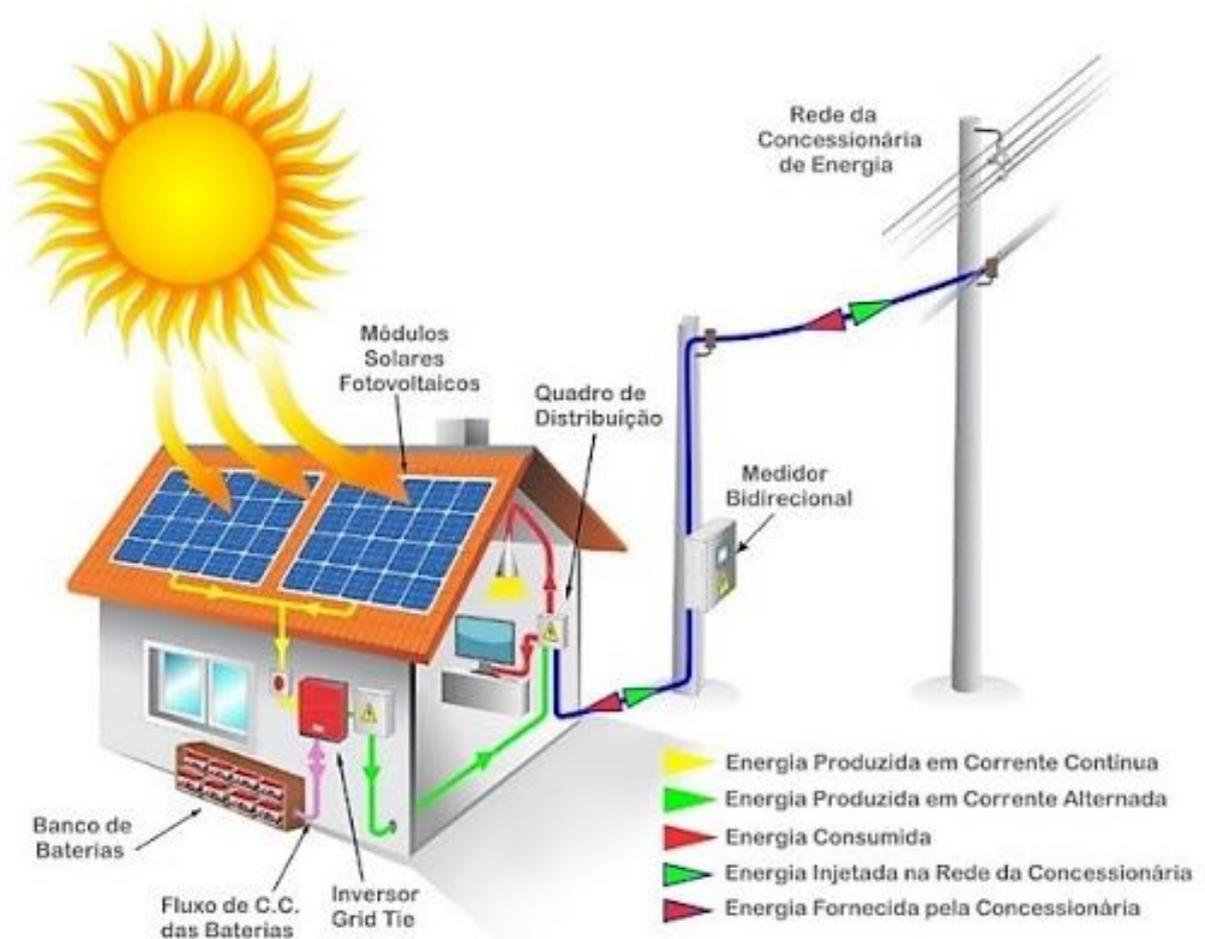


Figura 3.6: Exemplo de Sistema Híbrido atual (GridSolaris).

Este modelo tem a capacidade de integrar as tecnologias OnGrid e OffGrid simultaneamente em um único sistema de forma independentes entre si, e isso se dá pelas tecnologias e controles inteligentes inseridos no sistema.

Sendo assim, é capaz de suprir falhas na rede de energia, seu uso pode ser até mesmo à noite, entre outras funções. Como resultado, proporcionam economia e uma maior segurança de autonomia elétrica (Villalva (1983)).

# Capítulo 4

## Legislação de sistemas fotovoltaicos conectado a rede

Neste capítulo serão apresentados os aspectos legais e regulatórios associados aos sistemas fotovoltaicos, contendo a legislação vigente no Brasil para os sistemas conectados à rede.

### 4.1 Introdução

Para implementação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede foram elaboradas resoluções e normas técnicas que passaram a ser usadas como referência para regulamentar projetos, equipamentos e instalações, além de padronizar as características elétricas e de segurança durante a instalação.

Das resoluções e normas que serão apresentadas, será destacado os pontos importantes que foram necessários para a implementação do estudo de caso de aplicação de um sistema fotovoltaico residencial na cidade de Manaus.

### 4.2 Resoluções Regulamentares

#### 4.2.1 Resolução 482/2012 e 687/2015 (atualização da 482)

Em primeiro de março entram em vigor as novas regras da Resolução Normativa 482 ANEEL de 2012 que estabelece o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, permitindo que o consumidor instale pequenos geradores em sua unidade consumidora e

troque energia com a distribuidora local com objetivo de reduzir o valor da sua fatura de energia elétrica. Em vinte e quatro de novembro de 2015 a Resolução Normativa 687 ANEEL de 2015, altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012 (Creplive (2018)).

As adesões ao modelo de geração distribuída têm crescido expressivamente desde as primeiras instalações, em 2012. Entre 2014 e 2016 os registros quadruplicaram passando de 424 conexões para 1930 conexões. Com a revisão da norma, que simplifica procedimentos de registro, a estimativa é que até 2024 mais 1,2 milhão de consumidores passem a produzir sua própria energia, o equivalente a 4,5 gigawatts (GW) de potência instalada (Trinkenreich and Baldini (2020)).

A resolução autoriza o uso de qualquer fonte renovável, além da cogeração qualificada, denominando-se microgeração distribuída a central geradora com potência instalada até 75 quilowatts (KW) e minigeração distribuída aquela com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW (sendo 3 MW para a fonte hídrica), conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (de Bitencourt et al. (2020)).

As principais características dessas resoluções e suas alterações serão apresentadas nos itens abaixo:

1. **Validade dos Créditos de Energia:** Quando a quantidade de energia gerada em determinado mês for superior à energia consumida naquele período, o consumidor fica com créditos que podem ser utilizados para diminuir a fatura dos meses seguintes. O prazo de validade dos créditos passou de 36 para 60 meses, e podem ser usados também para abater o consumo de unidades consumidoras do mesmo titular situadas em outro local, desde que na área de atendimento de uma mesma distribuidora. Esse tipo de utilização dos créditos é chamado de “autoconsumo remoto”.

Outra inovação da norma diz respeito à possibilidade de instalação de geração distribuída em condomínios (empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras). Nessa configuração, a energia gerada pode ser repartida entre os condôminos em porcentagens definidas pelos próprios consumidores (BEZerra (2021)).

A ANEEL criou ainda a figura da “geração compartilhada”, possibilitando que diversos interessados se unam em um consórcio ou em uma cooperativa, instalem

um micro ou minigeração distribuída e utilizem a energia gerada para redução das faturas dos consorciados ou cooperados.

2. **Custo de Adequação:** São de responsabilidade da distribuidora no caso de microgeração, e do acessante no caso de minigeração.
3. **Incentivos Fiscais:** Existem alguns incentivos fiscais vigentes que isentam a cobrança de ICMS e IPI na venda de geradores de energia solar fotovoltaica. Há ainda isenção de PIS/COFINS para a energia injetada na rede além de isenção de ICMS para energia injetada na rede em 24 estados brasileiros.
4. **Prazos Menores:** Com relação aos procedimentos necessários para se conectar a microgeração ou minigeração distribuída à rede da distribuidora, a ANEEL estabeleceu regras que simplificam o processo: foram instituídos formulários padrão para realização da solicitação de acesso pelo consumidor. O prazo total para a distribuidora conectar usinas de até 75 kW, que era de 82 dias, foi reduzido para 34 dias.
5. **Menos Burocracia:** Adicionalmente, a partir de janeiro de 2017, a solicitação de acesso, poderá ser feita e acompanhada junto à distribuidora de energia pela internet. Esse procedimento reduz a burocracia, anteriormente era necessário protocolar os projetos presencialmente.
6. **Evolução da quantidade de sistemas solares:** A quantidade de sistemas solares conectados a rede cresce exponencialmente no Brasil desde 2012 quando foi criada a resolução 482 da ANEEL. Hoje temos pouco mais de 28 mil sistemas conectados a rede, e esse número irá continuar a crescer de forma acelerada. Um estudo da ANEEL estima em 1 milhão de conexões no final do ano de 2023. Fatores como o constante e elevado aumentos das tarifas de energia elétrica, a redução do preço dos equipamentos de energia solar e a preocupação ambiental da sociedade que clama por fontes de energia limpa são os principais fatores para esse crescimento exponencial.
7. **Benefícios para a concessionária:** A geração de energia perto do local de consumo traz uma série de vantagens, tais como redução dos gastos dos consumidores,

economia dos investimentos em transmissão, redução das perdas nas redes e melhoria da qualidade do serviço de energia elétrica. A expansão da geração distribuída beneficia o consumidor-gerador, a economia do país e os demais consumidores, pois esses benefícios se estendem a todo o sistema elétrico.

As resoluções normativas completa estão disponíveis no site da [ANEEL](#).

