

**MARINA APARECIDA PINTO**

**UTILIZAÇÃO DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS NO SEGMENTO  
RESIDENCIAL**

Guaratinguetá - SP

2015

MARINA APARECIDA PINTO

UTILIZAÇÃO DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS NO SEGMENTO  
RESIDENCIAL

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Rubens Alves Dias

P659u	<p>Pinto, Marina Aparecida Utilização de painéis solares fotovoltaicos no segmento residencial / Marina Aparecida Pinto – Guaratinguetá, 2015. 68 f : il. Bibliografia: f. 65-68</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015. Orientador: Prof. Dr. Rubens Alves Dias</p> <p>1. Energia solar 2. Geração de energia fotovoltaica 3. Energia - Fontes alternativas 4. Conversores de corrente elétrica I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 620.91</p>
-------	---

**MARINA APARECIDA PINTO**

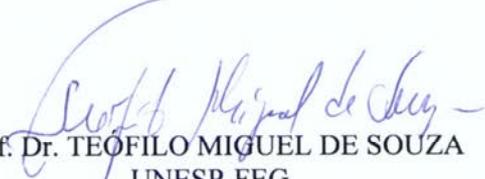
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
**“GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA”**

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. RUBENS ALVES DIAS  
Orientador/UNESP-FEG

  
Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA  
UNESP-FEG

  
Prof. Dr. JOSÉ FELICIANO ADAMI  
UNESP-FEG

**Dezembro de 2015**

De modo especial, dedico este trabalho aos meus pais, Márcio e Regiane, por todo o incentivo e apoio durante a realização deste trabalho e do curso de graduação.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por minha vida, saúde e persistência, que me permitiram a cada dia avançar um passo em busca da realização do sonho de se tornar Engenheira Eletricista.

Sou grata aos meus pais, Márcio e Regiane, principais provedores dessa conquista, a quem dedico todo o meu sucesso e felicidade. “Sem vocês, nada teria sido possível!”

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Rubens Alves Dias, por todo o conhecimento transmitido. Por toda compreensão, dedicação e paciência. Será para sempre um exemplo de pessoa e profissional. “Rubens, muito obrigada por tudo!”

Sou grata a minha família, avós, tios e primos, pelas orações e por todo o bem desejado. “Vocês fazem parte dessa vitória!”

Agradeço aos meus amigos e colegas, por toda a ajuda fornecida e momentos compartilhados. “Vocês farão muita falta!”

“Sucesso é conquistar aquilo que se deseja. Felicidade é gostar daquilo que se conquistou.”

Dale Carnegie

PINTO, M. A. **Utilização de painéis solares fotovoltaicos no segmento residencial.** 2015. 68 f. Trabalho de Graduação - Curso de Engenharia Elétrica, UNESP - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

## RESUMO

A fim de diversificar a matriz energética mundial e nacional, bem como reduzir os impactos nocivos ao meio ambiente, causados pela emissão de gases poluentes na atmosfera, a utilização de fontes de energia limpas e renováveis apresenta-se como uma boa alternativa. Este trabalho aborda o uso da energia solar fotovoltaica, uma fonte que apresenta tais características. O sistema fotovoltaico objeto de estudo é do tipo distribuído conectado à rede, no segmento residencial. É informado a respeito de sua utilização no âmbito mundial e nacional. Apresentam-se também suas características, os circuitos elétricos e eletrônicos que compõem os equipamentos necessários ao seu funcionamento e o projeto de um sistema a ser instalado em uma residência.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia solar fotovoltaica. Sistemas fotovoltaicos distribuídos conectados à rede. Módulos fotovoltaicos. Conversor CC-CA.

PINTO, M. A. **The use of solar panels in the residential segment.** 2015. 68 f. Graduation work - Electrical Engineering Course, UNESP - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

### **ABSTRACT**

In order to diversify the global and national energy matrix and reduce harmful impacts on the environment caused by the emission of polluting gases into the atmosphere, the use of clean and renewable energy sources is presented as a good alternative. This work discusses the use of photovoltaic solar energy, a source that presents such characteristics. The photovoltaic system under study is the type distributed connected to the grid, in the residential segment. It is informed of its use in the global and national levels. They are also present their characteristics, electrical and electronic circuits that make up the equipment required for its operation and the design of a system to be installed in a residence.

