



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FABRÍCIO NOGUEIRA DE FREITAS**

**PROJETO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA APLICAÇÃO EM ESTAÇÃO  
ELEVATÓRIA NA CHAPADA DO APODI**

**FORTALEZA**  
**2023**

FABRÍCIO NOGUEIRA DE FREITAS

PROJETO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA APLICAÇÃO EM ESTAÇÃO  
ELEVATÓRIA NA CHAPADA DO APODI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do  
Centro de Tecnologia da Universidade Federal  
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Ernande Eugênio Campelo  
Morais

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- F936p Freitas, Fabrício Nogueira de.  
Projeto de sistema fotovoltaico para aplicação em estação elevatória na Chapada do Apodi / Fabrício Nogueira de Freitas. – 2023.  
70 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2023.  
Orientação: Prof. Dr. Ernande Eugênio Campelo Morais.
1. Projeto fotovoltaico. 2. Energias renováveis. 3. Agronegócio. I. Título.

CDD 621.3

---

FABRÍCIO NOGUEIRA DE FREITAS

PROJETO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA APLICAÇÃO EM ESTAÇÃO  
ELEVATÓRIA NA CHAPADA DO APODI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do  
Centro de Tecnologia da Universidade Federal  
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 11/12/2023

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Ernande Eugênio Campelo Morais  
(Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Engenheiro Eletricista Elton John Freitas Maia  
Consultor de Projetos da Companhia Industrial de Cimento Apodi

À minha mãe, Francinete, que em vida não pôde  
de ver seu filho formado, como sonhava.

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Ceará e à pró-Reitoria de Assistência Estudantil, por ter me acolhido e ter proporcionado a minha permanência no curso.

Ao Prof. Dr. Ernande Eugênio Campelo Morais, pela excelente orientação e disposição em me orientar nessa fase da graduação.

Aos participantes da banca examinadora Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio e Eng. Eletricista Elton John Freitas Maia pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

À minha irmã, Ana Paula. Palavras não descreveriam, em um texto de agradecimento, o amor e a gratidão que sinto por você. Você e meus sobrinhos são as pessoas mais importantes da minha vida. Eu daria a minha vida por vocês.

À minha companheira Jade por todo seu esforço para que eu chegasse aqui. Sem seu cuidado, amor, paciência, carinho, conversas e afeto, eu não teria forças para enfrentar tantas dificuldades.

Ao meu amigo Mário, por ter me acompanhado em tantos momentos, bons e ruins, por ser um verdadeiro irmão. Sem seu apoio, meu caro amigo, eu não teria conseguido.

Ao meu amigo Willy, que me acolheu na sua casa quando mais eu precisei, que me levou a mundos desconhecidos em nossas conversas, que contribuiu à formação de meu caráter e foi outro irmão que a vida me presenteou.

Ao meu amigo Fábio, que também me acolheu em momentos difíceis, que me ensinou valores que me ajudaram a moldar quem sou. Tenho muito orgulho de ter conhecido você. Todos os momentos de prosa ficarão guardados em minha memória.

Ao amigo e colega de turma Janderson, por todas as conversas, ajuda e conselhos que me deu. Serei eternamente grato por tudo.

À Nathália e demais colegas, pelos conselhos, conversas e ajudas nessa caminhada.

Aos trabalhadores brasileiros, que me alimentaram, me vestiram, e me deram morada.

“Ícaro, meu filho, não se afaste de mim e estará seguro! Não voe alto demais, ou o sol derreterá a cera, nem baixo demais, senão o mar encharcará as penas.” (GRAVES, 2018, p.536)

## RESUMO

Os recursos hídricos utilizados na produção agrícola na Chapada do Apodi, são transportados através do bombeamento da água do Rio Jaguaribe por uma estação elevatória, situada na cidade de Limoeiro do Norte. Este trabalho tem por objetivo apresentar um projeto de minigeração fotovoltaica, que supra parte do consumo energético demandado pelas bombas responsáveis por levar essa água à lavoura. Com tal projeto o custo na produção de energia tende a ser reduzido, impactando diretamente no preço do produto final. Desta forma, além de beneficiar o consumidor, também tornará a indústria local mais competitiva internacionalmente.

O agronegócio brasileiro, para garantir a sua competitividade, possui um tecido produtivo baseado em maquinários agrícolas, assim como sistemas de irrigação, automação, dentre outros modais tecnológicos altamente dependentes de energia elétrica, tornando esse setor da economia, responsável por mais de um terço da demanda nacional de energia elétrica.

A preocupação dos países em torno das mudanças climáticas, está fazendo com que a indústria passe a utilizar formas renováveis de produzir energia elétrica. Uma das alternativas adotadas é a geração fotovoltaica.

Dentro do cenário cearense, a Chapada do Apodi é uma região de forte produção agrícola, onde possui empresas que competem internacionalmente no mercado de alimentos, portanto o preço do produto final depende fortemente das tarifas energéticas, e como mencionado, a preocupação global com as mudanças climáticas está fazendo com que novas formas de produzir energia sejam desenvolvidas, o que também afeta o cenário energético local.

A geração fotovoltaica é uma alternativa viável do ponto de vista de desempenho, visto que a irradiância solar no local do projeto é satisfatória. Desta forma, do ponto de vista energético, a potência gerada dependerá apenas do rendimento das células fotovoltaicas, uma vez que a disponibilidade de radiação possui índices elevados durante todo o ano, em relação à disponibilidade de radiação solar no território brasileiro.

**Palavras-chave:** Projeto Fotovoltaico; Energias Renováveis; Agronegócio.

## ABSTRACT

The water resources used in agricultural production in the Chapada do Apodi are transported by pumping water from the Jaguaribe River through a pumping station located in the city of Limoeiro do Norte. This work aims to present a photovoltaic minigeneration project that will supply part of the energy consumption required by the pumps responsible for delivering this water to the crops. With this project, the cost of energy production is expected to be reduced, directly impacting the price of the final product. Thus, in addition to benefiting the consumer, it will also make the local industry more internationally competitive.

Brazilian agribusiness, to ensure its competitiveness, has a productive fabric based on agricultural machinery, as well as irrigation systems, automation, among other technological modalities highly dependent on electrical energy, making this sector of the economy responsible for more than one-third of the national demand for electrical energy.

The concern of countries about climate change is causing the industry to start using renewable forms of producing electrical energy. One of the adopted alternatives is photovoltaic generation.

Within the Ceará scenario, the Chapada do Apodi is a region of strong agricultural production, with companies that compete internationally in the food market. Therefore, the price of the final product depends heavily on energy tariffs, and as mentioned, the global concern about climate change is leading to the development of new ways of producing energy, which also affects the local energy scenario.

Photovoltaic generation is a viable alternative from a performance perspective, as solar irradiance at the project site is satisfactory. Thus, from an energy perspective, the generated power will depend only on the efficiency of the photovoltaic cells, since the availability of radiation has high indices throughout the year, compared to the availability of solar radiation in the Brazilian territory.

**Keywords:** Photovoltaic Project; Renewable energy; Agribusiness

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da Chapada do Apodi.....	17
Figura 2 – Fusão do hidrogênio em hélio.....	21
Figura 3 – Espectro eletromagnético do sol no espaço e na atmosfera, em relação ao espectro da radiação de corpo negro.....	21
Figura 4 – A média anual global do fluxo de energia da Terra para março de 2000 a maio de 2004 ( $W/m^2$ ) .....	22
Figura 5 – Constante Solar ao longo do ano.....	22
Figura 6 – Componentes da irradiância solar.....	23
Figura 7 – Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica.....	25
Figura 8 – Formação da região de depleção.....	26
Figura 9 – Bandas energéticas de um semiconductor.....	26
Figura 10 – Curva característica da corrente de curto-circuito vs. tensão nos terminais de uma célula fotovoltaica.....	27
Figura 11 – Resposta espectral para uma célula multicristalina de silício a $25^{\circ}C$ .....	28
Figura 12 – <i>Strings</i> de módulos fotovoltaicos, com seus respectivos diodos de bloqueio.....	29
Figura 13 – Relação entre corrente e tensão em um módulo fotovoltaico e seu ponto máximo de potência para diferentes irradiâncias.....	30
Figura 14– Associação de células em paralelo.....	31
Figura 15 – Associação de células em série.....	31
Figura 16 – Circuito equivalente a um módulo fotovoltaico.....	32
Figura 17 – Diodo ideal.....	34
Figura 18 – Curva característica de um diodo real.....	34
Figura 19 – Diodo real.....	35
Figura 20 – Curva característica de um diodo real.....	35
Figura 21 – Representação da operação do diodo de <i>bypass</i> cuja sua célula associada está inoperante por sombreamento.....	36
Figura 22 – Circuito equivalente do módulo danificado ou sob sombra.....	37
Figura 23 – Curva característica de uma célula fotovoltaica sob condições de luminosidade e sombreamento.....	38

Figura 24 – Posicionamento do diodo de bloqueio evitando a passagem de corrente da bateria para o módulo.....	38
Figura 25 – Conversor CC-CA em ponte.....	39
Figura 26 – Circuito gerador de SPWM.....	40
Figura 27 – Dois geradores de SPWM defasados 180° conectados às chaves de um conversor CC-CA em ponte.....	40
Figura 28 – Sistema inversor de dois estágios.....	41
Figura 29 – Componentes de um sistema inversor de dois estágios.....	41
Figura 30 – Esquema do inversor trifásico.....	42
Figura 31 – Eficiência de um típico inversor de 650 W.....	42
Figura 32 – Fluxograma do projeto preliminar.....	45
Figura 33 – Irradiação solar global horizontal em Limoeiro do Norte.....	46
Figura 34 – Irradiação solar direta normal em Limoeiro do Norte.....	46
Figura 35 – Irradiação solar no plano inclinado na latitude em Limoeiro do Norte.....	47
Figura 36 – Irradiação solar difusa horizontal em Limoeiro do Norte.....	47
Figura 37 – Atenuação da potência injetada.....	53
Figura 38 – Bomba de recalque 163104 da WEG.....	56
Figura 39 – Relé Sepam 1000 com leitura de corrente do seu respectivo motor.....	59
Figura 40 – CCMs dos motores 2 e 3.....	59
Figura 41 – Comando elétrico associado ao <i>trip</i> do relé.....	60
Figura 42 – Supervisório mostrando os parâmetros de uma bomba.....	60
Figura 43 – Posição da instalação no <i>PVSyst</i> .....	62
Figura 44 – Estimativa de área dos painéis fotovoltaicos do tipo policristalino utilizando o <i>PVSyst</i> .....	63
Figura 45 – Possível área de implementação da usina.....	63
Figura 46 – Método a ser empregado na instalação dos condutores das <i>strings</i> .....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos mínimos da interface com a rede em função da potência instalada para central geradora classificada como microgeração ou minigeração distribuída.....	49
Tabela 2 – Funções de proteção junto à interface da central geradora classificada como microgeração ou minigeração distribuída.....	50
Tabela 3 – Proteções mínimas em função da potência instalada.....	51
Tabela 4 – Forma de conexão Enel Distribuição Ceará.....	51
Tabela 5 – Ajustes de sobretensão e subtensão – MT.....	52
Tabela 6 – Ajustes de sobrefrequência e subfrequência.....	52
Tabela 7 – Limites de distorção harmônica.....	53
Tabela 8 – Faixa de fator de potência.....	54
Tabela 9 – Dados de placa das bombas Toshiba.....	57
Tabela 10 – Dados de placa das bombas WEG.....	57
Tabela 11 – Dados dos transformadores da subestação da subestação da estação de bombeamento.....	58
Tabela 12 – Funções de proteção intrínsecas dos motores de 2850 cv.....	61
Tabela 13 – Dados de entrada e saída dos Inversores que serão utilizados nas <i>strings</i> .....	64
Tabela 14 – Dados do transformador de acoplamento.....	64

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FAPIJA	Federação das Associações do Perímetro de Irrigação Jaguaribe-Apodi
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
CE	Ceará
CEPEL	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
SPWM	<i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i>
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
MPPT	<i>Maximum Power Track</i>
PRODIST	Procedimento de Distribuição
ANSI	<i>American National Standart Institute</i>
TP	Transformador de Potencial
TC	Transformador de Corrente
FD	Fator de Desequilíbrio
RTC	Relação de Transformação do Transformador de Corrente
rpm	Rotações por minuto
A	Ampères
V	Volts
W	Watts
m	Metro
mm	Milímetro
CCM	Centro de Controle de Máquinas
kV	Quilovolts
MVA	Megavolt-ampères
TW	Terawatts
J	Joules
C	Coulombs
K	Kelvin
cv	Cavalo Vapor

## LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
%	Porcentagem
Ω	Ohms
v	Frequência da luz

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>O agronegócio na Chapada do Apodi.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>O fornecimento de água para o agronegócio da Chapada do Apodi.....</b>	<b>18</b>
<b>1.3</b>	<b>Motivação.....</b>	<b>18</b>
<b>1.4</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>18</b>
<b>1.5</b>	<b>Estrutura do Trabalho.....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2</b>	<b>Conceitos .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.1</b>	<b><i>O sol como fonte de energia.....</i></b>	<b>20</b>
<b>2.2.2</b>	<b><i>O efeito fotovoltaico.....</i></b>	<b>23</b>
<b>2.3</b>	<b>Sistema fotovoltaico de geração de energia elétrica.....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.1</b>	<b><i>A célula fotovoltaica.....</i></b>	<b>25</b>
<b>2.3.2</b>	<b><i>O módulo fotovoltaico.....</i></b>	<b>29</b>
<b>2.3.2.1</b>	<b><i>Associação entre células fotovoltaicas.....</i></b>	<b>30</b>
<b>2.3.2.2</b>	<b><i>Circuito equivalente de um módulo fotovoltaico.....</i></b>	<b>32</b>
<b>2.3.3</b>	<b><i>Diodos de bypass e bloqueio.....</i></b>	<b>33</b>
<b>2.3.3.1</b>	<b><i>O diodo de by-pass.....</i></b>	<b>35</b>
<b>2.3.3.2</b>	<b><i>O diodo de bloqueio.....</i></b>	<b>38</b>
<b>2.3.4</b>	<b><i>Sistema Inversor.....</i></b>	<b>38</b>
<b>2.3.5</b>	<b><i>Subestação da unidade geradora.....</i></b>	<b>43</b>
<b>2.3.5.1</b>	<b><i>O Transformador de acoplamento.....</i></b>	<b>43</b>
<b>2.4</b>	<b>Os condutores.....</b>	<b>43</b>
<b>2.5</b>	<b>Considerações finais.....</b>	<b>44</b>
<b>3.</b>	<b>Metodologia.....</b>	<b>45</b>
<b>3.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>45</b>
<b>3.2</b>	<b>Levantamento da Irradiação Solar no local onde o projeto deverá ser realizado.....</b>	<b>45</b>
<b>3.3</b>	<b>O software PVsyst.....</b>	<b>47</b>
<b>3.4</b>	<b>Relação dos requisitos para interface entre as unidades geradora e consumidora.....</b>	<b>48</b>

3.4.1	<i>Tensão</i> .....	51
3.4.2	<i>Frequência</i> .....	52
3.4.3	<i>Injeção de componente de corrente contínua na rede elétrica</i> .....	53
3.4.4	<i>Limites de distorção harmônica</i> .....	53
3.4.5	<i>Fator de Potência</i> .....	54
3.4.6	<i>Ilhamento</i> .....	54
3.4.7	<i>Reconexão</i> .....	54
3.4.8	<i>Religamento Automático da Rede</i> .....	54
3.5	<b>Considerações finais</b> .....	55
4.	<b>PROJETO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA APLICAÇÃO EM ESTAÇÃO ELEVATÓRIA NA CHAPADA DO APODI</b> .....	56
4.1	<b>Situação</b> .....	56
4.1.1	<i>As bombas</i> .....	56
4.1.2	<i>A subestação</i> .....	58
4.1.3	<i>O acionamento e as proteções dos motores</i> .....	58
4.2	<b>Sistema fotovoltaico a ser implementado</b> .....	62
4.2.1	<i>Painéis Solares</i> .....	62
4.2.2	<i>Inversor de frequência</i> .....	64
4.2.3	<i>Transformador do gerador fotovoltaico</i> .....	64
4.2.4	<b>Condutoramento</b> .....	65
4.2.3.1	<i>Condutores string – inversor</i> .....	65
4.2.3.2	<i>Condutores inversores – subestação da unidade geradora</i> .....	65
5	<b>CONCLUSÃO</b> .....	67
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	69
	<b>ANEXO A – DATASHEET DO INVERSOR MAX 253KTL3-X HV</b> .....	71
	<b>ANEXO B – MODELO DE BARRAMENTO DE COBRE DA SUBESTAÇÃO DA UNIDADE GERADORA</b> .....	72

## 1. INTRODUÇÃO

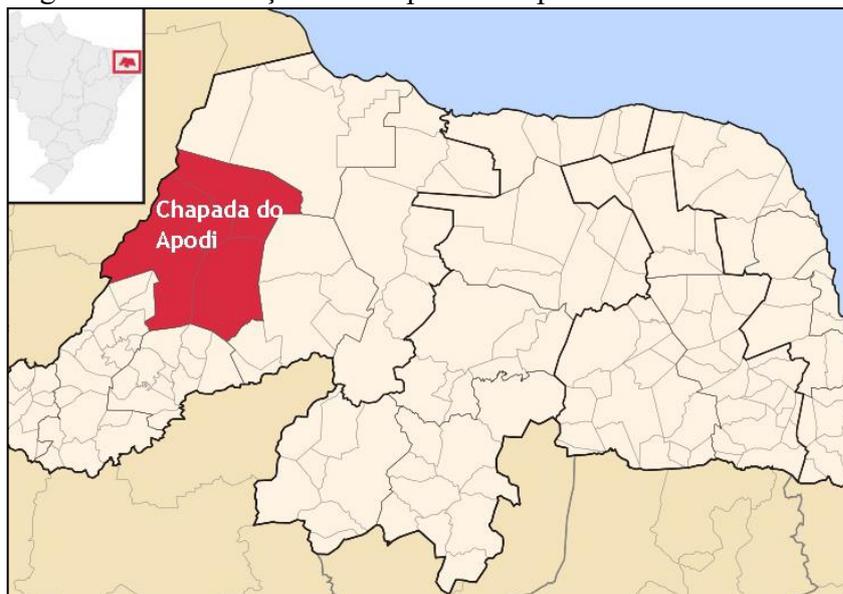
A Organização das Nações Unidas alerta que a temperatura média do planeta em 2023 deve ficar entre 1,08 C° e 1,32 C° mais alta em relação ao período pré industrial. (ONU, 2022). Alternativas para a redução de emissão de gases de efeito estufa estão concentradas na produção de energias renováveis. Em paralelo, tem-se um aumento na demanda por energia elétrica, devido ao crescimento industrial e populacional, desta forma a produção de energias renováveis deve acompanhar esse crescimento, a fim de minimizar os seus impactos.

