

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**FABIO NOGUEIRA MARTINS**

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA RESIDENCIAL DE  
MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA CONECTADO À REDE**

VITÓRIA – ES  
SETEMBRO 2017

FABIO NOGUEIRA MARTINS

**DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA RESIDENCIAL DE  
MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA CONECTADO À REDE**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Fabio Nogueira Martins**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Oureste Elias Batista

VITÓRIA – ES  
SETEMBRO 2017

FABIO NOGUEIRA MARTINS

## **DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA RESIDENCIAL DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA CONECTADOS À REDE**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Fabio Nogueira Martins**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 28, de Setembro de 2017.

### **COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Oureste Elias Batista**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Orientador**

---

**Dr. Augusto César Rueda Medina**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Examinador**

---

**Dr. Walbermark Marques dos Santos**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Examinador**

Aos meus pais, irmã, irmãos e aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado durante  
todo meu caminho na graduação.

## RESUMO

A utilização de fontes renováveis de energia tornou-se uma necessidade para o mundo a partir da situação ambiental, marcada por cenários de degradação ambiental. Desta forma, o conceito de sustentabilidade passou a ser inserida na matriz energética do mundo e diversas formas de energias renováveis vêm sendo exploradas nos últimos anos.

Dentro deste contexto surge a utilização da energia solar fotovoltaica, uma tecnologia que converte a energia solar em energia elétrica, por meio de equipamentos que aproveitam o recurso solar em sua potencialidade. O presente trabalho objetivou dimensionar um sistema fotovoltaico ligado à rede elétrica em uma residência no município de Piúma (ES), estudando a viabilidade técnica e econômica na geração de energia elétrica, utilizando painéis fotovoltaicos como a fonte de energia.

Inicialmente, foi realizada uma abordagem teórica informando a situação energética brasileira, estudou-se os conceitos básicos da energia solar fotovoltaica, o funcionamento e as partes componentes dos painéis fotovoltaicos. Após a análise teórica foi feito o dimensionamento do sistema proposto. Inicialmente, foi levantado o consumo mensal de energia utilizada na residência e estudado o local de instalação dos painéis para se determinar a irradiação solar incidente. Posteriormente, o sistema fotovoltaico conectado à rede foi dimensionado de forma a suprir a energia demandada pela residência em estudo. Foram considerados todos os equipamentos e acessórios necessários à instalação do mesmo e realizado o levantamento dos valores de mercado. A partir da proposição dos equipamentos para um sistema fotovoltaico e do estudo de viabilidade técnica, observou-se que a implantação é uma alternativa energética viável devido a facilidade de se encontrar fornecedores e instaladores de módulos fotovoltaicos e inversores no mercado, além da disponibilidade de área no local em estudo. Foi realizada análise de viabilidade econômica e concluiu-se que a implantação do sistema fotovoltaico ligado à rede nesta residência é uma alternativa viável, pois a economia na conta de energia seria significativa e o tempo de retorno do investimento seria pequeno.

**Palavras-chave:** Energia solar fotovoltaica, Sistema Fotovoltaico ligado à rede.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Fluxo de potência global em $\text{W/m}^2$ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 23 |
| Figura 2 – Ilustração do ângulo azimutal em relação ao norte geográfico .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 24 |
| Figura 3 – Representação das estações do ano e do movimento da Terra em torno do Sol ...                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 25 |
| Figura 4 – Órbita da Terra em torno do Sol, indicando a declinação solar ao longo do ano .                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 25 |
| Figura 5 – Lingote de silício monocristalino .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 27 |
| Figura 6 – Célula fotovoltaica de silício monocristalino .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 27 |
| Figura 7 – Lingote de silício policristalino .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 28 |
| Figura 8 – Células fotovoltaicas de silício policristalino .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 28 |
| Figura 9 – Curva característica $I-V$ de corrente e tensão e curva de potência $P-V$ para um módulo com potência nominal de 100 Wp .....                                                                                                                                                                                                                                          | 30 |
| Figura 10 – Influência da radiação solar na operação do módulo fotovoltaico .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 33 |
| Figura 11 – Influência da temperatura na operação do módulo fotovoltaico .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 33 |
| Figura 12 – Curva $I-V$ para 4 módulos conectados em série e sem sombreamento (linha contínua); curva $I-V$ para os mesmos 4 módulos na situação de sombreamento de uma das células, que passa a receber 50% da irradiância original (linha tracejada); curva $I-V$ com o mesmo sombreamento, mas com a utilização de diodos de desvio (curvas com linha contínua e pontos) ..... | 35 |
| Figura 13 – Conjunto de módulos fotovoltaicos .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 36 |
| Figura 14 – Conexões elétricas em série dos módulos fotovoltaicas .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 36 |
| Figura 15 – Características $I-V$ para um módulo de 220 Wp, 2 módulos idênticos associados em série e 4 módulos idênticos associados em série .....                                                                                                                                                                                                                               | 37 |
| Figura 16 – Características $I-V$ para conexão em paralelo dos mesmos módulos fotovoltaicos .....                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 38 |
| Figura 17 – Organização e componentes de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede elétrica .....                                                                                                                                                                                                                                                                      | 40 |
| Figura 18 – Sistema fotovoltaico de microgeração instalado no telhado de uma residência .                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 42 |
| Figura 19 – Caixa de conexões (esquerda) e diagrama de ligações (direita) de um módulo de 240 Wp, com 60 células em série (20 para cada diodo), onde $V_{OC}=36,9 \text{ V}$ .....                                                                                                                                                                                                | 44 |
| Figura 20 – Conectores de engate rápido MC4 para conexão série de módulos fotovoltaicos.                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 46 |
| Figura 21 – Quadro de proteção de corrente contínua da instalação fotovoltaica .....                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 53 |
| Figura 22 – Quadro de proteção de corrente alternada da instalação fotovoltaica .....                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 54 |
| Figura 23 – Medidor inteligente SMW100 da WEG .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 55 |

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 24 – Dias com diferentes valores de HSP .....               | 56 |
| Figura 25 – Local onde será instalado o sistema fotovoltaico ..... | 57 |
| Figura 26 - Diagrama unifilar simplificado do SFV .....            | 65 |

## **LISTA DE GRÁFICOS**

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1 - Consumo e geração do SFV .....                             | 60 |
| Gráfico 2 - Avaliação do tempo de retorno do investimento no SFV ..... | 69 |



## **LISTA DE QUADROS**

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 - Tecnologias aplicadas na produção de células e módulos fotovoltaicos.....      | 18 |
| Quadro 2 – Dados técnicos do painel fotovoltaico .....                                    | 58 |
| Quadro 3 - Equipamentos, quantidades e valores unitários dos componentes escolhidos ..... | 66 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                     |                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Tabela 1 - Requisitos mínimos de equipamentos em função da potência instalada ..... | 40                                   |
| Tabela 2 - Irradiação diária média .....                                            | 56                                   |
| Tabela 3 - Consumo mensal obtido através da conta de energia .....                  | 57                                   |
| Tabela 4 - Comparativo entre o Consumo e Geração .....                              | 59                                   |
| Tabela 5 – Custo anual com energia sem a instalação do SFV .....                    | 67                                   |
| Tabela 6 – Custo anual com energia após a instalação do SFV .....                   | 68                                   |
| Tabela 7 - Análise de custos da implantação do SFV .....                            | <b>Erro! Indicador não definido.</b> |

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

ed. – Editora, edição

ES – Espírito Santo (Estado do)

et. al. – Et alii (e outros)

f. – Folha (s)

p. – Página (s)

## LISTA DE SIGLAS

|          |                                                                      |
|----------|----------------------------------------------------------------------|
| ABNT     | Associação Brasileira de Normas Técnicas                             |
| ANEEL    | Agência Nacional de Energia Elétrica                                 |
| BEN      | Balanço Energético Nacional                                          |
| EPE      | Empresa de Pesquisa Energética                                       |
| HSP      | Hora de Sol Pleno                                                    |
| IBGE     | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                      |
| Mtep     | Milhões de toneladas equivalentes de petróleo                        |
| SFCR     | Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede                                |
| UFES     | Universidade Federal do Espírito Santo                               |
| ABNT     | Associação Brasileira de Normas Técnicas                             |
| Abinee   | Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica             |
| ANEEL    | Agência Nacional de Energia Elétrica                                 |
| BEN      | Balanço Energético Nacional                                          |
| CA       | Corrente Alternada                                                   |
| CC       | Corrente Contínua                                                    |
| CELPA    | Centrais Elétricas do Pará                                           |
| CEPEL    | Centro de Pesquisa de Energia Elétrica                               |
| CHESF    | Companhia Hidrelétrica do São Francisco                              |
| Conmetro | Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial |
| CPV      | Célula Fotovoltaica para Concentração                                |
| Creserb  | Centro de Referência para Energia Solar Eólica Sérgio de Salvo Brito |
| DDR      | Disjuntor Diferencial Residual                                       |
| DPS      | Dispositivo de Proteção de Surto                                     |
| DSSC     | Células Sensibilizadas por Corante                                   |
| EPE      | Empresa de Pesquisa Energética                                       |
| EVA      | Acetato de Etil Vinila                                               |
| FDI      | Fator de Dimensionamento de Inversores                               |
| HSP      | Horas de Sol Pleno                                                   |
| IBGE     | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                      |
| Inmetro  | Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia             |
| IP       | Ingress Protection                                                   |
| LPT      | Programa Luz para Todos                                              |

|         |                                                                              |
|---------|------------------------------------------------------------------------------|
| MIGDIs  | Microssistemas Isolados de Geração e Distribuição de Energia Elétrica        |
| MME     | Ministério de Minas e Energia                                                |
| MPPT    | Rastreamento do Ponto de Máxima Potência                                     |
| NBR     | Norma Brasileira                                                             |
| OPV     | Células Orgânicas ou Poliméricas                                             |
| PBE     | Programa Brasileiro de Etiquetagem                                           |
| Prodeem | Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios               |
| Prodist | Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica da Aneel                   |
| SFCR    | Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede                                        |
| SFV     | Sistema Fotovoltaico                                                         |
| SIGFI   | Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes |
| SIN     | Sistema Interligado Nacional                                                 |
| STC     | Condição Padrão de Teste                                                     |
| UFES    | Universidade Federal do Espírito Santo                                       |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|          |                                               |
|----------|-----------------------------------------------|
| $v_r(t)$ | Tensão instantânea sobre o resistor (V)       |
| $t$      | Tempo (s)                                     |
| $R$      | Valor da resistência do resistor ( $\Omega$ ) |
| $i(t)$   | Corrente instantânea no elemento (A)          |
| $v_l(t)$ | Tensão instantânea sobre o indutor (V)        |
| $L$      | Valor da indutância do indutor (H)            |
| $v_c(t)$ | Tensão instantânea sobre o capacitor (V)      |
| $C$      | Valor da capacitância do capacitor (F)        |

## SUMÁRIO

|          |                                                                          |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                  | <b>17</b> |
| <b>2</b> | <b>ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....</b>                                   | <b>18</b> |
| 2.1      | Histórico e panorama atual da energia solar fotovoltaica no mundo .....  | 19        |
| 2.1.1    | Histórico da energia solar fotovoltaica no Brasil .....                  | 20        |
| <b>3</b> | <b>RECURSO SOLAR.....</b>                                                | <b>22</b> |
| 3.1      | O Sol como fonte de energia .....                                        | 22        |
| 3.2      | Radiação direta e difusa.....                                            | 23        |
| 3.3      | Ângulo azimutal .....                                                    | 23        |
| 3.4      | Movimentos da Terra .....                                                | 24        |
| 3.5      | Declinação solar .....                                                   | 25        |
| 3.6      | Altura solar .....                                                       | 26        |
| <b>4</b> | <b>CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS .....</b>                             | <b>26</b> |
| 4.1      | Tipos de células fotovoltaicas .....                                     | 26        |
| 4.1.1    | Células de Silício monocristalino.....                                   | 26        |
| 4.1.2    | Células de Silício policristalino.....                                   | 28        |
| 4.2      | Módulo fotovoltaico .....                                                | 29        |
| 4.3      | Funcionamento e características dos módulos fotovoltaicos.....           | 29        |
| 4.3.1    | Curvas características de corrente, tensão e potência.....               | 30        |
| 4.3.1.1  | Características elétricas .....                                          | 31        |
| 4.3.2    | Fatores que afetam as características elétricas dos módulos .....        | 32        |
| 4.3.2.1  | Efeito da radiação solar .....                                           | 32        |
| 4.3.2.2  | Efeito da temperatura .....                                              | 33        |
| 4.3.3    | Efeitos de sombreamento .....                                            | 34        |
| 4.4      | Associação de módulos fotovoltaicos .....                                | 35        |
| 4.4.1    | Módulos fotovoltaicos conectados em série.....                           | 36        |
| 4.4.2    | Módulos fotovoltaicos conectados em paralelo .....                       | 37        |
| <b>5</b> | <b>MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA .....</b>                             | <b>38</b> |
| 5.1      | Normas nacionais para Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) ..... | 38        |
| 5.1.1    | Categorias dos Sistemas Conectados à Rede .....                          | 39        |
| 5.1.1.1  | Sistemas de micro e minigeração fotovoltaica .....                       | 40        |

|                                                                                                    |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.2 Sistema de tarifação.....                                                                      | 42        |
| 5.2.1 Venda de energia no mercado livre .....                                                      | 42        |
| 5.2.2 Tarifação net metering.....                                                                  | 43        |
| 5.2.3 Tarifação <i>feed in</i> .....                                                               | 43        |
| <b>6 COMPONENTES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE</b>                                   | <b>44</b> |
| 6.1 Caixa de junção .....                                                                          | 44        |
| 6.2 Cabos elétricos.....                                                                           | 45        |
| 6.3 Conectores .....                                                                               | 45        |
| 6.4 Inversores .....                                                                               | 46        |
| 6.4.1 Principais características dos inversores .....                                              | 47        |
| 6.4.1.1 Tensão contínua máxima na entrada .....                                                    | 47        |
| 6.4.1.2 Faixa útil de tensão contínua na entrada.....                                              | 47        |
| 6.4.1.3 Número máximo de <i>strings</i> na entrada.....                                            | 47        |
| 6.4.1.4 Rastreamento do ponto de máxima potência – MPPT .....                                      | 48        |
| 6.4.1.5 Número de entradas independentes com MPPT .....                                            | 48        |
| 6.4.1.6 Tensão de operação na conexão com a rede.....                                              | 49        |
| 6.4.1.7 Frequência da rede elétrica.....                                                           | 49        |
| 6.4.1.8 Distorção da corrente injetada na rede .....                                               | 49        |
| 6.4.1.9 Grau de proteção.....                                                                      | 49        |
| 6.4.1.10 Temperatura de operação .....                                                             | 50        |
| 6.4.1.11 Umidade relativa do ambiente.....                                                         | 50        |
| 6.4.1.12 Consumo de potência sem carga (permanente, autoconsumo, consumo em <i>stand by</i> )..... | 50        |
| 6.4.1.13 Potência de corrente contínua na entrada .....                                            | 50        |
| 6.4.1.14 Potência de corrente alternada na saída.....                                              | 51        |
| 6.4.1.15 Rendimento.....                                                                           | 51        |
| 6.4.2 Recursos e funções dos inversores .....                                                      | 51        |
| 6.4.2.1 Chave de desconexão de corrente contínua.....                                              | 51        |
| 6.4.2.2 Detecção de ilhamento e reconexão automática.....                                          | 51        |
| 6.5 Caixa de strings .....                                                                         | 52        |
| 6.6 Quadro de proteção de corrente contínua (String Box CC).....                                   | 52        |
| 6.7 Quadro de proteção de corrente alternada .....                                                 | 53        |
| 6.8 Medidores de energia .....                                                                     | 54        |



|          |                                                   |           |
|----------|---------------------------------------------------|-----------|
| <b>7</b> | <b>DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA DE MICROGERAÇÃO</b> |           |
|          | <b>FOTOVOLTAICA .....</b>                         | <b>55</b> |
| 7.1      | Avaliação do recurso solar .....                  | 55        |
| 7.2      | Avaliação do espaço físico da instalação .....    | 56        |
| 7.3      | Dimensionamento do gerador fotovoltaico .....     | 57        |
| 7.4      | Cabeamento lado CC .....                          | 60        |
| 7.5      | Quadro de proteção CC .....                       | 61        |
| 7.5.1    | Chave de desconexão CC .....                      | 61        |
| 7.5.2    | Dispositivo de proteção contra surto .....        | 61        |
| 7.6      | Inversor de frequência .....                      | 62        |
| 7.6.1    | Tensão de entrada do inversor .....               | 62        |
| 7.7      | Cabeamento lado CA.....                           | 63        |
| 7.8      | Quadro de proteção CA .....                       | 64        |
| 7.8.1    | Disjuntor termomagnético .....                    | 65        |
| 7.8.2    | Dispositivo de proteção contra surto .....        | 65        |
| 7.9      | Viabilidade econômica .....                       | 66        |
| <b>8</b> | <b>CONCLUSÃO.....</b>                             | <b>69</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>            | <b>71</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento da população associado ao consumo cada vez maior de energia elétrica levanta o questionamento do modelo energético utilizado no mundo devido ao contexto ambiental global. Além de ser necessária a busca de fontes que possuam grande potencial para suprir a demanda energética, é necessário utilizar fontes que degradem menos possível o meio ambiente. Dessa forma, diversas alternativas sustentáveis vêm sendo exploradas para suprir a crise energética e a escassez dos recursos naturais associados à produção de energia.