### 4.3 Normas de Instalação e Comissionamento

Neste capítulo será apresentado as principais normas que norteiam a elaboração do projetos e execuções de instalações de sistemas fotovoltaico conectados à rede.

Normas Aplicáveis: NR-10, NR-35, NBR-5410, NBR-14039, NBR-16149/16150

#### 1. **NBR 16149: Características de Interface com a Rede de Distribuição**

Trata dos requisitos que os inversores solares precisam atender para servirem de interface dos Sistemas Fotovoltaicos com a rede.

Efetivamente esta norma determina que ocorra um desligamento do ponto de conexão quando:

- Tensão for inferior a 80% e superior a 110% em um intervalo de tempo de até 0,4s e 0,2s respectivamente, que a frequência.
- Frequência for inferior a 57,5 e superior a 62 Hz em 0,2s e redução da potência quando estiver entre 60,5 e 62 Hz.
- Injeção de corrente contínua for 0,5% da corrente de curto circuito em 0,1s.
- Harmônicos com TDHmax de 5%.

O tempo de reconexão varia entre 20 e 300 segundos após os parâmetros descritos anteriormente serem estabelecidos aos padrões da norma.

#### 2. **NBR 16274: Requisitos Mínimos para Documentação, Ensaio de Comissionamento, Inspeção e Avaliação de Desempenho;**

A ABNT NBR 16274 (2014) é aplicável apenas em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, ou seja, não se aplica a sistemas com armazenamento de energia elétrica por meio de baterias e sistemas fotovoltaicos que utilizem módulos com

micro inversores. Esta norma também não se aplica a sistemas híbridos (Azevedo Jr et al. (2019)).

### 3. **NBR 16690: Instalações Elétricas de Arranjos Fotovoltaicos;**

A NBR 16690 foi criada com o objetivo de estabelecer os requisitos de projeto das instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos, padrões de condutores, dispositivos de proteção elétrica, dispositivos de manobra, aterramento e equipotencialização do arranjo fotovoltaico.

A Norma descreve como deverão ser combinados os arranjos fotovoltaicos e não incluiu os dispositivos de armazenamento de energia, as unidades de condicionamento de potência ou as cargas.

### 4. **Normas Regulamentadoras NR-10 e NR-35.**

As normas NR10 e NR 35 estabelecem as condições mínimas necessárias de trabalho para que o Eletricista, Engenheiro ou Prestador de Serviço tenham segurança enquanto trabalham.

Essas são normas regulamentadoras e exigidas pelo Ministério do Trabalho, com o objetivo de garantir a segurança enquanto trabalha e credibilidade durante a execução pois trabalhando dentro delas, pode-se evitar acidentes de trabalho e para o contratante, passará uma imagem de um eletricista realmente profissional.

A NR 10 determina requisitos e condições mínimas, objetivando a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade. É aplicada nas fases de geração, transmissão, distribuição e consumo, ou seja, nas etapas de projeto, construção, montagem, operação, manutenção das instalações elétricas e quaisquer trabalhos realizados nas suas proximidades, observando-se as normas técnicas oficiais estabelecidas pelos órgãos competentes. Na ausência ou omissão destas, as normas internacionais cabíveis Cruz (2019).

Em todas as intervenções em instalações elétricas devem ser adotadas medidas preventivas de controle do risco elétrico e de outros riscos adicionais mediante técnicas de análise de risco, de forma a garantir a segurança e a saúde no traba-

lho. Maiores detalhes da norma regulamentadora podem ser verificadas em <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/>.

A Norma Regulamentadora 35 estabelece os requisitos mínimos e as medidas de proteção necessárias para realizar atividades em altura, com o intuito de prevenir e minimizar danos ocorridos por acidentes nestas atividades.

Considera-se, perante a NR 35, atividades em altura aqueles realizados acima de 2 metros do nível inferior, caso exista o risco de queda e estabelece que as atividades sejam realizadas por profissionais devidamente capacitados que seja realizado uma análise de risco (AR) e que toda a atividade seja supervisionada. Devem ser implementadas medidas de proteção coletiva (EPC) e individual (EPI) adequadas as necessidades exigidas para a realização da atividade. Os trabalhos em altura devem considerar as influências externas que possam alterar as condições de trabalho já previstas na Análise de Risco (Regulamentadora (2019)).

Em todas as atividades em altura, é obrigatório o uso de proteção contra quedas. O sistema deve possuir características, das quais:

- Ser adequado e implementado de acordo com a tarefa que será executada;
- Considerar os riscos adicionais que o trabalhador esteja exposto, bem como os da natureza da atividade, e que estejam descritos na Análise de Risco;
- Possuir características que suportem uma queda, através da resistência para suportar a força máxima aplicável.
- Atender as normas de segurança nacionais, e caso não exista uma especificada norma, seguir as normativas de segurança internacionais;
- Realizar uma inspeção sistemática em todos os elementos compatíveis.

Maiores detalhes da norma regulamentadora pode ser verificadas em <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/>.

# Capítulo 5

## Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos conectados a rede

Neste capítulo serão abordadas as principais técnicas de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos conectados observada e recomendada pelos principais estudiosos do ramo, como Villalva and Gazoli (2012) e Azevedo Jr et al. (2019), os quais tomei como referência para todas as abordagens citadas nos capítulos anteriores.

Desta forma, o dimensionamento será apresentado em etapas, o que possibilitará um melhor entendimento de todo o processo, partindo-se da capacidade de geração da localidade até a indicação do tamanho do sistema fotovoltaico capaz de atender a solicitação apresentada.

### 5.1 Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos On-Grid

Os sistemas fotovoltaicos OnGrid utilizam grandes números de placas, comparado ao OffGrid, não utilizam armazenamento de energia pois entregam diretamente na rede toda sua produção que não é consumida instantaneamente pela carga.

Dessa forma, para que o dimensionamento seja apropriado, precisamos levar em consideração a necessidade da carga, a capacidade de entrega à rede e a capacidade de geração na localidade desejada, uma vez que esta varia de acordo com a posição geográfica no globo terrestre (Isami and Bis (2020)).

### 5.1.1 Quanto a posição geográfica e inclinação de painéis

Para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicas é imprescindível que saibamos a capacidade de irradiação solar no local desejado, para que assim seja possível saber se é viável ou não a implementação desse sistema.

Dessa forma, pode-se usar ferramentas computacionais para a verificação e estimativa de irradiação da localidade desejada. Softwares como o PVSYST, LUVIC, HOMER PRO, PV F-CHART e SOLAR PRO, usam bancos de dados de medidores de irradiação solar que estão espalhados por todo o globo e permitem que essas informações ocorridas sejam usadas como referências estimadas para os projetos fotovoltaicos, sendo possível assim estimar a capacidade de geração que cada parte do planeta. Neste artigo usamos como referência o software PVSYST para o dimensionamento e este usa a base de dados solarimétrica da CRESESB, NASA e METEONORM. Estes institutos apresentam pequenas diferenças quanto aos seus dados coletados e, portanto, podem ser considerados equivalentes. A tabela 1 apresenta o potencial anual médio de energia solar disponível no território brasileiro (Villalva (1983)).

POTENCIAL ANUAL MÉDIO DE ENERGIA SOLAR	
REGIÃO	RADIAÇÃO GLOBAL MÉDIA
NORDESTE	5,9 kWh/m <sup>2</sup>
CENTRO-OESTE	5,7 kWh/m <sup>2</sup>
SUDESTE	5,6 kWh/m <sup>2</sup>
NORTE	5,5 kWh/m <sup>2</sup>
SUL	5,0 kWh/m <sup>2</sup>

Tabela 5.1: Potencial anual médio de energia solar.

### 5.1.2 Quanto a capacidade de injeção a rede

A rede de distribuição tem auto poder de absorção de corrente pois foi projetada para atender a demanda de uma cidade por exemplo. Esta tem que ser capaz de suportar a solicitação da carga, e tendo em vista que as cargas operam de modo dinâmico e muito particular, no que diz respeito a quantidade de carga solicitada pelo tempo de uso, é notório que esta estrutura de distribuição é capaz de absolver e inclusive retransmitir essa

corrente que transita sob sua linha, mesmo senso estas de outra fonte geradora.

Dessa forma a preocupação refere-se principalmente ao modo de proteção que deve ser usado entre a unidade geradora e a rede especificamente. O que permite, por exemplo, gerar mais energia do que a carga necessita garantindo assim um reserva ou mesmo a possibilidade de compensação remota.

Partindo desse princípio devemos manter a geração dentro do grupo a qual a unidade pertence e respeitar as limitações físicas e técnicas de cada unidade e no caso em que a geração for superior ao grupo da unidade, caberá ao solicitante de acesso a rede fazer as devidas correções para que sua geração seja compatível com a capacidade de absorção da rede (BAJAY et al. (2018)).

<b>TENSÃO DE FORNECIMENTO</b>			
<b>A</b> <b>ALTA E MÉDIA</b>		<b>B</b> <b>BAIXA</b>	
<b>SUBGRUPOS</b>	<b>TENSÃO</b>	<b>SUBGRUPOS</b>	<b>TENSÃO &lt; 2,3 KV</b>
A1	> 230 kV	B1	Classe residencial e subclasse residencial baixa renda
A2	88 a 138 kV	B2	Classe rural
A3	69 kV	B3	Outras classes: industrial, comercial, serviços e outras atividades, poder público...
A3a	30 a 44 kV	B4	Classe iluminação pública
A4	2,3 a 25 kV		
AS	Subterrâneo		

Figura 5.1: Grupo Tarifários - Tensão de Fornecimento (SGT/ANAEEL).