O Brasil atualmente possui uma demanda energética de 555 TW, com crescimento médio de 4% ao ano, segundo a Fundação Getúlio Vargas (FGV, 2014). Apenas o agronegócio responde por 34,72% do consumo de energia elétrica do país (MONTROYA, PASQUAL, LOPES e GUILHOTO, 2016).

### 1.1 O agronegócio na Chapada do Apodi

Situada na divisa entre os estados do Ceará e Rio Grande do Norte, a Chapada do Apodi (Figura 1) é uma região com notável atividade econômica (DNOCS, 2022), abrigando produtores agrícolas, de pequeno, médio e grande porte, agremiados sob o nome Federação das Associações do Perímetro de Irrigação Jaguaribe-Apodi (FAPIJA e DNOCS, 2019).

Figura 1 – Localização da Chapada do Apodi



Fonte: Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (2022).

## **1.2 O fornecimento de água para o agronegócio da Chapada do Apodi**

Como a Chapada do Apodi é uma formação geológica elevada em relação ao principal rio que corta o estado do Ceará, o Rio Jaguaribe, a água utilizada no agronegócio precisa ser bombeada. A instalação responsável por essa tarefa é um conjunto de bombas situado em uma estação elevatória posicionada à margem do rio, onde a água utilizada é represada por uma barragem de derivação, chamada Pedrinhas, localizada no município de Limoeiro do Norte-CE.

## **1.3 Motivação**

Ao longo das últimas décadas, tem sido crescente o aumento da demanda por energia elétrica devido ao crescimento da população. Isso faz com que sejam exigidas medidas para atender o aumento da demanda de potência na rede elétrica.

Quando a demanda é superior à potência ofertada pelas unidades geradoras das hidrelétricas, que representam a maior parte da energia gerada em território nacional, unidades geradoras de contenção à base de derivados de petróleo entram para suprir essa demanda. Isso é prejudicial para o meio ambiente, pois aumenta a emissão de gases de efeito estufa, o que favorece o desequilíbrio no ciclo da água, o que prejudica safras, aumentando o risco de desabastecimento. Com relação à atividade econômica, eleva a alíquota da energia elétrica por parte das concessionárias, visto que o kWh produzido por diesel, por exemplo é mais caro que o produzido por hidrelétricas, conseqüentemente toda a cadeia industrial que depende da eletricidade se vê obrigada a aumentar o preço de seus produtos, portanto o preço dos alimentos está diretamente ligado a como é produzida a energia elétrica.

## **1.4 Objetivos**

O objetivo deste trabalho é apresentar um projeto preliminar de geração fotovoltaica cuja função é injetar potência no sistema de bombeamento da Fapija, com a finalidade de reduzir o custo de eletricidade, impactando no valor gasto na produção dos alimentos.

## 1.5 Estrutura do Trabalho

Na introdução deste trabalho, foi apresentado um panorama global da necessidade de utilizar-se energias renováveis, assim como a localização do projeto de geração fotovoltaica a ser implementado.

Os próximos capítulos deste trabalho apresentam a revisão bibliográfica, a metodologia utilizada e o projeto de uma usina fotovoltaica na chapada do Apodi, respectivamente.

Na revisão bibliográfica são apresentados os conceitos de como o Sol produz energia, de como essa energia é convertida em energia elétrica, e de como um sistema fotovoltaico funciona.

No capítulo referente à metodologia aplicada, são apresentados dados da irradiação solar na cidade de Limoeiro do Norte, o *software* utilizado para estipular a área total de módulos fotovoltaicos e o que as normas da concessionária e da ANEEL determinam para a interface entre o sistema de geração e a rede elétrica, no que tange as proteções, respectivamente.

No capítulo que trata de apresentar o projeto, são utilizados dados da instalação elétrica da estação de elevação da Barragem de Derivação Pedrinhas, para elaboração de um projeto preliminar de uma usina de geração fotovoltaica, e seu cabeamento até a carga.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Introdução

Os temas abordados nesse capítulo estão ligados a como a energia elétrica é gerada, por meio da conversão da radiação solar em corrente elétrica, e de como ocorre o processo para que essa eletricidade se torne efetivamente adequada à utilização pelas cargas presentes no projeto.

No que diz respeito aos aspectos físicos da geração fotovoltaica, são apresentados os fundamentos teóricos que modelam a conversão a energia proveniente da radiação solar, em energia elétrica.

Mais adiante, onde é demonstrada a teoria por detrás da adequação da eletricidade gerada nos painéis, para que possa ser utilizada pelas cargas, é apresentado os aspectos básicos do funcionamento de um inversor de frequência, cuja função é converter corrente contínua em corrente alternada.

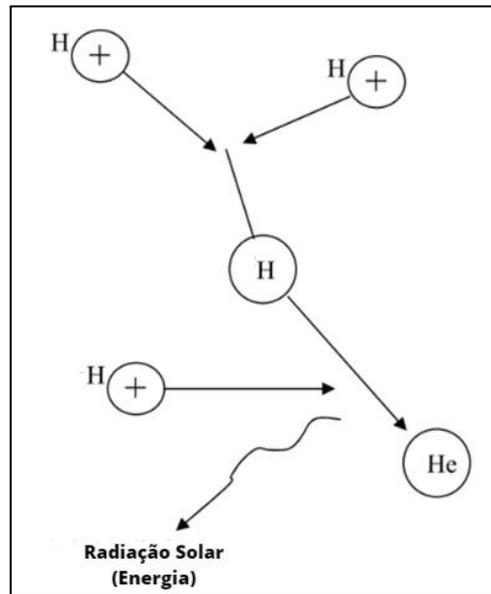
### 2.2 Conceitos

#### *2.2.1 O sol como fonte de energia.*

O Sol é responsável por 94% de toda a energia que o planeta Terra utiliza, aquecendo toda sua atmosfera, de uma temperatura, dadas as condições do espaço, de  $-273,2^{\circ}\text{C}$  para uma temperatura média de  $+14,5^{\circ}\text{C}$ . Já a potência irradiada sobre nosso planeta é de 178 PW, e a energia durante um ano, o equivalente a  $5,61 \times 10^{24}$  J. Portanto, sem o Sol a Terra seria apenas uma rocha fria e estéril flutuando no espaço (KRAUTER, 2005).

Toda essa energia é proveniente da transformação do hidrogênio (Figura 2) presente no Sol em hélio, através do processo de fusão (ŞEN, 2008).

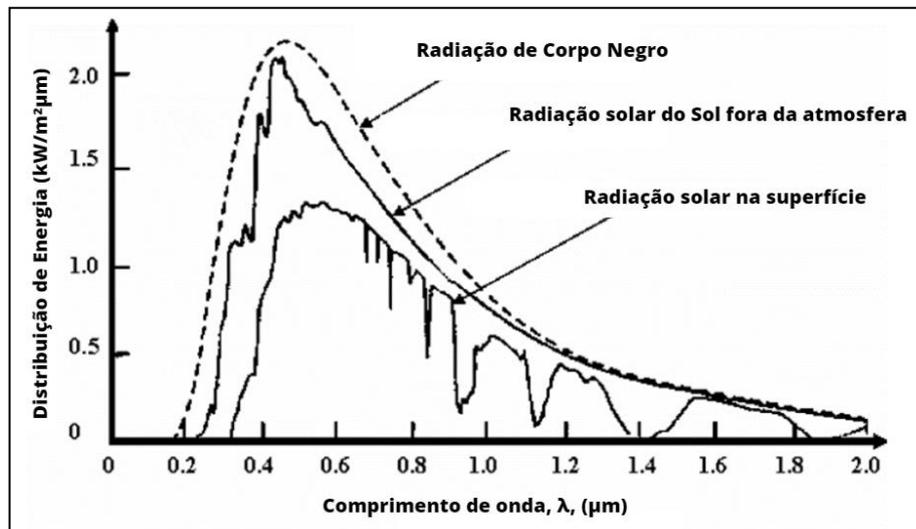
Figura 2 – Fusão do hidrogênio em hélio



Fonte: Adaptado de ŞEN (2008, p. 49).

A radiação fornecida pelo sol possui um espectro eletromagnético (Figura 3) semelhante ao espectro de radiação de corpo negro (irradiação ou absorção ideal de um corpo). Entretanto sofre variação ao interagir com a massa da atmosfera e todo o material disperso nesta, tais como poeira, vapor, etc. (ŞEN, 2008).

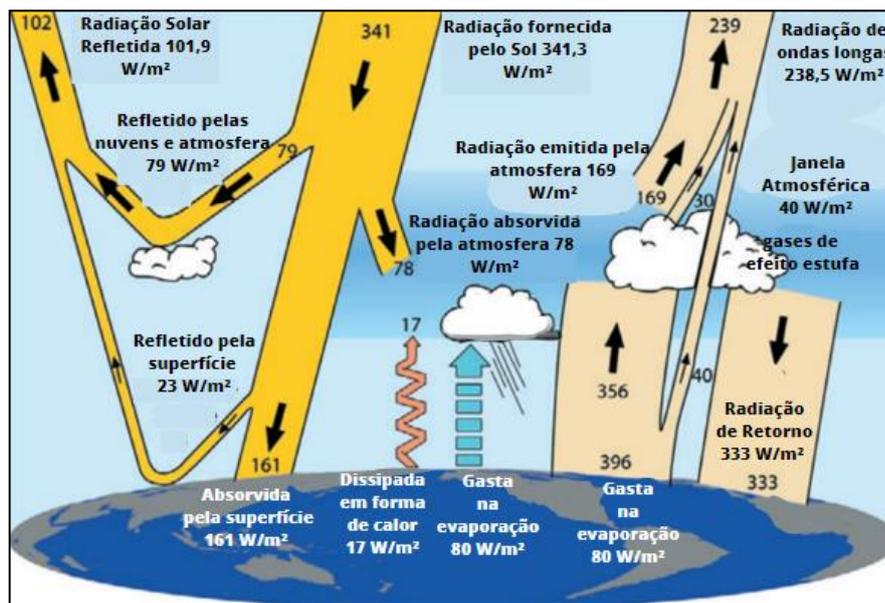
Figura 3 – Espectro eletromagnético do sol no espaço e na atmosfera, em relação ao espectro da radiação de corpo negro



Fonte: Adaptado de ŞEN (2008, p. 54).

Cerca de 50% da energia fornecida pelo Sol fica na superfície da Terra. Uma parte é refletida para o espaço, outra parte do montante é reabsorvida e uma outra sofre difusão na atmosfera. Fenômenos atmosféricos também contribuem para que isso ocorra, conforme Figura 4 (ŞEN, 2008).

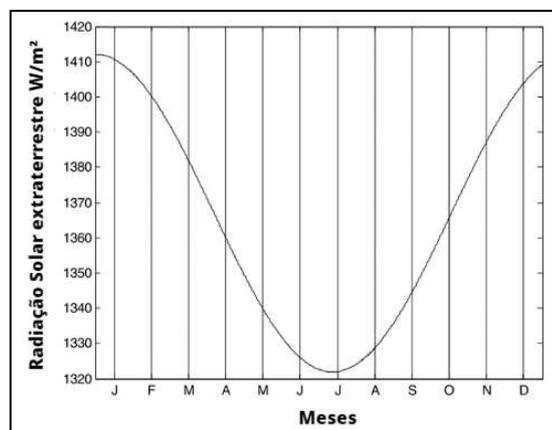
Figura 4 – A média anual global do fluxo de energia da Terra para março de 2000 a maio de 2004 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).



Fonte: Adaptado de TRENBERTH *et. al.* (2009).

Devido ao movimento elíptico da Terra em relação ao Sol, se faz necessária uma grandeza que meça a intensidade da radiação solar na superfície da Terra: a constante solar (Figura 5), cujo valor médio é  $1.360 \text{ W}/\text{m}^2$  (ŞEN, 2008).

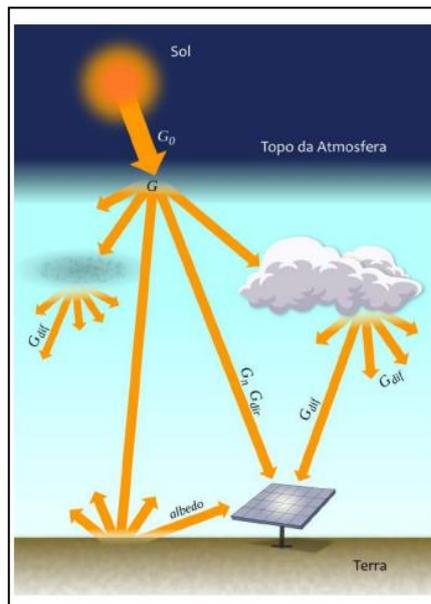
Figura 5 – Constante Solar ao longo do ano



Fonte: Adaptado de ŞEN (2008, p. 67).

Como mencionado, o fluxo de energia solar que chega à atmosfera, sofre difusão e absorção. Portanto a irradiância solar que incide sobre a superfície pode ser dividida em: extraterrestre ( $G_0$ ), direta normal ( $G_n$ ), difusa horizontal ( $G_{dif}$ ), direta horizontal ( $G_{dir}$ ), global horizontal ( $G$ ), e irradiância no plano inclinado ( $G_i$ ) (PEREIRA *et al.*, 2017).

Figura 6 – Componentes da irradiância solar



Fonte: PEREIRA *et al.* (2017, p. 19).

A irradiância solar integrada em relação ao tempo é denominada irradiação solar, cuja simbologia é  $H$ , e sua unidade é definida como  $Wh/m^2$ . Portanto a irradiação solar também pode ser dividida em extraterrestre ( $H_0$ ), direta normal ( $H_n$ ), difusa horizontal ( $H_{dif}$ ), direta horizontal ( $H_{dir}$ ), global horizontal ( $H$ ), e irradiação no plano inclinado ( $H_i$ ) (Pereira, Martins, Gonçalves, et al.; 2017).

### 2.2.2 O efeito fotovoltaico

Partindo dos estudos de Max Planck (1) sobre a natureza da luz e a resolução do problema da radiação de corpo negro, Albert Einstein determinou a natureza corpuscular da luz, ou seja, que a luz pode ser definida, além de onda, como partículas, denominadas fótons, cuja a energia que essas partículas carregam dependem do seu comprimento de onda (KRAUTER, 2006).

$$E = h\nu \quad (1)$$

Onde:  $E$  é a energia do fóton,  $(h)$  a constante de Planck, e  $(\nu)$  a frequência da luz.

Os estudos de Albert Einstein culminaram na equação de onda de Schrödinger e Wilson a aplicou em diversos materiais sólidos, permitindo diferenciar metais, como bons condutores de eletricidade, dos materiais isolantes, assim como evidenciando as propriedades intermediárias dos semicondutores (Krauter, 2006).

Nos isolantes, elétrons são retidos nas ligações atômicas e exigem energia significativa para mobilização. Já nos semicondutores, como o silício, mesmo um impulso menor, como fótons vermelhos do sol, pode liberar elétrons. A descoberta acidental de Russell Ohl em 1940, ao expor uma haste de silício à luz, revelou propriedades elétricas distintas causadas por impurezas, levando à criação da primeira célula solar de silício.

Em 1949, William Shockley trabalhou com dispositivos formados por uma junção de semicondutores do tipo  $p$  e tipo  $n$ , e seu conjunto de teorias foram responsáveis pela revolução nos semicondutores, onde em 1954 surgiram as primeiras células solares eficientes (KRAUTER, 2006).

### **2.3 Sistema fotovoltaico de geração de energia elétrica**

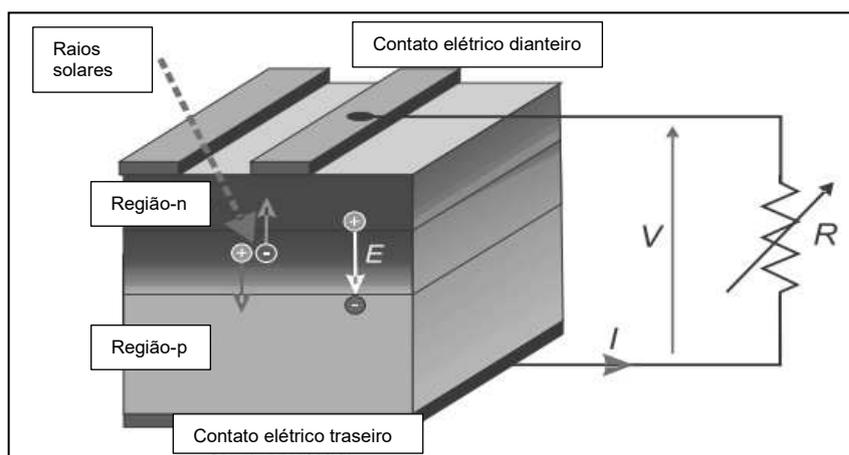
Trata-se de um sistema onde é aproveitada a energia proveniente do sol, que através do efeito fotovoltaico que ocorre em células fotovoltaicas, das quais são formados os painéis ou módulos, é transformada em energia elétrica. O sistema pode ser conectado, ou não, à rede elétrica da distribuidora. Neste trabalho, será abordado apenas o sistema conectado.

Esse sistema é constituído além dos módulos, por inversores de frequência, diodos de *bypass* e bloqueio, além de fusíveis e disjuntores. Também pode ser requerido um sistema de transmissão e distribuição (T&D), quando o sistema de geração não está no entorno da unidade consumidora, nem acoplado à sua estrutura (RÜTHER, 2004).

### 2.3.1 A célula fotovoltaica

A célula fotovoltaica (Figura 7) é um dispositivo semiconductor, formado pela junção de dois cristais de silício, que fazem quatro ligações em seu estado natural, e estes cristais contém impurezas, ou seja, são dopados (KRAUTER, 2006).