Diante deste cenário, passou-se a colocar em prática o estudo e a utilização de energias renováveis, aquelas que são consideradas inesgotáveis pela utilização humana. Uma das alternativas energéticas que vem sendo explorada está associada à energia solar, que pode ser aproveitada diretamente para aquecimento ou para geração de eletricidade. A energia solar é responsável por outras fontes de energia e é uma fonte renovável ideal para locais onde a radiação solar é abundante.

O Brasil está localizado em sua maior parte na zona térmica tropical e possui grande potencial para o aproveitamento da energia proveniente do Sol durante todo período anual. A energia solar pode ser utilizada tanto em regiões mais remotas, onde há um alto custo ao acesso à rede elétrica, quanto como alternativa extra para fornecimento de energia em vista as altas taxas de energia elétrica no país. E de acordo com Pereira *et al.* (2006), existe diversas possibilidades de aproveitamento deste tipo de energia, que vai desde pequenos sistemas fotovoltaicos autônomos até as grandes centrais que empregam energia solar concentrada.

É nesse contexto que se insere a energia fotovoltaica e seus benefícios. A mesma é obtida através da conversão da radiação solar em eletricidade, utilizando materiais semicondutores e pode ser utilizada em qualquer localidade, gerando eletricidade para consumo próprio, em sistemas isolados ou autônomos ou conectados à rede elétrica.

De acordo com Silvestri e Takasaki (2014), a instalação de painéis fotovoltaicos pode reduzir os custos com a transmissão e distribuição de energia elétrica, além do impacto substancialmente menor ao meio ambiente quando comparado à geração por outras fontes, como hidrelétrica, térmica ou nuclear. Dessa forma, a mesma surge como uma alternativa sustentável, capaz de suprir a geração de energia de residências e reduzir o valor da conta da concessionária.

A instituída Resolução Normativa nº 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (ANEEL, 2012), lançada em abril de 2012, foi um marco para incentivo da microgeração e

minigeração de energia elétrica com fontes renováveis de sistemas conectados à rede elétrica. A mesma estabelece as condições gerais para o acesso a microgeração e minigeração e disponibiliza o sistema de compensação de energia elétrica.

Entretanto, a geração de energia elétrica por meio de células fotovoltaicas ainda é pequena em relação as outras fontes alternativas de energia. O avanço de tecnologias e a aprovação de legislações referentes ao incentivo e apoio a autoprodução de energia elétrica contribui para que o preço dos produtos e serviços referentes a energia fotovoltaica se torne mais acessível.

A presente pesquisa teve por objetivo elaborar o dimensionamento de sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica para uma residência localizada em Piúma, no estado do Espírito Santo. O sistema foi proposto para realizar a compensação total do consumo de energia dessa residência, para tanto, realizou-se um estudo da viabilidade técnica e econômica de implantação do mesmo.

## 2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é definida como uma energia obtida através da conversão da luz solar em eletricidade, fenômeno conhecido como efeito fotovoltaico. A célula fotovoltaica é fabricada com material semicondutor, que é a unidade fundamental desse processo de conversão de energia. Para a produção de células e módulos fotovoltaicos, são utilizadas tecnologias classificadas em três gerações, de acordo com o Quadro 1:

Quadro 1 - Tecnologias aplicadas na produção de células e módulos fotovoltaicos

| Classificação             | 1ª Geração                                                                                                               | 2ª Geração                                                                                                                                                                    | 3ª Geração                                                                                                                                                        |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Cadeias Produtivas</b> | Silício monocristalino (m-Si) e Silício policristalino (p-Si)                                                            | Silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CuInSe) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CuInGaSe) e telureto de cádmio (CdTe)                                    | Célula fotovoltaica multijunção e célula fotovoltaica para concentração (CPV), células sensibilizadas por corante (DSSC) e células orgânicas ou poliméricas (OPV) |
| <b>Observações Gerais</b> | Representa mais de 85% do mercado;<br>Tecnologia consolidada e confiável;<br>Melhor eficiência comercialmente disponível | Modesta participação do mercado;<br>Menor eficiência do que a primeira geração;<br>Dificuldades associadas à disponibilidade dos materiais, vida útil, rendimento das células | Potencial para produção de módulos com altas eficiências;<br>Custo ainda não é competitivo com as tecnologias que atualmente dominam o mercado                    |

Fonte: Adaptado de CRESESB (2014); TOLMASQUIN (2016).

O desenvolvimento de acessórios e equipamentos complementares para sistemas fotovoltaicos ainda é um desafio para a indústria, pois os mesmos precisam possuir qualidade e vida útil comparável às dos módulos, que possuem vida útil de aproximadamente 25 anos.

Os sistemas de armazenamento de energia e de condicionamento de potência têm avançado no sentido de aperfeiçoamento e redução de custos, embora ainda não tenham atingido o grau de desenvolvimento desejado (CRESESB, 2014, p.52).

## **2.1 Histórico e panorama atual da energia solar fotovoltaica no mundo**

O Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (CRESESB, 2014) faz um apanhado do histórico da energia solar fotovoltaica no mundo, que será descrito a seguir.

- 1839: O efeito fotovoltaico foi relatado pelo físico francês Edmond Becquerel, em que foi observado o surgimento de uma diferença de potencial nas extremidades de um material semiconductor quando colocado em exposição à luz.
- 1876: O primeiro aparato fotovoltaico foi construído.
- 1956: Iniciou-se a produção industrial de sistemas fotovoltaicos, porém, devido ao seu alto custo e baixa eficiência, foi verificado que não eram viáveis em aplicações residenciais, comerciais e até mesmo industriais de pequeno porte.
- 1973: Devido à crise do petróleo, ocorre um segundo momento impulsionador, em que o mundo buscava investir em fontes de energias renováveis.
- 1990: Houve um desenvolvimento mais acelerado da indústria de células fotovoltaicas, visando ampliar os horizontes. No final dessa década, políticas de governo na Alemanha e no Japão resultaram em aumentos substanciais no desenvolvimento desse mercado.
- 1998: A produção mundial de células fotovoltaicas atingiu a marca de 150 MWp, número que em 1978 era de 1 MWp, sendo o silício o material mais utilizado na fabricação de módulos fotovoltaicos.
- 2006: Grande salto no desenvolvimento do mercado fotovoltaico pelos chineses.
- 2009: China já ocupava a liderança na fabricação dos módulos.

Após o ano de 2009, nos países desenvolvidos o cenário do desenvolvimento da utilização de energia solar foi mudando devido a fortes incentivos que foram concedidos para a instalação de sistemas fotovoltaicos. Em países europeus, por exemplo, onde a matriz energética é

baseada na energia nuclear e combustíveis fósseis, a energia fotovoltaica se apresentou como uma ótima alternativa para suprir a demanda de energia desses países.

### **2.1.1 Histórico da energia solar fotovoltaica no Brasil**

Devido a sua localização, o Brasil recebe altos índices de irradiação quando comparados aos países europeus. Nesses países a tecnologia fotovoltaica é disseminada para a produção de energia elétrica, já no Brasil esse avanço tecnológico tem passado por fases de crescimento e por períodos de dificuldades. De acordo com o CRESESB (2014), o histórico de desenvolvimento da energia solar fotovoltaica ocorreu da seguinte forma no Brasil:

- 1994: Governo Federal, por meio do MME (Ministério de Minas e Energia), criou um programa para promover a eletrificação rural, baseado principalmente nos sistemas fotovoltaicos, denominado Prodeem (Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios), envolvendo universidades, centros de pesquisa, secretarias estaduais de energia e concessionárias federais e estaduais, através do qual foram adquiridos mais de 8.500 sistemas fotovoltaicos.
- 1990: Foram instalados os primeiros sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. A CHESF (Companhia Hidrelétrica do São Francisco) foi pioneira nesta área ao instalar um sistema de 11 kWp em 1995, em sua sede em Recife, PE.
- 2002: A ANEEL iniciou estudos para regulamentar as especificações técnicas necessárias a instalações dos SIGFIs (Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes), que são destinados ao fornecimento de energia elétrica aos consumidores isolados da rede de distribuição de energia elétrica. Essa regulamentação resultou na publicação da Resolução Normativa nº 83/2004, que posteriormente foi revogada e substituída pela Resolução Normativa nº493/2012, a qual regulamenta também o fornecimento de energia por meio dos MIGDIs (Microssistemas Isolados de Geração e Distribuição de Energia Elétrica).
- 2003: O Governo Federal instituiu o Programa Luz para Todos (LPT), através do Decreto nº4873/2003, alterado pelo Decreto nº6442/2008, onde o objetivo era prover o acesso à energia elétrica a todos os domicílios e estabelecimentos no meio rural. As concessionárias de energia foram os agentes executores do LPT, que utilizaram recursos subsidiados no investimento dos sistemas de atendimento. Esse processo ocorreu, na sua maioria, por meio de extensão da rede elétrica, mas também contemplou a instalação de sistemas fotovoltaicos.

- 2009: Foi publicada a Lei nº 12.111 que dispõe sobre serviços de energia elétrica nos Sistemas Isolados. Essa lei é um marco para universalização do atendimento de energia elétrica, pois autoriza a utilização de subsídio governamental para reembolsar o custo de geração, incluindo investimentos e custos de operação e manutenção, de qualquer sistema elétrico – não somente daqueles a base de combustíveis fósseis – para atendimento de áreas isoladas ao SIN (Sistema Interligado Nacional). A CELPA (Centrais Elétricas do Pará) e distribuidoras da Eletrobrás elaboraram projetos para atendimento de algumas comunidades remotas com base unicamente em sistemas fotovoltaicos.
- 2013: O MME (Ministério de Minas e Energia), com o apoio do EPE (Empresa de Pesquisa Energética), da Eletrobrás e do CEPEL (Centro de Pesquisa de Energia Elétrica), elaborou um relatório intitulado “Especificações dos Projetos de Referência no âmbito do Programa Luz para Todos” com critérios para orientar as distribuidoras na elaboração de seus projetos para os leilões previstos na Lei nº 12.111 e que utilizem recursos de investimento do Programa LPT. Devido ao aumento do número de instalações de sistemas fotovoltaicos no país, o Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) criou um grupo de trabalho (GT-FOT) para atuar nessa área, como parte do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). Esse grupo é formado por especialistas de universidades e centros de pesquisa, representantes de órgãos públicos e de empresas privadas. O GT-FOT publicou um documento pela Portaria Inmetro nº4/2011, intitulado “Requisitos de Avaliação da Conformidade para Sistemas e Equipamentos para Energia Fotovoltaica”, que estabelece requisitos para equipamentos utilizados em sistemas fotovoltaicos (módulos, inversores, controladores de carga e baterias). Atualmente, muitos equipamentos presentes no mercado já possuem essa etiqueta. Para que esses equipamentos sejam comercializados, eles necessitam ainda do registro no Inmetro, devem passar por testes no Inmetro e só depois de receberem a etiqueta serão comercializados, conforme Resolução Conmetro nº05, de maio de 2008.
- 2011: ANEEL lançou uma chamada para um Projeto Estratégico de P&D, denominado “Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira”. Nesta chamada, foram selecionados 18 projetos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, com potência instalada

na faixa de 0,5 MWp e 3 MWp, com uma potência total instalada de 24 MWp e um custo de aproximadamente R\$ 400 milhões.

- 2012: Foi definido pela ANEEL, a partir da Resolução Normativa nº482/2012, que regulamenta sistemas fotovoltaicos conectados a rede de distribuição, associados à unidade consumidora. Essa resolução trata da micro e mini geração distribuída, que são potências iguais ou inferiores a 100 kWp, e superiores a 100 kWp e inferior a 1 MWp, respectivamente. Nesta resolução está previsto sistema de compensação de energia elétrica, no qual é feito o balanço da energia consumida e gerada pela unidade consumidora (modelo *net metering*), nesse modelo existe um medidor de energia que registra o que a residência consome de energia elétrica e a energia que a residência produz e exporta para a rede elétrica, no final do mês o consumidor só irá pagar a diferença entre o que consumiu e o que gerou (ANEEL, 2012). A capacidade dos sistemas fotovoltaicos instalados no Brasil, dentre sistemas isolados e conectados à rede, estava na faixa de 30 a 40 MWp (ABINEE, 2012).

Por ser um mercado novo no Brasil, existem poucas empresas de projeto e instalações de sistemas fotovoltaicos, algumas, com pouca experiência. Segundo relatório publicado pela Abinee em 2012 (ABINEE, 2012) existem fatores que diminuirão o ritmo de crescimento dessa área, como: custo da geração do sistema fotovoltaico ainda não é competitivo, o investimento em instalações residenciais é elevado, algumas distribuidoras mostram certa restrição a micro e minigeração distribuída por perda de mercado, há falta de políticas específicas de financiamento e modelo de comercialização e os consumidores ainda não possuem conhecimento sobre a fonte fotovoltaica como uma opção de geração de energia elétrica.

### **3 RECURSO SOLAR**

#### **3.1 O Sol como fonte de energia**

A Terra recebe anualmente  $1,5 \times 10^{18}$  kWh de energia solar, o que corresponde a 10.000 vezes o consumo mundial de energia neste período.

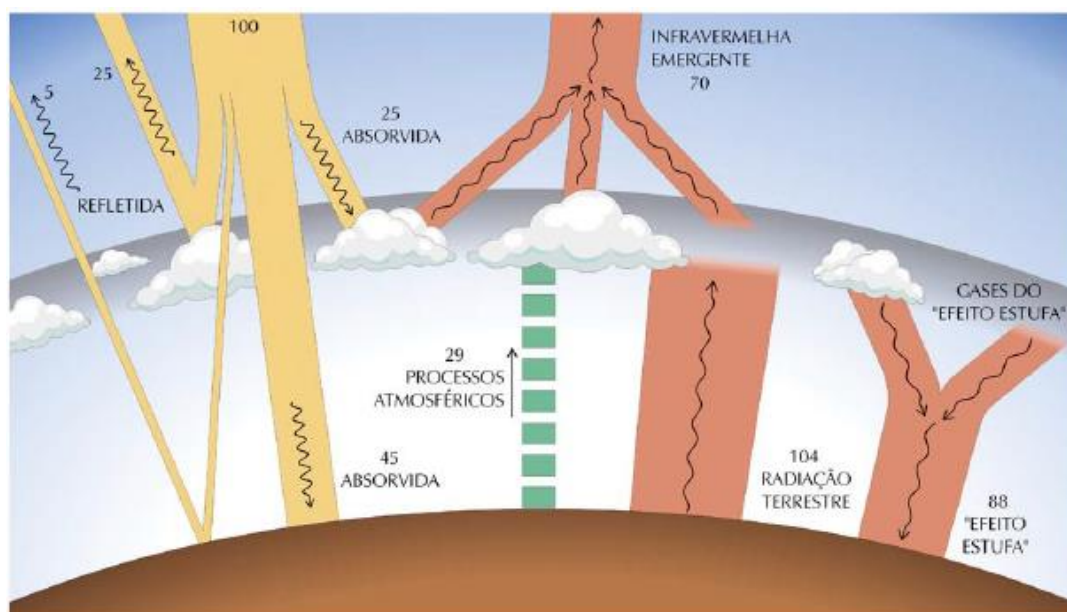
Por ser um país de dimensões continentais e estar situado, quase inteiramente, em uma região tropical, o Brasil possui um grande potencial para a utilização da energia solar como uma fonte alternativa de energia.

### 3.2 Radiação direta e difusa

A luz solar que chega até a superfície terrestre é composta por uma parte direta e outra parte difusa. A radiação solar direta corresponde aos raios solares que chegam diretamente do Sol, em linha reta, não sofrendo nenhuma influência de qualquer obstáculo. A radiação solar difusa corresponde aos raios que sofreram influências de algum obstáculo, como difração na atmosfera e reflexão da luz em nuvens, partículas de poeira ou em outros objetos.

A radiação solar recebida na superfície terrestre foi observada periodicamente em estudo realizado entre março de 2000 e novembro de 2005 por Trenberth *et al.* (2009). A partir desse estudo foi atualizado o diagrama de fluxo de potência global, apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Fluxo de potência global em W/m<sup>2</sup>



Fonte: ANEEL (2005).

Segundo esse diagrama, as nuvens, os gases, partículas atmosféricas e a superfície refletem cerca de 30% da radiação incidente no topo da atmosfera, os outros 70% são absorvidos produzindo aquecimento do sistema atmosfera-Terra.