### 5.1.3 Quanto a necessidade da carga.

Após ser observada o potencial de energia solar disponível na região e a capacidade de absorção da rede, pode-se dar início ao dimensionamento propriamente dito, no que diz

respeito a necessidade da carga. Neste tópico, serão apresentados cálculos que auxiliarão na verificação do sistema fotovoltaico ideal para a carga.

Para que seja possível calcular de forma prática, será considerado que a carga consome 400 kWh por mês e que possua uma rede monofásica de 127V, quando medido entre Fase-Neutro, e disjuntor de entrada de 30A.

Primeiramente devemos dividir a quantidade de kWh que são consumidos ao mês por 30 dias para que se tenha uma média de consumo diária.

CONSUMO MENSAL FATURADO	
MÊS	CONSUMO (kWh/mês)
JANEIRO	457
FEVEREIRO	379
MARÇO	391
ABRIL	309
MAIO	257
JUNHO	292
JULHO	390
AGOSTO	480
SETEMBRO	450
OUTUBRO	450
NOVEMBRO	480
DEZEMBRO	467
<b>MÉDIA MENSAL</b>	<b>400</b>

Tabela 5.2: Cálculo de consumo.

Após ser identificado a média mensal faz-se necessário identificar a capacidade de geração anual de referência. Foi usado os dados do Centro de Referência para as Energias Solares e Eólicas (CRESESB) conforme figura 5.3.

Latitude: 3,007284° S  
Longitude: 59,975422° O

#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m <sup>2</sup> .dia]																	
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta	
<input checked="" type="checkbox"/>	Manaus	Manaus	AM	BRASIL	3,001° S	59,949° O		3,0	3,87	4,07	4,02	3,81	3,81	4,30	4,34	4,95	4,97	4,82	4,66	4,18	4,32	1,16
<input checked="" type="checkbox"/>	Manaus	Manaus	AM	BRASIL	3,001° S	60,049° O		8,2	4,00	4,03	4,01	3,79	3,79	4,25	4,29	4,89	4,93	4,80	4,62	4,21	4,30	1,14
<input checked="" type="checkbox"/>	Manaus	Manaus	AM	BRASIL	3,101° S	59,949° O		10,8	3,97	4,11	4,13	3,94	3,96	4,48	4,49	5,03	5,06	4,89	4,71	4,23	4,42	1,12

Figura 5.2: CRESESB - <http://www.cresesb.cepel.br/index.php>.

Com os dados atualizados na planilha, obtém-se a irradiação solar diária média 4,42 kWh/m<sup>2</sup> por dia.

<b>PRODUÇÃO MENSAL DE SOL</b>	
<b>MÊS</b>	<b>HORAS DE SOL PLENO</b>
JANEIRO	3,97
FEVEREIRO	4,11
MARÇO	4,13
ABRIL	3,94
MAIO	3,96
JUNHO	4,48
JULHO	4,49
AGOSTO	5,03
SETEMBRO	5,06
OUTUBRO	4,89
NOVEMBRO	4,71
DEZEMBRO	4,23
<b>MÉDIA</b>	<b>4,42</b>

Tabela 5.3: Irradiação solar média.

Se faz necessário calcular as percas relacionadas a sujeira, Driff entre módulos, temperatura, efeito joule e eficiência do inversor. Estes dados são obtidos no datasheet dos respectivos equipamentos que passaram por teste de eficiência em condições reais e mais ideais possível para que assim possamos ter uma referência válida. Para tais considera-se 1% para sujeira, 1% para Driff entre os módulos, 14% para temperatura e 1% para efeito joule e 4.5% para eficiência do inversor, totalizando assim uma eficiência de 80% conforme figura 5.5 da planilha.

CONSIDERAÇÃO DE PERDAS	
TIPO	QUANTIDADE EM %
SUJEIRA	1%
DIFF ENTRE MÓDULOS	1%
TEMPERATURA	14%
EFEITO JOULE	1%
INVERSOR	4.5%
<b>EFICIÊNCIA TOTAL</b>	<b>80%</b>

Tabela 5.4: Cálculo das perdas.

Com essas informações é possível calcular a potência que o sistema fotovoltaico deve possuir para suprir a demanda da carga.

$$POTENCIA = \frac{\text{Consumo(kWh)}}{\text{MediadaIrradiacao} * \text{Eficiencia}} = \frac{400}{4,42 * 80\%} = 3,79kW. \quad (5.1)$$

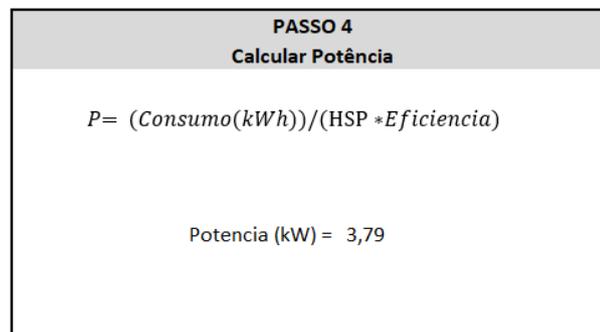


Figura 5.3: Cálculo da potência necessária para atender a demanda.

Feito o cálculo da potência que supre a necessidade da demanda, deve-se encontrar a quantidade de painéis de acordo com as potências existentes no mercado bem como o inversor adequado. Para tal usa-se a potência calculada para a demanda e divide pela potência nominal do painel escolhido, como exemplo para fins de cálculos o painel da TIER 550W 1 meia célula 144 Células Monocrystaline, para assim encontrar a quantidade

aproximada de painéis necessário para atender a demanda.

$$QT = \frac{\text{POTENCIA(kW)}}{\text{POTENCIADAPLACA}} = \frac{3,79\text{kW}}{550\text{W}} = 6,890 \quad (5.2)$$

PASSO 5 Calcular quantidade de placas	
Potência da Placas Escolhida	550
Qde de Placas:	6 OU 7

Figura 5.4: Cálculo da quantidade de placa.

Quanto ao inversor que será usado, é importante considerar que a sua potência esteja 20% para mais ou para menos da potência nominal do conjunto de placas a serem usadas, e sendo assim, para este exemplo, a potência nominal é de 3850W pois serão usadas 7 placas de 550W nominais (Gazoli et al. (2012)). É importante citar que os inversores possuem um sistema de proteção para o caso de uma geração maior que sua capacidade e desta forma este despreza a energia em excesso que vem a ser detectada pelo seu rastreamento de ponto de máxima potência (MPPT).

PASSO 6 Escolher Inversor	
Potencia do inversor deve ser entre +- 20% potencia de placas	
Potencia do inversor (kw) Entre	
Menor Valor	2,64
	e
Maior Valor	4,62

Figura 5.5: Cálculo da potência estimada do inversor.

Nesse sentido a indicação para o dimensionamento, com uma demanda mensal de 400kWh/mês, seria de um sistema fotovoltaico que tivesse a capacidade de gerar até 4kW, ou seja, para o caso do exemplo especificado anteriormente, 7 placas de 550W um inversor de 3kW, os cabamentos que usados seriam os indicados no datasheet do inversor e placa fotovoltaicas. Para este sistema seriam usados os cabos solar de 4mm

com todas as proteções exigidas pelas normas regulamentadoras e por fim os dispositivos de segurança da parte DC - STRINGBOX - que possui uma chave que garante a abertura do circuito com segurança bem como os DPS's. Na parte AC do sistema usa-se também um quadro com dispositivos de segurança exclusivos para a integração do sistema fotovoltaico com a carga e de forma totalmente independente, o sistema é conectado através de um barramento e em paralelo de forma a atender a carga ou a rede (Gazoli et al. (2012)).

## 5.2 Conclusão

Em síntese, com o exemplo apresentado, observa-se claramente que o dimensionamento do sistema fotovoltaico sugerido atende a necessidade da demanda da carga e a capacidade de injeção a rede dentro dos padrões estabelecido pela concessionária.

No Capítulo seguinte será apresentado um protótipo que foi implementado com os conhecimentos adquiridos no decorrer da graduação bem como com auxílio de cursos complementares e referências biográficas usadas nesta contextualização.

## Capítulo 6

# Estudo de caso de aplicação de um sistema fotovoltaico residencial na cidade de Manaus

Este capítulo apresentará um estudo de caso de um sistema fotovoltaico conectado a rede, com o objetivo de atender a demanda do caso em foco. Este proporcionará uma visão mais específica do dimensionamento pois será usado software PVSYST que auxiliará no dimensionamento do protótipo, o qual fornecerá todas as características necessárias para a implementação do sistema.

### 6.1 Estudo de Caso

O Projeto estudado neste trabalho é uma residência localizada na cidade de Manaus-AM, onde o primeiro passo para efetuar o dimensionamento do sistema fotovoltaico e analisar o histórico dos últimos 12 meses da fatura de energia elétrica do consumidor residencial, conforme apresentado na Figura 6.1.