Figura 7 – Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica



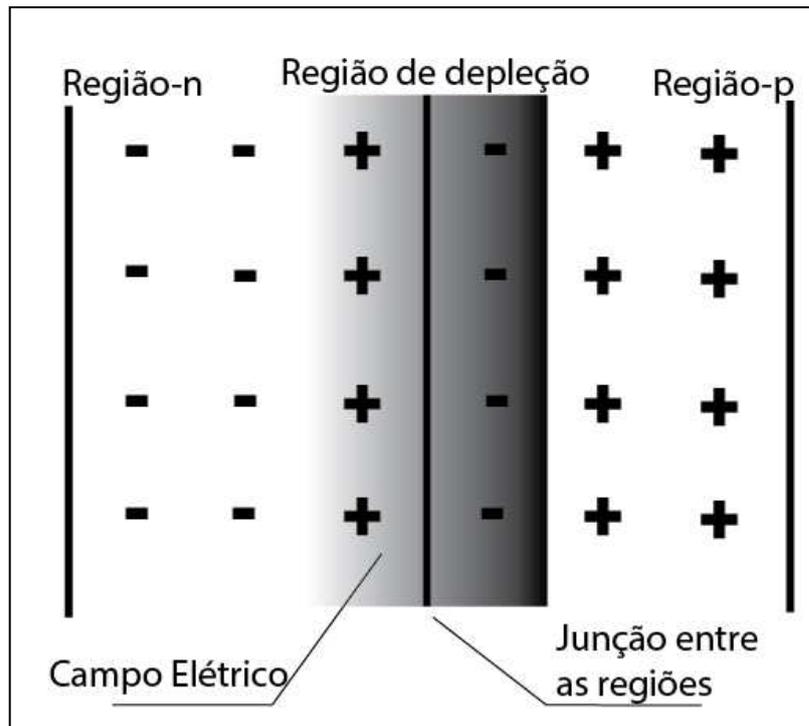
Fonte: Adaptado de KRAUTER (2006, p. 22).

Impurezas, como fósforo na região-n e boro na região-p, afetam o silício. Fósforo deixa um elétron livre, gerando cargas negativas na região-n, enquanto o boro, com três elétrons, deixa um elétron ausente na região-p. Essas alterações influenciam a condução elétrica (KRAUTER, 2006).

Graças à concentração dessas impurezas na região-p e região-n, um campo elétrico se forma na região neutra, ou seja, na junção das duas regiões. Quando a radiação solar interage com esse campo, pares elétrons-lacunas se formam, logo uma corrente elétrica se forma em uma carga acoplada às duas regiões (KRAUTER, 2006).

Os elétrons presentes na região-n são atraídos pelas lacunas da região-p e se difundem na junção das duas regiões, criando lacunas na região-n e cargas na região-p, esse fenômeno gera a região de depleção (Figura 8). As cargas que pertencem a sua respectiva região, são chamadas de portadores majoritários. Já as que estão na região oposta, são denominadas portadores minoritários.

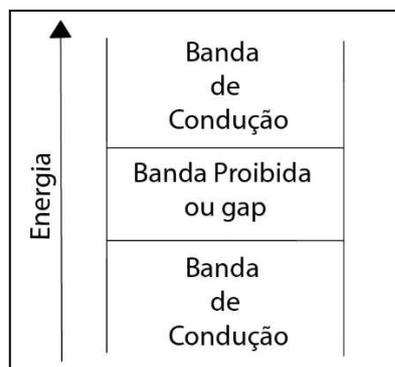
Figura 8 – Formação da região de depleção



Fonte: Elaborado pelo autor.

As bandas de energia (Figura 9) indicam qual o estado do elétron. Quando este está em equilíbrio, quer dizer que o elétron está na sua banda de valência, quando o elétron adquire energia suficiente para se mover, está na banda de condução. As bandas de valência e condução estão separadas por um *gap* energético. A geração dos pares elétrons-lacunas depende da energia dos fótons, presentes na luz do sol, possuírem energia superior ao *gap* de energia entre a banda de valência e a banda de condução.

Figura 9 – Bandas energéticas de um semiconductor



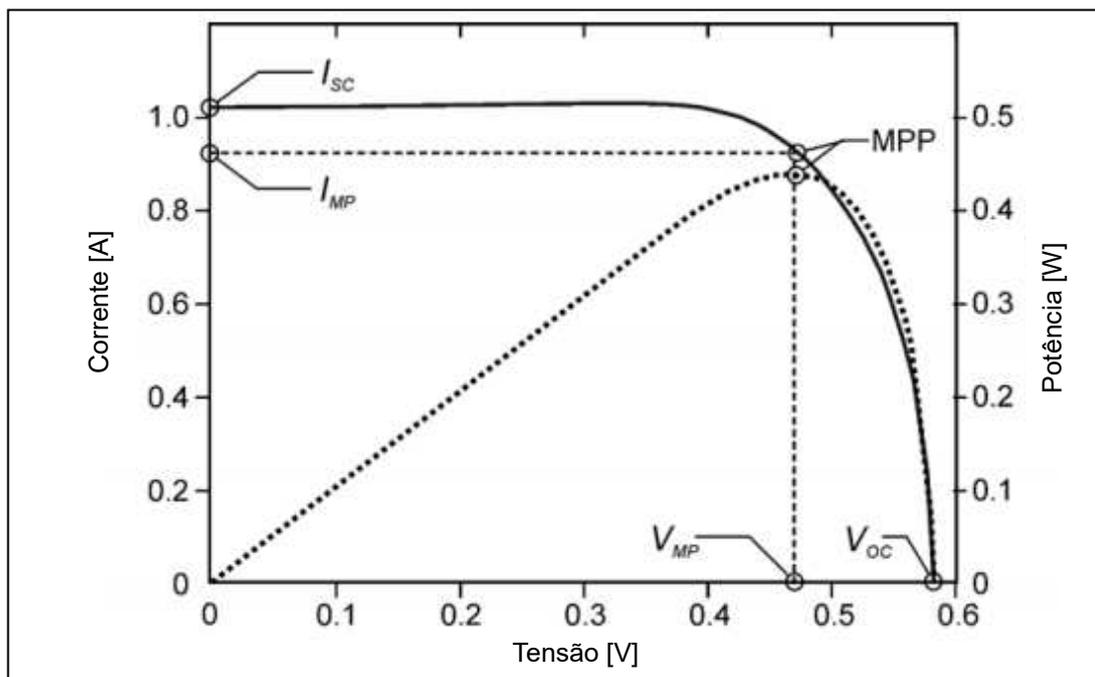
Fonte: Elaborado pelo autor.

A maior potência teórica ( $P_{opt}$ ) fornecida por uma célula fotovoltaica, é obtida pelo produto entre corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) e a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), nos seus respectivos terminais (KRAUTER, 2006).

$$P_{opt} = I_{sc} \cdot V_{oc} \quad (2)$$

Já a máxima potência fornecida real ( $P_{max}$ ) é obtida através do maior produto entre a corrente e tensão, portanto em seus pontos ótimos ( $V_{op}$  e  $I_{op}$ ). E o ponto que representa esse produto ( $MPP$ ) pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Curva característica da corrente de curto-circuito vs. tensão nos terminais de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Adaptado de KRAUTER (2006, p. 24).

Com relação à eficiência na conversão de energia proveniente da luz solar por uma célula fotovoltaica, trata-se da relação entre a irradiância solar pela potência elétrica fornecida. A eficiência na conversão de uma célula policristalina, gira em torno de 28%. (KRAUTER, 2006)

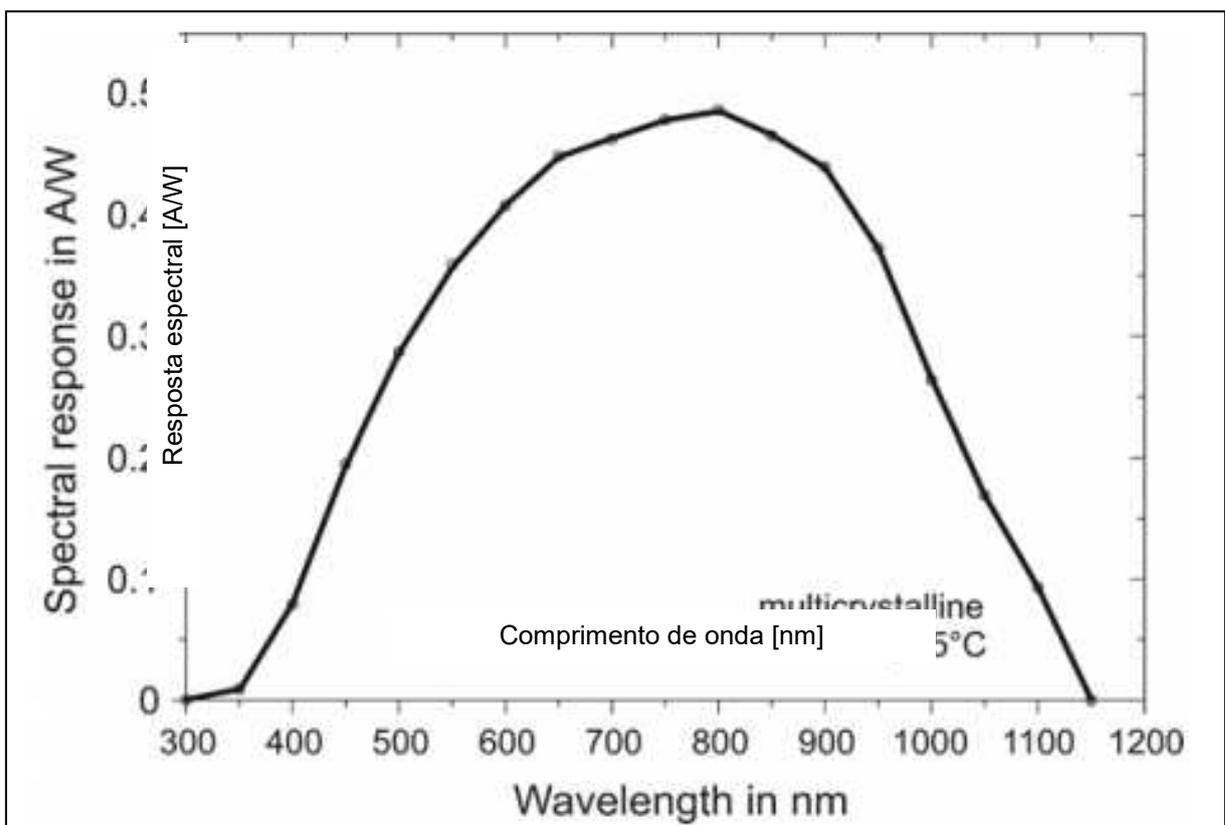
Segundo Krauter, as perdas de energia na conversão possuem três principais causas: graças ao silício ser um semicondutor indireto, o que faz com que o fóton seja absorvido devido

a uma vibração no retículo cristalino (ocorrência de um fônon), o que ocorre com relativa raridade; a banda proibida (*gap*) do silício é de 1,1 eV, onde fótons de energia inferior não são suficientes para criar pares elétron-lacuna, enquanto fótons de energia muito elevada, provocam aumento na temperatura do cristal; e por fim graças a tensão máxima de circuito aberto da célula de silício ser limitada a 0,7 V.

A eficiência pode ser reduzida por perdas ópticas, sombreamento devido aos contatos elétricos e por irradiância não absorvida. Também pode ser reduzida por perdas ôhmicas e por recombinação (KRAUTER, 2006).

Como mencionado, fótons com energia inferior ao *gap* energético, ou muito superior, não são capazes de criar pares elétron-lacuna, portanto existe uma relação entre a eficiência de uma célula fotovoltaica e o comprimento de onda da luz. Essa relação entre a geração de pares elétron-lacunas e a absorção de energia, é denominada resposta espectral ( $S(\lambda)$ ) e sua unidade é A/W. A Figura 11 representa a resposta espectral para uma célula multicristalina de silício a 25°C.

Figura 11 – Resposta espectral para uma célula multicristalina de silício a 25°C



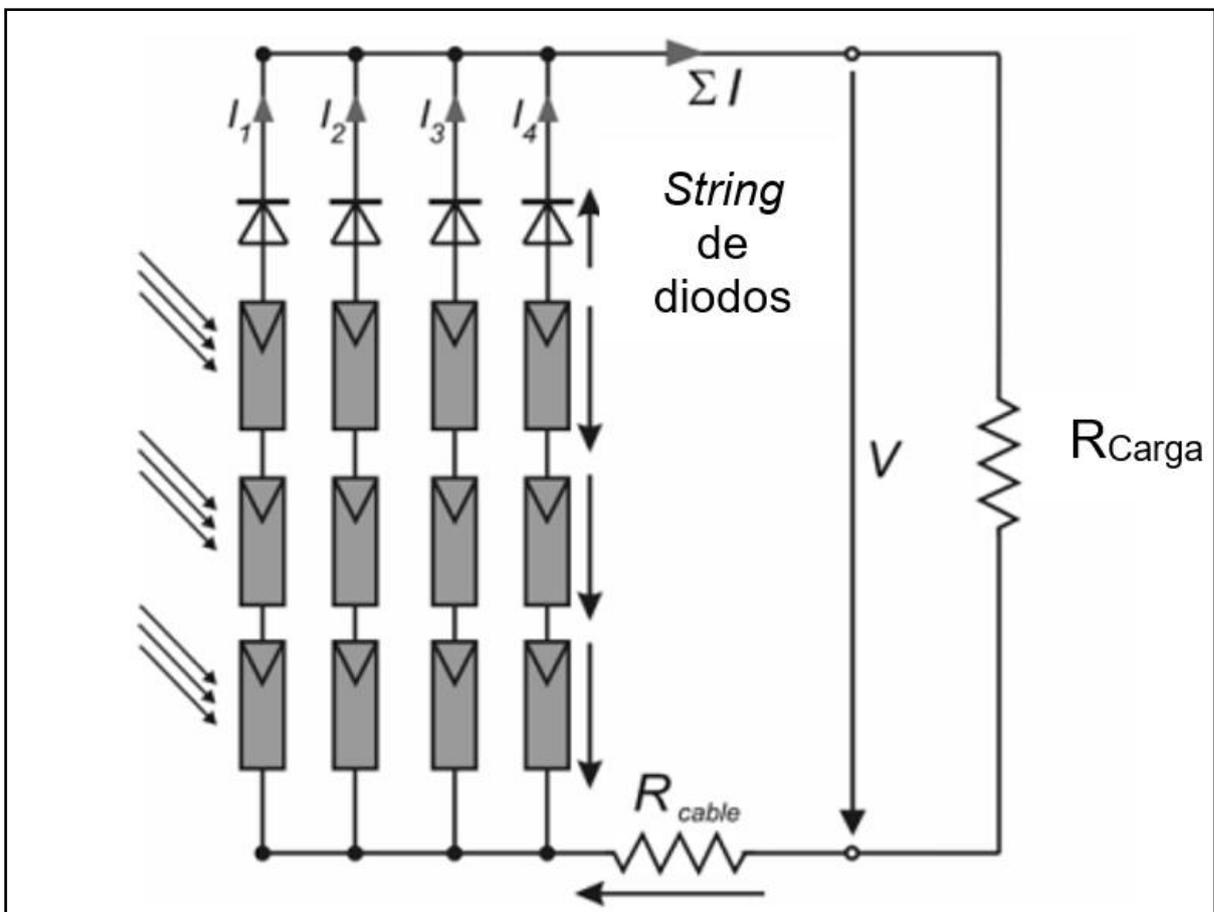
Fonte: Adaptado de KRAUTER (2006, p. 26).

### 2.3.2. O módulo fotovoltaico

Como mencionado a tensão nos terminais de uma célula fotovoltaica de silício é limitada a 0,7 V. Para atingir a tensão de operação necessária ao sistema, é necessário que as células fotovoltaicas sejam associadas em série e paralelo para formar módulos fotovoltaicos.

Módulos também são associados em *strings* (Figura 12), de tal forma que a tensão que chega aos inversores de frequência seja mais elevada, visto que a eficiência desse tipo de conversor depende de sua tensão de operação (KRAUTER, 2006).

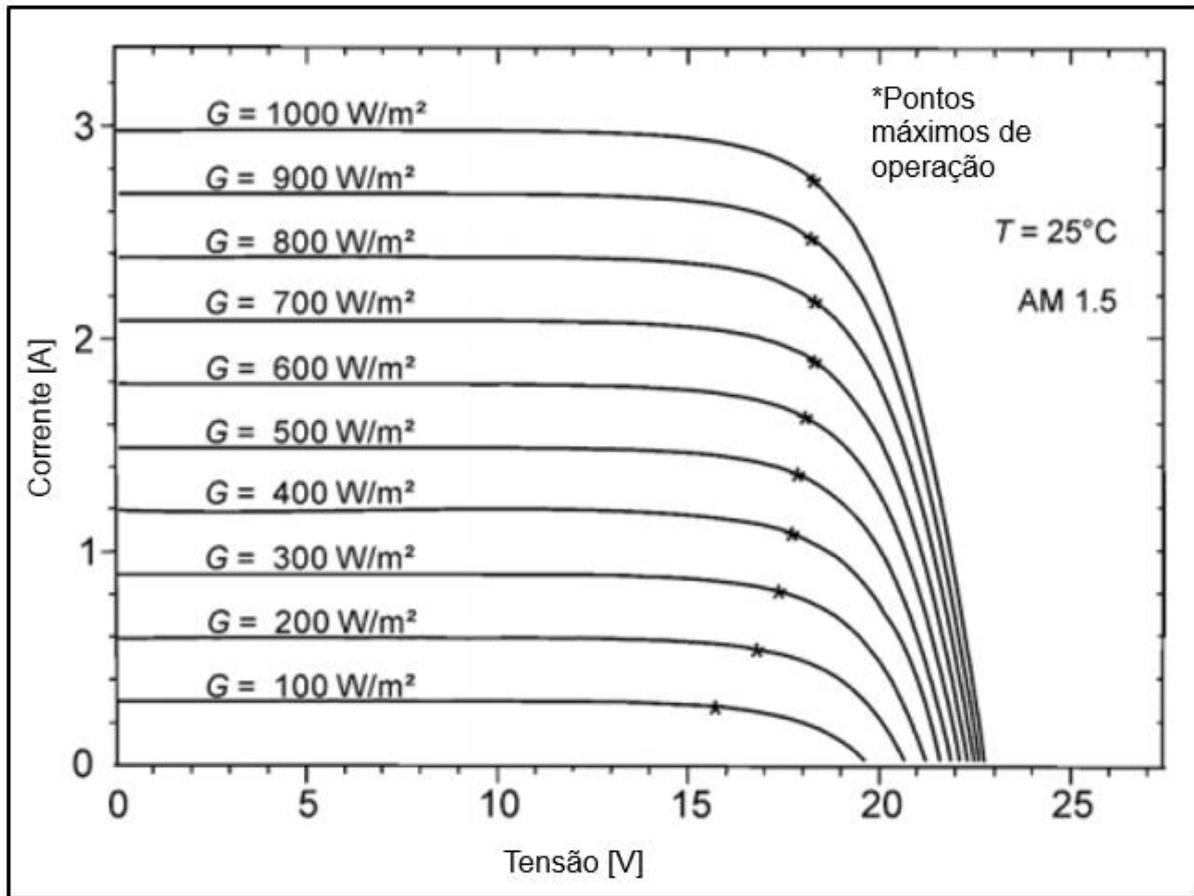
Figura 12 – *Strings* de módulos fotovoltaicos, com seus respectivos diodos de bloqueio



Fonte: Adaptado de KRAUTER (2006, p. 33).