### 3.3 Ângulo azimutal

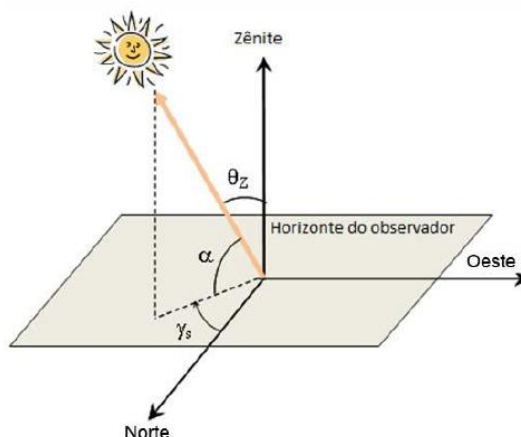
O ângulo azimutal ( $\gamma_s$ ) corresponde ao ângulo da projeção dos raios solares com relação ao norte geográfico, conforme Figura 2.

Um observador localizado no hemisfério sul, verá o Sol com ângulos variáveis do seu lado direito, no período da manhã, e do seu lado esquerdo, no período da tarde. Ao meio-dia,



quando o Sol se encontra na direção norte, o observador verá o Sol exatamente à sua frente, por convenção esse ângulo representa o ângulo azimutal nulo.

Figura 2 – Ilustração do ângulo azimutal em relação ao norte geográfico



Fonte: CRESESB (2014).

O ângulo azimutal é importante para o estudo, pois a instalação correta de um módulo fotovoltaico deve levar em consideração o movimento diário do Sol. No hemisfério sul, a melhor maneira de instalar um módulo fotovoltaico fixo é orientá-lo para o norte, pois com essa orientação há um melhor aproveitamento da luz solar ao longo do dia.

### 3.4 Movimentos da Terra

A Terra descreve uma trajetória elíptica em torno do Sol em seu movimento anual. Um trajeto completo tem a duração de aproximadamente 365 dias e seis horas. O eixo da Terra apresenta uma inclinação de aproximadamente  $23,45^\circ$  em relação ao plano normal à elipse. Essa inclinação e o movimento de translação da Terra dão origem às estações do ano, conforme mostra a Figura 3.

Figura 3 – Representação das estações do ano e do movimento da Terra em torno do Sol

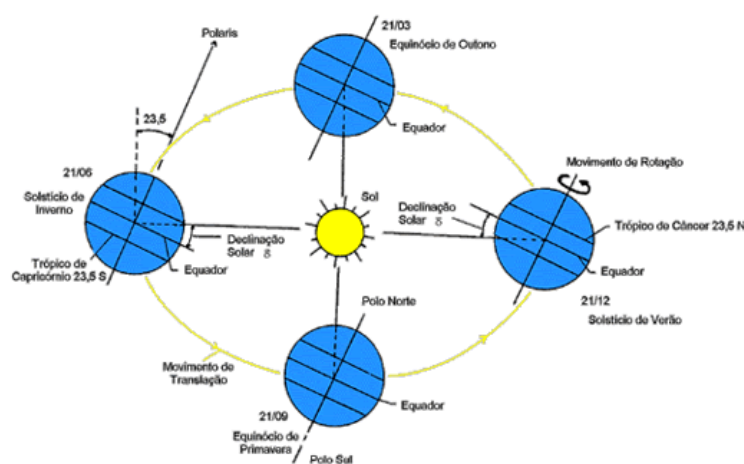


Fonte: ANEEL (2005).

### 3.5 Declinação solar

Observando o movimento aparente do Sol, ao meio dia solar, ao longo do ano, verifica-se que o ângulo entre os seus raios e o plano do Equador varia entre  $+23,45^\circ$  em torno de 21 de Junho (solstício de inverno no hemisfério Sul), e  $-23,45^\circ$  em 21 de Dezembro (solstício de verão no hemisfério Sul). Este ângulo denominado Declinação Solar ( $\delta$ ), é positivo ao Norte e negativo ao Sul da Linha do Equador. Nos dias 21 de Setembro (equinócio de primavera) e 21 de Março (equinócio de outono) os raios solares se alinham com o plano do Equador ( $\delta=0$ ). Pode-se observar na Figura 4 a variação da duração dos dias ao longo do ano para uma determinada localidade, resultante da inclinação da Terra.

Figura 4 – Órbita da Terra em torno do Sol, indicando a declinação solar ao longo do ano



Fonte: CRESESB (2017).

É possível verificar dias mais longos em localidades no hemisfério Sul, no solstício de verão e dias mais curtos no solstício de inverno. No Equador terrestre os dias têm sempre a mesma duração e em locais próximos as variações são pequenas ao longo do ano (Declinação Solar).

### **3.6 Altura solar**

Devido ao ângulo de declinação solar, o Sol nasce e se põe em diferentes pontos do céu e descreve uma trajetória com inclinação diferente em cada dia do ano.

Um observador olhando em direção ao norte enxerga o Sol descrevendo uma trajetória circular no céu. A altura do Sol é maior no verão, isso significa que durante essa época os raios solares incidem sobre a cabeça do observador com um ângulo zenital menor.

O zênite é uma linha imaginária perpendicular ao solo. O ângulo zenital do Sol ( $\theta_z$ ) é zero quando ele se encontra exatamente acima do observador.

Em dias de inverno a altura solar é menor, devido a isso o observador enxerga o Sol mais baixo, próximo da linha do horizonte.

## **4 CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Para a elaboração de projetos de sistemas fotovoltaicos, deve-se levar em consideração as características das células e módulos fotovoltaicos de silício cristalino, suas principais propriedades físicas e elétricas, disposição e funcionamento.

### **4.1 Tipos de células fotovoltaicas**

No mercado existem vários tipos de tecnologias para a fabricação de células fotovoltaicas, porém, as células de silício monocristalino e de silício policristalino são as tecnologias mais encontradas. Desta forma, o dimensionamento do projeto em estudo será feito a partir de equipamentos com estes dois tipos de tecnologias.

#### **4.1.1 Células de Silício monocristalino**

Para a sua fabricação, são utilizados blocos de silício ultrapuro, as células de silício monocristalino são obtidas pelo método Czochralski (Si-Cz). O produto resultante desse processo é o lingote de silício monocristalino, conforme Figura 5.

Figura 5 – Lingote de silício monocristalino



Fonte: UJAEN (2017).

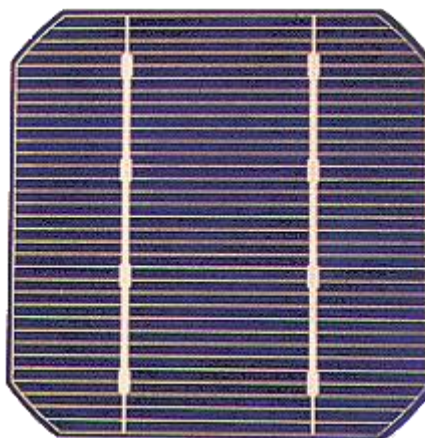
De acordo com Villalva e Gazoli (2012, p.71), “o lingote de silício monocristalino é constituído de uma estrutura cristalina única e possui organização molecular homogênea, o que lhe confere um aspecto brilhante e uniforme”.

A partir do corte dos lingotes, são obtidas lâminas, também chamadas de *wafers*, nas quais serão fabricadas as células fotovoltaicas. As lâminas de silício usadas atualmente têm espessura da ordem de 0,2 mm, mas o objetivo das pesquisas em andamento para 2020 é obter lâminas de até 0,12 mm, assim reduzindo o custo de fabricação (CRESESB, 2014, p.128).

As lâminas são submetidas a processos químicos nos quais recebem impurezas em ambas as faces, impurezas que formarão camadas de silício p e n que constituem a base do funcionamento da célula fotovoltaica.

Na última etapa do processo, a célula semiacabada recebe uma película metálica em uma das faces, uma grade metálica na outra face e uma camada de material antirreflexivo na face que vai receber a luz. A Figura 6 apresenta uma célula fotovoltaica de silício monocristalino.

Figura 6 – Célula fotovoltaica de silício monocristalino



Fonte: Eduardo Aquino (2017)

#### 4.1.2 Células de Silício policristalino

O processo de produção do silício policristalino é mais barato, pois é solidificado em forma de um bloco composto de pequenos cristais, com dimensões e orientações diferentes. O lingote de silício policristalino (Figura 7) é cortado em lâminas, que posteriormente serão transformados em células fotovoltaicas. Essas células possuem uma aparência heterogênea e são normalmente encontradas na cor azul (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Figura 7 – Lingote de silício policristalino



Fonte: CRESESB, 2014

As células de silício policristalino possuem uma eficiência que varia de 14,5% a 16,2%, são valores menores do que as células de silício monocristalino, pois há presença de interfaces entre os vários cristais nessa célula, devido ao seu processo de fabricação, entretanto seu custo é menor e isso compensa a redução da eficiência. São células rígidas e quebradiças, que precisam ser montadas em módulos para adquirir resistência mecânica (CRESESB, 2014). A Figura 8 apresenta uma placa fotovoltaica de silício policristalino.

Figura 8 – Células fotovoltaicas de silício policristalino



Fonte: Painéis Fotovoltaicos (2011).

## 4.2 Módulo fotovoltaico

Um módulo fotovoltaico é composto por várias células fotovoltaicas conectadas em arranjos a fim de produzir tensão e corrente suficientes para a utilização prática da energia gerada. Como foram mencionadas, as células fotovoltaicas, possuem uma tensão muito baixa, da ordem de 0,5 a 0,8 V, para as células de silício. Assim, para obter níveis de tensão adequados as células são conectadas em série, produzindo uma tensão equivalente à soma das tensões individuais de cada célula. Ao mesmo tempo, as células são muito frágeis e seu encapsulamento em placas rígidas ou flexíveis traz uma importante proteção mecânica e contra as intempéries (CRESESB, 2014).

Os módulos de silício cristalino que normalmente são encontrados no mercado apresentam uma potência entre 50 e 300 W de potência, apresentam tensões máximas de até 37 V aproximadamente e podem fornecer em torno de 8 A de corrente elétrica (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

As células de silício cristalino podem ser conectadas em série, sendo que nesta ligação os contatos frontais de cada célula são conectados aos contatos posteriores da célula seguinte, assim unindo o polo negativo (parte frontal) de uma célula, ao polo positivo (parte posterior) da célula seguinte.

Após as células serem soldadas, elas passam pelo processo de encapsulamento. Esse encapsulamento é constituído de uma estrutura de alumínio, um vidro temperado de alta transparência, acetato de etil vinila (EVA, do inglês *Ethylene-vinyl acetate*), células fotovoltaicas, EVA e um filme posterior isolante.

## 4.3 Funcionamento e características dos módulos fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são formados por células conectadas eletricamente. Para produzir módulos de tensões maiores, os fabricantes conectam várias células em série. Um módulo normalmente possui 36, 54 ou 60 células, essa quantidade vai depender de sua classe de potência.

A corrente elétrica produzida por cada célula depende da sua área, pois a corrente elétrica é diretamente proporcional à quantidade de luz recebida pela célula. Quanto maior a área, maior a captação de luz e maior a corrente fornecida. Os módulos cristalinos comerciais fornecem em torno de 8 A (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

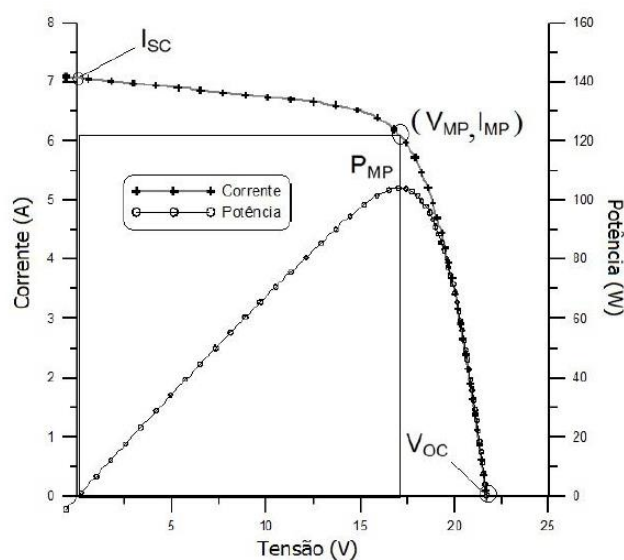
### 4.3.1 Curvas características de corrente, tensão e potência

Um módulo fotovoltaico não possui um comportamento de uma fonte elétrica convencional. A tensão de saída dos módulos não é constante, esse valor vai depender da sua corrente e vice-versa.

O valor da tensão e da corrente nos seus terminais vai depender da carga que está conectada aos seus terminais. Caso seja conectado um aparelho que demanda um valor alto de corrente, a tensão na saída do módulo tenderá a cair. Por outro lado, se conectarmos uma carga que demanda pouca corrente, a tensão do módulo será mais elevada, tendendo à tensão de circuito aberto (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Na Figura 9 são apresentadas duas curvas,  $I$ - $V$  e  $P$ - $V$  típicas de um módulo. Pode-se observar que o gráfico é apresentado no primeiro quadrante, fisicamente a curva  $I$ - $V$  se situa na realidade no quarto quadrante, pois se trata de um gerador, onde a corrente tem sentido inverso (é negativa).

Figura 9 – Curva característica  $I$ - $V$  de corrente e tensão e curva de potência  $P$ - $V$  para um módulo com potência nominal de 100 Wp



Fonte: CRESESB (2014)

Três pontos estão em destaque nestas curvas: ponto de corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ ), ponto de tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) e ponto de máxima potência ( $P_{MP}$ ). Essas características dos módulos serão descritas a seguir.

#### 4.3.1.1 Características elétricas

Geralmente um módulo é identificado pela sua potência de pico (Wp), mas outras características compatíveis com sua aplicação devem ser observadas. A potência de pico de um módulo fotovoltaico é definida nas condições *Standard Test Conditions* (STC) ou Condição Padrão de Teste.

A STC se refere às condições padronizadas de teste do módulo. Os fabricantes de módulos fotovoltaicos realizam testes nas mesmas condições, padronizadas por órgãos internacionais de certificação. Devido a isso, é possível comparar os diversos módulos de fabricantes com os mesmos critérios. A STC considera uma irradiância solar de  $1000 \text{ W/m}^2$  e a temperatura de  $25^\circ\text{C}$  da célula solar.

Os parâmetros elétricos que caracterizam os módulos fotovoltaicos são: tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, tensão de máxima potência, corrente de máxima potência, potência de pico ou máxima potência e eficiência (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

**Tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ):** A tensão entre os terminais de um módulo quando não há corrente elétrica circulando e é a máxima tensão que um módulo fotovoltaico pode produzir. Pode ser medida diretamente com um voltímetro nos terminais do módulo. A informação sobre a tensão de circuito aberto é importante para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico, pois o projeto de um sistema deve respeitar as tensões máximas dos inversores, baterias, controladores de carga e outros componentes que são ligados aos módulos fotovoltaicos (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

**Corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ ):** É a máxima corrente que se pode obter de um módulo quando os seus terminais estão ligados em curto-circuito. Pode ser medida com um amperímetro curto-circuitando os terminais do módulo. Essa informação é importante para a especificação dos equipamentos e acessórios utilizados que serão ligados ao módulo, pois esse é o maior valor de corrente que o módulo poderá fornecer em um momento em que esteja recebendo uma radiação solar de  $1000 \text{ W/m}^2$  (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

**Tensão de máxima potência ( $V_{MP}$ ):** É o valor da tensão nos terminais do módulo quando fornece sua potência máxima na condição padronizada de teste. Ou seja, é a tensão do módulo no ponto de máxima potência (VILLALVA e GAZOLI, 2012).