**AMAZONAS ENERGIA S.A.**  
 AV 7 DE SETEMBRO, 2414 - CACHOEIRINHA - MANAUS  
 CNPJ: 02.341.467/0001-20 IE: 42156092  
 Atendimento: 0800 701 3001 www.amazonasenergia.com  
 Ouvidoria: 0800 095 1247 (08 às 18h/Dias úteis)  
 Visualizado em: 20/04/2022 às 17:43:40

**VIA PARA PAGAMENTO**

LEOPOLDINO LOURENCO ARAUJO DA SILVA JUNIOR R. STA T DAVILA, 34 , QD162 NOVA CIDADE 69.000-000 - MANAUS - AM	Código Único <b>0511497-7</b>	Mês Faturado <b>08/2021</b>	Nota Fiscal <b>47934652</b>	Data Emissão <b>12/08/2021</b>
--	----------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	-----------------------------------

	Medidor	Leit. Atual	Leit. Anterior	Constante Fatur.	NPL	Cons. Medido	Cons. Faturado
<b>Consumo</b>	11418960	18748	17950	1,00000	5	798	798

Período de Consumo: 14/07/2021 a 13/08/2021

Itens Faturados	Tar. sem impostos	Valor
Consumo 798 kWh a 1,051213	0,788410	838,86
Contribuição de Iluminação Pública (COSIP)		43,55
Correção Monetária Ipca/Igpm 07/2021-00		0,34
Multa Por Atraso 07/2021-00		12,82
Juros De Mora De Importe/Servico 07/2021-00		0,42
Estorno Multa Lei 5145/2020 07/2021-00		-12,82
Estorno Juros Lei 5145/2020 07/2021-00		-0,42
Adicional Bandeira Vermelha Patamar 2 - 75,68		

Descrição da Grandeza	Leit. Atual	Leit. Anterior	Constante	Registrado
En Ativa Pta	0,00	0,00	0,00000	0

Base de Cálculo	Alíquota	Valor do ICMS	Vencimento	Valor a Pagar
(*)	(*)	(*)	<b>26/08/2021</b>	<b>R\$ 882,75</b>

(\*) ICMS, quando aplicável foi recolhido por ST - Substituição Tributária. Decreto N°. 40.628/2019. Valor do ICMS ST R\$ 209,71

recorte aqui -----

Figura 6.1: Fatura de consumo de energia.

## 6.2 Irradiação na Cidade de Manaus - Referencia 2021

Usando o software PVSYSY, foi possível encontrar a irradiação solar diária média mensal coletada na cidade de Manaus acordo com a Figura 6.2.

	Gl. horiz. kWh/m <sup>2</sup> .day	Coll. Plane kWh/m <sup>2</sup> .day	System output kWh/day	System output kWh
Jan.	4.44	4.01	20.03	621
Feb.	4.50	4.24	21.19	593
Mar.	4.51	4.45	22.23	689
Apr.	4.51	4.68	23.40	702
May	4.44	4.82	24.07	746
June	4.73	5.28	26.41	792
July	5.11	5.67	28.37	879
Aug.	5.64	6.01	30.03	931
Sep.	5.64	5.70	28.49	855
Oct.	5.47	5.22	26.12	810
Nov.	5.26	4.78	23.91	717
Dec.	4.80	4.28	21.42	664
Year	4.92	4.93	24.66	9000

Figura 6.2: Irradiação solar - Base de dados PVSYST.

O software apresenta tanto a irradiação média anual, como a irradiação média mensal. Foi utilizada para o dimensionamento do sistema fotovoltaico a irradiação média anual 5,415 kWh/m<sup>2</sup>/dia, essa variação na irradiação será recompensada na época do inverno devido seu menor valor através do sistema de compensação de crédito.

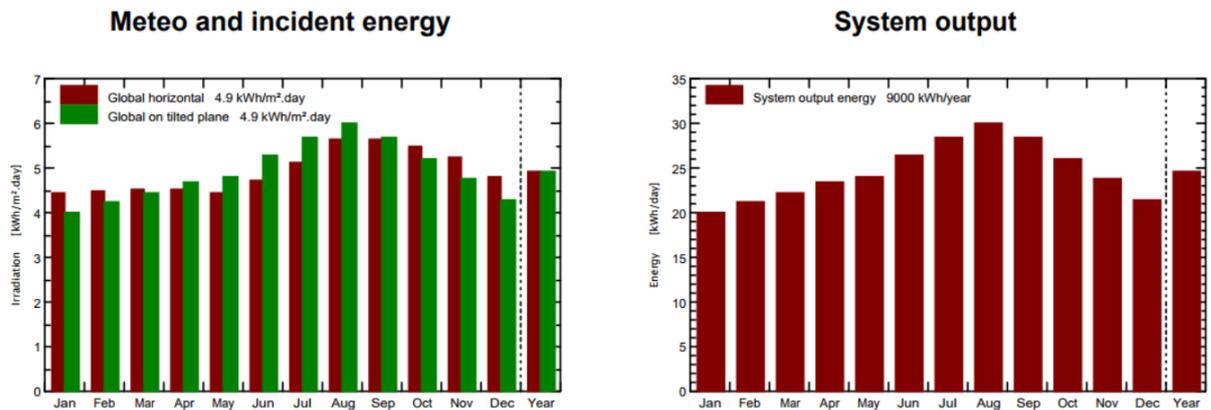


Figura 6.3: Gráficos mensais e anuais.

### 6.3 Dimensionamento

Observado o histórico de consumo anual do caso em estudo, é possível calcular a média de consumo anual e obter o consumo médio que neste caso é de 802 kWh/mês.

$$CMA = CMM(kWh) * meses = 802 * 12 = 9.634kWh/ano. \quad (6.1)$$

PVSYST V6.70		20/04/22	Page 1/1
<b>Grid system presizing</b>			
<b>Geographical Site</b>	<b>Manaus</b>	<b>Country</b>	<b>Brazil</b>
<b>Situation</b>	Latitude -3.11° S	<b>Longitude</b>	-60.03° W
Time defined as	Legal Time Time zone UT-4	<b>Altitude</b>	31 m
<b>Collector Plane Orientation</b>	Tilt 15°	<b>Azimuth</b>	0°
<b>PV-field installation main features</b>			
Module type	Standard		
Technology	Monocrystalline cells		
Mounting method	Facade or tilt roof		
Back ventilation properties	Ventilated		
<b>System characteristics and pre-sizing evaluation</b>			
PV-field nominal power (STC)	<b>Pnom</b>	5.9 kWp	
Collector area	<b>Acoll</b>	37 m <sup>2</sup>	
Annual energy yield	<b>Eyear</b>	9.00 MWh	<b>Specific yield</b> 1513 kWh/kWp
Economic gross evaluation	<b>Investment</b>	59188 Real	<b>Energy price</b> 0.67 Real/kWh

Figura 6.4: Indicação de pré-dimensionamento.

A tensão de entrada é bifásica e o consumidor paga pela disponibilidade dela, independente do uso, 50kWh/mês e, portanto, este valor deve ser deduzido do consumo anual. Logo temos o consumo anual médio é de 9.034 kWh/ano. O Software indica um pré-dimensionamento que apresenta a potência nominal do sistema que seria de 5.9 kW<sub>p</sub>, área mínima de 37 m<sup>2</sup>, consumo estimado de 9 MWh/ano, valor muito próximo do calculado. Como Manaus é uma região muito quente e não circula muitos ventos, os equipamentos sofrem uma perda maior que outras regiões e por isso recomenda-se fazer a compensação acrescentando cerca de 20% a mais da capacidade de geração para garantir ao consumidor que mesmo nos dias chuvosos ou nos dias em que o calor estiver intenso, o sistema será capaz de atender a demanda da carga. Dessa forma o sistema fotovoltaico será implementado com potência nominal de 8kW<sub>p</sub> reservando crédito junto à concessionária. Conseqüentemente a quantidade de painéis necessária para este sistema terá que apresentar uma potência nominal de 8kW<sub>p</sub> e o inversor escolhido tem que possuir a capacidade de 6 à 8 kW (Shayani et al. (2006)).

### 6.3.1 Definição de Equipamentos

Tendo sido dimensionada a necessidade so consumidor pode-se partir para a escolha dos equipamento. Nesta questão é importante salientar que deve-se, obrigatoriamente, buscar a aquisição de equipamentos devidamente homologados pois estes precisarão possuir

certificados de aprovação do Inmetro para concessão de uso junto a rede da concessionária.

Neste projeto foram utilizados 20 (vinte) Painéis Fotovoltaicos fabricados pela empresa BYD, todos com capacidade nominal de 400 Watts de pico (Wp) e 19,7% de eficiência. Cada módulo possui aproximadamente 2m<sup>2</sup> e o arranjo total dos painéis ocupou uma área de aproximadamente 40 metros quadros, instalados sobre o telhado da residência. As especificações elétricas detalhadas são encontradas na Tabela 6.1.

DADOS ELETRICOS	MODELO BYD 400MIK-36
POTÊNCIA MÁXIMA (P <sub>max</sub> )	400 W
TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO (V <sub>oc</sub> )	49,21 V
TENSÃO DE POTÊNCIA MÁXIMA (V <sub>mp</sub> )	40,87 V
CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO (I <sub>sc</sub> )	10,29 A
CORRENTE DE POTÊNCIA MÁXIMA (I <sub>mp</sub> )	9,79 A
EFICIÊNCIA DO MÓDULO	19,88%
COEFICIENTE DE TEMPERATURA DE I <sub>sc</sub>	0,041%/°C
COEFICIENTE DE TEMPERATURA DE V <sub>oc</sub>	0,254%/°C

Tabela 6.1: Características elétricas do painel fotovoltaico BYD.

O Inversor usado neste projeto será o Modelo MIN 8000MTL-S fabricado pela empresa GROWATT com capacidade nominal de 8 quilowatts de saída. A interface Homem-Máquina é realizada por meio de uma interface WEB; o dispositivo conta ainda com as interfaces de dados RS485, WiFi/GPRS/LAN (opcional).

As entradas de Corrente Contínua (CC) são compostas de dois Pontos de Máxima Transferência de Potência (Maximum Power Point Tracking - MPPT's). As especificações detalhadas são encontradas na Tabela 6.2.

<b>ESPECIFICAÇÕES DE ENTRADA CC</b>	<b>MODELO MIN8000MTL-S</b>
MÁX. POTÊNCIA FOTOVOLTAICA	10500 W
MÁXIMA TENSÃO CC	550 V
TENSÃO DE PARTIDA	100 V
FAIXA DE TENSÃO DE MPPT E TENSÃO NOMINAL DE MPPT	80V-550V/360V
CORRENTE MÁXIMA DE ENTRADA	25A/12,5A
MÁXIMA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	32A/16A
NÚMERO DE MPPT E STRINGS POR MPPT	2/(2/1)

Tabela 6.2: Especificações Técnicas de Entrada CC do Inversor MIN8000MTL-S.