No que diz respeito à relação entre corrente, tensão, potência e ponto de potência máxima, o módulo se comporta como uma célula, onde a corrente é diretamente proporcional a irradiância (Figura 13), visto que quanto maior é esta, maior é a geração de pares elétron-lacuna (Krauter, 2006).

Figura 13 – Relação entre corrente e tensão em um módulo fotovoltaico e seu ponto máximo de potência para diferentes irradiâncias

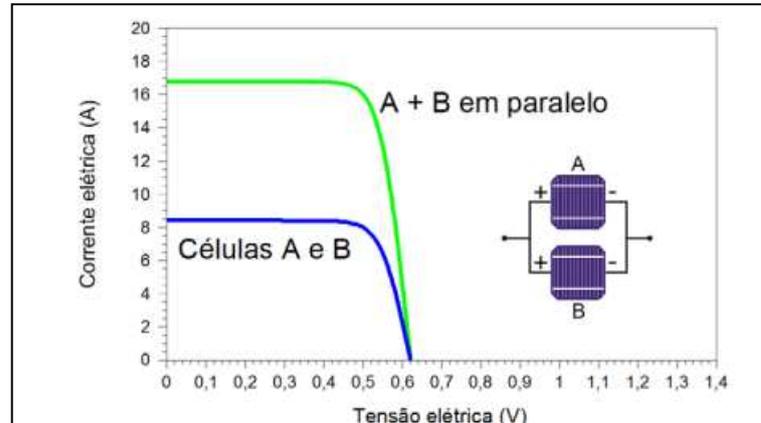


Fonte: Adaptado de KRAUTER (2006, p. 29).

### 2.3.2.1. Associação entre células fotovoltaicas

Levando em consideração que as células estejam submetidas às mesmas condições de temperatura e irradiância, a tensão se mantém a mesma e a capacidade de fornecer corrente aumenta, caso os módulos estejam ligados em paralelo (Figura 14).

Figura 14– Associação de células em paralelo



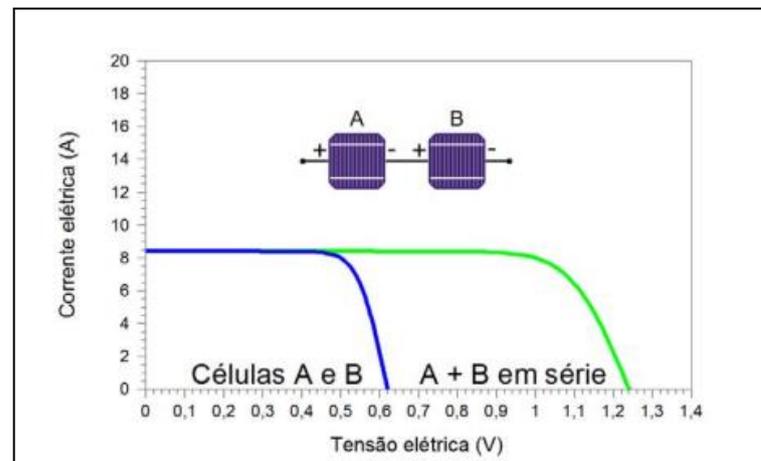
Fonte: CEPEL-CRESESB (2014, p.124).

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (3)$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (4)$$

Sob as mesmas condições, a tensão aumenta e a capacidade de fornecer corrente se mantém, caso os módulos estejam ligados em série (Figura 14).

Figura 15 – Associação de células em série



Fonte: CEPEL-CRESESB (2014, p. 124).

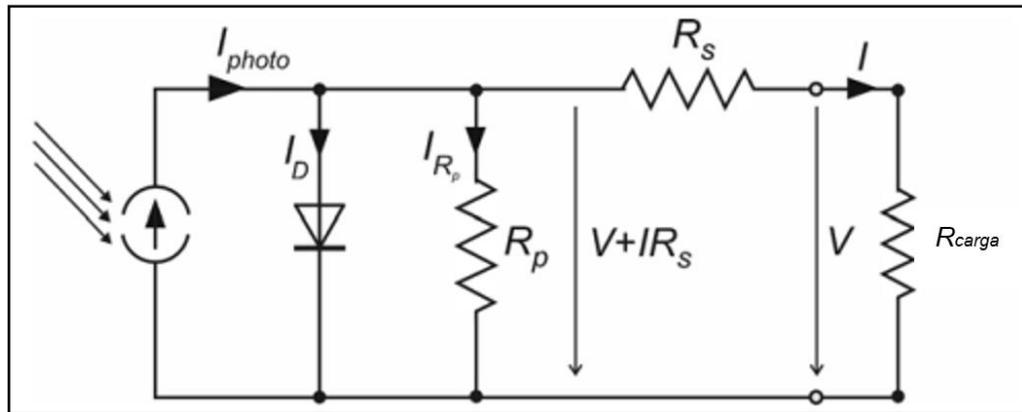
$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (5)$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (6)$$

### 2.3.2.2. Circuito equivalente de um módulo fotovoltaico

Um módulo fotovoltaico pode ser modelado como uma fonte de corrente em paralelo com um diodo e um resistor, e em série com outro resistor, conforme Figura 16.

Figura 16 – Circuito equivalente a um módulo fotovoltaico



Fonte: Krauter (2006, p. 30).

Utilizando a lei de Kirchoff dos nós, a corrente  $I$  é determinada pela seguinte relação:

$$I = I_{photo} - I_{R_p} - I_D \quad (7)$$

A resistência *shunt* ( $R_p$ ) e a corrente que flui por ela, são obtidas respectivamente pelas expressões 4 e 5:

$$R_p = R_{p,escuro} \cdot e^{-\alpha E} \quad (8)$$

$$I_{R_p} = \frac{V + IR_s}{R_p} \left( 1 + a \left( 1 - \frac{V + IR_s}{V_{br}} \right) - 1 \right) \quad (9)$$

A corrente que flui pelo diodo ( $I_D$ ) é dada pela seguinte expressão:

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{kT}} - 1 \right) \quad (10)$$

Portanto, a corrente fornecida por um módulo fotovoltaico é determinada pela seguinte expressão: (Krauter, 2006)

$$I = I_{photo} - I_0 \left( \left( e^{\frac{q(\sum V + IR_s)}{kT}} \right) - 1 \right) - I_{Rp} \quad (11)$$

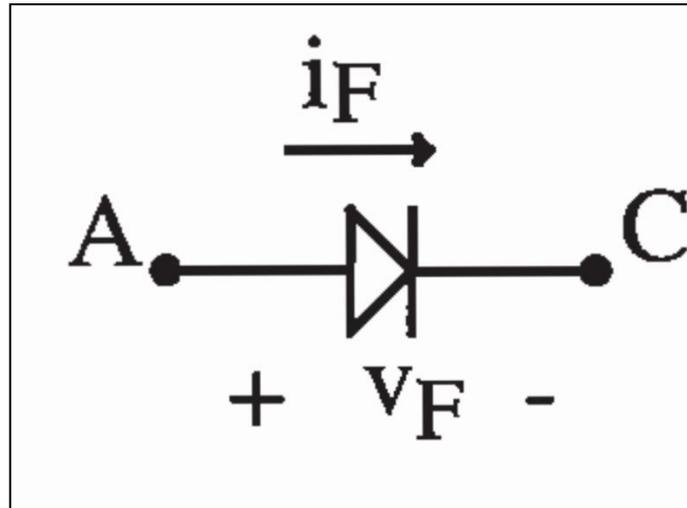
Onde:	$a$	Fator de avalanche
	$I_0$	Corrente de saturação do diodo em [A]
	$E$	Irradiância em [W/m <sup>2</sup> ]
	$I_{photo}$	Corrente proveniente da interação entre os fótons e a região de depleção em [A]
	$I_{Rp}$	Corrente no resistor <i>shunt</i> em [A]
	$k$	Constante de Boltzmann (1,381·10 <sup>-23</sup> [J/K])
	$m$	Expoente avalanche
	$q$	Carga elementar (1,602·10 <sup>-19</sup> [C])
	$R_p$	Resistor <i>shunt</i> [Ω]
	$R_s$	Resistor em série [Ω]
	$T$	Temperatura [K]
	$V_{br}$	Tensão de ruptura do diodo [V]
	$\alpha$	Coefficiente de dependência de irradiância (m <sup>2</sup> /W)

### 2.3.3. Diodos de bypass e bloqueio

Diodos são dispositivos semicondutores formados pela junção de dois cristais semicondutores, frequentemente cristais de silício, cujo retículo cristalino possui impurezas (dopagem) do tipo-*n* e do tipo-*p*, portanto possuem o mesmo princípio construtivo das células fotovoltaicas.

Um diodo possui dois terminais, onde um dos terminais está ligado ao cristal tipo-*p* (cátodo) e o outro ao cristal tipo-*n* (ânodo). Aplicando-se uma tensão e corrente  $i_F$  e  $v_F$ , respectivamente em um diodo ideal (Figura 17) no sentido ânodo-cátodo, a corrente flui sem perdas. Invertendo-se a tensão, a resistência é infinita (BARBI, 2005).

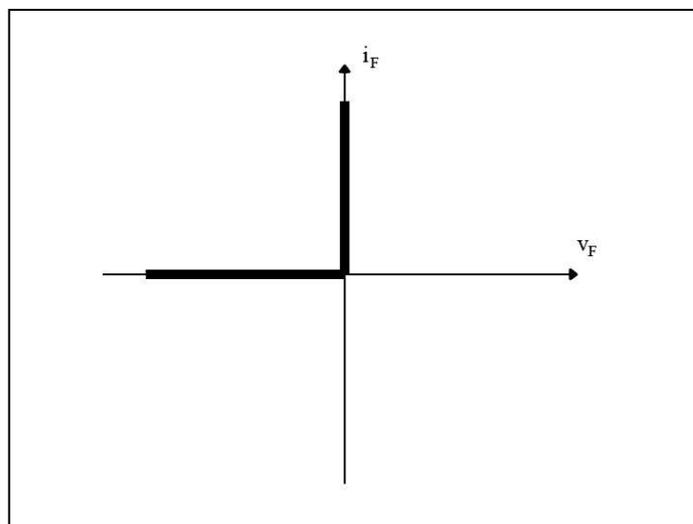
Figura 17 – Diodo ideal



Fonte: BARBI (2005, p. 4).

A Figura 18 ilustra a curva característica de um diodo ideal. É possível observar que, na sua polarização direta, não há nenhuma queda de tensão e o mesmo se comporta como um curto-circuito.

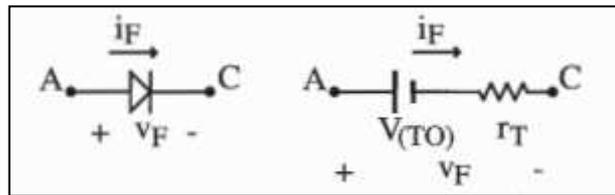
Figura 18 – Curva característica de um diodo real



Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de BARBI (2005, p. 3).

Diodos reais (Figura 19) possuem uma força eletromotriz ( $V_{TO}$ ) que provocam uma queda de tensão e uma resistência ( $r_T$ ) associada. A tensão máxima de bloqueio  $V_{RRM}$  é limitada, e caso superada pode ser destrutivo para o componente (BARBI, 2005).

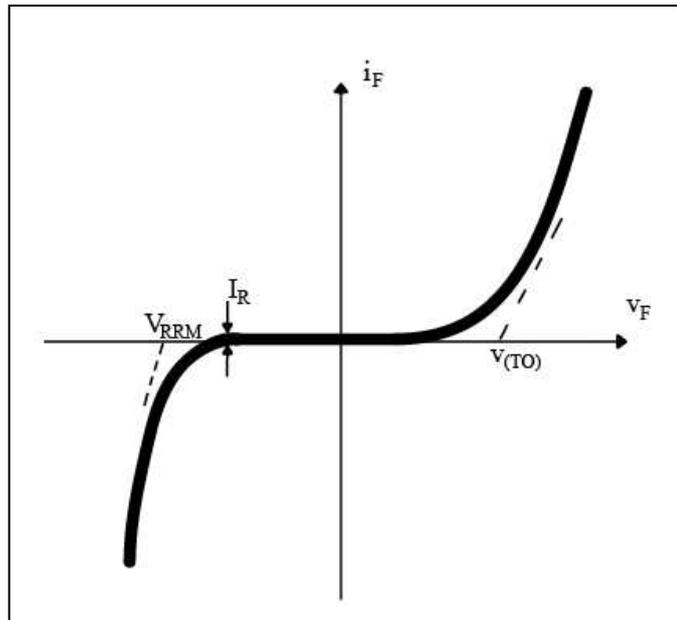
Figura 19 – Diodo real



Fonte: Barbi (2005, p. 4).

Diferentemente do diodo ideal, o diodo real possui uma queda de tensão provocada pela fonte de tensão  $V_{TO}$ , conforme ilustra a Figura 20.

Figura 20 – Curva característica de um diodo real



Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Barbi (2005, p. 4).

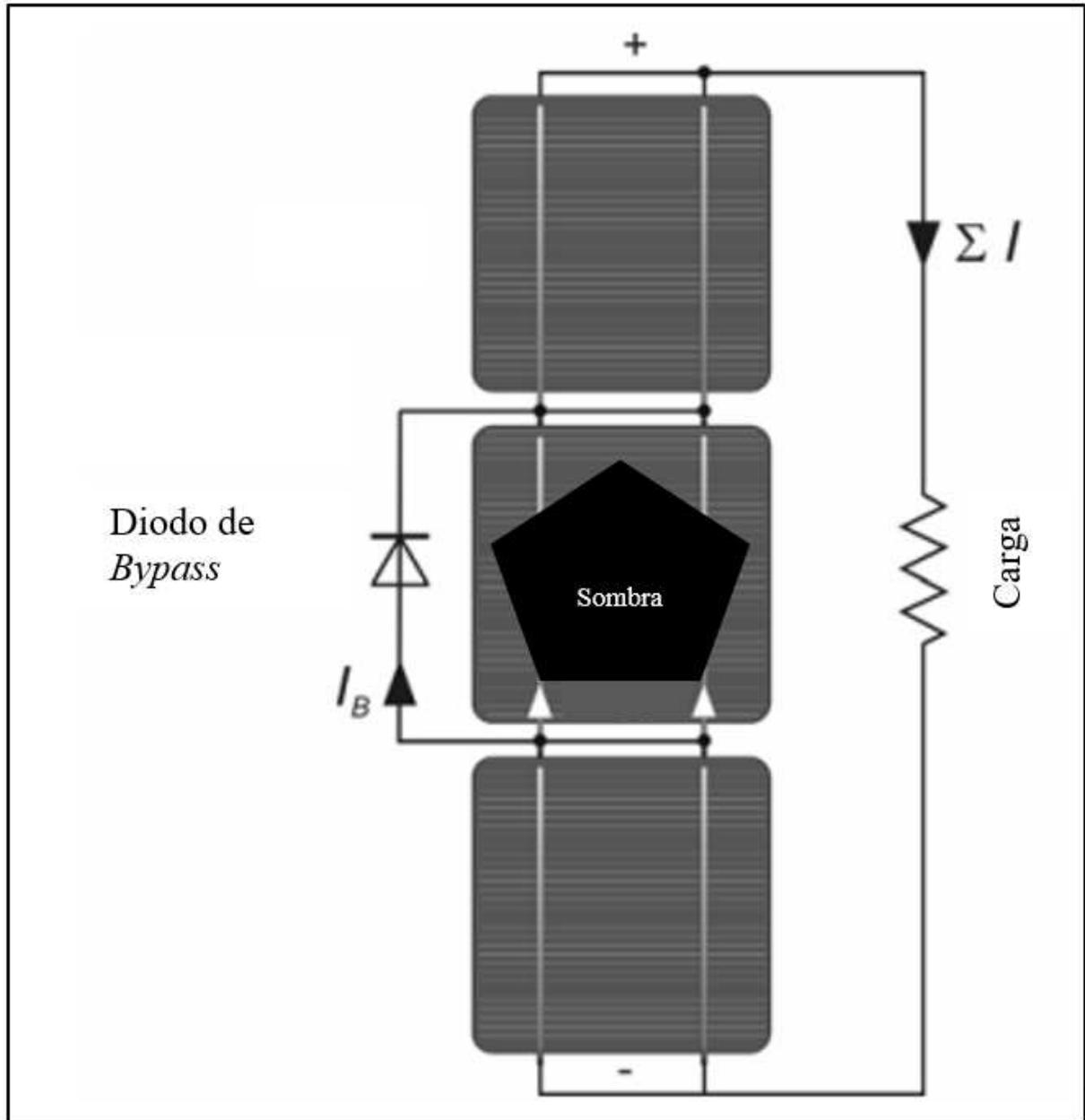
### 2.3.3.1. O diodo de bypass

Os diodos de *bypass* (Figura 21) ou desvio são utilizados em conexão paralela, com polaridade inversa, com os módulos para evitar o mau funcionamento destes, devido a defeitos de fabricação ou a sombreamento (CEPEL-CRESESB, 2014).