**Corrente de máxima potência ( $I_{MP}$ ):** É o valor da corrente de máxima potência do módulo quando os terminais da placa fornecem potência máxima (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

**Potência de pico ou máxima potência ( $P_{MP}$ ):** É a máxima potência que o módulo pode fornecer no ponto de máxima potência em STC. Esse valor corresponde à multiplicação da corrente de máxima potência pela tensão de máxima potência (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

**Eficiência do módulo ( $\eta$ ):** É o parâmetro que define quão efetivo é o processo de conversão de energia solar em energia elétrica. Representa a relação entre a potência elétrica produzida pelo módulo e a energia solar incidente e pode ser definida pela seguinte expressão:

$$\eta_P = \frac{P_{MÁX}}{A_p \times 1000} \quad (1)$$

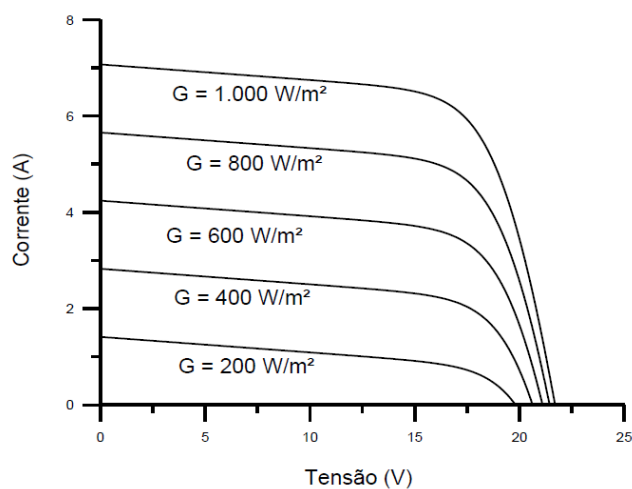
Em que  $P_{MÁX}$  é a potência máxima do módulo ou de pico do módulo (W) e  $A_p$  é a área do módulo ( $m^2$ ) (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

#### 4.3.2 Fatores que afetam as características elétricas dos módulos

##### 4.3.2.1 Efeito da radiação solar

O módulo fotovoltaico fornece uma corrente elétrica que depende diretamente da intensidade da radiação solar. Uma irradiância solar de  $1000 \text{ W/m}^2$  incidindo em um módulo é capaz de fornecer a corrente máxima especificada em seu catálogo (na temperatura de  $25^\circ\text{C}$ ). A Figura 10 mostra a variação de geração de um módulo fotovoltaico de 36 células para diferentes valores de irradiância (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Figura 10 – Influência da radiação solar na operação do módulo fotovoltaico

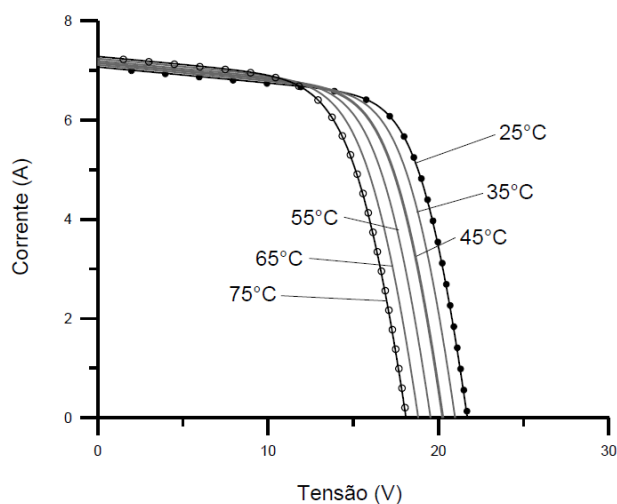


Fonte: CRESESB (2014)

#### 4.3.2.2 Efeito da temperatura

A temperatura nos módulos fotovoltaicos influencia diretamente na tensão que eles fornecem, consequentemente afeta a sua potência fornecida. A Figura 11 mostra a curva  $I$ - $V$  para diversas temperaturas de um módulo fotovoltaico, deixando evidente que há uma queda de tensão importante com o aumento da temperatura do módulo. A corrente sofre uma pequena elevação que não é suficiente para compensar a perda causada pela diminuição da tensão (CRESESB, 2014).

Figura 11 – Influência da temperatura na operação do módulo fotovoltaico



Fonte: CRESESB (2014)

### 4.3.3 Efeitos de sombreamento

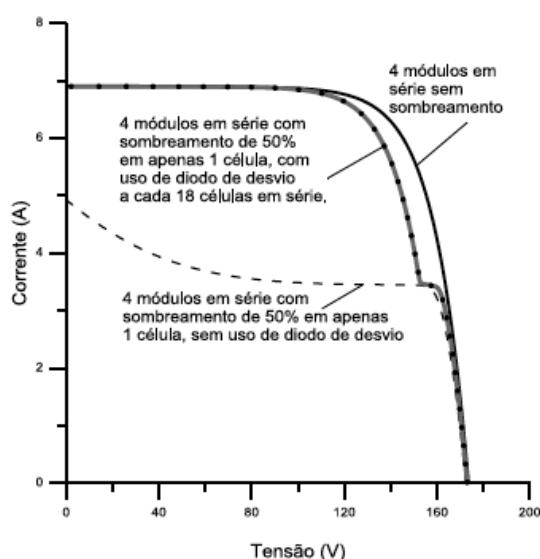
O sombreamento causado nos módulos fotovoltaicos por árvores, prédios, outros tipos de edificações, entre outros, é uma questão crítica devido ao gerador fotovoltaico apresentar queda no seu desempenho quando isso acontece. Sistemas fotovoltaicos possuem excelente rendimento quando iluminado homoganeamente.

Dada à característica construtiva da maioria dos módulos fotovoltaicos, em que as células solares individuais são conectadas em série, uma pequena sombra sobre uma destas células, como a sombra projetada por uma antena, chaminé ou poste, pode reduzir acentuadamente o rendimento de todo o sistema. Isto se deve ao fato de que a célula sobre a qual incidir a menor quantidade de radiação é que irá determinar a corrente de operação de todo o conjunto a ela conectado em série.

Em algumas condições, uma célula solar parcialmente sombreada pode vir a atuar como uma carga, o que pode levar a um aquecimento excessivo da célula e podendo causar ruptura do vidro e fusão dos polímeros e metais. Este efeito, conhecido como *hot spot*, pode ser evitado pela instalação de diodos de *bypass* entre cada célula de um módulo, o que por outro lado leva a uma perda de rendimento.

O diodo de *bypass* é ligado em paralelo com as células, o ideal seria existir um diodo para cada célula do módulo, mas isso teria um custo muito alto e tornaria difícil a fabricação dos módulos. O diodo de *bypass* evita que, mesmo que uma das células esteja escurecida e produzindo pouca corrente, as outras células do módulo continuam produzindo corrente, pois a corrente da célula problemática é desviada pelo diodo em paralelo. A Figura 12 apresenta as curvas para quatro módulos conectados em série, com e sem sombreamento.

Figura 12 – Curva  $I$ - $V$  para 4 módulos conectados em série e sem sombreamento (linha contínua); curva  $I$ - $V$  para os mesmos 4 módulos na situação de sombreamento de uma das células, que passa a receber 50% da irradiância original (linha tracejada); curva  $I$ - $V$  com o mesmo sombreamento, mas com a utilização de diodos de desvio (curvas com linha contínua e pontos)



Fonte: CRESESB (2014)

Módulos solares de filmes finos, cujas células são normalmente tiras longas e estreitas, são menos afetados por este fenômeno do que os mais tradicionais módulos solares de silício cristalino (RUTHER, 2004).

#### 4.4 Associação de módulos fotovoltaicos

Os módulos podem ser conectados em ligações série e/ou paralelo, dependendo da quantidade de energia desejada. Ao definir como serão associados os módulos, é necessário ter informações de como deverá ser a instalação e quais componentes serão utilizados, pois as tensões e correntes resultantes devem ter plena compatibilidade com esses componentes.

Um agrupamento de módulos é denominado arranjo ou conjunto fotovoltaico, conforme Figura 13. Na literatura inglesa encontra-se o termo *string* para definir um conjunto de módulos.

Figura 13 – Conjunto de módulos fotovoltaicos

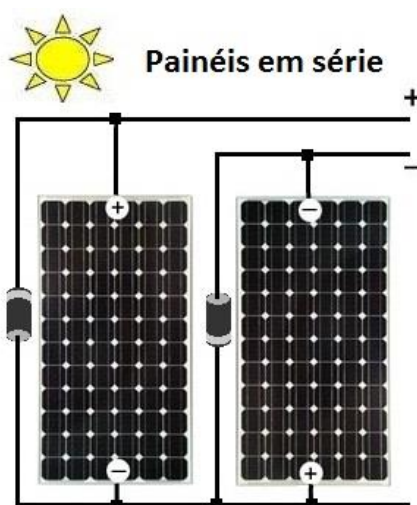


Fonte: Neosolar (2017)

#### 4.4.1 Módulos fotovoltaicos conectados em série

A conexão em série é feita do terminal positivo de um módulo ao terminal negativo de outro, e assim por diante, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Conexões elétricas em série dos módulos fotovoltaicos



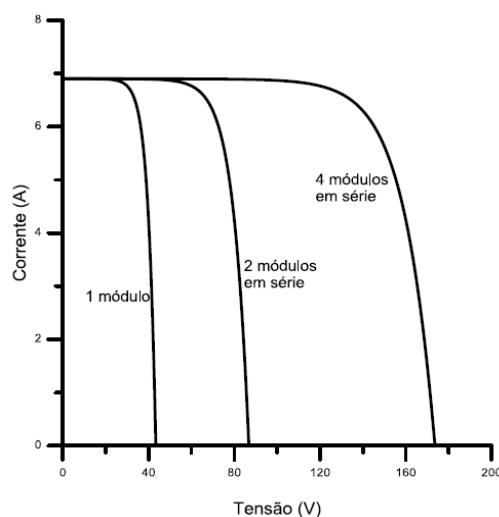
Fonte: MPPT Solar (2017).

As caixas de conexões na sua face posterior ou cabos pré-instalados facilitam esta conexão. Devem-se utilizar cabos e conexões específicos para uso em sistemas fotovoltaicos, que são protegidos contra os efeitos da radiação e das intempéries.

Quando os módulos são conectados em série, a tensão de saída do conjunto corresponde à soma das tensões fornecida por cada um dos módulos. O valor da corrente que circula no conjunto é o mesmo em todos os módulos (CRESESB, 2014). Podemos fazer esta verificação

a partir da Figura 15, em que foram associados um, dois e quatro módulos idênticos, e a corrente foi a mesma.

Figura 15 – Características  $I$ - $V$  para um módulo de 220 Wp, 2 módulos idênticos associados em série e 4 módulos idênticos associados em série



Fonte: CRESESB (2014)

De maneira análoga à conexão das células fotovoltaicas, quando a ligação dos módulos é série, as tensões são somadas e a corrente (para módulos iguais) não é afetada, ou seja:

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (2)$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (3)$$

Quando é realizada a conexão série, as correntes que fluem por cada módulo são sempre iguais entre si, mas para que a corrente não seja afetada em relação à corrente de um módulo individual, consideram-se módulos idênticos sob as mesmas condições de radiação e temperatura. Se houver alguma dispersão de características elétricas ou um sombreamento parcial, a corrente do conjunto fica limitada pelo módulo com a menor corrente individual.

#### 4.4.2 Módulos fotovoltaicos conectados em paralelo

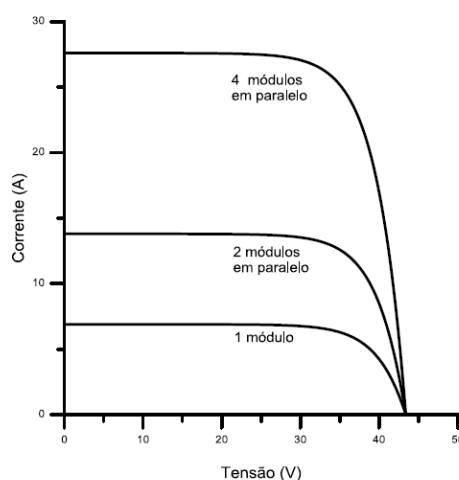
A conexão em paralelo é feita unindo-se os terminais positivos de todos os módulos entre si e da mesma forma com os terminais negativos. A corrente fornecida por esta conexão é a soma das correntes sem alteração de tensão, ou seja:

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

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

Podemos fazer também esta verificação a partir da Figura 16, em que foram associados dois e quatro módulos idênticos, e a tensão de saída dos conjuntos foram à mesma.

Figura 16 – Características I-V para conexão em paralelo dos mesmos módulos fotovoltaicos



Fonte: CRESESB (2014)

## 5 MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA

### 5.1 Normas nacionais para Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR)

O uso da energia solar no Brasil não era regulamentado no Brasil antes da publicação da Resolução Normativa n.º 482 do ano de 2012. A micro e minigeração distribuída no Brasil teve seu início regulamentado pela mesma. No Brasil, existem três normas que devem ser cumpridas pelo consumidor que queira se tornar um gerador micro ou minigerador de energia elétrica.

As normas são as seguintes:

- Norma Brasileira IEC 62.116 de 2012 – Procedimento de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (ABNT, 2012);
- Seção 3.7 do Módulo 3 do PRODIST – Procedimentos para acesso de micro e minigeração distribuída ao sistema de distribuição;

- Resolução normativa 482 de 2012 da ANEEL – Condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e sistema de compensação de energia elétrica.

Durante o ano de 2015, a Resolução Normativa n.º 482 passou por revisão, dando origem à resolução n.º 687/2015. Esta nova resolução, que passou a vigorar em março de 2016 e ampliou o limite de potência da micro e minigeração,

A ausência de legislações acaba sendo um entrave para algumas potências de geração de energia a partir de sistemas fotovoltaicos, e para a instalação de sistemas fotovoltaicos é aconselhável seguir algumas normas e recomendações técnicas nacionais para instalação.

### **5.1.1 Categorias dos Sistemas Conectados à Rede**

Os SFCR operam em paralelo com a rede elétrica e diferente dos sistemas autônomos, os sistemas conectados à rede são empregados em locais já atendidos por uma rede de distribuição de energia elétrica.

Os SFCR são aqueles onde a potência produzida pelo gerador fotovoltaico pode ser consumida diretamente pelo consumidor ou, caso o consumo no momento seja menor do que a energia produzida, entregue à rede elétrica. Nesse sistema é indispensável à utilização de inversores de frequência que satisfaçam as exigências de qualidade e segurança, para que não degradem a qualidade do sistema elétrico ao qual o gerador fotovoltaico está ligado.



Tabela 1 - Requisitos mínimos de equipamentos em função da potência instalada

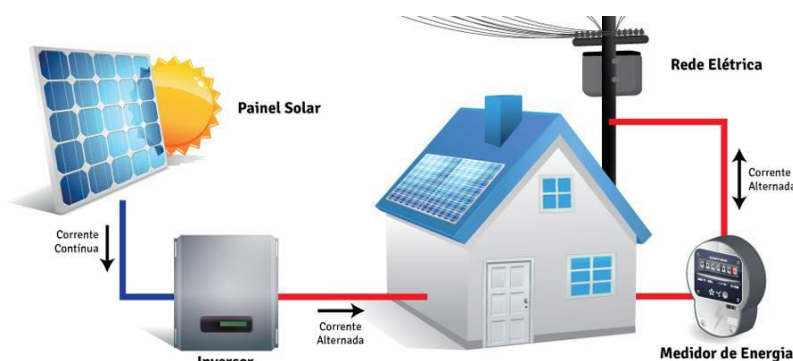
| EQUIPAMENTO                               | Potência Instalada              |                      |                      |
|-------------------------------------------|---------------------------------|----------------------|----------------------|
|                                           | Até 100kW                       | 101kW a 500kW        | 501kW a 1MW          |
| 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                  |
| Relé de sincronismo                       | Sim                             | Sim                  | Sim                  |
| Anti-ilhamento                            | Sim                             | Sim                  | Sim                  |
| Estado de curto-circuito                  | Não                             | Sim                  | Sim                  |
| Medição                                   | Sistema de Medição Bidirecional | Medidor 4 Quadrantes | Medidor 4 Quadrantes |
| Ensaio                                    | Sim                             | Sim                  | Sim                  |

Fonte: Prodist (2012)

#### 5.1.1.1 Sistemas de micro e minigeração fotovoltaica

O objetivo dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede é gerar eletricidade para ser consumida pela carga ou injetada diretamente na rede elétrica convencional, consequentemente sendo consumida por outras cargas conectadas ao sistema de distribuição (VILLALVA e GAZOLI, 2012). A Figura 17 mostra um típico sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.

Figura 17 – Organização e componentes de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede elétrica



Fonte: Real Solar (2017)

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede podem ser centralizados, constituindo uma usina de geração de energia elétrica ou micro e minissistemas descentralizados de geração

distribuída instalados em qualquer tipo de consumidor. Segundo a ANEEL, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede podem ser classificados em duas categorias, de acordo com seu tamanho, são elas:

- Microgeração: potência instalada de até 75 kW;
- Minigeração: potência instalada entre 75 kW e 3 MW.

Os sistemas de microgeração englobam as instalações de sistemas fotovoltaicos em telhados de residências que podem suprir totalmente o consumo de energia elétrica, tornando a residência autossuficiente em energia elétrica. Os SFCR podem ser conectados a redes monofásicas ou trifásicas de residências, empresas, prédios comerciais ou qualquer outro tipo de consumidor que seja atendido pelo sistema de distribuição da concessionária de energia elétrica.

O sistema é composto de um conjunto de módulos fotovoltaicos, um inversor de frequência próprio para a conexão à rede e um medidor de energia também próprio para este tipo de aplicação. A energia que é gerada pelos módulos fotovoltaicos é injetada e distribuída na rede elétrica da residência. Essa energia gerada é consumida na própria residência e o excedente, se houver, é injetado na rede de distribuição da concessionária de energia elétrica, gerando créditos que serão descontados da conta de energia elétrica do cliente, esse sistema de créditos é utilizado no Brasil.

Em países da Europa e nos Estados Unidos existem outros tipos de tarifas e incentivos para quem instala um sistema fotovoltaico na sua residência, esses sistemas de tarifação serão detalhados no decorrer do capítulo.

Os sistemas fotovoltaicos são modulares, quer dizer que o conjunto de módulos e inversores pode ser acrescentado em paralelo em qualquer quantidade, de acordo com o projeto do sistema desejado.