A potência nominal de saída em corrente alternada (CA) é de 8 quilovolt-ampères (KVA), nas faixas de tensões de 160V a 300V, nas frequências de 50 e 60 Hertz (Hz). As especificações detalhadas são encontradas na Tabela 6.3.

<b>ESPECIFICAÇÕES DE SAÍDA CA</b>	<b>MODELO MIN8000MTL-S</b>
POTÊNCIA NOMINAL DE SAÍDA CA	8000 W
POTÊNCIA APARENTE MÁXIMA CA	8000 VA
CORRENTE MÁXIMA DE SAÍDA	36,4 A
TENSÃO NOMINAL DE SAÍDA	220V(180V-280V)
FREQUÊNCIA DA REDE CA	50 Hz/60Hz (+ OU - 5%)
FATOR DE POTÊNCIA AJUSTÁVEL	0,8I-0,8C
THDI	<3%
CONEXÃO CA	FASE ÚNICA
MÁXIMA EFICIÊNCIA	98,4%
EFICIÊNCIA EUROPEIA	97,5%
EFICIÊNCIA MPPT	99,9%

Tabela 6.3: Especificações Técnicas de Entrada CA do Inversor MIN8000MTL-S.

A estrutura metálica necessária para a correta e segura instalação dos painéis fotovoltaicos será fornecida pela empresa ROMAGNOLE e instalada por profissionais capa-

citados com experiência na área. As vistas frontal e superior dos painéis instalados em telhado metálico podem ser observadas nas figuras 6.5.

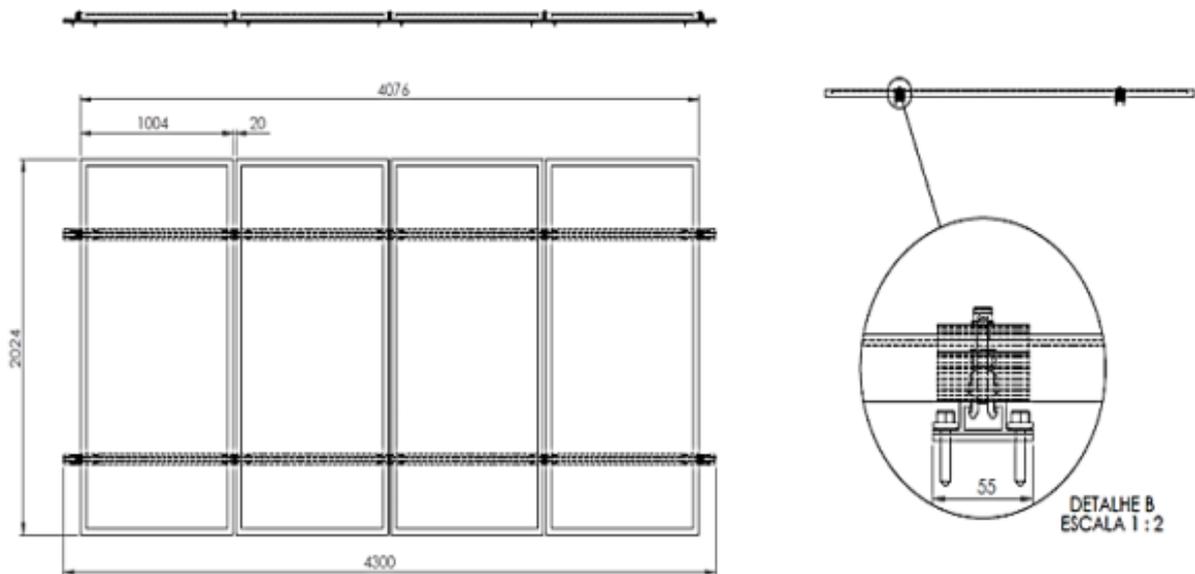


Figura 6.5: Estrutura metálica.

De acordo com a norma europeia IEC 60364-7-712, o cabo de cada fileira deve ser capaz de suportar 1,25 vezes a corrente de curto-circuito da associação série de módulos fotovoltaicos, na temperatura máxima de operação. Além disso, deve estar protegido contra falhas de terra e curto-circuito, incrementando-se um fator de tolerância de 10%, totalizando 1,35 vezes a corrente de máxima temperatura. Sendo assim, a corrente  $I_z$  suportada pelo cabo da fileira é calculada de acordo com a equação 6.2.

$$I_z > 1,35 * I_{max} \quad (6.2)$$

Visando limitar a queda de tensão ao valor de 1%, deve-se verificar ainda a bitola mínima para tal. A queda de tensão num condutor de cobre é dada por:

$$QT = R * I \quad (6.3)$$

Dividindo-se os dois lados da equação 2 pela tensão máxima de cada fileira ( $V_{mp}$ ) e aplicando a condição de queda de tensão máxima, a dois condutores carregados, obtém-se a equação 6.4:

$$A > \frac{\rho * 2 * L * I * 10^6}{QT\% * V_{mp}} \quad (6.4)$$

Onde:

- $\rho$  a resistividade elétrica do cobre à temperatura de operação. Será suposta a temperatura de 70 °C no condutor de cobre carregado, correspondente à resistividade de  $2,2 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ . Este coeficiente será adotado para o dimensionamento de todos os cabos do projeto.
- $L$  é o comprimento dos cabos do circuito.
- $I$  é a corrente máxima do circuito. Neste caso,  $I = I_{max}$ .
- $V_{mp}$  é a tensão de máxima potência da associação em série de cada fileira de módulos fotovoltaicos.

Na concepção deste projeto, o cliente informou que pretende expandir a capacidade do sistema num futuro próximo, acrescentando um painel fotovoltaico para a fileira de seis módulos e dois painéis para as fileiras que possuem sete módulos. Portanto, como requisito de projeto, iremos dimensionar os circuitos considerando a expansão futura pretendida.

Nestas condições temos os seguintes dados:

- $\rho = 2,2 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ;
- $L_1 = 20$  metros: é o comprimento dos cabos do circuito do arranjo composto de uma String de seis painéis fotovoltaicos em serie;
- $L_2 = 20$  metros é o comprimento dos cabos do circuito do arranjo composto por duas strings de sete painéis fotovoltaicos cada, instaladas em paralelo;
- $I$  é a corrente máxima do circuito. Neste caso,  $I = I_{max}$ ;
- $V_{mp}$  é a tensão de máxima potência da associação em série de cada fileira de módulos fotovoltaicos.

Para o arranjo de sete painéis em série, teremos:  $I_{cc} \geq 13,21$  amperes e a área  $A = 3,01 \text{ mm}^2$ . Será adotado o cabo de cobre de  $6 \text{ mm}^2$  de especificação recomendada pelo fabricante.

Para cada subarranjo composto de nove painéis em serie, teremos:  $I_{cc} \geq 13,21$  amperes e a área  $A = 2,34 \text{ mm}^2$ . Por segurança, adotaremos o cabo de cobre de  $6 \text{ mm}^2$  (especificação recomendada pelo fabricante).

O cabo CC Principal estabelece a conexão entre a “String Box” de cada fileira ao respectivo terminal MPPT dos inversores. A metodologia de dimensionamento deste cabo será a mesma utilizada para o cabeamento das fileiras:

- $\rho = 2,2 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ;
- $L_1 = 1,5$  metros: é o comprimento dos cabos do circuito do arranjo composto de uma String de seis painéis fotovoltaicos em serie;
- $L_2 = 1,5$  metros é o comprimento dos cabos do circuito do arranjo composto por duas strings de sete painéis fotovoltaicos cada, instaladas em paralelo;
- $I$  é a corrente máxima do circuito. Neste caso,  $I = I_{max}$ ;
- $V_{mp}$  é a tensão de máxima potência da associação em série de cada fileira de módulos fotovoltaicos.

Para o arranjo de sete painéis, teremos:  $I_{cc} \geq 13,21$  amperes e a área  $A = 0,23 \text{ mm}^2$ . Por segurança, adotaremos o cabo de cobre de  $6 \text{ mm}^2$  (especificação recomendada pelo fabricante).

Para o arranjo composto de duas “Strings” em paralelo serão utilizados dois cabos por fase, logo:  $I_{cc} \geq 13,21$  amperes e a área  $A = 0,18 \text{ mm}^2$ . Por segurança, adotaremos o cabo de cobre de  $6 \text{ mm}^2$  (especificação recomendada pelo fabricante).

Os cabeamentos CA principal serão os cabos que interligam a saída de cada inversor ao Barramento CA local. Os mesmos cabos serão utilizados para conexão dos barramentos locais aos barramentos principais. De acordo com a Norma Técnica Brasileira, ABNT NBR 5010 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão, os cabos devem ser dimensionados para uma corrente 1,25 vezes maior que a corrente nominal  $I_{ca}$  (à potência nominal), conforme apresentado na inequação 6.5.

$$I > 1,25 * I_{ca} \quad (6.5)$$

A corrente nominal do inversor é dada por:

$$I_{inv} = \frac{P_{inv}}{V_{inv}} I_{inv} = \frac{8000VA}{220Volts} = 36,36A \quad (6.6)$$

$$I = 1,25 * I_{inv}$$

$$I > 1,25 * 36,36 = 45,45A$$

A inequação (3) também é válida para circuitos de corrente alternada. No entanto,  $I=I_{ca}$  e a tensão nominal no denominador do circuito é a tensão padrão de 220 Volts. Logo:

- $\rho = 2,2 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ;
- $L_1 = 10$  metros;
- $I = 36,36$  amperes;
- $V = 220$  volts.

$$A > \frac{2,2 * 10^{-8} * 2 * 10 * 36,36 * 10^6}{0,01 * 220} \quad (6.7)$$

$$A > 7,272 mm^2$$

Este resultado deve ser arredondado para cima considerando a bitola de cabo padrão disponível no mercado. Para tanto, visando atender tanto o critério da ampacidade quanto da queda de tensão foi escolhido o cabo de  $10 mm^2$ , sendo este o cabo recomendado pelo fabricante dos inversores.