Diodos de *bypass* são comumente empregados em *strings* com tensão de circuito aberto superior a 30V para isolar e evitar que atuem como cargas durante sombreamento parcial. Os cabos desses sistemas são projetados para resistir à radiação ultravioleta, possuindo duplo

isolamento e capacidade de suportar temperaturas elevadas, frequentemente até 50°C acima da temperatura ambiente, nas regiões posteriores dos módulos (RÜTHER, 2004).

Figura 21 – Representação da operação do diodo de *bypass* cuja sua célula associada está inoperante por sombreamento

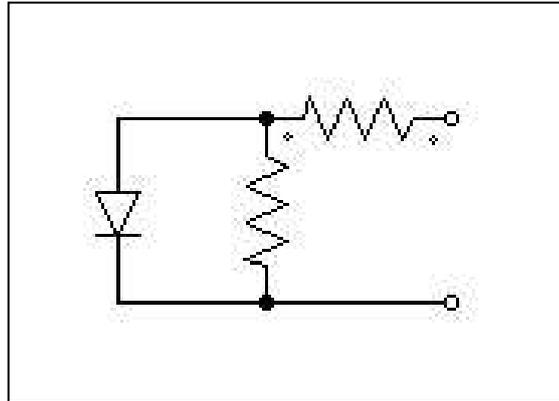


Fonte: Adaptado de KRAUTER (2006, p. 32).

O circuito equivalente apresentado anteriormente na Figura 16, mostra que se a fonte de corrente, a qual é dependente da irradiância solar, for removida do circuito, ou seja, estiver defeituosa ou submetida a sombreamento, as células passarão a se comportar como cargas, conforme mostrado nas Figuras 22 e 23.

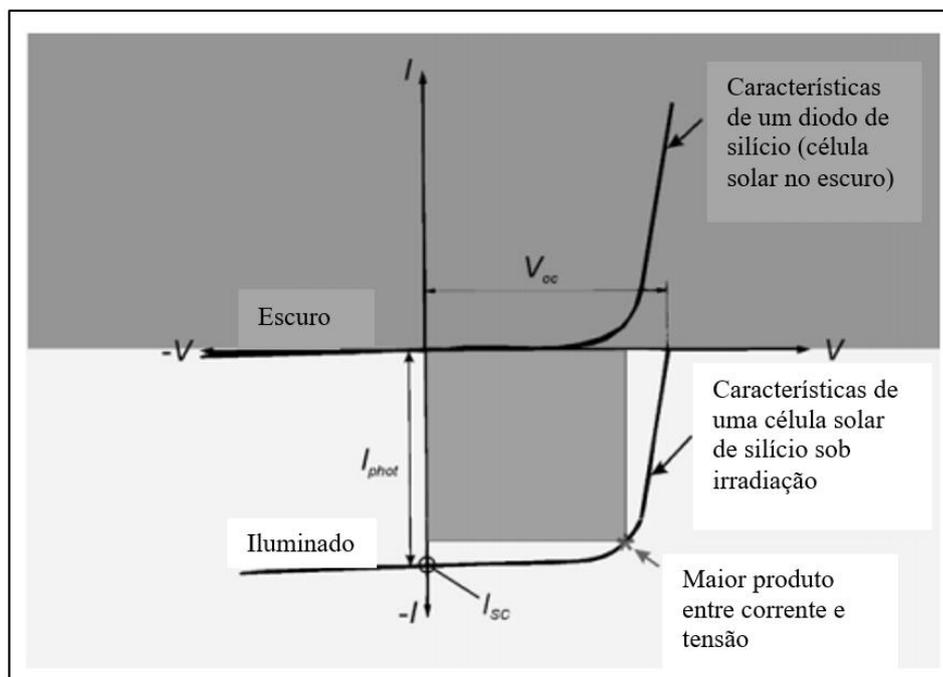
Isso pode gerar pontos quentes, logo o diodo de *bypass* fornecerá um desvio para a corrente, evitando a dissipação de corrente nas células, reduzindo as perdas e a possibilidade de dano permanente nestas (CEPEL-CRESESB, 2014).

Figura 22 – Circuito equivalente do módulo danificado ou sob sombra



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Curva característica de uma célula fotovoltaica sob condições de luminosidade e sombreamento



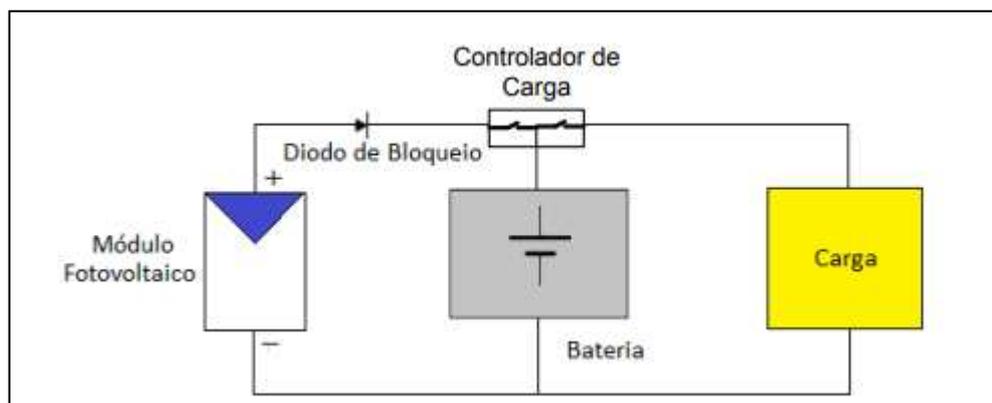
Fonte: Adaptado de KRAUTER (2006, p. 23).

### 2.3.3.2. O diodo de bloqueio

Diodos de bloqueio são utilizados em série com módulos, e tem a finalidade de evitar corrente que haja fluxo de corrente reverso, conforme ilustra a Figura 24.

O diodo de bloqueio protege conexões em módulos ou conjuntos série/paralelo, impedindo o fluxo de corrente de conjuntos com maior tensão para os de menor tensão. Em sistemas com armazenamento, ele também evita descargas noturnas das baterias, pois os módulos podem conduzir uma corrente reversa que contribui para a descarga, mesmo que em pequena quantidade, durante a noite (CEPEL-CRESESB, 2014).

Figura 24 – Posicionamento do diodo de bloqueio evitando a passagem de corrente da bateria para o módulo



Fonte: CEPEL-CRESESB (2014, p. 162).

### 2.3.4. Sistema inversor

Outro componente do sistema de geração fotovoltaica é o sistema de conversão de energia. Trata-se de um conversor, ou conjunto de conversores, que transformam a energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos, sob a forma de corrente contínua, em corrente alternada, dentro mesmos parâmetros de tensão e frequência da rede de distribuição. Apesar de existirem sistemas completamente autônomos, isto é, independentes da rede de distribuição, neste trabalho será abordado o sistema do tipo *on-grid*, cuja principal característica é a intergração ao sistema de distribuição de energia elétrica.

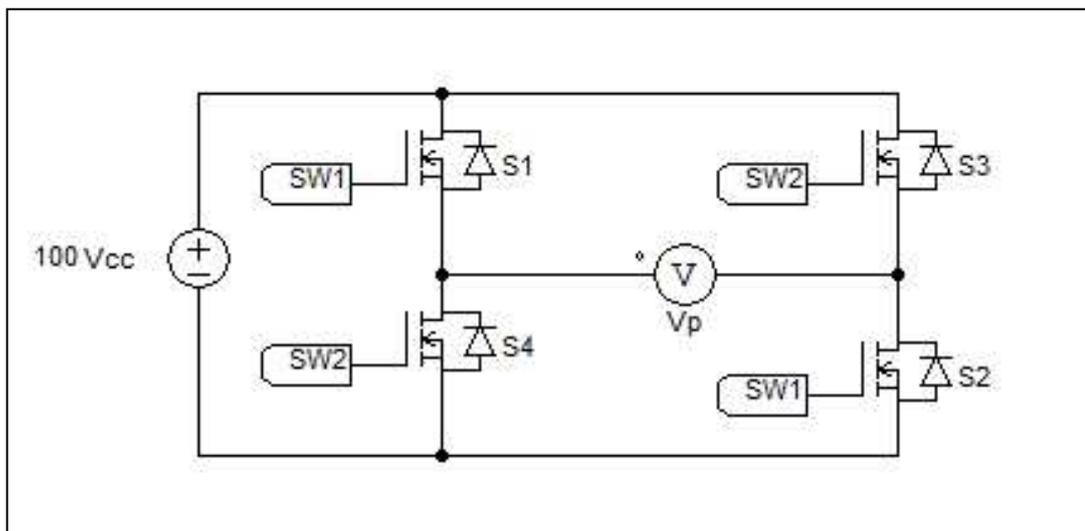
Os conversores de energia podem ser do tipo CC-CC (corrente contínua – corrente contínua), CA-CC (corrente alternada – corrente contínua), CC-CA e CA-CC.

Os inversores (conversores CC-CA) podem ser divididos em conversores comutados pela rede elétrica, cujo sinal senoidal captado do sistema elétrico sincroniza o chaveamento do conversor, e auto comutados nos quais está presente um sistema eletrônico incumbido desta tarefa (RÜTHER, 2004).

Em comparação ao início dos anos noventa, onde os inversores eram dimensionados para atender às solicitações de carga específicas, atualmente são utilizados inversores de menor porte conectados em paralelo (RÜTHER, 2004).

Um conversor CC-CA monofásico em ponte funciona através da comutação combinada de chaves (pulsadores). Utilizando uma onda quadrada de 60 Hz, quando as chaves S1 e S2 estão fechadas, e S3 e S4 estão abertas, a tensão em  $V_P$  é de 100 V. Quando as chaves S3 e S4 fecham e S1 e S2 abrem, a tensão passa a ser -100 V, conforme Figura 25.

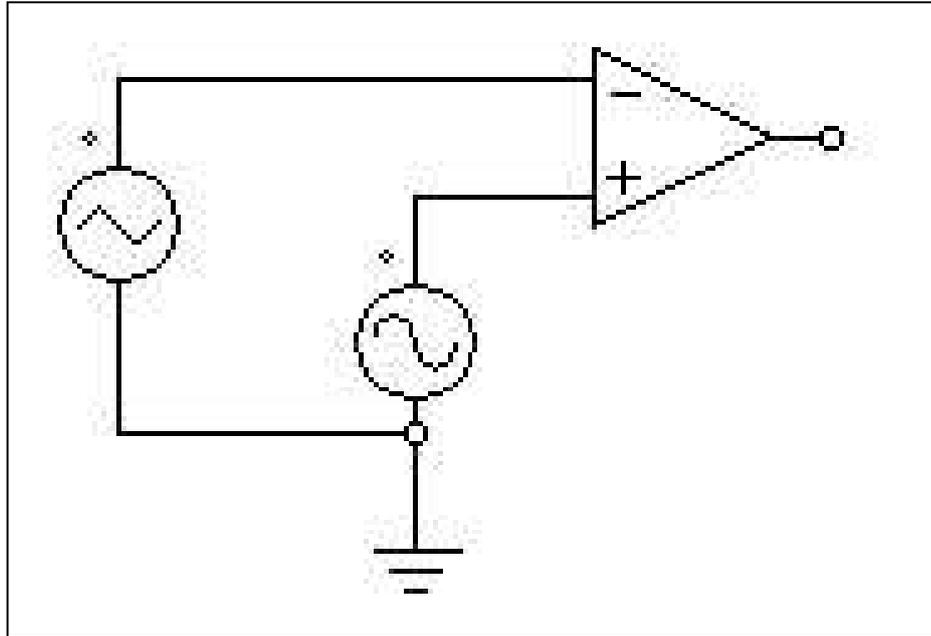
Figura 25 – Conversor CC-CA em ponte



Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando o *software* PSIM.

Para se obter uma tensão senoidal na saída é necessário que a comutação das chaves seja feita através de uma modulação por largura de pulso senoidal (*sinusoidal pulse width modulation* ou SPWM), (RASHID, 2014) que pode ser gerada utilizando um sinal senoidal e um triangular nas entradas de um circuito comparador, conforme Figura 26.

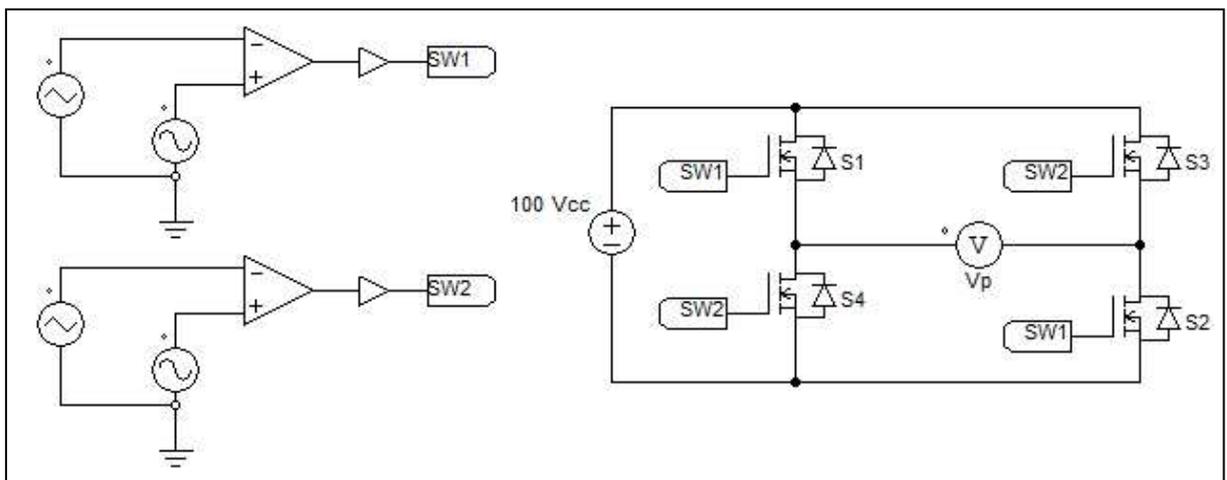
Figura 26 – Circuito gerador de SPWM



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o *software* PSIM.

Utilizando dois geradores de SPWM defasados  $180^\circ$  entre si, e aplicando no circuito da Figura 25, obtêm-se um circuito inversor de frequência em ponte (Figura 27).

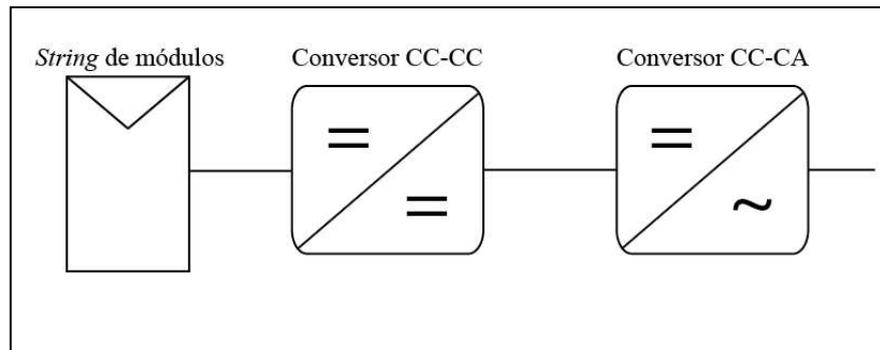
Figura 27 – Dois geradores de SPWM defasados  $180^\circ$  conectados às chaves de um conversor CC-CA em ponte



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o *software* PSIM.

Pode-se obter um sistema inversor combinando conversores em cascata (CS), criando-se estágios na conversão (XIE, 2019), conforme ilustra Figura 28.

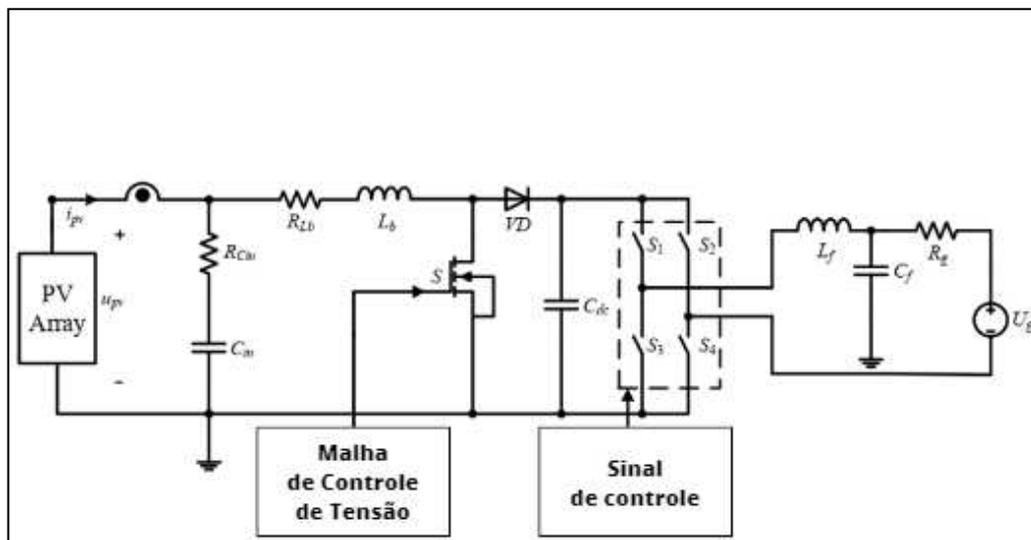
Figura 28 – Sistema inversor de dois estágios



Fonte: Elaborado pelo autor.

O sistema proposto na Figura 29, é formado por um conversor CC-CC *boost* no estágio de entrada e um inversor de frequência monofásico (XIE, 2019). O primeiro conversor tem como finalidade elevar o nível de tensão para o segundo estágio.

Figura 29 – Componentes de um sistema inversor de dois estágios

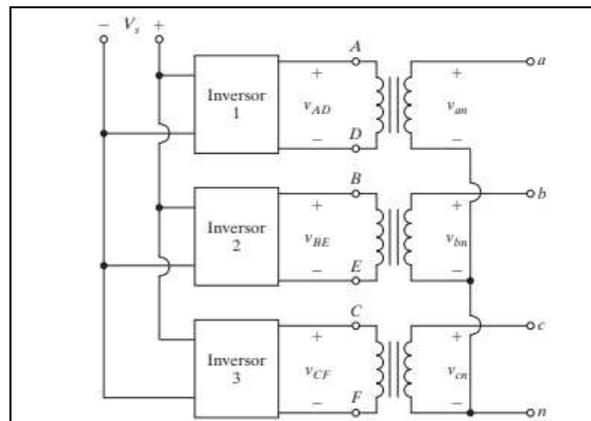


Fonte: Adaptado de XIE (2019, p. 3).