Os sistemas de microgeração utilizam poucos componentes e são de fácil instalação. Sua fixação nos telhados é feita de forma semelhante às instalações de coletores solares térmicos (Figura 18). Os módulos são conectados à rede elétrica da residência através de um inversor específico para a conexão à rede elétrica e um medidor bidirecional, que irá medir a quantidade de energia que foi gerada pelo consumidor e a quantidade de energia que foi consumida pelo mesmo (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Figura 18 – Sistema fotovoltaico de microgeração instalado no telhado de uma residência



Fonte: Ciclo Vivo (2017).

Esses sistemas já são utilizados em muitos países e agora começam a ganhar mais visibilidade no Brasil, tanto pelas autoridades, quanto pela população. A inserção desse tipo de sistema nas residências do Brasil pode contribuir com a geração de energia em nível nacional e reduzir emissões de Carbono e outros prejuízos ambientais que são causados pelo uso de combustíveis fósseis e outras fontes tradicionais de energia.

Sistemas fotovoltaicos de minigeração geralmente são instalados em consumidores comerciais e industriais. O objetivo dessas instalações é suprir totalmente ou parcialmente a demanda de energia elétrica desses consumidores, reduzindo sua dependência de energia elétrica da rede pública, essa medida proporciona economia na conta de energia e imunidade contra o aumento da tarifa de energia elétrica.

## **5.2 Sistema de tarifação**

### **5.2.1 Venda de energia no mercado livre**

O setor elétrico brasileiro possui um sistema de tarifação diferenciado, em que empresas responsáveis pela produção e transmissão de energia fazem parte do Sistema Interligado Nacional (SIN). Neste sistema ocorrem as negociações de compra e venda de energia. A venda de energia é definido por Villava e Gazoli (2012, p.155):

“A venda de energia ocorre no mercado de comercialização e aplicam-se as tarifas e os requisitos técnicos padronizados para esse tipo de conexão. A conexão desses sistemas à rede é feita através de grandes inversores que são conectados a transformadores elevadores, permitindo a conexão a linhas de transmissão de alta tensão para distribuição da energia elétrica produzida pra o Sistema Interligado Nacional (SIN)”.

Ou seja, se o agente de mercado (distribuidor, gerador, comercializador, consumidor livre ou especial) fizer parte do SIN, o mesmo pode negociar energia com qualquer outro agente, independentemente das restrições físicas de geração e transmissão.

### 5.2.2 Tarifação *net metering*

A tarifação *net metering* consiste na injeção do excesso de energia elétrica produzida pelo consumidor na rede elétrica. Esse excesso usualmente é repassado para o consumidor na forma de crédito, onde esses créditos são usados para compensar seu consumo nos momentos em que ele não estiver gerando energia elétrica. Neste sistema de tarifação é utilizado um medidor eletrônico que realiza a medição da energia que foi gerada pelo cliente e a energia que foi consumida (ABINEE, 2012).

Atualmente no Brasil é utilizado esse sistema de compensação de energia, em que a distribuidora de energia concede um crédito de energia ativa para o consumidor, que possui um prazo de 36 (trinta e seis meses) para ser consumida, caso o consumidor não utilize todos esses créditos nesse período, eles serão perdidos e sem direito a remuneração pela energia que foi produzida (ANEEL, 2012).

### 5.2.3 Tarifação *feed in*

Esse sistema de tarifação teve origem na Europa, foi um dos principais incentivos para o uso de energias renováveis. Possui um sistema de medição semelhante ao *net metering* com dois medidores, mas no sistema *feed in* o consumidor é premiado com a instalação de um sistema de energia fotovoltaica em sua residência e receberá um pagamento pela energia que o seu sistema fotovoltaico exporta para a rede elétrica. O valor que é pago pela energia exportada para a rede é maior que o valor da energia que é consumida pela rede elétrica, portanto esse tipo de instalação fotovoltaica, com tarifação *feed in* é vantajoso e rentável (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Com o intuito de incentivar ainda mais, o sistema *feed in* foi aperfeiçoado pelo governo de alguns países com esses três tipos de tarifas:

- **Tarifa de geração** – o proprietário recebe por cada kWh gerado a partir de uma fonte renovável;
- **Tarifa de exportação** – caso o proprietário produza mais energia que consome, ele recebe um valor adicional por cada kWh exportado para a rede elétrica;

- **Tarifa de consumo** – o proprietário pagaria o mesmo valor que qualquer outro consumidor sem um sistema fotovoltaico. O valor cobrado será pela energia que foi efetivamente consumida por ele, que é a diferença da energia que foi consumida e que foi exportada para a rede.

## 6 COMPONENTES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

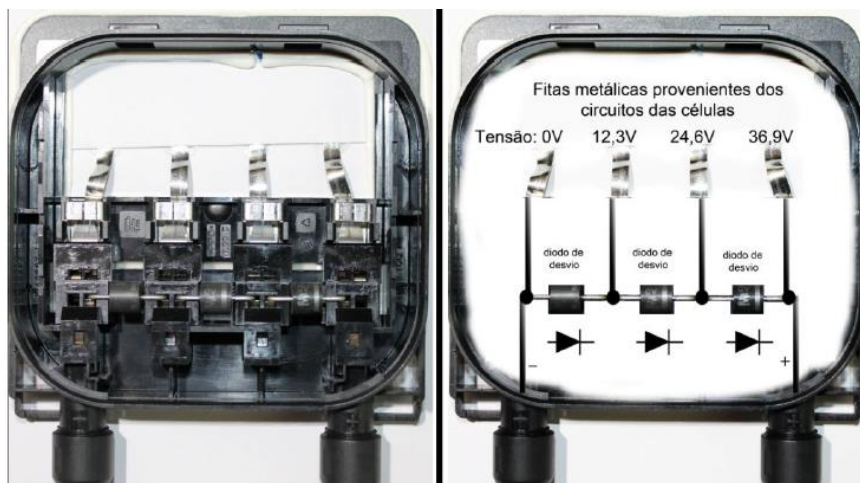
Um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica é constituído por módulos fotovoltaicos, inversores de frequência, dispositivos de proteção, sistema de fixação e suporte dos módulos e cabos. Nesse sistema o objetivo que se deseja é deixar a edificação autossuficiente.

### 6.1 Caixa de junção

Os módulos fotovoltaicos comerciais apresentam uma caixa de conexões, geralmente denominada caixa de junção, em sua parte posterior. A caixa de junção recebe os terminais das conexões elétricas das células fotovoltaicas e aloja os diodos de *bypass* do módulo. Na parte externa, os cabos elétricos de conexão do módulo são conectados à caixa de junção através de dois conectores externos.

As caixas de conexões dos módulos fotovoltaicos comerciais normalmente são seladas e resinadas e o usuário não tem acesso ao seu conteúdo. A Figura 19 mostra uma caixa de conexões e diagrama de um módulo.

Figura 19 – Caixa de conexões (esquerda) e diagrama de ligações (direita) de um módulo de 240 Wp, com 60 células em série (20 para cada diodo), onde  $V_{OC}=36,9$  V



Fonte: CRESESB (2014)

## 6.2 Cabos elétricos

Os cabos elétricos utilizados nos módulos geralmente são fornecidos pelos fabricantes junto com os módulos. Dois cabos são conectados à caixa de junção e com terminais padronizados para sistemas fotovoltaicos.

Os cabos que acompanham os módulos de fábrica têm o comprimento adequado para que os módulos possam ser colocados lado a lado e conectados em série e assim formar *strings* em conjuntos fotovoltaicos. Os mesmos devem ter características especiais, próprias para aplicações nesse segmento.

Nas instalações fotovoltaicas, os cabos estão sujeitos a intempéries e radiação solar excessiva, o que exige cabos elétricos com características específicas para evitar ressecamento e deterioração acelerada.

## 6.3 Conectores

As conexões dos módulos fotovoltaicos em série são feitas com conectores que já são fornecidos com os módulos, bastando conectar o terminal positivo de um módulo ao terminal negativo do outro. Alguns tipos de conectores encontrados no mercado são MC3 e MC4, e foram desenvolvidos especialmente para aplicações fotovoltaicas e tornaram-se padrões mundiais.

Atualmente os conectores MC4 (Figura 20) passaram a ser adotados por maior parte dos fabricantes de módulos fotovoltaicos, pois conferem maior segurança às conexões elétricas devido ao seu sistema de travamento, que impede que a conexão seja facilmente interrompida.

Figura 20 – Conectores de engate rápido MC4 para conexão série de módulos fotovoltaicos.



Fonte: Mercado Livre (2017).

## 6.4 Inversores

Um inversor é um dispositivo eletrônico que fornece energia elétrica em tensão e corrente alternada (CA) a partir de uma fonte de energia elétrica em corrente e tensão contínua (CC).

Para o caso de SFCR, a energia elétrica pode ser proveniente dos módulos fotovoltaicos e a tensão gerada deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequado às cargas que serão alimentadas. Além disso, a tensão de saída do inversor deve ser sincronizada com a tensão da rede.

Os inversores utilizados em SFCR compartilham o mesmo princípio de funcionamento que as inversoras para SFI, mas possuem características específicas para atender as exigências das concessionárias de distribuição em termos de segurança e qualidade da energia que será injetada na rede e exigências do PRODIST.

Existem inversores mais modernos que utilizam chaves eletrônicas de estado sólido e o seu desenvolvimento está diretamente ligado à evolução da eletrônica de potência, tanto em termos de componentes (especialmente semicondutores) quanto das topologias de seus circuitos de potência e controle. Os primeiros inversores que foram utilizados em sistemas fotovoltaicos eram simples adaptações de circuitos já existentes, atualmente os circuitos são desenvolvidos levando em consideração a complexidade e as exigências de sua aplicação específica. Assim, com o passar dos anos, as topologias foram sendo otimizadas e os custos de fabricação reduzidos, enquanto as eficiências de conversão evoluíram até chegar a 99% em alguns inversores para conexão à rede elétrica (CRESESB, 2014, p.217).

### 6.4.1 Principais características dos inversores

#### 6.4.1.1 Tensão contínua máxima na entrada

Este é o valor máximo de tensão que o inversor suporta na sua entrada. A entrada do inversor é onde os terminais dos módulos fotovoltaicos serão conectados. A tensão máxima que o inversor suporta está relacionada com a tensão de circuito aberto dos módulos fotovoltaicos. Esta tensão de circuito aberto aparece nos módulos quando estes não estão fornecendo corrente elétrica.

Esse valor de máxima tensão na entrada no inversor é importante, pois ele limita o máximo de módulos que podem ser colocados em série. No momento do projeto esse valor deve ser consultado para determinar o máximo de módulos que podem ser instalados com base nas informações de tensão de circuito aberto fornecida pelo fabricante (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

#### 6.4.1.2 Faixa útil de tensão contínua na entrada

A faixa útil de tensão é o intervalo de tensão de entrada no qual o inversor consegue operar. Essa é também a faixa de tensão na qual o sistema MPPT (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência) do inversor consegue maximizar a produção de energia dos módulos fotovoltaicos. Os inversores que são utilizados para a conexão à rede elétrica são fabricados para receber vários módulos conectados em série, formando os chamados *strings* (fileiras de módulos) com tensão de saída elevada.

A faixa de tensão de MPPT significa que o ponto de máxima potência do conjunto de módulos fotovoltaicos deve estar dentro dessa faixa, para o inversor maximizar a produção de energia dos módulos (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

#### 6.4.1.3 Número máximo de *strings* na entrada

*Strings* são os conjuntos de módulos ligados em série. Na construção de sistemas fotovoltaicos, os módulos são primeiramente ligados em série, formando *strings*, para proporcionar a tensão de trabalho adequada. Visando o aumento da potência do sistema os conjuntos de *strings* são ligados em paralelo, formando um conjunto de vários *strings*.

Os inversores comerciais possuem um número limitado de entradas para *strings*. Geralmente os inversores apresentam um conjunto de terminais do tipo MC4 para a conexão de até quatro *strings*.



Os inversores geralmente são instalados distantes dos módulos, devido a isso é necessário o uso de cabos de extensão com conectores MC4 macho e fêmea nas extremidades, para realizar a conexão dos *strings* ao inversor.

Existem inversores que possuem quatro entradas para *strings*. Caso o sistema fotovoltaico projetado apresente um número maior de *strings* em paralelo, deve ser feito o uso de conectores auxiliares para o paralelismo ou de uma caixa de conectores chamada de *string box* (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

#### **6.4.1.4 Rastreamento do ponto de máxima potência – MPPT**

Esse recurso está presente em todos os inversores para a conexão à rede elétrica disponíveis no mercado.

Tem como objetivo garantir que os módulos operem em seu ponto de máxima potência, qualquer que seja ele, independente das condições de operação. Como as condições de operação dos módulos fotovoltaicos (radiação solar e temperatura) mudam aleatoriamente durante o funcionamento do inversor, a estratégia de MPPT é necessária em sistemas conectados à rede para maximizar constantemente a produção de energia, proporcionando o maior rendimento possível do sistema.

O MPPT funciona com um algoritmo simples, que consiste em perturbar a operação dos módulos, alterando intencionalmente a tensão nos seus terminais, e observar o que acontece com a potência fornecida.

Os métodos MPPT são vulneráveis a presença de sombras parciais nos módulos fotovoltaicos, podendo comprometer a eficiência global do sistema conectado à rede elétrica.

#### **6.4.1.5 Número de entradas independentes com MPPT**

Os inversores podem ser equipados com um ou mais sistemas de MPPT (rastreamento do ponto de máxima potência).

Todos inversores que são utilizados em sistemas conectados à rede possuem MPPT, eles são preparados para maximizar a potência fornecida pelos módulos fotovoltaicos, fazendo-os operar constantemente em seu ponto de máxima potência, independentemente das condições que afetam o desempenho e alteram a curva característica de corrente e tensão do conjunto de módulos.

Inversores com recurso de múltiplas entradas com MPPT têm a capacidade de otimizar a produção de energia de modo independente para vários conjuntos de módulos fotovoltaicos.

Por exemplo, se um conjunto de *strings* esteja sobre efeito de sombreamento, os demais que estão conectados ao outro sistema de MPPT continuam operando normalmente em seu ponto de máxima potência. Esses inversores com múltiplos sistemas de MPPT tornam os sistemas fotovoltaicos mais eficientes (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

#### **6.4.1.6 Tensão de operação na conexão com a rede**

Em geral esse valor é especificado pelo fabricante e vai variar de acordo com a região em que o equipamento será comercializado.

Antes da compra do inversor com objetivo de conexão à rede, deve-se consultar o fabricante para saber se o equipamento é adequado para a região onde ele será instalado.

#### **6.4.1.7 Frequência da rede elétrica**

Os fabricantes disponibilizam inversores em 50 Hz e 60 Hz, essa característica vai variar de acordo com o país onde ele será comercializado. Como no Brasil a rede elétrica opera em 60 Hz, os inversores de 50 Hz não devem ser utilizados, pois não são adequados para os parâmetros da nossa rede elétrica e não oferecem segurança de operação necessária nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

#### **6.4.1.8 Distorção da corrente injetada na rede**

Os inversores devem apresentar esse valor nas suas especificações, pois geralmente as normas permitem uma distorção harmônica de até 5% na forma de onda da corrente que será injetada na rede elétrica.

#### **6.4.1.9 Grau de proteção**

O grau de proteção IP (*Ingress Protection*) classifica e avalia o grau de proteção de um equipamento e fornece informações sobre a sua capacidade de operar em ambientes que possam ocorrer contato de partes energizadas sem isolamento, proteção contra entrada de poeira e contato acidental de água em carcaças mecânicas e invólucros elétricos.

Como os inversores para sistemas fotovoltaicos são desenvolvidos para operar em ambientes agressivos, expostos ao tempo, eles necessitam de uma proteção diferenciada. Em algumas aplicações os inversores podem ser instalados em locais fechados, mas normalmente são instalados em áreas externas, próximos aos módulos fotovoltaicos. Normalmente em ambientes desabrigados se estabelece um grau de proteção IP54, ou melhor, e para ambientes

abrigados IP20, ou melhor. A proximidade com os módulos diminui as perdas que ocorrem em cabos de grandes comprimentos.

Os inversores devem estar sempre em locais protegidos de chuva e exposição direta ao Sol, mesmo que possuam um grau de proteção elevado. O aquecimento excessivo desse equipamento devido à incidência de radiação solar reduz sua vida útil e sua eficiência.

#### **6.4.1.10 Temperatura de operação**

O inversor é especificado para operar em uma determinada faixa de temperatura, como todo equipamento eletroeletrônico. Nas especificações do equipamento deve ser citada a temperatura máxima do local da instalação do inversor, pois a temperatura de operação afeta sua eficiência. A sua dissipação de calor por convecção natural deve ser especificada, e o local de instalação deve possuir ventilação adequada.

#### **6.4.1.11 Umidade relativa do ambiente**

Inversores fotovoltaicos para conexão à rede podem falhar em ambientes com elevada umidade, como qualquer equipamento eletroeletrônico. Em regiões litorâneas e amazônicas, onde há um alto índice de umidade, deve-se considerar a instalação dos inversores em locais fechados e secos.