O Disjuntor CA deve ser instalado na saída de cada inversor para seccionamento e proteção contra sobrecorrentes e curto-circuito, em conformidade com os critérios estabelecidos pela Norma Técnica para conexão de acessantes à rede de distribuição de baixa tensão por Micro geradores.

Segundo a norma ABNT-NBR 5410, a corrente do disjuntor deve ser dimensionada como 1,25 vezes maior que a corrente nominal de operação do circuito CA e menor ou igual à corrente máxima admitida pelo cabo condutor. Sendo assim  $I_{ca} = 36,36$  ampéres;  $I_z = 68$  ampéres. Será adotado, portanto, o disjuntor bipolar de 63 Amperes / 220 Volts, sendo este o disjuntor recomendado pelo fabricante.

O aterramento do sistema fotovoltaico deve atender a todas as especificações exigidas na norma ABNT NBR 5410:2004 referente a instalações elétricas de baixa tensão. O aterramento de proteção dos equipamentos da Microgeração Fotovoltaica será realizado por meio da conexão das carcaças condutoras ao aterramento do circuito via um Barramento de Equipotencialização local. O barramento de equipotencialização local, por sua vez,

será conectado ao barramento principal, localizado próximo ao medidor de energia. Portanto, as instalações elétricas serão compostas pelo sistema de aterramento TN-S, onde o aterramento é conectado ao neutro e as carcaças do sistema são aterradas via condutor de proteção. O lado CC deve ser aterrado seguindo as orientações do inversor e do módulo fotovoltaico. De acordo com a norma NBR 5410, a seção do condutor de proteção pode ser determinada através seção dos condutores de Fase  $S \leq 16$  e a Seção mínima do condutor de proteção correspondente S.

O modelo de referência de inversor adotado neste projeto não possui transformador de isolamento. Por este motivo, serão instalados DPS's no ponto de conexão com a rede elétrica. A especificações de todos os DPS's de proteção CA e CC serão apresentados nas próximas seções.

A String Box CC consiste em uma caixa construída em Cloreto de Polivinila (PVC) que é utilizada para acomodar os dispositivos de proteção elétrica em corrente contínua que interligam os arranjos de Painéis Fotovoltaicos aos terminais MPPT's dos Inversores. Para interligação de cada String de painéis aos respectivos terminais MPPT's dos inversores, serão utilizadas duas String Box da marca ABB. Cada String Box CC é composta por duas Chaves Seccionadoras Tripolares, ampacidade de 32 Amperes e operação em 1200 Volts em corrente contínua (Vcc), além de seis Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS's), de 40 KA e 1040 Vcc. Detalhes das especificações da String Box podem ser observados no Diagrama Unifilar.

A String Box CA consiste em uma caixa construída em Cloreto de Polivinila (PVC) que é utilizada para acomodar os dispositivos de proteção elétrica em corrente alternada que interligam o terminais de saída do Inversor de frequência aos respectivos barramentos. A String Box CA é composta por um disjuntor bipolar, 50 Amperes e operação em 220 Volts em corrente alternada (CA), além um DPS de 20 KA e 275 Volts. O Diagrama Unifilar das Instalações Elétricas do empreendimento é apresentado conforme figura 6.6.

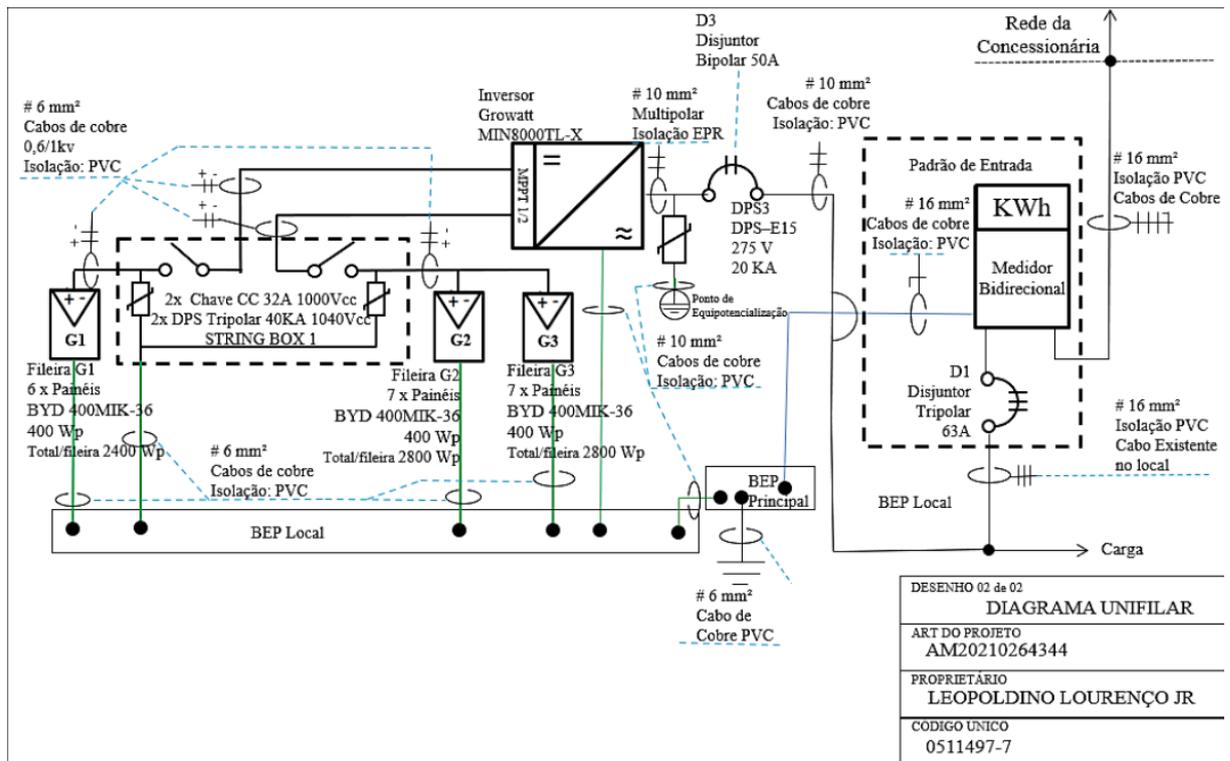


Figura 6.6: Diagrama unifilar.

O fornecimento de energia elétrica da residência se dá em baixa tensão (B.T.) na área de concessão da Eletrobrás Amazonas Distribuidora e efetivado em corrente alternada, na frequência de 60 Hz, nas tensões 127/220 Volts, tipo de ligação bifásica (Monofásica a três fios).

O ponto de conexão da Geração será realizado nos Barramentos Principais da Unidade Consumidora. Esta conexão será realizada por meio do Inversor de Frequência. As entradas de corrente CC do Inversor serão conectadas aos dois pontos de saída da ‘String Box’. A String Box é responsável pela conexão, seccionamento e garantia da segurança da Geração Fotovoltaica. Os Painéis Fotovoltaicos são os componentes do sistema responsáveis pela geração de energia e estão configurados em dois arranjos. O primeiro arranjo possui uma fileira de seis painéis em série, denominada G1 no Diagrama Unifilar; o segundo arranjo possui duas fileiras, conectadas em paralelo, de sete painéis em série, cada fileira, denominadas no Diagrama Unifilar de G2 e G3. A Fileira G1 possui 2400 KWp; as fileiras G2 e G3 possuem 2800 KWp, cada. O sistema completo possui 20 painéis de 400 Watts cada, o que resulta num total de 8 KWp, entregues ao Inversor de frequência que possui capacidade nominal de 8 KVA.

O Inversor de Frequência utilizado neste projeto é o modelo MIN8000MTL-S, produ-

zido pelo fabricante GROWATT. Este modelo possui uma Unidade de Monitoramento de Correntes Residuais (Residual Current Monitoring Unit – RCMU) integrada, capaz de atuar nas proteções de: Subtensão, Sobretensão, Subfrequência, Sobre frequência, Sobrecorrente, além de Anti-ilhamento e Monitoramento de falta à terra, todos acionados por um elemento de interrupção automático inteligente. O sistema conta ainda com as proteções contra surtos em corrente contínua e alternada, além de proteção contra sobrecorrente e curto-circuito na saída de ambos os inversores, proteções estas garantidas pelos dispositivos acomodados nas “String BOX CC” e “String BOX CA”. Com a aquisição dos equipamentos apresentado anteriormente, foi possível fazer a solicitação de acesso a rede a concessionária com as devidas documentações necessárias como ART, diagrama unifilar, projeto elétrico, memorial descritivo, certificados de conformidades, dados para registro na central e planta de situação. Após verificação dos documentos enviados a concessionária autorizou a instalação do sistema propriamente dito.

## 6.4 Conclusão

A instalação foi dividida em três partes, iniciando-se pela fixação da StringBox DC, Inversor, StringBox AC e toda infraestrutura de condução de cabos, posteriormente foi feita a instalação da estrutura de fixação das placas, a descida dos cabos DC e fixação dos painéis no telhado. Por último fez-se as conexões das placas para a StringBox DC, da StringBox DC para o Inverso, do Inverso para a StringBox AC e da StringBox AC para o barramento, finalizando assim a instalação.