A malha de Controle de tensão acoplada à chave do conversor CC-CC possui um MPPT ou *Maximum Power Track*, que é um circuito lógico que rastreia o ponto de maior potência do arranjo fotovoltaico. No caso do projeto proposto por este trabalho, é necessário apenas um MPPT, visto que o sistema possuirá apenas uma angulação.

Para aplicações de onde seja necessária maior potência fornecida, são utilizados inversores trifásicos, que são formados por três inversores monofásicos de meia ponte, ou ponte completa, conectados em paralelo, conforme Figura 30 (RASHID, 2014).

Figura 30 – Esquema do inversor trifásico

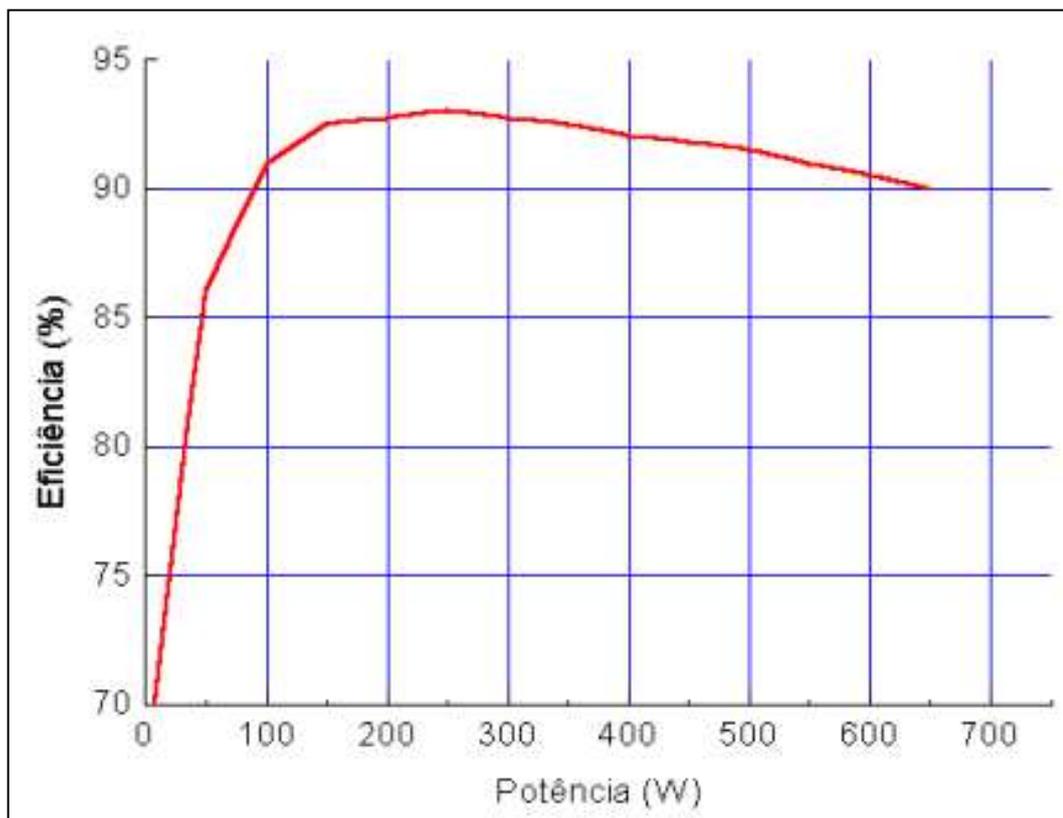


Fonte: RASHID (2014, p. 253).

Os inversores sob nenhuma circunstância devem injetar corrente módulos fotovoltaicos na rede, provocando um fenômeno chamado *islanding*.

Com relação à eficiência dos inversores de frequência típicos, a mesma possui um ponto ótimo (Figura 31) e cai à medida em que se aproxima da potência nominal. As perdas por *stanby* também devem ser consideradas. (RÜTHER, 2006)

Figura 31 – Eficiência de um típico inversor de 650 W



Fonte: RÜTHER (2006, p. 31).

### **2.3.5. Subestação da unidade geradora**

Uma subestação é um sistema composto por cabos, dispositivos e aparelhos projetados para alterar as propriedades da energia elétrica, como tensão e corrente, a fim de viabilizar sua distribuição aos locais de consumo em níveis adequados para utilização (MAMEDE, 2017).

#### **2.3.5.1 O Transformador de acoplamento**

O transformador de acoplamento tem como função unir o circuito formado pelos inversores de frequência, à rede elétrica. Também são responsáveis pelo aumento da segurança e confiabilidade uma vez que isolam os dois estágios (geração e distribuição). Por fim, também tem a característica de isolar as componentes harmônicas geradas pelas chaves eletrônicas dos inversores de frequência.

No projeto presente neste trabalho, serão implementados transformadores de acoplamento para cada *string* de painéis, elevando a tensão à 13,8 kV, reduzindo drasticamente a seção transversal dos cabos.

## **2.4 Os condutores**

Para o dimensionamento adequado dos condutores, é preciso levar em conta a tensão e frequência nominal do sistema; a potência ou corrente da que alimentará as cargas e seu respectivo fator de potência; se o sistema é monofásico, bifásico ou trifásico, o método de instalação dos condutores; a natureza de carga; a distância da carga ao ponto de suprimento e a corrente de curto-circuito e os sistemas de proteção associados (LIMA, 2022).

O projeto proposto no Capítulo 4 terá três níveis de tensão (dois em baixa tensão e um em média tensão), logo para o dimensionamento dos condutores que operarão nesses níveis tensão, serão utilizados os fatores de correção presentes nas normas: NBR-5410:2004 e NBR-14039:2021, respectivamente.

## **2.5 Considerações finais**

A teoria apresentada até aqui demonstra que se faz necessário um levantamento da irradiação que incide sobre a superfície terrestre no ponto onde o projeto deverá ser

implementado. Assim como dá ferramentas para que se escolha um inversor de frequência adequado à tarefa de converter a eletricidade proveniente da planta fotovoltaica, assim como que proteções devem ser utilizadas em uma planta com essa capacidade de geração.

No próximo capítulo, é apresentada a metodologia para que se consiga fazer o levantamento da irradiação, assim como, quais os parâmetros de ajustes das proteções exigidas pelas normas para que o sistema esteja apto a se integrar à rede elétrica da distribuidora.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Introdução

Neste capítulo, será apresentada a metodologia necessária ao projeto preliminar, de um sistema de geração fotovoltaica.

Após a revisão de toda a teoria pertinente a como a energia solar pode ser convertida em energia elétrica, é feito um levantamento da disponibilidade de radiação no local de aplicação do projeto. Após isso, é feita a relação das proteções e seus parâmetros para que a usina fotovoltaica possa ser acoplada à rede elétrica, e por fim ser elaborado o projeto preliminar.

A Figura 32 ilustra as etapas de desenvolvimento da metodologia utilizada na elaboração do projeto preliminar da usina de minigeração fotovoltaica.

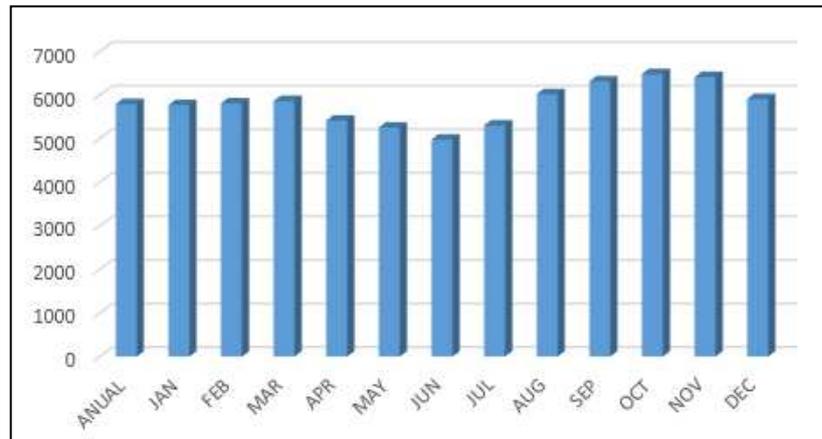
Figura 32 – Fluxograma do projeto preliminar



#### 3.2 Levantamento da Irradiação Solar no local onde o projeto deverá ser realizado

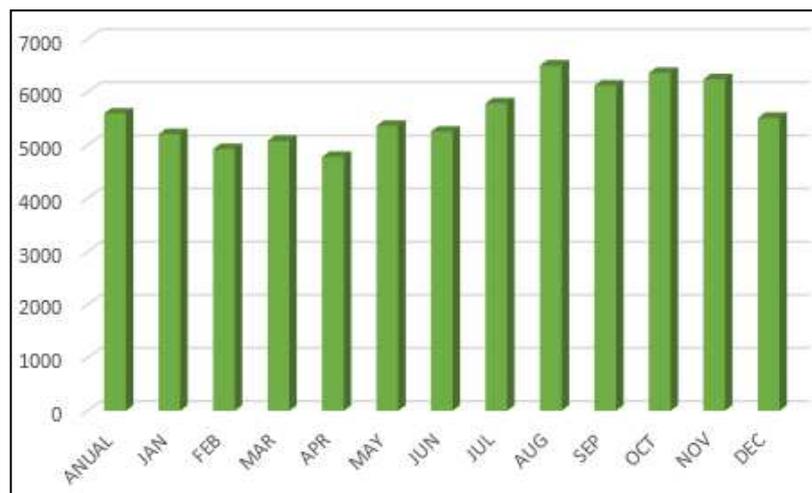
Conforme dados extraídos da base de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar, as irradiações, global horizontal, direta normal, no plano inclinado na latitude e difusa, na cidade de Limoeiro do Norte-CE estão presentes Figuras 33, 34, 35 e 36.

Figura 33 – Irradiação solar global horizontal em Limoeiro do Norte



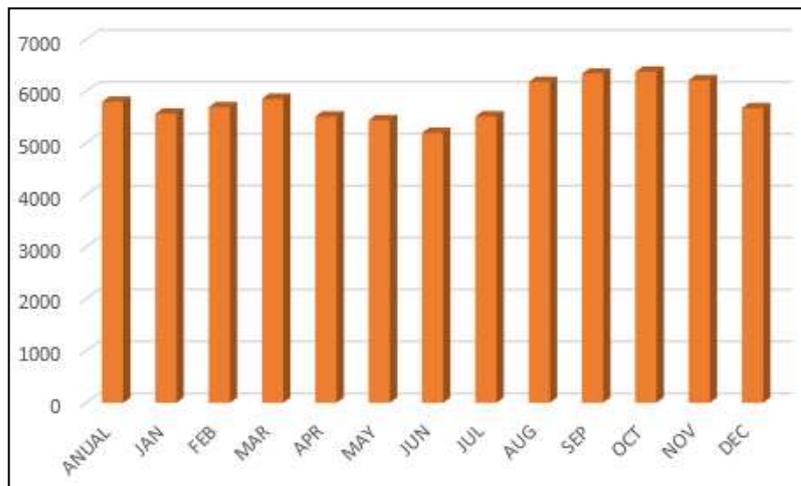
Fonte: Elaborado pelo autor, com dados extraídos do banco de dados do Inpe.  
Disponível em: <http://labren.ccst.inpe.br>. Acesso em: março de 2023.

Figura 34 – Irradiação solar direta normal em Limoeiro do Norte



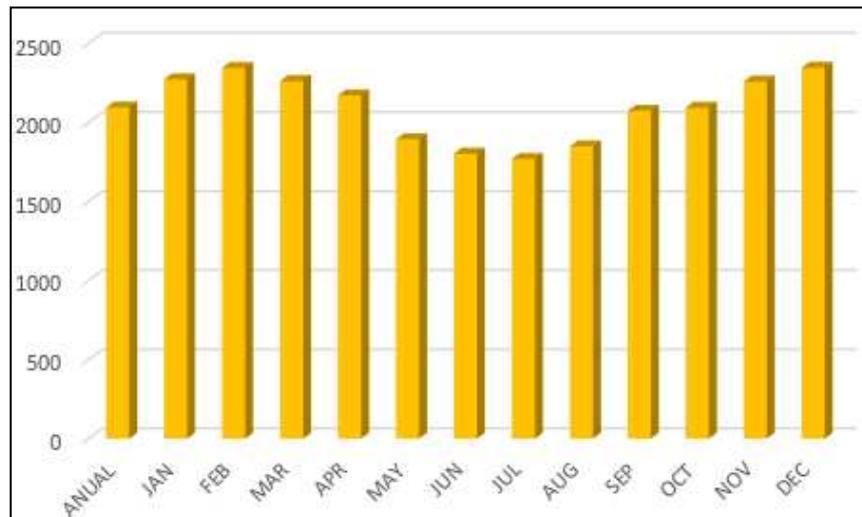
Fonte: Elaborado pelo autor, com dados extraídos do banco de dados do Inpe.  
Disponível em: <http://labren.ccst.inpe.br>. Acesso em: março de 2023.

Figura 35 – Irradiação solar no plano inclinado na latitude em Limoeiro do Norte



Fonte: Elaborado pelo autor, com dados extraídos do banco de dados do Inpe. Disponível em: <http://labren.ccst.inpe.br>. Acesso em: março de 2023.

Figura 36 – Irradiação solar difusa horizontal em Limoeiro do Norte



Fonte: Elaborado pelo autor, com dados extraídos do banco de dados do Inpe. Disponível em: <http://labren.ccst.inpe.br>. Acesso em: março de 2023.

### 3.3 O software *PVSyst*

O *PVSyst* é um software dedicado à simulação e análise de sistemas de energia solar fotovoltaica. Desenvolvido pela empresa *PVSyst SA*, é amplamente utilizado na indústria solar para projetar, dimensionar e otimizar instalações fotovoltaicas. As principais características do *PVSyst* são:

- **Modelagem do Sistema Solar:** Permite a modelagem detalhada de sistemas fotovoltaicos, incluindo a configuração de módulos solares, inversores, baterias e outros componentes.
- **Previsão de Desempenho:** Realiza simulações para prever o desempenho energético ao longo do tempo, considerando fatores como a inclinação dos painéis, orientação, sombreamento, condições climáticas e outros parâmetros.
- **Análise Financeira:** Facilita a análise econômica de projetos, considerando custos de instalação, tarifas de eletricidade, incentivos fiscais e outros aspectos financeiros.
- **Banco de Dados Meteorológicos:** Utiliza dados meteorológicos específicos do local para fornecer estimativas precisas de produção de energia solar.
- **Relatórios Detalhados:** Gera relatórios detalhados que incluem informações sobre o desempenho esperado do sistema, análise de viabilidade econômica e outros aspectos relevantes.
- **Atualizações e Suporte:** O *PVSyst* é regularmente atualizado para incorporar novas tecnologias e melhorar a precisão das simulações. Além disso, oferece suporte técnico aos usuários.

Em resumo, o *PVSyst* é uma ferramenta abrangente e especializada que desempenha um papel crucial na fase de planejamento e avaliação de projetos de energia solar fotovoltaica, contribuindo para a tomada de decisões informadas e a otimização do desempenho dos sistemas.

### 3.4 Relação dos requisitos para interface entre as unidades geradora e consumidora

No projeto contido neste trabalho, a subestação da unidade geradora será composta por um conjunto de inversores de frequência conectados em paralelo, um transformador de acoplamento, cabos, conexões e as proteções.

O módulo 3 do PRODIST, estabelece os requisitos de interface entre o sistema de geração e o sistema de distribuição de energia elétrica. Neste trabalho, o sistema de geração deve ser acoplado à rede no lado de baixa tensão da subestação responsável pela alimentação do sistema de bombeamento citado na seção de introdução.

Com relação aos requisitos mínimos para fazer a interface entre a unidade geradora e a unidade consumidora estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Requisitos mínimos da interface com a rede em função da potência instalada para central geradora classificada como microgeração ou minigeração distribuída.

Elemento	Potência Instalada da Microgeração ou Minigeração Distribuída		
	Menor ou igual a 75 kW	Maior que 75 kW e menor ou igual a 500 kW	Maior que 500 kW e menor ou igual a 5 MW
<b>Elemento de acoplamento</b>	Nenhum	Transformador de interface com isolamento galvânica	Transformador de interface com isolamento galvânica
<b>Elemento de seccionamento</b>	Disjuntor termomagnético	Chave seccionadora acessível	Chave seccionadora Acessível
<b>Elemento de interrupção</b>	Dispositivo de interrupção automática	Dispositivo de interrupção automática	Dispositivo de interrupção automática
<b>Elemento de proteção</b>	Conjunto de funções de proteção que produza uma saída capaz de operar na lógica de atuação do elemento de interrupção	Conjunto de funções de proteção que produza uma saída capaz de operar na lógica de atuação do elemento de interrupção	Conjunto de funções de proteção que produza uma saída capaz de operar na lógica de atuação do elemento de interrupção
<b>Elemento de medição</b>	Medidor de energia ativa bidirecional	Medidor de energia de 4 quadrantes	Medidor de energia de 4 quadrantes

Fonte: Extraída do módulo 3 do PRODIST (2021, p. 4)

Com respeito às proteções que o módulo 3 do PRODIST impõe, também são descritas as funções de proteção, seus respectivos códigos baseados nas normas do *American National Standart Institute* (ANSI) e a potência instalada da unidade geradora, conforme indica a Tabela 2.

Tabela 2 – Funções de proteção junto à interface da central geradora classificada como microgeração ou minigeração distribuída

Função de proteção	Código ANSI equivalente	Potência Instalada da Microgeração ou Minigeração Distribuída		
		Menor ou igual a 75 kW	Maior que 75 kW e menor ou igual a 500 kW	Maior que 500 kW e menor ou igual a 5 MW
Função de proteção de subtensão	27	Sim	Sim	Sim
Função de proteção de sobretensão	59	Sim	Sim	Sim
Função de proteção de subfrequência	81U	Sim	Sim	Sim
Função de proteção de sobrefrequência	81°	Sim	Sim	Sim
Função de proteção contra desequilíbrio de corrente entre fases	46	Sim	Sim	Sim
Função de proteção contra reversão e desequilíbrio de tensão	47	Sim	Sim	Sim
Função de proteção contra Curto-circuito	50 / 50N	Sim	Sim	Sim
Função de proteção seletiva contra curto-circuito	51 / 51N	Sim	Sim	Sim
Função de proteção contra Perda de rede (Proteção anti-ilhamento)	-	Relé de detecção de ilhamento	Relé de detecção de ilhamento	Relé de detecção de ilhamento
Função de verificação de sincronismo	25	Sim	Sim	Sim
Função de espera de tempo de reconexão	62	Sim	Sim	Sim

Fonte: extraída do módulo 3 do PRODIST (2021, p. 5).