#### **6.4.1.12 Consumo de potência sem carga (permanente, autoconsumo, consumo em *stand by*)**

Mesmo não operando, o inversor consome energia. Esse consumo está relacionado ao funcionamento dos circuitos internos do equipamento mesmo quando nenhuma carga está sendo alimentada. Este fato acontece quando existe tensão nos módulos fotovoltaicos, mas por algum motivo o inversor está desligado.

À noite, quando os módulos não fornecem energia, o inversor é desligado automaticamente e apenas suas funções mínimas permanecem ativas, consumindo pouca energia (CRESESB, 2014).

#### **6.4.1.13 Potência de corrente contínua na entrada**

Nas especificações dos inversores são apresentados dois valores de potência expressos em Watts [W], um para a entrada do inversor (lado CC) e um para o lado de saída (lado CA).

Há a possibilidade de conectar ao inversor, conjuntos de potências ligeiramente maiores ou menores. Caso o inversor seja conectado a um conjunto de potência menor, o inversor fica

subutilizado. Por outro lado, com potências maiores o inversor é utilizado em seu limite de potência e os módulos estarão sendo subutilizados.

#### **6.4.1.14 Potência de corrente alternada na saída**

É o valor da potência CA de saída especificada pelo fabricante, é a máxima potência que o inversor pode injetar na rede elétrica. Essa potência está relacionada com o valor da tensão de operação do inversor e a máxima corrente suportada na conexão com a rede elétrica.

#### **6.4.1.15 Rendimento**

O rendimento é um parâmetro muito importante do inversor, como qualquer equipamento que processa energia elétrica. O rendimento é a relação entre a potência de entrada e potência de saída do equipamento. Um bom inversor possui um rendimento acima de 90%.

### **6.4.2 Recursos e funções dos inversores**

Existem alguns recursos que devem ser levado em consideração no momento de escolher o inversor que será utilizado em sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

#### **6.4.2.1 Chave de desconexão de corrente contínua**

Chave manual que pode ser acionada pelo usuário para desconectar os módulos fotovoltaicos do circuito inversor.

Essa chave é necessária quando é necessário realizar algum procedimento de manutenção no sistema, essa chave garante que os módulos não estarão alimentando o inversor, com isso evita que sejam desfeitas as conexões dos cabos elétricos entre os módulos e inversores.

#### **6.4.2.2 Detecção de ilhamento e reconexão automática**

Essa é uma função necessária e obrigatória em inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Essa função é obrigatória por questões de segurança de pessoas, equipamentos e instalações em situações de interrupção de fornecimento de energia da rede de energia elétrica.

Em uma situação em que a instalação se encontra ilhada, se não houver um sistema anti-ilhamento para fazer a desconexão do inversor, o sistema fotovoltaico pode continuar alimentando sozinho os consumidores locais, energizando a rede, o que não é permitido, pois há riscos para pessoas que realizam manutenção na rede ou para outros equipamentos que estão conectados à mesma rede.

Caso a instalação local esteja ligada a um sistema de microrrede, com a presença de um inversor próprio para sistemas autônomos, isolado da rede pública, a instalação pode

continuar sendo alimentada por esse inversor, mas o inversor conectado à rede deve ser desconectado ou desligado.

O sistema de anti-ilhamento deve ser capaz de perceber rapidamente a ocorrência de falhas da rede elétrica ou desligamento intencional programado, com o uso de técnicas sofisticadas, a ausência de alimentação da rede elétrica e automaticamente desligar ou desconectar o inversor.

## 6.5 Caixa de strings

Os *strings* de um conjunto fotovoltaico podem ser ligados entre si através de uma caixa de conexões, geralmente denominada *string box* ou caixa de *strings*, que pode ser montada com componentes encontrados no mercado ou pode ser uma caixa pré-fabricada.

Essa caixa deve ser protegida contra intempéries, possuindo um grau de proteção IP54, no mínimo, e seus terminais positivo e negativo devem estar bem separados e identificados em seu interior.

Para proteção dos módulos e cabos contra sobrecargas e correntes reversas, são usados fusíveis de *strings* em todos os condutores ativos (positivos e negativos).

Se não forem utilizados fusíveis de proteção, os condutores devem ser dimensionados para a máxima corrente de curto dos módulos fotovoltaicos.

Dentro da caixa de *strings* pode conter diodos de bloqueio em série com os *strings*. Esses diodos tem a função de impedir uma corrente elétrica de circular no sentido contrário ao sentido normal da corrente dos módulos, evitando danos ao painel. Com esses diodos instalados, o painel continuará funcionando no caso de curto-circuito ou sombreamento em um dos *strings*. Sem os diodos, uma corrente pode passar no sentido inverso através da fileira afetada pela sombra.

Atualmente o uso de diodos de bloqueio não é recomendável, pois não se consegue perceber com facilidade a existência de falhas nos painéis e em suas conexões, pois os diodos permitem que o restante do sistema continue funcionando normalmente. Estudos e experiências práticas demonstram que somente os fusíveis em série com os *strings* são suficientes para a proteção dos sistemas fotovoltaicos (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

## 6.6 Quadro de proteção de corrente contínua (String Box CC)

O quadro de proteção de corrente contínua, além de possuir fusíveis para a conexão dos *strings*, possui também uma chave de desconexão CC e o dispositivo de proteção de surto.

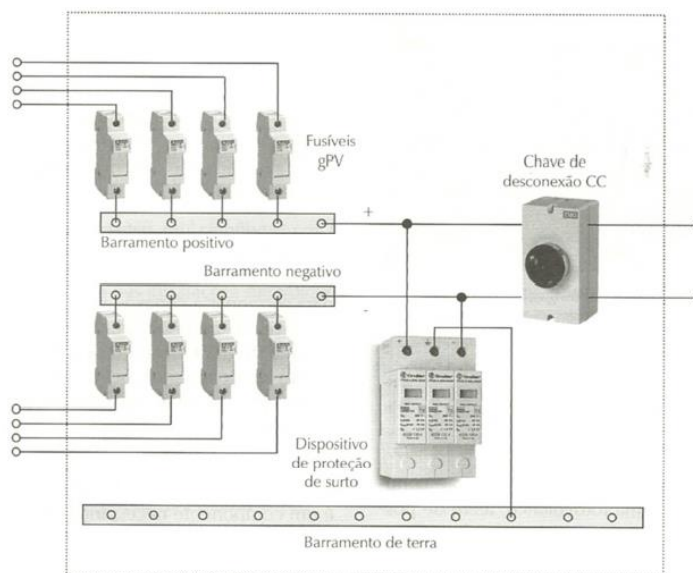
Esse quadro pode ter a função da caixa de *strings*. No mesmo quadro deve conter o barramento de aterramento, necessário para coletar as ligações à terra das estruturas metálicas e carcaça dos módulos fotovoltaicos.

A chave de desconexão é necessária para desconectar os módulos em caso de manutenção nas instalações e nos inversores. As chaves empregadas nessa aplicação devem suportar os níveis de tensão presente nos sistemas fotovoltaicos e ter capacidade de interrupção de arco elétrico em corrente contínua. Não se deve utilizar chaves de corrente alternada nestes casos.

O dispositivo de proteção de surto (DPS) é um componente necessário em sistemas fotovoltaicos, para a proteção dos cabos e equipamentos contra sobretensões ocasionadas por descargas atmosféricas. No lado CC dos sistemas fotovoltaicos, devem ser empregados dispositivos projetados especialmente para operar em circuitos de corrente contínua.

A barra de aterramento do quadro de proteção pode ser conectada à terra ou ao condutor equipotencial da instalação elétrica, conforme o tipo de aterramento que está sendo empregado na instalação (VILLALVA e GAZOLI, 2012). A Figura 21 mostra um quadro de proteção de corrente contínua de uma instalação fotovoltaica.

Figura 21 – Quadro de proteção de corrente contínua da instalação fotovoltaica



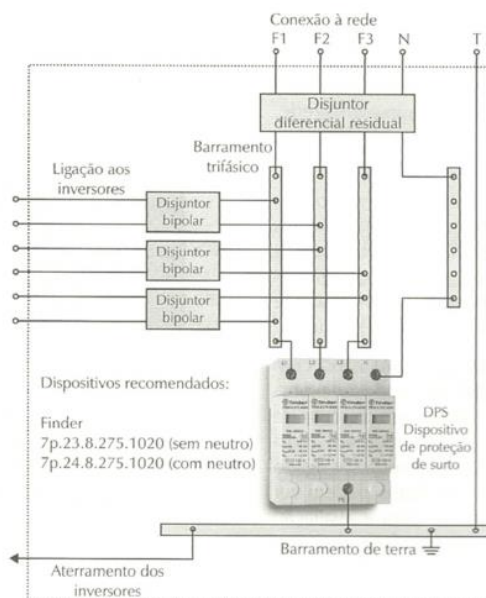
Fonte: Villalva e Gazoli (2012).

## 6.7 Quadro de proteção de corrente alternada

O quadro de proteção de corrente alternada, faz a conexão entre os inversores do sistema fotovoltaico e a rede elétrica. O método de dimensionamento e os dispositivos utilizados são

semelhantes aos empregados em instalações elétricas convencionais de baixa tensão. Na Figura 22 é apresentado o quadro de proteção CA para sistemas trifásicos, onde os inversores são conectados às fases do sistema e não há neutro da instalação.

Figura 22 – Quadro de proteção de corrente alternada da instalação fotovoltaica



Fonte: Villalva e Gazoli (2012).

É recomendado que o neutro da instalação, mesmo não sendo usado na conexão aos inversores, seja conectado ao DPS. Observa-se a presença de um disjuntor diferencial residual (DDR) na entrada. O aterramento pode variar de uma instalação para outra. Existem casos em que o neutro do sistema está aterrado, em outros não. Há casos em que a ligação à terra do lado CA será unificada com a ligação à terra do lado CC.

O mais recomendado é a equipotencialização da instalação com a conexão unificada de todos os barramentos e condutores da ligação à terra, tanto do lado CA quanto no lado CC.

Neste quadro observa-se a presença de um DPS trifásico usado para proteger a instalação e o lado de corrente alternada dos inversores. É recomendada a instalação do DPS, pois no Brasil há um elevado índice de descargas atmosféricas.

## 6.8 Medidores de energia

Os medidores de energia podem ser instalados na conexão com a rede elétrica, entre o disjuntor de entrada do quadro de proteção CA do sistema fotovoltaico e o ponto de conexão com a rede, para monitorar a produção de energia do sistema fotovoltaico.

O medidor apresentado na Figura 23 foi desenvolvido para implantação em projetos piloto e em larga escala, essa linha de medidores inteligentes SMW possui versões monofásica e polifásica, possui módulos de comunicação integrados com vários meios físicos e protocolos, e pode ser configurada de acordo com a necessidade.

Figura 23 – Medidor inteligente SMW100 da WEG



Fonte: WEG (2017).

## 7 DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA

### 7.1 Avaliação do recurso solar

Nesta etapa do projeto foi realizada a quantificação da radiação solar global incidente sobre o painel fotovoltaico no local da instalação, em uma residência localizada no município de Piúma (ES). Como não há dados de radiação disponíveis para o dimensionamento do sistema neste local, foi realizada uma consulta no software Radiasol 2 e site do Cresesb.

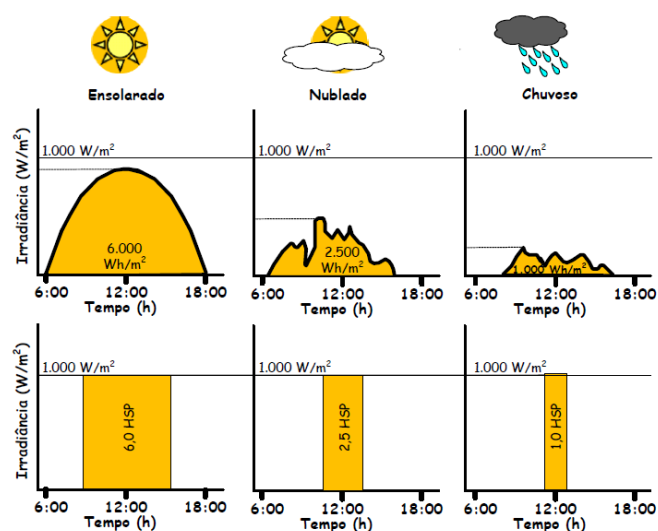
Os valores de radiação solar podem ser especificados de várias formas, podendo ser em valores instantâneos do fluxo de potência ou valores de energia por unidade de área conhecidos como irradiância e irradiação, respectivamente. O mais comum é obter esses dados em valores médios mensais para energia acumulada ao longo de um dia.

Na avaliação do recurso solar deve-se ignorar os efeitos de variação da irradiância a cada instante e considerar a totalidade da energia elétrica convertida em intervalos horários. Devido a uma forte linearidade entre a geração de energia e a irradiância horária, este conceito pode ser estendido, gerando uma forma conveniente de expressar o valor acumulado de energia



solar ao longo de um dia: o número de Horas de Sol Pleno (HSP). Esta grandeza apresenta o número de horas que a irradiância solar deve permanecer constante e igual a  $1 \text{ kW/m}^2$ , de forma que a energia resultante seja equivalente à energia disponibilizada pelo Sol no local da instalação, acumulada ao longo de um dia (PINHO *et al.*, 2008). A Figura 24 ilustra o significado desse conceito para três dias com diferentes comportamentos de irradiância.

Figura 24 – Dias com diferentes valores de HSP



Fonte: Pinho *et al.* (2008).

Para a presente pesquisa e para realização dos cálculos de dimensionamento, foram utilizados os valores de HSP do município de Cachoeiro de Itapemirim conforme apresentados na Tabela 2, sendo o valor médio utilizado para o estudo foi de  $4,74 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$ . O mesmo foi utilizado devido à proximidade do município de Piúma e possuir dados disponíveis. Foi realizada a comparação entre os dados do software Radasol 2 (2017) com os dados fornecidos pelo CRESESB (2017).

Tabela 2 - Irradiação diária média

| Mês                            | Jan  | Fev  | Mar  | Abr  | Mai  | Jun  | Jul  | Ago  | Set  | Out  | Nov  | Dez  | Média |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| <b>Irradiação (kWh/m².dia)</b> | 6,05 | 5,76 | 5,46 | 4,38 | 3,93 | 3,57 | 3,88 | 4,30 | 4,35 | 4,85 | 4,88 | 5,46 | 4,74  |

Fonte: Radasol 2 (2017).

## 7.2 Avaliação do espaço físico da instalação

A localização onde os painéis fotovoltaicos serão instalados pode ser determinante para o seu desempenho. O local escolhido para a instalação do projeto será em uma área de  $143,00 \text{ m}^2$  no

telhado de uma residência localizada na cidade de Piúma, no estado do Espírito Santo. A vizinhança da residência é predominantemente composta por casas de um andar, conforme Figura 25. O motivo da sua escolha foi devido a uma grande superfície livre e não possuir nenhuma estrutura próxima que possa causar sombreamento nas placas.

Figura 25 – Local onde será instalado o sistema fotovoltaico



Fonte: Google Earth (2017)

### 7.3 Dimensionamento do gerador fotovoltaico

Para o dimensionamento do gerador fotovoltaico foi realizado o levantamento do consumo mensal de energia do local do projeto, no período entre os meses de setembro de 2016 a agosto de 2017, apresentado na Tabela 3

Tabela 3 - Consumo mensal obtido através da conta de energia

| Mês                  | Set | Out | Nov | Dez | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>Consumo (kWh)</b> | 322 | 321 | 357 | 349 | 383 | 352 | 411 | 358 | 372 | 341 | 345 | 314 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi realizado o cálculo da média de consumo de energia da residência, resultando em 364,64 kWh/mês. Com base na média de consumo mensal, foi escolhido o módulo fotovoltaico da

marca YINGLI SOLAR, modelo YL240P-29b (YINGLI SOLAR, 2017), sendo seus dados técnicos apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Dados técnicos do painel fotovoltaico

| Características elétricas   |                     |
|-----------------------------|---------------------|
| Máxima Potência             | 240 Wp              |
| Tensão de Máxima Potência   | 29,3 V              |
| Corrente de Máxima Potência | 8,18 A              |
| Tensão de Circuito Aberto   | 37,5 V              |
| Corrente de Curto Circuito  | 8,75 A              |
| Tensão Máxima do Sistema    | 1000 V              |
| Eficiência do Módulo        | 14,8 %              |
| Área                        | 1,64 m <sup>2</sup> |

Fonte: Yingli Solar (2017).

Após a escolha do módulo fotovoltaico, foi feita a estimativa de energia diária produzida pelo mesmo, utilizando a equação abaixo:

$$E_P = E_S \cdot A_M \cdot \eta_M \quad (6)$$

Onde:

$E_P$  (kWh) – Energia produzida pelo módulo diariamente;

$E_S$  (kWh/m<sup>2</sup>/dia) – Insolação diária;

$A_M$  (m<sup>2</sup>) – Área da superfície do módulo;

$\eta_M$  – Eficiência do módulo.