Tomou-se a decisão de iniciar pela fixação da StringBox DC, Inversor e StringBox AC por questão de segurança, pois se aos os painéis forem conectados por exemplos não seria seguro abrir o circuito sem a chave seccionadora, uma vez que, se isso fosse feito de forma irresponsável, poderia gerar um arco voltaico com risco de grave acidente por conta da potência do sistema instalado.



Figura 6.7: Instalação da StringBox DC, AC e Inversor.

Esses componentes individuais seguem rigidamente o projeto e suas limitações que estão descritas e destacadas no diagrama unifilar. Dessa forma em qualquer etapa os dispositivos de segurança conseguirão atuar e fazer seu papel de proteção.



Figura 6.8: String Box DC.



Figura 6.9: Inversor GroWatt de 8k.



Figura 6.10: String Box AC.

A instalação da estrutura de fixação dos módulos levou dois dias para ficar pronta pois nesta etapa foi deixado os cabos que seriam usados por cada arranjo, nesse sentido, deixou-se passados três trios de cabos fotovoltaicos protegidos por eletrodutos flexíveis,

estes cabos desceram padronizados em cores (+ vermelho, - Preto e Terra - Verde) e marcados para cada grupo de arranjos conforme diagrama unifilar.



Figura 6.11: Instalação das Placas.

A última etapa, que levou um dia de trabalho, foi feita a conexão da StringBox AC para o barramento que fica entre o contador e o quadro geral da casa (carga). o sistema fotovoltaico é conectado em paralelo com a carga.



Figura 6.12: Baixa de barramento.

Finalizada toda a parte de instalação, chega a hora de fazer o comissionamento e ligação propriamente dita dos equipamentos para que possam ser testados e posto em operação. Feito todos os procedimentos verificou-se o pleno funcionamento e então pode-se manter o sistema em operação. Esse procedimento de comissionamento levou cerca

de 4 horas de trabalho e desde então o sistema vem trabalhando e trazendo a economia esperada.

Para ter certeza da quantidade de energia que a carga consome, foi feita a instalação de um medidor bifásico dentro do quadro geral da residência e assim é possível ter certeza do desempenho do sistema fotovoltaico instalado pois com esse equipamento foi possível ter o controle de todas as variáveis, não sobrando dúvidas a respeito do consumo da carga, da quantidade de energia injetada na rede.



Figura 6.13: Medidor de energia da carga.

A planta do sistema é apresentada em operação.

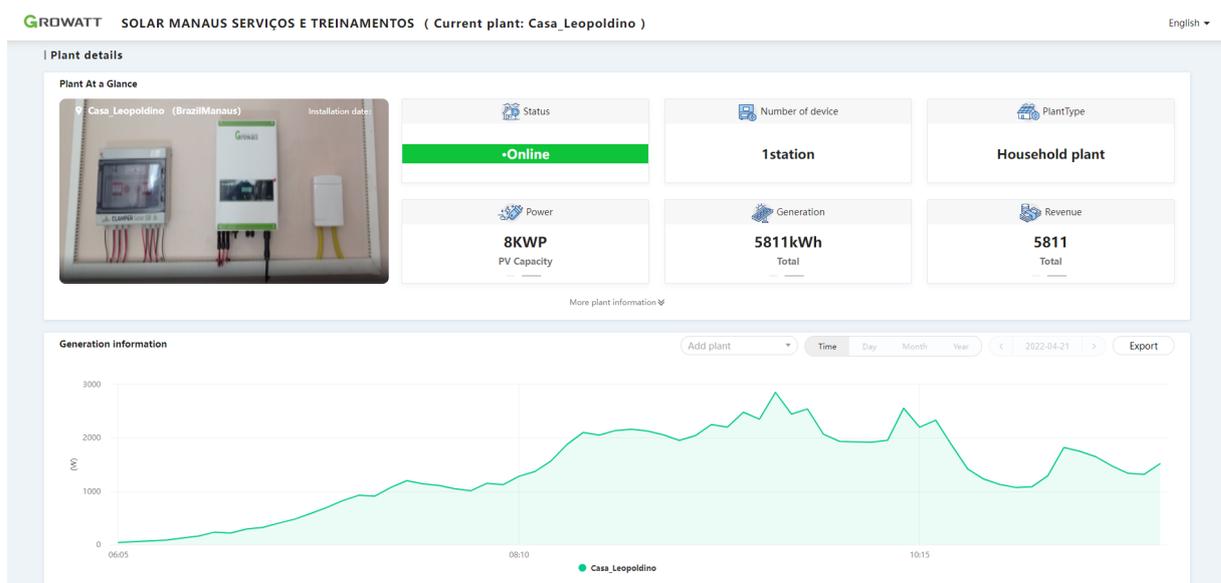


Figura 6.14: Planta em operação.

Os gráficos de geração serão apresentados mensalmente sendo possível acompanhar a geração.



Figura 6.15: Geração em outubro de 2021.

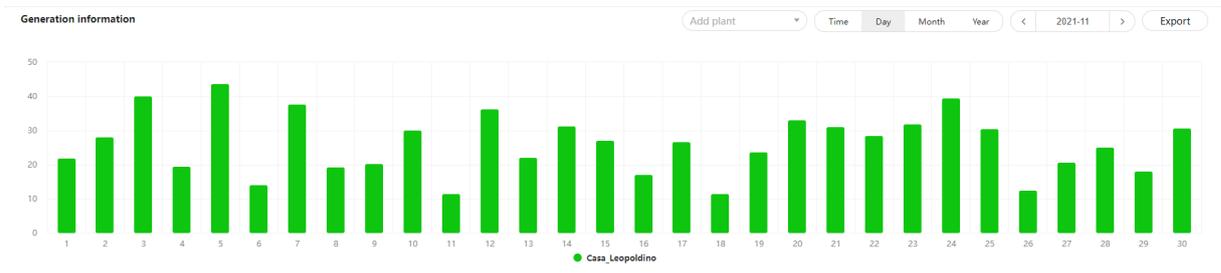


Figura 6.16: Geração em novembro de 2021.



Figura 6.17: Geração em dezembro de 2021.

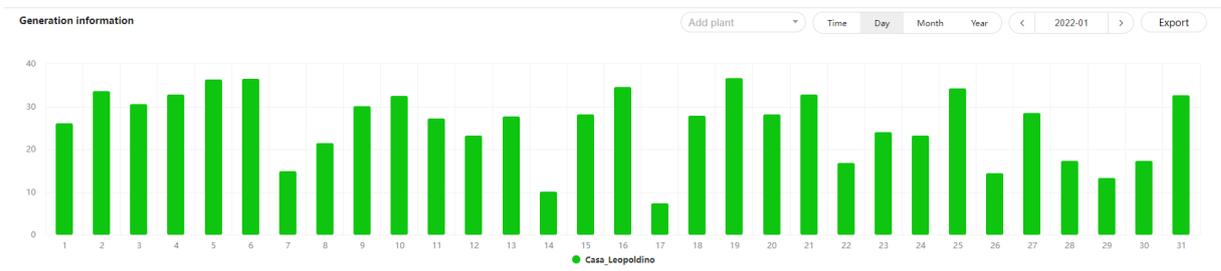


Figura 6.18: Geração em janeiro de 2022.

No mês de fevereiro foi necessário fazer o desligamento pois do sistema pois foram feitas as trocas dos portes e medidores pela concessionária. Por este motivo achou-se por bem manter o sistema desligado até que todo o trabalho fosse finalizado.



Figura 6.19: Geração em fevereiro de 2022.



Figura 6.20: Geração em março de 2022.



Figura 6.21: Geração em abril de 2022.

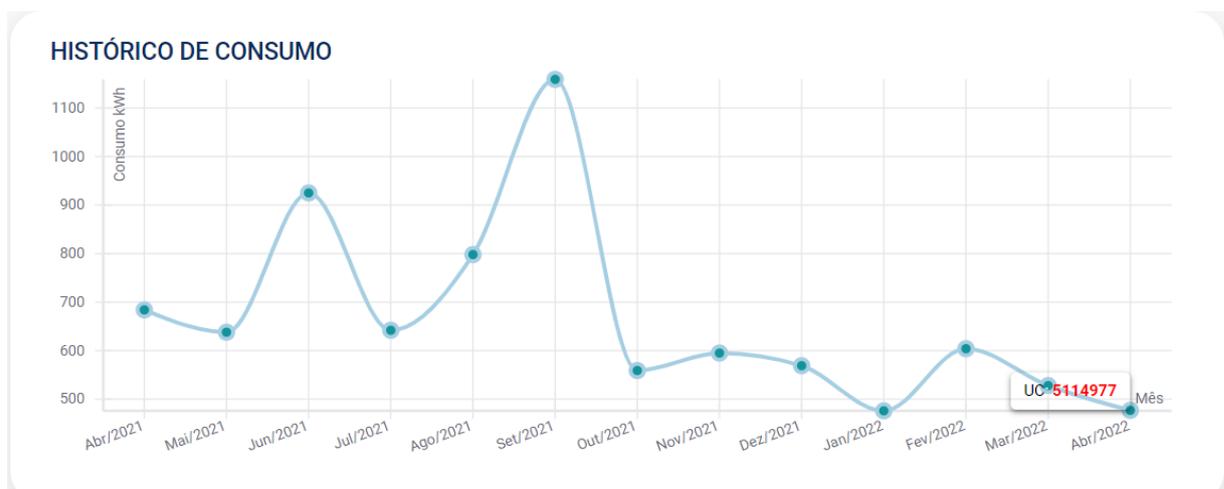


Figura 6.22: Histórico de consumo com sistema em operação.