Com respeito às proteções mínimas exigidas, em relação à potência instalada, constadas no módulo 3 do PRODIST, estão listadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Proteções mínimas em função da potência instalada

EQUIPAMENTO	Potência Instalada		
	< 10 kW	10 kW a 500 kW	> 500 kW
Elemento de desconexão	Sim	Sim	Sim
Elemento de interrupção	Sim	Sim	Sim
Transformador de acoplamento	Não	Sim	Sim
Proteção de sub e sobretensão	Sim	Sim	Sim
Proteção de sub e sobrefrequência	Sim	Sim	Sim
Proteção contra desequilíbrio de corrente	Não	Não	Sim
Proteção contra desbalanço de tensão	Não	Não	Sim
Sobrecorrente direcional	Não	Não	Sim
Sobrecorrente com restrição de tensão	Não	Não	Sim

Fonte: Extraído módulo 3 do PRODIST (2021, p. 8).

A distribuidora de energia que fornece energia à estação elevatória, é a Enel. Os parâmetros estabelecidos de tensão para determinar em qual categoria se encaixa a unidade consumidora, a Enel estipula as faixas descritas na Tabela 4.

Tabela 4 - Forma de conexão Enel Distribuição Ceará

Potência Disponibilizada [kW]	Tensão Nominal [V]	Sistema Elétrico
$\leq 10$	220	Baixa Tensão (monofásico)
$> 10$ e $\leq 20$	380	Baixa Tensão (bifásico)
$> 20$ e $\leq 75$	380	Baixa Tensão (trifásico)
$> 75$ e $\leq 5000$	13800 / 69000	Média Tensão / Alta Tensão

Fonte: Extraído de CNC-OMBR-MAT-18-0122-EDBR (ENEL, 2018).

Com relação ao que a Enel determina a respeito dos ajustes de proteção, está descrito nos subitens a seguir.

### 3.4.1 Tensão

Tanto para os ajustes de sobretensão como subtensão, as faixas de valores, assim como o tempo de desconexão, devem obedecer aos parâmetros da Tabela 5. A tensão nominal do projeto, deve ser de 13,8 kW, portando se enquadra na categoria de Média Tensão (MT).

Tabela 5 – Ajustes de sobrentensão e subtensão - MT

Faixa de tensão no ponto de conexão [% TR]	Tempo de desconexão [s]
$TL \geq 1,20$	0,5
$1,10 \leq TL < 1,20$	10
$191 \leq TL \leq 231$	Operação Normal
$0,7 < TL \leq 0,8$	10
$TL \leq 0,5$	1,5
NOTA: TL – Tensão de Leitura, TR – Tensão de Referência	

Fonte: Extraído de CNC-OMBR-MAT-18-0122-EDBR (ENEL, 2018).

### 3.4.2 Frequência

As faixas de ajustes da função de proteção referente à sub e sobrefrequência, devem obedecer aos critérios descritos na Tabela 6.

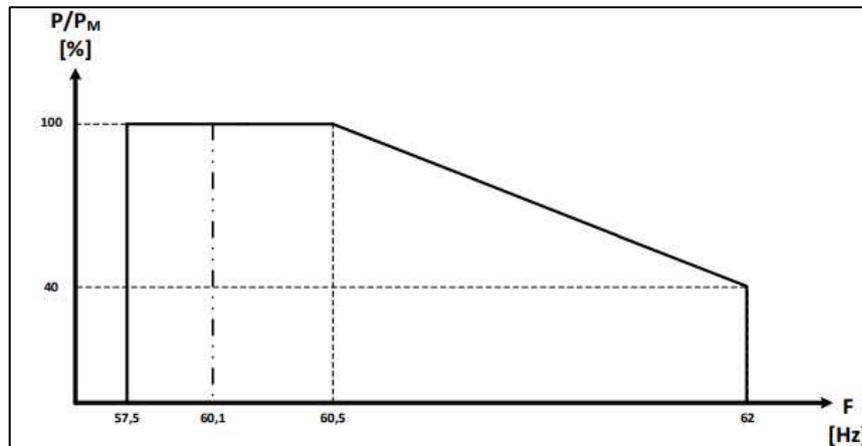
Tabela 6 – Ajustes de sobrefrequência e subfrequência

Faixa de frequência no ponto de conexão (Hz)	Tempo de Desconexão (s)
$f \leq 56,5$	Instantâneo
$56,5 < f \leq 57,5$	5
$57,5 < f \leq 58,5$	10
$59,9 \leq f \leq 60,1$	Operação Normal
$62 \leq f \leq 63,5$	30
$63,5 \leq f < 66$	10
$f \geq 66$	Instantâneo

Fonte: Extraído de CNC-OMBR-MAT-18-0122-EDBR (ENEL, 2018).

Em casos de distúrbios no sistema de distribuição, as instalações geradoras têm a responsabilidade de assegurar que a frequência retorne à faixa de 59,5Hz a 60,5Hz em até 30 segundos após a ocorrência, facilitando a restauração do equilíbrio entre carga e geração. A potência ativa injetada deve ser diminuída em 40% da potência máxima para cada Hz acima de 60,5 Hz, conforme ilustrado na Figura 37. Somente após 300 segundos em condições normais de frequência de operação, o sistema pode aumentar a potência injetada a uma taxa de até 20% da potência máxima por minuto.

Figura 37 - Atenuação da potência injetada



Fonte: Extraído de CNC-OMBR-MAT-18-0122-EDBR (ENEL, 2018).

### 3.4.3 Injeção de componente de corrente contínua na rede elétrica

A geração distribuída deve interromper a entrega de energia à rede dentro de 1 segundo se a injeção do componente de corrente contínua na rede elétrica exceder 0,5% da corrente nominal do sistema de geração distribuída. No caso de um sistema de geração distribuída que inclui um transformador com separação galvânica em 60 Hz, não são necessárias proteções adicionais para cumprir esse requisito.

### 3.4.4 Limites de distorção harmônica

Os parâmetros para distorção harmônica estão especificados na Tabela 7, sendo que a distorção harmônica total não deve ultrapassar 5%.

Tabela 7 – Limites de distorção harmônica

Harmônicas ímpares	Limite de distorção [%]
3° a 9°	< 4,0
11° a 15°	< 2,0
17° a 21°	< 1,5
23° a 33°	< 0,6
Harmônicas pares	Limite de distorção [%]
2° a 8°	< 1,0
10° a 32°	< 0,5

Fonte: Extraído de CNC-OMBR-MAT-18-0122-EDBR (ENEL, 2018).

### 3.4.5 Fator de Potência

O sistema de geração deve assegurar que o ponto de operação permaneça dentro dos intervalos de fator de potência, mesmo quando a potência injetada exceder 20% da potência nominal do gerador, conforme indicado na Tabela 8.

Tabela 8 – Faixa de fator de potência

Potência Nominal – Pn [kW]	Faixa de fator de potência	Fator de potência configurado em fábrica
$P_n \leq 3$	0,98 indutivo – 0,98 capacitivo	1
$3 < P_n \leq 6$	0,95 indutivo – 0,95 capacitivo	1
$P_n > 6$	0,90 indutivo – 0,92 capacitivo	1

Fonte: Extraído de CNC-OMBR-MAT-18-0122-EDBR (ENEL, 2018).

### 3.4.6 Ilhamento

O sistema de geração distribuída deve realizar a desconexão e interromper a injeção de energia na rede de distribuição da Enel Distribuição Ceará em um prazo máximo de 2 (dois) segundos após a interrupção do fornecimento de energia.

A exceção se aplica quando a unidade geradora não possuir ligação física com o sistema elétrico da distribuidora.

### 3.4.7 Reconexão

A reintegração do sistema de geração distribuída é autorizada somente após decorridos 180 (cento e oitenta) segundos em condições normais de operação de tensão e frequência no sistema elétrico da Enel Distribuição Ceará / Enel Distribuição Goiás / Enel Distribuição Rio.

### 3.4.8 Religamento Automático da Rede

O sistema de geração distribuída deve ter a capacidade de resistir ao religamento automático do sistema de distribuição, mesmo em situações adversas, como aquelas envolvendo oposição de fase.

### **3.5 Considerações finais**

Com as informações apresentadas neste capítulo, há subsídios necessários à elaboração preliminar de um projeto para atender o problema proposto no Capítulo 1. No próximo capítulo deste trabalho é apresentada a aplicação dos conceitos expostos na metodologia.

## 4. PROJETO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA APLICAÇÃO EM ESTAÇÃO ELEVATÓRIA NA CHAPADA DO APODI

As informações para a elaboração deste projeto foram obtidas através de visita técnica às instalações. Foram coletadas informações sobre o conjunto de bombas, seu modo de acionamento, *as-built*s da proteção das bombas, estudos dos parâmetros de proteções, relés, modo de comunicação com o sistema supervisor, e por fim, da subestação que alimenta toda a instalação.

### 4.1 Situação

#### 4.1.1 As bombas

As cargas que serão levadas em consideração para esse projeto, são sete bombas de recalque, onde o conjunto possui cinco bombas do modelo A958 da Toshiba, e outras duas do modelo 163104 da WEG (Figura 38). Os dados de placa dos motores estão descritos na Tabela 9 e Tabela 10.

Figura 38 – Bomba de recalque 163104 da WEG



Fonte: O autor.

Tabela 9 – Dados de placa das bombas Toshiba

Grandeza Elétrica	Simbologia	Unidade	Valor	Grandeza mecânica	Simbologia	Unidade	Valor
Potência	P	W	2098	Índice de proteção mecânica	IP	-	24
Rotação	-	rpm	1180	Coluna d'água	-	m	1000
Frequência da rede	F	Hz	60	Isolação	-	-	F
Corrente nominal	$I_n$	A	110	Massa	-	ton	
Relação corrente partida/corrente de nominal	$I_p/I_n$	-	4,27	Ruído	-	dB	
Nº de Polos	-	-	6	Temperatura do ar	-	°C	40
Fator de serviço	F.S.	-	1,0				
Fator de potência	$\cos \phi$	-	0,89				
Eficiência	$\eta$	%	95,4				
Tipo de ligação	-	-	Y				

Fonte: Elaborado pelo autor, extraído dos arquivos da planta.

De posse da corrente nominal fornecida nos dados de placa, a corrente máxima na partida, para cada bomba Toshiba, é encontrada através da seguinte relação:

$$I_{n(partida)} = I_n \times \left( \frac{I_n}{I_p} \right) = 110 [A] \times 4,27 = 469,7[A] \quad (12)$$

A potência aparente total do conjunto de bombas Toshiba é de:

$$P_{total} = 5 \times S = 5 \times \frac{P}{F.P.} = 5 \times \frac{2098 [kW]}{0,89} = 11,79 [MVA] \quad (13)$$

Tabela 10 – Dados de placa das bombas WEG

Grandeza Elétrica	Simbologia	Unidade	Valor	Grandeza mecânica	Simbologia	Unidade	Valor
Potência	P	W	2098	Índice de proteção mecânica	IP	-	24
Rotação	-	rpm	1180	Coluna d'água	-	m	1000
Frequência da rede	F	Hz	60	Isolação	-	-	F

Continuação da Tabela 10

Grandeza Elétrica	Simbologia	Unidade	Valor	Grandeza mecânica	Simbologia	Unidade	Valor
Corrente nominal	$I_n$	A	110	Massa	-	ton	
Relação corrente partida/corrente de nominal	$I_p/I_n$	-	4,27	Ruído	-	dB	
Nº de Polos	-	-	6	Temperatura do ar	-	°C	40
Fator de serviço	F.S.	-	1,0				
Fator de potência	$\cos \phi$	-	0,89				
Eficiência	$\eta$	%	95,4				
Tipo de ligação	-	-	Y				

Fonte: Elaborado pelo autor, extraído dos arquivos da planta.

Do mesmo modo que foram obtidas a corrente máxima na partida e a potência aparente total instalada, para as bombas Toshiba, têm-se que, para as bombas WEG:

$$I_{n(partida)} = I_n \times \left( \frac{I_n}{I_p} \right) = 110 [A] \times 4,27 = 469,7[A] \quad (14)$$

#### 4.1.2 A subestação

A subestação atual é formada por dois transformadores idênticos, em paralelo, e suas respectivas proteções, cujos dados de cada um estão descritos na Tabela 11.

Tabela 11 – Dados dos transformadores da subestação da subestação da estação de bombeamento

Tensão no primário	Tensão no secundário	Potência aparente
69 kV	13,8 kV	10 MVA

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.1.3 O acionamento e as proteções dos motores

O método de partida das bombas é através de partida direta e é feito de forma remota, através de um sistema supervisor, que acompanha os dados obtidos pela proteção.

Levando em consideração que a corrente de partida é cerca de sete vezes a corrente nominal do motor, a corrente de partida para cada bomba equivale à corrente de todo o conjunto.

$$I_p = I_n \times 4,27 = 811,05 [A] \quad (15)$$

As proteções dos motores foram obtidas através de um estudo realizado no ano de 2009 pela empresa Conexão Engenharia. Os relés de proteção das bombas são do modelo Sepam 1000 do fabricante Schneider (Figura 39), e ficam abrigados centros de controle de motores (CCMs), conforme Figura 40.

Figura 39 – Relé Sepam 1000 com leitura de corrente do respectivo motor



Fonte: O autor

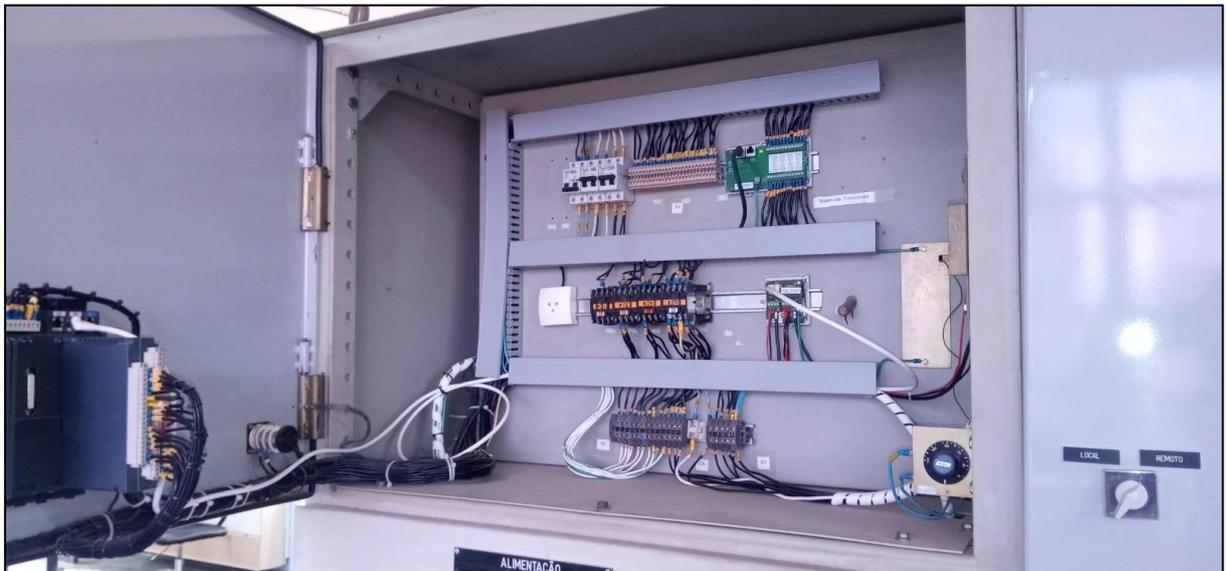
Figura 40 – CCMs dos motores 2 e 3



Fonte: O autor.

Cada bomba possui um relé de proteção, um disjuntor que recebe o sinal de *trip* e um comando elétrico associado (Figura 41), para fazer o acionamento do disjuntor.

Figura 41 – Comando elétrico associado ao *trip* do relé



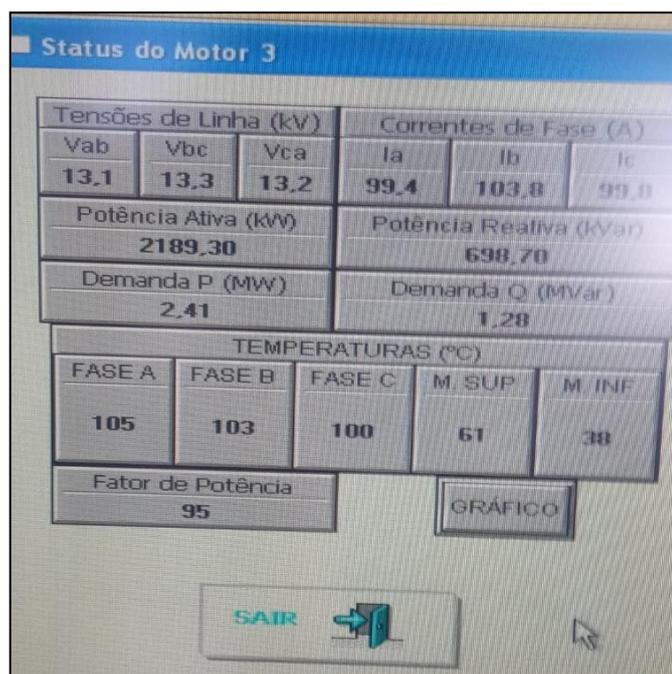
Fonte: O autor

Os relés são alimentados por um barramento de 110 V em corrente contínua, e associado a esse barramento, um banco de baterias. A vantagem de se ter um barramento de

corrente contínua para as proteções é que caso ocorra qualquer falha no transformador que alimenta os serviços auxiliares, os relés continuam ativos.

Há ainda um módulo de comunicação RS-485 (Figura 44) que interliga o Sepam 1000 ao sistema supervisório (Figura 42).