Para o módulo escolhido, obtivemos o valor de  $E_P$  mostrado abaixo.

$$E_P = 4,74 \cdot 1,624 \cdot 14,8\% = 1,139 \text{ kWh}$$

A partir do cálculo de energia produzida diariamente por cada módulo, foi definido o número de módulos a serem instalados no sistema, conforme equação abaixo.

$$N_M = \frac{E_C}{E_P} \quad (7)$$

Onde:

$N_M$  (unidade) – Número de módulos;

$E_C$  (kWh) – Consumo diário de energia.

Para o sistema, obtivemos o valor de  $N_M$  mostrado abaixo.

$$N_M = \frac{10,488}{1,139} = 9,21$$

Desta forma, optou-se por utilizar nove módulos de 240 Wp para atender a demanda deste consumidor. O módulo escolhido da marca Yingli Solar é composto por 60 células e possui uma área de aproximadamente 1,64 m<sup>2</sup>. Para essa quantidade de módulos, será necessário dispor de uma área para captação solar de 14,76 m<sup>2</sup>, área que está dentro do espaço que a residência possui para a instalação dos módulos.

Após realizar o dimensionamento de geração de energia para cada painel, foi feita uma análise da quantidade de energia que será gerada pelo conjunto em um ano. A Tabela 4 apresenta os valores de consumo e geração após a instalação do sistema fotovoltaico.

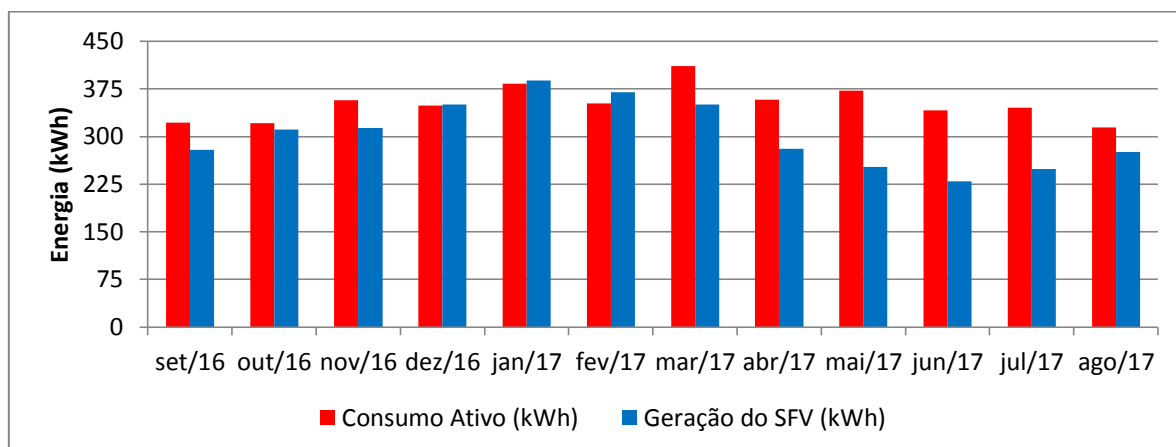
Tabela 4 - Comparativo entre o Consumo e Geração

| Mês/Ano              | set/16 | out/16 | nov/16 | dez/16 | jan/17 | fev/17 | mar/17 | abr/17 | mai/17 | jun/17 | jul/17 | ago/17 |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Consumo (kWh)</b> | 322    | 321    | 357    | 349    | 383    | 352    | 411    | 358    | 372    | 341    | 345    | 314    |
| <b>Geração (kWh)</b> | 279    | 311    | 313    | 350    | 388    | 370    | 350    | 281    | 252    | 229    | 249    | 276    |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi realizada a análise dos dados de consumo e geração de energia nesse sistema e verificou-se que, de acordo com o Gráfico 1, durante os meses do período de verão, os valores de geração ultrapassam o consumo da residência. Por outro lado, nas outras estações do ano a quantidade de energia gerada pelo sistema fotovoltaico é menor que a consumida na residência.

Gráfico 1 - Consumo e geração do SFV



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 7.4 Cabeamento lado CC

Para o dimensionamento do cabeamento do lado CC da instalação foi utilizada a máxima corrente de saída dos módulos fotovoltaicos, que é de 8,75 A.

Esses cabos devem ter uma tensão de isolamento entre 300 V e 1000 V e sua capacidade de condução de corrente deve ser 25% superior à corrente de curto-circuito do módulo em STC:

$$I_{CABOS} \geq I_{SC,STC} \cdot 1,25 \quad (8)$$

$$I_{CABOS} \geq 8,75 \cdot 1,25 \rightarrow I_{CABOS} \geq 10,94 \text{ A}$$

De acordo com o critério utilizado, o cabo que se adequa é o de 0,5 mm<sup>2</sup>. O fabricante dos módulos indica que seja utilizado um cabo de 4 mm<sup>2</sup>.

Devemos verificar se o cabo de 4 mm<sup>2</sup> atende as exigências do método da queda de tensão, que não pode ultrapassar 7% a partir dos terminais de saída do gerador. Segue abaixo a equação para verificar a queda de tensão no circuito entre o inversor e o medidor.

$$\Delta V_{unit} = \frac{e(\%) \cdot V}{I_p \cdot l} \quad (9)$$

Onde:

$\Delta V_{unit}$  – Valor de queda de tensão unitária;

$e(\%)$  – Queda de tensão admissível;

$V$  – Tensão do circuito;

$I_p$  – Corrente de projeto;

$l$  – Comprimento do circuito.

Realizando os cálculos para a queda de tensão, obtivemos o seguinte resultado:

$$10,7 = \frac{e(\%) \cdot 187,50}{8,75 \cdot 0,005} \rightarrow e(\%) = 0,250$$

Pelo método da queda de tensão observamos que o condutor de  $4\text{mm}^2$  está dentro da tolerância de 7%.

## 7.5 Quadro de proteção CC

O quadro de proteção CC possui três componentes básicos: fusíveis, chave de desconexão CC e DPS. Como o projeto em questão possui apenas uma *string* de painéis, não será necessário utilizar fusíveis de proteção.

### 7.5.1 Chave de desconexão CC

A chave de desconexão CC é necessária por motivos de segurança, quando os painéis devem ser desligados para a realização de algum tipo de manutenção. Foi escolhida para a instalação foi a C60NA-DC da fabricante Schneider Eletric suportando até 20 A e uma tensão de 1000 V<sub>CC</sub>.

### 7.5.2 Dispositivo de proteção contra surto

O dispositivo de proteção contra surto tem a função de desviar correntes provenientes de um surto para a terra e limitar sobretensões transientes, por exemplo, uma descarga atmosférica.

O dispositivo de proteção contra surto utilizado no projeto será o DPS 08275 da fabricante STECK suportando o máximo de tensão de 350 V.

## 7.6 Inversor de frequência

A escolha do inversor está diretamente ligada à potência do gerador fotovoltaico, das características elétricas do módulo escolhido para a geração de energia elétrica, das características ambientais do local e da topologia de instalação escolhida. O inversor selecionado para o projeto foi de 2,50 kW da marca Fronius, modelo Galvo 2.5-1, com tensão máxima de entrada de 550V, uma temperatura de operação na faixa de -25°C a 50°C, possui MPPT com tensão de operação no intervalo 165V a 440V.

Como os inversores conectados à rede, em alguns casos estão sujeitos a altas temperaturas, por estarem expostos à radiação solar, é recomendada uma potência igual ou superior do gerador fotovoltaico, por isso foi realizada a escolha do inversor de 2,50 kW.

### 7.6.1 Tensão de entrada do inversor

A tensão na entrada dos inversores será a soma das tensões dos módulos associados em série. O cálculo de máxima tensão deve ser realizado com muito cuidado, pois ela nunca deve ser ultrapassada, sendo este um dos maiores riscos de danificar o inversor.

A máxima tensão do sistema ocorre quando o painel fotovoltaico está em circuito aberto ( $V_{OC}$ ) e em baixas temperaturas. A equação 10 mostra o cálculo do número máximo de módulos em série que pode ser conectado ao inversor pela razão da máxima tensão de entrada do inversor e da tensão de circuito aberto para as baixas temperaturas de inverno. O número máximo de módulos em série também deve respeitar a tensão máxima suportável pelo módulo.

$$N^{\circ} \text{módulos}_{\text{série}} \cdot V_{OCmin} < Vi_{max} \quad (10)$$

Onde:

$V_{OCmin}$  (V) – Tensão em circuito aberto ( $V_{OC}$ ) de um módulo fotovoltaico na menor temperatura de operação prevista;

$Vi_{max}$  (V) – Máxima tensão CC admitida pela entrada do inversor.

Para determinar o valor de tensão do módulo na menor temperatura de operação, será utilizada a seguinte fórmula:

$$V_{OC}(T) = V_{OC_{stc}} \cdot [1 + \beta \cdot (T - 25)] \quad (11)$$

Onde:

$V_{OC}(T)$  (V) – Tensão em circuito aberto de um módulo fotovoltaico para uma determinada temperatura de operação;

$V_{OC_{stc}}$  (V) – Tensão em circuito aberto de um módulo fotovoltaico para condição padrão;

$\beta$  – Coeficiente de variação de tensão de circuito aberto;

$T$  (°C) – Temperatura para cálculo.

Utilizando o valor de  $\beta$  de -2,3 mV/célula indicado nas características do painel escolhido e considerando a menor temperatura da cidade de Piúma de 15°C (CLIMATE-DATA, 2017), a maior tensão de entrada no inversor será de:

$$V_{OC}(T) = 37,5 \cdot [1 + (-0,0023) \cdot (15 - 25)] = 38,36 \text{ V}$$

Considerando o valor de tensão de circuito aberto acima, será feita a verificação da tensão de entrada no inversor:

$$5 \cdot 38,36 < 550 \rightarrow 191,8 \text{ V} < 550 \text{ V}$$

## 7.7 Cabeamento lado CA

Para o dimensionamento do cabeamento do lado CA da instalação, deverão ser atendidos as exigências da NBR5410 (ABNT, 2004). O dimensionamento utilizou os critérios de capacidade de corrente, queda de tensão e método de instalação.

A corrente utilizada nos cálculos foi de 12,1 A, que é a máxima corrente de saída do inversor escolhido.

De acordo com o critério de capacidade de corrente deve-se utilizar o condutor que suporte a máxima corrente de saída do inversor. De acordo com a NBR5410 (ABNT, 2004), devemos utilizar os fatores de correção e definir qual a bitola do condutor que será empregada.



$$I_Z = I_C \cdot FCT \cdot FCR \cdot FCA \quad (12)$$

Onde:

$I_Z$  – Capacidade de condução de corrente dos condutores corrigida, aplicando-se os fatores de correção;

$I_C$  – Capacidade de condução de corrente dos condutores, conforme Tabela da NBR 5410 (ABNT, 2004);

$FCT$  – Fator de correção de temperatura;

$FCR$  – Fator de correção de resistência térmica do solo;

$FCA$  – Fator de correção de agrupamento.

Os fatores de correção apresentados acima são tabelados e apresentados na NBR5410 (ABNT, 2004), utilizando esses valores para a correção da corrente, foi obtido o seguinte resultado:

$$I_Z = 13 \cdot 0,96 \cdot 1 \cdot 1 = 12,48 \text{ A}$$

Para este valor de corrente a bitola do cabo a ser utilizada é de  $0,5 \text{ mm}^2$ , porém o fabricante do inversor indica que seja utilizado um cabo de  $4,0 \text{ mm}^2$ , devido a essa exigência do fabricante, será escolhido o cabo de  $4,0 \text{ mm}^2$ .

Foi verificado se o cabo de  $4,0 \text{ mm}^2$  atende as exigências do método da queda de tensão, que não pode ultrapassar 7,0 % a partir dos terminais de saída do gerador.

Segue abaixo a equação para verificar a queda de tensão no circuito entre o inversor e o medidor. Realizando os cálculos para a queda de tensão, obtivemos o seguinte resultado:

$$10,7 = \frac{e(\%) \cdot 220}{12,1 \cdot 0,01} \rightarrow e(\%) = 0,589$$

Pelo método da queda de tensão foi observado que o condutor de  $4,0 \text{ mm}^2$  está dentro da tolerância de 7,0 %.

## 7.8 Quadro de proteção CA

O quadro de proteção CA faz a conexão entre o inversor do sistema fotovoltaico e a rede elétrica. No quadro serão instalados um disjuntor termomagnético e o dispositivo de proteção contra surto.

### 7.8.1 Disjuntor termomagnético

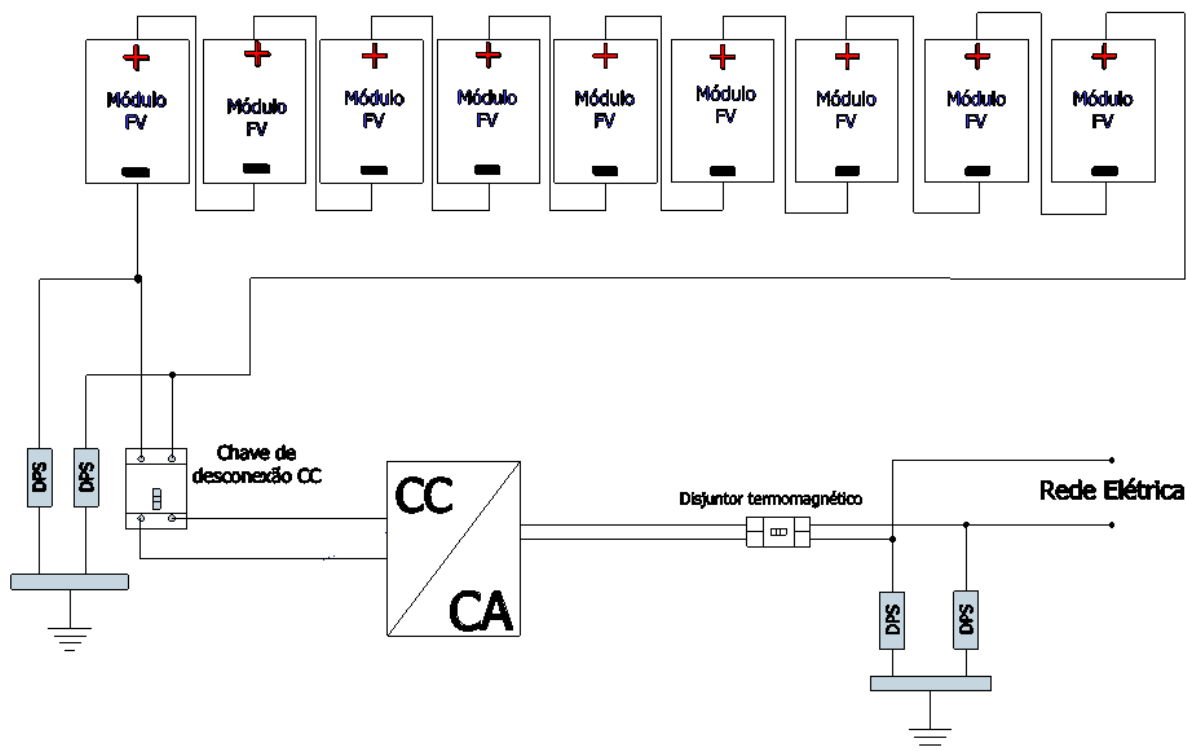
A corrente nominal de saída do lado CA do inversor é de 12,1 A. Logo o disjuntor que será utilizado terá que suportar 16,0 A, segundo especificações da NBR 5410 de 2004 (ABNT, 2004). O disjuntor que será utilizado no quadro CA para proteção será da marca General Electric, modelo GE32B16, bipolar com corrente nominal de 16,0 A.

### 7.8.2 Dispositivo de proteção contra surto

O dispositivo de proteção contra surto tem a função de desviar correntes provenientes de um surto para a terra e limitar sobretensões transientes, por exemplo, uma descarga atmosférica. O dispositivo de proteção contra surto utilizado no projeto será o DPS 08275 da fabricante STECK suportando o máximo de tensão de 350 V, acima desse valor toda a sobretensão será direcionada para a terra.

A Figura 26 está apresentando o diagrama unifilar simplificado do sistema

Figura 26 - Diagrama unifilar simplificado do SFV



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 7.9 Viabilidade econômica

A escolha do módulo fotovoltaico e todos os acessórios se basearam em fatores como o custo, durabilidade e reputação do fabricante. A seguir no Quadro 3, são apresentados os equipamentos e acessórios escolhidos para o dimensionamento do projeto proposto e o valor.