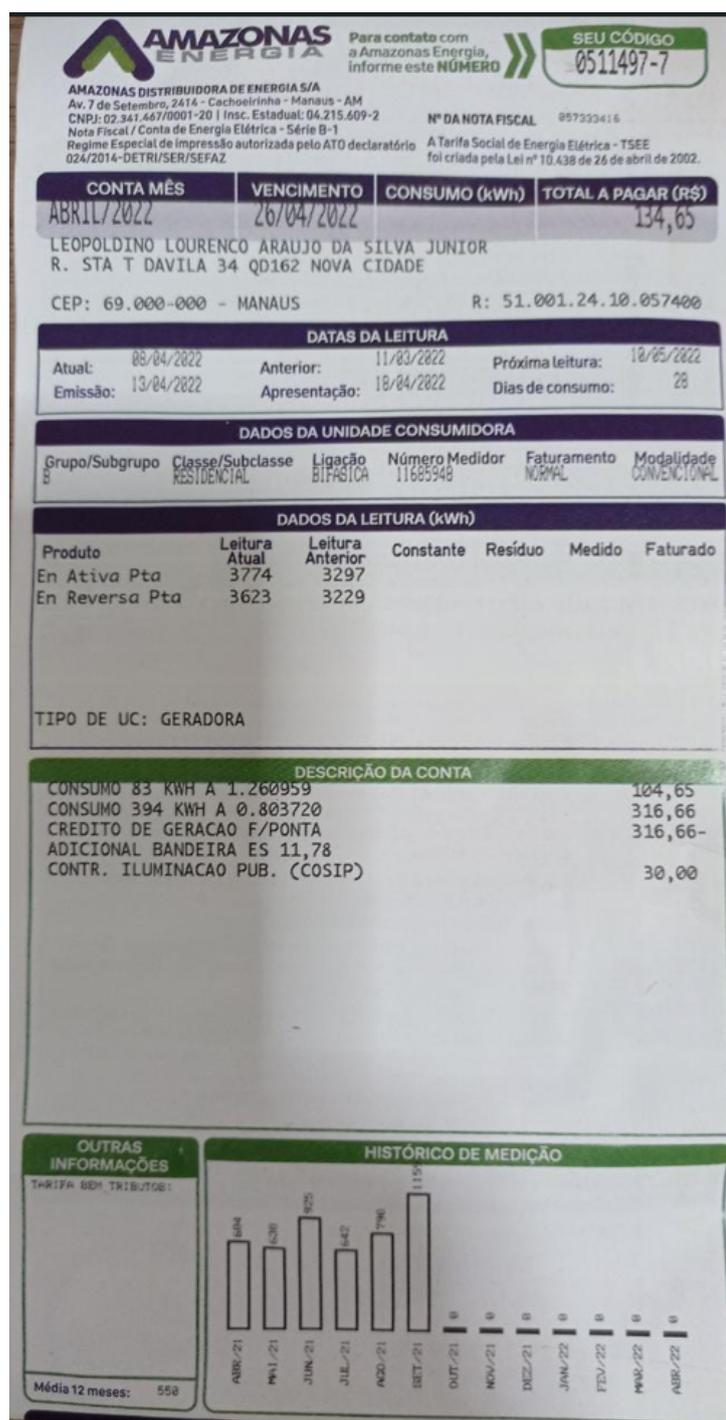


Figura 6.23: Fatura de energia compensada pela geração.

Em síntese pode ser observado o sucesso na execução desse estudo de caso. O sistema garantiu ao consumidor a economia esperada bem como os benefícios financeiros que serão garantidos no decorrer do período de operação do sistema que está estimado em 25 anos, conforme indicação dos fabricantes.

# Capítulo 7

## Considerações Finais

Conforme a sociedade evolui, a necessidade de novas fontes de energia se faz necessária, seja ela por questões climáticas ou mesmo econômicas. A energia solar fotovoltaica vem apresentando-se como uma alternativa cada dia mais desejável e palpável junto a sociedade, tornou-se mais interessante à aplicação dela no Brasil em virtude do seu posicionamento geográfico, favorável a este cenário, pois o país possui um grande potencial energético em todo seu território, e uma baixa variabilidade durante o ano.

A resolução normativa N° 687, que permite ao consumidor residencial que seja utilizado o sistema de compensação de crédito de energia elétrica de Micro e Minigeração distribuída, potencializou a busca por energias renováveis, que exige um alto investimento inicial, porém é muito efetiva uma vez que apresenta um retorno financeiro consideravelmente rápido, através da diminuição do gasto de energia elétrica. No estudo de caso apresentado neste trabalho, foi dimensionada uma instalação fotovoltaica para atender a demanda da residência do consumidor, prevendo inclusive um consumo um pouco maior sem a preocupação de surpresas na fatura de energia. Os cálculos dimensionados resultaram numa instalação de 20 módulos fotovoltaicos de 400 Wp, gerando 8 kW. A área necessária para instalação dos módulos estava dentro da disponibilidade do telhado do consumidor e ocupou cerca de 50m<sup>2</sup> tendo em vista que ficou disponível uma boa área de circulação para eventuais manutenções que forem necessárias. O projeto com 20 módulos foi orçado em R\$ 31.938,95, sendo este valor responsável pela aquisição de todos os equipamentos necessários da parte DC, inclusive o inversor. A StringBox AC, seus cabeamentos de conexão com o barramento e toda estrutura para esse fim juntamente com obras de alvenaria tiveram um custo adicional de R\$ 2.800,00. Dessa forma o custo total para a

implementação do sistema ficou em R\$ 34.738,95.

O retorno de investimento será garantido após aproximadamente quatro anos, com um saldo positivo de R\$ 3661,05, valor esse que o consumidor deixa de pagar na fatura de energia elétrica. E para os próximos 21 anos, que completam à vida útil do sistema, chegará na ordem de R\$ 201.600,00, aproximadamente. Fazendo-se um comparativo nos primeiros meses de funcionamento, nota-se que a geração supriu a demanda da carga e com isso, pode-se concluir que a instalação do sistema fotovoltaico é viável, pois possui um retorno econômico rápido quando comparado com a vida útil do sistema, além de ser uma fonte de energia abundante limpa e renovável.

# Referências Bibliográficas

- E. Fadigas, “Energia solar fotovoltaica: fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica,” *Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo*, p. 32, 2012.
- R. Berticelli, R. Lauxen, A. Binato, G. C. Masutti, and L. K. Rodrigues, “Energia solar fotovoltaica: Conceitos e aplicações,” *I Seminário de Pesquisa Científica e Tecnológica*, vol. 1, no. 1, 2017.
- F. D. BEZerra, “Energia solar,” 2021.
- M. Villalva and J. Gazoli, *ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: CONCEITOS E APLICAÇÕES*. ERICA, 2012. [Online]. Available: <https://books.google.com.br/books?id=etO2NAEACAAJ>
- M. Munoz Escribano, M. García Solano, I. n. de la Parra Laita, J. Marcos Álvarez, L. Marroyo, and E. Lorenzo Pigueiras, “Module temperature dispersion within a large pv array: Observations at the amareleja pv plant,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 8, no. 6, pp. 1725–1731, 2018.
- J. M. Baptista and R. Santos, “Fundamentos de energia solar fotovoltaica,” *Série Didáctica, Ciências Aplicadas*, vol. 383, 2010.
- S. BAJAY, G. Jannuzzi, R. Heideier, I. Vilela, J. Paccola, and R. Gomes, “Geração distribuída e eficiência energética,” *Campinas: Internetional Energy Initiative-IEI Brasil*, vol. 1, 2018.
- G. M. Azevedo Jr, A. J. D. da Silva, M. H. de Lima Melo, and R. de Souza Botelho, “Projeto para implementação de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica em

- jardim gramacho, em duque de caxias-rj,” *Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula*, vol. 1, no. 1, pp. 130–141, 2019.
- M. G. Villalva, *Energia Solar Fotovoltaica: guía del usuario*. Saraiva Educação SA, 1983.
- E. R. Creplive, “Estudo da viabilidade técnica e econômica para geração de energia elétrica utilizando painéis fotovoltaicos em um condomínio na cidade de Curitiba,” 2018.
- G. Trinkenreich and C. Baldini, “Estudo de proposta para gerenciamento de escopo no setor de projetos de energia solar fotovoltaica,” *Boletim do Gerenciamento*, vol. 19, no. 19, pp. 33–42, 2020.
- I. A. de Bitencourt, H. H. Figueira, and L. Michels, “Análise do desempenho de inversores fotovoltaicos conectados à rede segundo abnt nbr 16149 em diferentes cenários de impedância de rede,” in *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*, vol. 2, no. 1, 2020.
- Y. J. S. Cruz, “Exemplo de conformidade em: Norma regulamentadora nº 10 (nr 10) e norma regulamentadora nº 12 (nr 12),” 2019.
- N. Regulamentadora, “35–nr 35. trabalho em altura,” *Work at Height*)[Online], *Ministério do Trabalho e Emprego*, 2019.
- A. M. Isami and E. Bis, “A importância da norma abnt nbr 5410 nas instalações elétricas,” *Revista eSALENG–Revista eletrônica das Engenharias do UniSALESIANO–Vol*, vol. 9, no. 1, 2020.
- J. R. Gazoli, M. G. Villalva, and J. Guerra, “Energia solar fotovoltaica sistemas conectados à rede elétrica: requisitos para a conexão e proteções,” *O Setor Elétrico*, vol. 83, 2012.
- R. A. Shayani, M. d. Oliveira, and I. d. T. Camargo, “Comparação do custo entre energia solar fotovoltaica e fontes convencionais,” in *Congresso Brasileiro de Planejamento Energético (V CBPE)*. Brasília, 2006, p. 60.