Figura 42 – Supervisório mostrando os parâmetros de uma bomba



Fonte: O autor

Com relação às funções de proteção intrínsecas dos motores de 2850 cv, configuradas nos relés, estão listadas a seguir, na Tabela 12.

Tabela 12 – Funções de proteção intrínsecas dos motores de 2850 cv

Código ANSI	Função
50/51	Sobrecorrente instantânea e sobrecorrente temporizada
50/51GS	Fuga de corrente à terra instantânea e temporizada
46	Desequilíbrio de corrente
49	Sobrecarga térmica
26	Temperatura dos mancais e enrolamentos

Fonte: Extraído do estudo de proteção da planta.

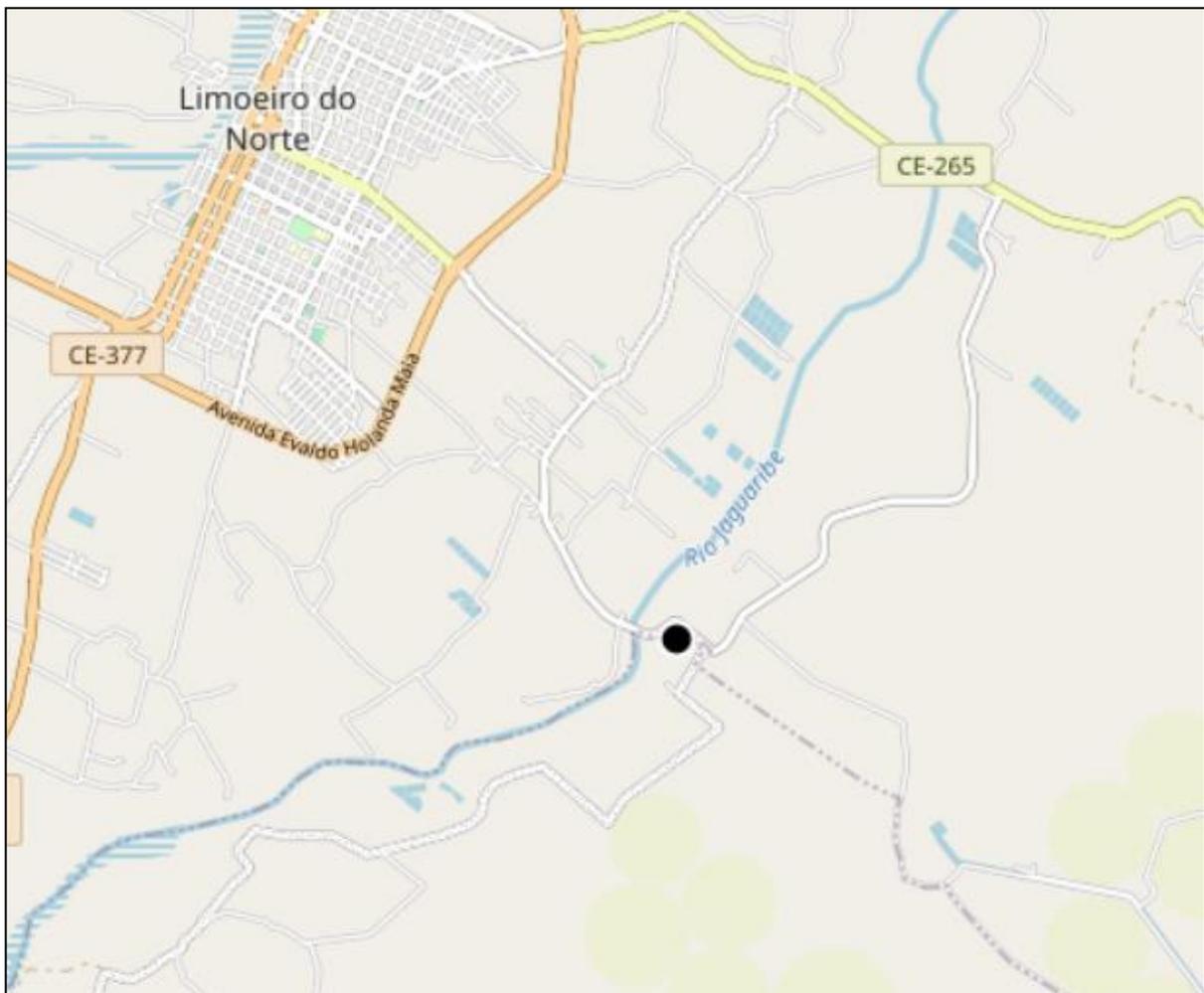
## 4.2 Sistema fotovoltaico a ser implementado

Para atender aos limites impostos pelo PRODIST, a unidade geradora deverá fornecer 5 MW de potência, o que equivale a cerca de 34% da potência ativa total da demanda das bombas.

### 4.2.1 Paineis Solares

Através do *software PVSystem* é possível estimar quantos painéis fotovoltaicos são necessários ao projeto, conforme Figuras 43 e 44.

Figura 43 – Posição da instalação no *PVSystem*



Fonte: Extraído do *PVSystem*

Figura 44 – Estimativa de área dos painéis fotovoltaicos do tipo policristalino utilizando o *PVSyst*



Fonte: Elaborado pelo autor, extraído do *PVSyst*

A área sugerida de painéis para se obter 5 MW de potência é de 33.330 m<sup>2</sup>. É possível estimar uma possível área utilizando imagem de satélite, conforme Figura 45.

Figura 45 – Possível área de implementação da usina



Fonte: *Google Earth*. Adaptado pelo autor.

Para atender à demanda dos inversores utilizados, os painéis deverão estar dispostos em *strings*. Esses arranjos serão conectados em paralelo até formar um único barramento para assim se conectar ao transformador de acoplamento.

#### 4.2.2 Inversor de frequência

As *strings* fornecerão 253 kW, totalizando 20. Os inversores que serão incumbidos da tarefa de converter a tensão contínua em alternada, podem ser do modelo MAX 253KTL3-X HV da fabricante *Growatt*. Os dados de entrada e saída dos inversores são dados pela Tabela 13, e mais detalhadamente no Anexo A.

Tabela 13 – Dados de entrada e saída dos Inversores que serão utilizados nas *strings*

Faixa de tensão na entrada	Tensão de saída	Potência nominal	Corrente de saída
500 - 1500 V <sub>CC</sub>	800 V <sub>CA</sub>	253 kW	182,6 A

Fonte: *Datasheet* do fabricante

#### 4.2.3 Transformador do gerador fotovoltaico

Para injetar a potência gerada nos painéis e tratada nos inversores, poderá ser utilizado um transformador, que possua as características descritas na Tabela 14.

Tabela 14 – Dados do transformador de acoplamento

Tensão primária	Tensão secundária	Potência nominal	Impedância percentual	Fator de potência	Ligação
800 V	13,8 kV	10 MVA	7,5%	0,9	Delta-Delta

Fonte: O autor.

## 4.2.4 Condutoramento

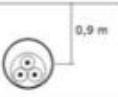
### 4.2.3.1 Condutores *string* – inversor

Os condutores que interligarão as *strings* aos inversores serão colocados sob o solo. De acordo com a faixa de operação da entrada dos inversores, em cada *string* fluirá uma corrente nominal de:

$$I_{string} = \frac{P_{inversor}}{V_{entrada}} = \frac{253000}{1500} = 168,67 \text{ [A]} \quad (16)$$

A disposição da instalação que os cabos que saem das *strings* devem seguir é o método F1 da tabela 25 da NBR-14039:2021, conforme Figura 46.

Figura 46 – Método a ser empregado na instalação dos condutores das *strings*

13		Cabos tripolares em eletroduto diretamente enterrado	F1
----	---	--	----

Fonte: NBR-14039:2021.

O tipo de isolamento dos condutores deverá ser de polietileno reticulado (XLPE ou TR XLPE), portanto, sua temperatura máxima é de 90°C segundo a NBR-14039:2021.

Considerando a temperatura de 40°C, conforme tabela 31 da NBR-14039:2021, o fator de correção é:

$$k_T = 0,85$$

Logo, a corrente nominal dos condutores que sairão das *strings* passará a ser de 143,37 [A]. Por fim os condutores terão um diâmetro de sua seção transversal de 50 mm<sup>2</sup>, conforme tabela 29 da NBR-14039:2021.

### 4.2.3.3 Condutores inversores – subestação da unidade geradora

Os inversores deverão alimentar um barramento de baixa tensão do tipo mostrado no Anexo B. Devido à distância entre a subestação da usina de geração e à SEP da casa de

bombas, a seção transversal do condutor (de cobre) pode ser calculada fixando uma queda de tensão de 4%, através da seguinte relação:

$$S_c = \frac{100 \cdot \sqrt{3} \cdot \rho \cdot \sum(L_c \cdot I_c)}{\Delta V_c \cdot V_{FF}} \quad (17)$$

Onde:	$S_c$	Seção transversal do condutor [mm <sup>2</sup> ];
	$P$	Resistividade elétrica do cobre [Ω.mm <sup>2</sup> /m];
	$L_c$	Distância entre a fonte e a carga [m];
	$I_c$	Corrente que fluirá pelo condutor [A];
	$\Delta V_c$	Máxima queda de tensão [V];
	$V_{FF}$	Tensão entre as fases [V].

$$S_c = \frac{100 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,01786 [\Omega \cdot mm^2/m] \cdot 200 [m] \cdot 3.652 [A]}{4 [\%] \cdot 800 [V]} = 706 [mm^2]$$

Portanto, a seção transversal do condutor, deve ser de 800 mm<sup>2</sup>. A fim de reduzir custos, pode ser utilizada o paralelismo entre condutores, conforme norma NBR-5410.

## 5. CONCLUSÃO

O efeito fotovoltaico é o fenômeno por trás dessa forma de produzir eletricidade, onde o rendimento dos painéis dependerá das características do material. Por se tratar de um fenômeno de natureza quântica, o projetista deve se atentar aos ensaios realizados pelo fabricante ou fornecedor, quando não, realizar seus próprios ensaios para obter os parâmetros reais.

Com relação à escolha dos painéis, além da eficiência, o projetista deve buscar aqueles que são formados por células fotovoltaicas que possuam um Máximo Ponto de Potência (MPP) alto, que é a relação entre a corrente de curto-circuito e a tensão nos terminais. Quanto maior o MPP, menor será a impedância elétrica interna de cada célula.

Outro fator a ser levado em consideração na escolha dos painéis, é a resposta espectral. Uma vez que essa resposta seja de largo espectro, ou seja, as células produzem a mesma quantidade de energia para diferentes comprimentos de onda, isso impactará diretamente na produção global de energia por célula, por conseguinte na produção por painel. Isso se deve ao espectro eletromagnético solar estar próximo do espectro ideal, ou seja, quando relacionado ao modelo da Radiação de Corpo Negro.

Foi demonstrado, por meio da equação que determina a quantidade de corrente fornecida por célula fotovoltaica, que além da resistência interna, irradiância solar e outros fatores físicos, um elemento que influenciará na quantidade de energia produzida pelas células é a temperatura em que estas se encontram. Isso torna possível determinar em que épocas do ano, considerando a irradiância solar constante, os módulos fotovoltaicos terão sua capacidade reduzida, visto que a temperatura ambiente no local varia de acordo com os meses do ano.

Outros elementos que formam o painel, que merecem atenção, são o diodo de bloqueio e o diodo de *by-pass*. As correntes que ambos suportam devem estar de acordo com as características do projeto. Portanto, é necessário conhecer e estar de posse da folha de dados desses componentes. Isso torna possível avaliar se eles atendem as solicitações de corrente por parte da carga, refletida na corrente demandada pelo inversor de frequência.

Os inversores de frequência também devem atender às características do projeto, principalmente com relação à queda de tensão, em virtude da partida direta dos motores da estação elevatória. Partidas diretas em máquinas aumentam consideravelmente o nível de corrente no circuito elétrico, o que provoca uma queda de tensão, caso o gerador não atenda à potência demandada na partida durante a partida. É importante também, que o circuito de

controle do inversor não detecte a partida como um curto-circuito acionando as proteções internas.

Em virtude da potência nominal fornecida pelo projeto de geração, o sistema está caracterizado como minigeração, de acordo com os parâmetros do PRODIST. Logo, as proteções da subestação da unidade geradora devem possuir todas as funções de proteção recomendadas por essa norma.

Com relação às proteções existentes nas máquinas, todos os seus parâmetros devem ser refeitos, visto que, ao adicionar um gerador fotovoltaico no barramento de 13,8 kV, a corrente de curto-circuito sofrerá alteração em virtude do novo fluxo de potência.

Diante do exposto, fica como sugestão para trabalhos futuros:

- Um estudo de proteção das máquinas com as novas condições de fornecimento de energia, um estudo de proteção da subestação da unidade geradora;
- Um projeto de proteção para seccionamento dos módulos fotovoltaicos em caso de falta nos barramentos das *strings*;
- Um estudo de viabilidade econômica e *payback*;
- O projeto de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas;
- Um projeto detalhando a subestação da unidade geradora, assim como sua malha de aterramento;
- Um estudo de qualidade de energia a fim de determinar as componentes harmônicas e sua influência no desempenho das máquinas.

## REFERÊNCIAS

ALTERAÇÕES no clima este ano mostram necessidade de mais ações em 2023. 23 dez. 2022. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2022/12/1807207>. Acesso em: 4 dez. 2023.

BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potência**. 5. ed. Florianópolis: Ed. do Autor, 2006. 328 p.

DNOCS; FAPIJA. **PLANO OPERATIVO 2020**. Limoeiro do Norte: Fapija, 2019. 35 p.

FILHO, João Mamede; MAMEDE, Daniel Ribeiro. **PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

HART, Daniel W. **Eletrônica de Potência: análise e projetos de circuitos**. Porto Alegre: AMGH, 2012. 480 p.

KRAUTER, Stefan C. W. **Solar Electric Power Generation - Photovoltaic Energy Systems**. Berlin: Springer, 2006. 271 p.

LIMA, Kleber. **Notas de Aula da Disciplina de Instalações Elétricas Prediais**. Fortaleza. 2022.

LIMA, Kleber. **Notas de Aula da Disciplina de Instalações Elétricas Industriais**. Fortaleza. 2022.

MONTOYA, Marco Antonio *et al.* Consumo de energia, emissões de co2 e a geração de renda e emprego no agronegócio brasileiro: uma análise insumo–produto. **Economia Aplicada**, v. 20, n. 4, p. 383, 9 dez. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/1413-8050/ea134600>. Acesso em: 4 dez. 2023.

O PLANEJAMENTO e o futuro do setor elétrico brasileiro - GGN. 22 out. 2014. Disponível em: <https://jornalgggn.com.br/desenvolvimento/o-planejamento-e-o-futuro-do-setor-eletrico-brasileiro-0/>. Acesso em: 4 dez. 2023.

RÜTHER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos**: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. Florianópolis: LABSOLAR, 2004. 114 p.

SAMPAIO, Raimundo. **Notas de Aula da Disciplina de Análise de Sistemas Elétricos de Potência**. Fortaleza, 2022.

ŞEN, Zekai. **Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques**. Istanbul: Springer, 2008. 276 p.

XIE, Fan *et al.* Study on a Simplified Structure of a Two-Stage Grid-Connected Photovoltaic System for Parameter Design Optimization. **Energies**, v. 12, n. 11, p. 2193, 8 jun. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en12112193>. Acesso em: 4 dez. 2023.

## ANEXO A – DATASHEET DO INVERSOR MAX 253KTL3-X HV

Ficha de dados	MAX 185KTL3-X HV	MAX 216KTL3-X HV	MAX 250KTL3-X HV	MAX 253KTL3-X HV
<b>Dados de entrada</b>				
Máxima tensão CC			1500V	
Tensão de partida			500V	
Tensão nominal			1080V	
Faixa de tensão MPPT			500V-1500V	
Número de MPPT trackers	9	9	12	15
Número de strings PV por MPPT trackers			2	
Máxima corrente de entrada por MPPT Tracker			30A	
Máxima corrente de curto-circuito por MPPT tracker			50A	
<b>Saída</b>				
Potência nominal de saída CA	185kW	216kW	250kW	253kW
Potência máxima aparente CA	185kVA@30°C 175kVA@40°C 160kVA@50°C	216kVA@30°C 201kVA@40°C 192kVA@50°C	250kVA@30°C 230kVA@45°C 220kVA@50°C	253kVA@30°C 230kVA@45°C 220kVA@50°C
Tensão nominal de saída (Faixa)	600V (640-690V)			
Frequência da rede CA (Faixa)	50/60 Hz (45-65Hz/55-65 Hz)			
Corrente máxima de saída	133.5A	155.9A	180.4A	182.6A
Fator de potência ajustável	0,8-0,8cc			
THDi	<3%			
Tipo de conexão da rede CA	3W+PE			
<b>Eficiência</b>				
Máx. eficiência	99,0%			
Eficiência europeia	98,7%	98,7%	98,7%	98,5%
Eficiência MPPT	99,9%			
<b>Dispositivos de proteção</b>				
Proteção polaridade reversa CC	Sim			
Interruptor CC	Sim			
Proteção de surtos CA/CC	Tipo/Tipoi			
Monitoramento de resistência / de isolamento	Sim			
Proteção de curto-circuito CA	Sim			
Monitoramento de falta à terra	Sim			
Monitoramento da rede	Sim			
Proteção de anti-ilhamento	Sim			
Unidade de monitoramento da corrente residual	Sim			
Monitoramento da string	Sim			
Proteção AFCI	Opcional			
Função Anti-PID	Opcional			
LVIT	Sim			
HVRT	Sim			
Night SVS	Opcional			
<b>Dados Gerais</b>				
Dimensões (LxVxP)	1070x670x370mm			
Peso	95kg	95kg	99kg	109kg
Faixa de temperatura operacional	-30°C ... +60°C			
Consumo Noturno	< 1W			
Topologia	Sem transformador			
Resfriamento	Resfriamento inteligente			
Grau de proteção	IP66			
Humidade relativa	0-100%			
Altitude	4000m			
Conexão CC	Stäubli MC4/Amphenol UTX			
Conexão CA	07 terminais conectivos (Max. 300mm²)			
Display	LED/WEI+APP			
Interfaces: RS485 / USB / PLC	Sim/Sim/Opcional			
Garantia: 10 anos	Sim			

**ANEXO B – MODELO DE BARRAMENTO DE COBRE DA SUBESTAÇÃO DA  
UNIDADE GERADORA**