Quadro 3 - Equipamentos, quantidades e valores unitários dos componentes escolhidos

| Componente                              | Preço        | Quantidade | Total                |
|-----------------------------------------|--------------|------------|----------------------|
| <b>Módulo (unidade)</b>                 | R\$ 889,00   | 9          | R\$ 8.001,00         |
| <b>Inversor 2,50 kW (unidade)</b>       | R\$ 5.154,00 | 1          | R\$ 5.154,00         |
| <b>Cabo solar #4 (mm2)</b>              | R\$ 12,20    | 20         | R\$ 244,00           |
| <b>Cabo #4 (mm2)</b>                    | R\$ 1,57     | 10         | R\$ 15,70            |
| <b>Chave de desconexão CC (unidade)</b> | R\$ 289,00   | 1          | R\$ 289,00           |
| <b>Disjuntor 16A (unidade)</b>          | R\$ 28,34    | 1          | R\$ 28,34            |
| <b>DPS 350 V (unidade)</b>              | R\$ 62,00    | 4          | R\$ 248,00           |
| <b>Conectores MC4 par (unidade)</b>     | R\$ 23,80    | 1          | R\$ 23,80            |
| <b>Suporte 4 painéis (unidade)</b>      | R\$ 1.250,00 | 2          | R\$ 2.500,00         |
| <b>Custo de instalação</b>              | R\$ 2.475,00 | -          | R\$ 2.475,00         |
| <b>Técnico e projeto</b>                | R\$ 1.650,00 | -          | R\$ 1.650,00         |
| <b>Custo de manutenção (ano)</b>        | R\$ 165,00   | 20         | R\$ 3.300,00         |
| <b>TOTAL</b>                            |              |            | <b>R\$ 23.928,84</b> |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do dimensionamento verificou-se que serão gastos R\$ 23.928,84 para a implantação do sistema na residência.

Na Tabela 5 está sendo apresentado o custo da energia durante um ano desconsiderando a instalação do sistema fotovoltaico, que será de R\$ 2.049,13.

Tabela 5 – Custo anual com energia sem a instalação do SFV

| <b>Mês/Ano</b> | <b>Consumo Ativo (kWh)</b> | <b>Valor da fatura (R\$)</b> |
|----------------|----------------------------|------------------------------|
| <b>ago/17</b>  | 314                        | 152,29                       |
| <b>jul/17</b>  | 345                        | 167,33                       |
| <b>jun/17</b>  | 341                        | 165,39                       |
| <b>mai/17</b>  | 372                        | 180,42                       |
| <b>abr/17</b>  | 358                        | 173,63                       |
| <b>mar/17</b>  | 411                        | 199,34                       |
| <b>fev/17</b>  | 352                        | 170,72                       |
| <b>jan/17</b>  | 383                        | 185,76                       |
| <b>dez/16</b>  | 349                        | 169,27                       |
| <b>nov/16</b>  | 357                        | 173,15                       |
| <b>out/16</b>  | 321                        | 155,69                       |
| <b>set/16</b>  | 322                        | 156,17                       |
| <b>TOTAL</b>   |                            | <b>2049,13</b>               |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 6 apresenta a quantidade de energia gerada anualmente pelo conjunto de módulos, considerando um tempo de vida útil dos módulos de 25 anos. No primeiro ano a quantidade de energia produzida pelo sistema com nove módulos será de 3.649 kWh, nos anos seguintes esse valor sofrerá uma ligeira queda, devido à queda de rendimento dos módulos.

De acordo com os dados técnicos do módulo escolhido, a cada ano o seu rendimento diminui em 0,672%.

Tabela 6 – Geração anual de energia após a instalação do SFV

| Ano | Geração (kWh) | Valor estimado da fatura (R\$) |
|-----|---------------|--------------------------------|
| 1   | 3649          | R\$ 279,25                     |
| 2   | 3625          | R\$ 291,15                     |
| 3   | 3600          | R\$ 302,96                     |
| 4   | 3576          | R\$ 314,69                     |
| 5   | 3552          | R\$ 326,35                     |
| 6   | 3528          | R\$ 337,93                     |
| 7   | 3505          | R\$ 349,42                     |
| 8   | 3481          | R\$ 360,85                     |
| 9   | 3458          | R\$ 372,19                     |
| 10  | 3434          | R\$ 383,46                     |
| 11  | 3411          | R\$ 394,65                     |
| 12  | 3388          | R\$ 405,77                     |
| 13  | 3366          | R\$ 416,82                     |
| 14  | 3343          | R\$ 427,78                     |
| 15  | 3321          | R\$ 438,68                     |
| 16  | 3298          | R\$ 449,50                     |
| 17  | 3276          | R\$ 460,25                     |
| 18  | 3254          | R\$ 470,93                     |
| 19  | 3232          | R\$ 481,53                     |
| 20  | 3210          | R\$ 492,07                     |
| 21  | 3189          | R\$ 502,53                     |
| 22  | 3167          | R\$ 512,93                     |
| 23  | 3146          | R\$ 523,25                     |
| 24  | 3125          | R\$ 533,50                     |
| 25  | 3104          | R\$ 543,69                     |

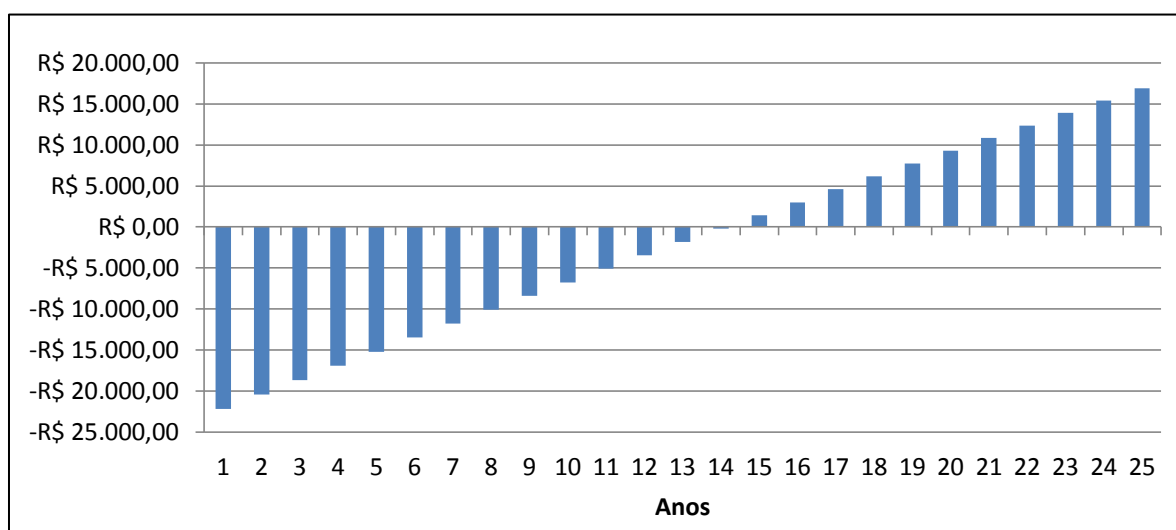
Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a instalação do sistema fotovoltaico o custo anual com a energia tende a aumentar com a perda do rendimento dos módulos.

Diante desses valores, podemos avaliar a diferença entre o custo de energia antes e após a instalação do SFV. Essa avaliação será feita considerando o custo inicial de implantação do SFV e o seu retorno financeiro a cada ano.

O Gráfico 2 apresenta a evolução do retorno financeiro que o consumidor terá ao longo dos 25 anos de vida útil dos módulos.

Gráfico 2 - Avaliação do tempo de retorno do investimento no SFV



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante os primeiros 14 anos, verificamos que o lucro obtido pela geração de energia elétrica do sistema fotovoltaico, está sendo exclusivamente o retorno do investimento realizado pelo consumidor. Após o 15º ano o consumidor passa a ter lucro com a instalação do sistema fotovoltaico.

## 8 CONCLUSÃO

O aumento da demanda de energia elétrica no Brasil faz com que o país tenha que buscar e investir em novas alternativas para o fornecimento da mesma. Diante da situação ambiental global, marcada por um histórico de catástrofes, mudanças climáticas e danos ambientais graves devido ao desenvolvimento humano, procura-se fontes que gerem pouco impacto ao meio ambiente e que seja economicamente viável. Dentro desta perspectiva, a energia solar, apesar de pouco explorada, apresenta-se como uma alternativa, considerando o bom potencial de utilização de energia solar no Brasil.

Neste trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o panorama da utilização de energia no país, recurso solar, energia solar fotovoltaica, módulo fotovoltaico e seus equipamentos acessórios e particularidades, e por fim o dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede para uma residência. A partir do dimensionamento foram escolhidos o gerador fotovoltaico, inversor e outros acessórios compatíveis com a demanda de energia para a residência em estudo. Foram necessários nove módulos de 240Wp.

Tomando como referência a bibliografia consultada e a análise dos dados obtidos durante o desenvolvimento do projeto, conclui-se que é imprescindível a realização de um estudo para definição da localização deste tipo de sistema, a fim de aproveitar melhor o recurso solar disponível ao longo de todo o ano.

No município de Piúma, local onde o estudo foi realizado, constatou-se que há ótimas condições para a instalação de um sistema de geração solar fotovoltaica, podendo gerar quantidade considerável de energia elétrica durante o ano.

Como foi apresentado, o custo de investimento para a implantação do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica foi de R\$ 23.928,84, sendo assim, com o valor de economia a cada ano calculado, dividido pelo valor total para aplicação do sistema fotovoltaico, é possível chegar à quantidade de anos necessária para ter o retorno do investimento. Dessa forma, em 15 anos o consumidor terá o retorno do investimento inicial.

De um modo geral, a fonte de energia solar fotovoltaica ainda não é um investimento acessível a qualquer pessoa, tendo em vista o seu custo de implantação, manutenção e operação, e seu retorno financeiro ocorre em longo prazo. Por outro lado, essa alternativa, caso aplicada, tornaria a residência mais sustentável, reduziria o consumo de energia e o valor pago mensalmente, colaboraria para preservação do meio ambiente.

Por fim, reforça-se a necessidade de que o governo adote mais medidas para o incentivo de pesquisa e desenvolvimento que levem ao aumento de eficiência das células e diminuição de custos, incentivo a implantação de sistemas fotovoltaicos e incentivos fiscais para pessoas físicas e jurídicas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA (ABINEE). **Propostas para Inserção de Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. 2012. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2017.

ABERLE, A. **Thin-film solar cells**. Thin Solid Films, v.517, 2009. p.4706-4710.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução n.º482 de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução n.º687 de 24 de novembro de 2015**. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2017.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA Elétrica (ANEEL). **Atlas de Energia Elétrica**. 2. ed., Brasília: 2005. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/download.htm>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**. 2017. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/PRODIST-M%C3%B3dulo3\\_Revis%C3%A3o7/ebfa9546-09c2-4fe5-a5a2-ac8430cbca99](http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/PRODIST-M%C3%B3dulo3_Revis%C3%A3o7/ebfa9546-09c2-4fe5-a5a2-ac8430cbca99)>. Acesso em: 20 mai. 2017.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Ranking das Tarifas**. 2017. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>>. Acesso em: 25 abr. 2017

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR IEC 62116**. Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Rio de Janeiro, 2012.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA. SÉRGIO Brito (CRESESB). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**, 2014.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO CRESESB, 2017. **Potência Solar - SunData**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/sundata/index.php>>. Acesso em: 20 ago. 2017.



CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO (CRESEB), 2017. **Radiação solar**. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=301](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=301)>. Acesso em: 16 abr. 2017.

CICLO VIVO. **Desenvolvimento**. 2017. Disponível em: <<http://ciclovivo.com.br/noticia/5-passos-para-ter-energia-solar-em-casa/>>. Acesso em: 10 mai. 2017.

CLIMATE-DATA. **Clima: Piúma**. 2017. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/location/27844/>>. Acesso em: 30 jun. 2017.

COSTA, H. J. S. **Avaliação do Fator de Dimensionamento do Inversor em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2010.

EDUARDO AQUINO. **Energia Solar**. 2017. Disponível em: <<http://www.eduardoaquino.com.br/energia-solar/>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

ELETROBRAS - CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. **Gestão Energética**. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <> . Acesso em:

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional – Ano Base 2011**: Resultados preliminares. Rio de Janeiro, 2012.

FERREIRA, M. J. G. **Inserção da energia solar fotovoltaica no Brasil**. 1993. 155f. Dissertação (Mestrado em Energia). Departamento de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

FRONIUS GALVO. **Especificações técnicas do Inversor Fronius Galvo Grid-Tie 2.5-1**. 2017. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/loja/inversor-fronius-galvo-2-5-1-2-500w.html>>. Acesso em: 26 de maio de 2017.

FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Centro de Documentação e Disseminação de Informações. **Normas de apresentação tabular**. 3. Ed. Rio de Janeiro, 1993.

GREEN, M. A.; RAFAELLE, R. P.; BURTON, T. M.; CONIBEER, G. **Achievements and challenges of solar electricity from photovoltaics**. In Handbook of Photovoltaic Science and Engineering [LUQUE, A.; HEGEDUS, S.]. 2 ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. p. 1-38.

GOOGLE EARTH. **Google Earth**. 2017. Disponível em: <<https://www.google.com.br/intl/pt-PT/earth/>> acesso em: 10 março 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **PBE – Orientações Gerais para fabricantes e importadores sobre a Regulamentação de Equipamentos para geração de energia fotovoltaica**. Disponível em: <[http://www2.inmetro.gov.br/pbe/pdf/guia\\_de\\_orientacoes\\_PBE\\_fotovoltaico.pdf](http://www2.inmetro.gov.br/pbe/pdf/guia_de_orientacoes_PBE_fotovoltaico.pdf)>.

LIMA, L. E. M.; AMARAL, P. F. S.; FILHO, A. B. Controle da estabilidade de equilíbrio para um robô quadrupede com uso de lógica nebulosa. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS, 7., 2008, Poços de Caldas. **Anais da Sétima Conferência Internacional de Aplicações Industriais**. CD-ROM.

MPPT SOLAR. **Ligação em série de mais painéis solares**. 2017. Disponível em: <<http://www.mpptsolar.com/pt/paineis-solares-em-serie.html>>. Acesso em: 30 mai. 2017.

NEOSOLAR. **Painel Solar Fotovoltaico**. 2017. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/painel-solar-fotovoltaico/>>. Acesso em: 13 abr. 2017.

OLIVEIRA FILHO, K. S.; SARAIVA, M. F. O. **Astronomia e Astrofísica**. 2ª. Ed. São Paulo, Brasil: Editora Livraria da Física, 2004.

PAINEIS FOTOVOLTAICOS. **Painéis policristalinos**. 2011. Disponível em: <<http://www.paineisfotovoltaicos.com/policristalinos.php>>. Acesso em: 13 abr. 2017.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F.R.; ABREU, S. L. e RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. INPE, 2009.

RADIASOL. **Radiasol 2**. 2017. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/45987>> acesso em: 10 abr. 2017.

REAL SOLAR. **Os sistemas**. 2017. Disponível em: <<http://real-solar.com/como-funciona.php>>. Acesso em: 28 abr. 2017.

RUTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. 2004. Laboratório de Energia Solar, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <<http://fotovoltaica.ufsc.br/sistemas/livros/livro-edificios-solares-fotovoltaicos.pdf>>. Acesso em: 24 fev. 2014.

SILVESTRI, A.F.; TAKASAKI, V.G. **Estudo de viabilidade para implantação de geração fotovoltaica em shopping centers na região de Curitiba**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. 101f. (Engenharia Industrial Elétrica Ênfase Eletrotécnica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. EPE: Rio de Janeiro, 2016 . Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Renovável%20-%20Online%2016maio2016.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2017.

UNIVERSIDAD DE JAÉN (UJAEN). **Tecnología de fabricación de la célula solar**. 2017. Disponível em: <[http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/03\\_celula/01\\_basico/3\\_celula\\_05.htm](http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/3_celula_05.htm)>. Acesso em: 12 abr. 2017.

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

VERA, L. H. **Programa computacional para dimensionamento e simulação de sistemas fotovoltaicos autônomos**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PEREIRA, E.B.; MARTINS, F.R.; ABREU, S.L.;  
RÜTHER, R.. **Atlas Brasileira de Energia Solar**. 1. ed. São José dos Campos, 2006.  
MERCADO LIVRE. **Conector Mc4 Para Painel Solar Macho E Fêmea (par)**. 2017.  
Disponível em: <[https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-708132550-conector-mc4-para-painel-solar-macho-e-fmeapar-\\_JM](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-708132550-conector-mc4-para-painel-solar-macho-e-fmeapar-_JM)>. Acesso em: 10 abr. 2017.

WEG. **Medidores Inteligentes de Energia**. 2017. Disponível em:  
<<http://old.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Controls/Medidores-Inteligentes-de-Energia/Linha-SMW>>. Acesso em: 15 abr. 2017

PINHO, J. et al. **Sistemas Híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia**. 1.ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

YINGLI SOLAR. **Folha de dados técnicos do painel YL240P-29b**. 2017. Disponível em:<  
[http://www.yinglisolar.com/assets/uploads/products/downloads/YGE\\_60\\_Cell\\_Series\\_EN.pdf](http://www.yinglisolar.com/assets/uploads/products/downloads/YGE_60_Cell_Series_EN.pdf)  
>. Acesso em: 26 de março de 2017.