**KEYWORDS:** Photovoltaic solar energy. Distributed photovoltaic systems connected to the grid. Photovoltaic modules. DC-AC converter.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Capacidade instalada de geração fotovoltaica até 2013 e capacidade adicionada em 2014.....	19
Figura 2.2 – Capacidade total mundial de geração fotovoltaica entre os anos de 2004 e 2014.....	20
Figura 3.1 – Célula fotovoltaica iluminada pela luz solar.....	28
Figura 3.2 – Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica.....	31
Figura 3.3 – Curvas I-V (em azul) e P-V (em vermelho) de uma célula fotovoltaica de Si de 156 mm x 156 mm sob condições-padrão de ensaio.....	33
Figura 3.4 – Células fotovoltaicas associadas em série.....	35
Figura 3.5 – Células fotovoltaicas associadas em paralelo.....	35
Figura 3.6 – Conversor CC-CA.....	39
Figura 3.7 – Regulador <i>boost</i> .....	41
Figura 3.8 – Símbolos de componentes utilizados em inversores CC-CA (A – anodo; K – catodo; G – gate; B – base, C – coletor; E – emissor; D – dreno; S – fonte).....	43
Figura 3.9 – Inversor CC-CA monofásico em ponte completa.....	44
Figura 3.10 – Onda quadrada na saída do inversor CC-CA.....	45
Figura 3.11 – Onda quadrada modificada na saída do inversor CC-CA.....	46
Figura 3.12 – Controle PWM para um inversor CC-CA – (a) Tensões de controle ( $V_{ca\ ref}$ e $V_{tri}$ ) e (b) Tensão na saída do inversor ( $V_{inversor}$ ).....	47
Figura 3.13 – Instalação típica dos dispositivos de proteção em um SFCR.....	48
Figura 4.1 – Planta do projeto da edificação sustentável.....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dados que constam na etiqueta do módulo fotovoltaico.....	37
Tabela 4.1 – Irradiação solar diária média mensal no plano horizontal para cidades próximas à Guaratinguetá.....	51
Tabela 4.2 – Irradiação solar diária média mensal para a cidade de Lorena para diferentes ângulos de inclinação em relação ao plano horizontal.....	52
Tabela 4.3 – Determinação do ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos.....	53
Tabela 4.4 – Características de um módulo fotovoltaico comercial.....	54
Tabela 4.5 – Características de um conversor CC-CA comercial.....	58
Tabela 4.6 – Determinação das cargas de iluminação, das tomadas de uso geral e das tomadas de uso específico (AS - Agência de Sustentabilidade; CPV - Casa do Professor Visitante).....	61

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AS	Agência de Sustentabilidade
a-Si:H	Silício amorfo hidrogenado
BJT	<i>Bipolar junction transistor</i>
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CdTe	Telureto de cádmio
Cepel	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
Chesf	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
CIGS	Disseleneto de cobre, índio e gálio
CIS	Disseleneto de cobre e índio
COBEI	Comitê Brasileiro de Eletricidade
CPV	Casa do Professor Visitante
CSI	Inversor tipo fonte de corrente
c-Si	Silício cristalino
CTA	Centro Tecnológico de Aeronáutica
DPS	Dispositivo de proteção contra surtos
DSP	<i>Digital signal processing</i>
DSV	Dispositivo de seccionamento visível
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FDI	Fator de dimensionamento do inversor
GaAs	Arseneto de gálio
GTO	<i>Gate turn-off thyristor</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IGBT	<i>Insulated gate bipolar transistor</i>
IME	Instituto Militar de Engenharia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INT	Instituto Nacional de Tecnologia
LpT	Programa Luz para Todos
MME	Ministério de Minas e Energia

MOSFET	<i>Metal oxide semiconductor field effect transistor</i>
MPPT	<i>Maximum power point tracker</i>
m-Si	Silício monocristalino
NBR	Norma Brasileira
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PRODEEM	Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
p-Si	Silício policristalino
PWM	<i>Pulse width modulation</i>
REN21	<i>Renewable Energy Policy Network for the 21st Century</i>
SCR	<i>Silicon controlled rectifier</i>
SFCR	Sistema fotovoltaico conectados à rede
SFI	Sistema fotovoltaico isolado
SPDA	Sistema de proteção contra descargas atmosféricas
SPPM	Seguidor do ponto de potência máxima
STC	<i>Standard test conditions</i>
TRIAC	<i>Triode for alternating current</i>
TUE	Tomada de uso específico
TUG	Tomada de uso geral
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USB	<i>Universal serial bus</i>
USP	Universidade de São Paulo
VSI	Inversor tipo fonte de tensão

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	área da célula fotovoltaica ou do telhado	$m^2$
d	fator de demanda	
$D_{resid}$	demanda da residência	W
FF	fator de forma	
$FP_{ilum}$	fator de potência referente à iluminação	
$FP_{TUE}$	fator de potência associada a cada tomada de uso específico	
$FP_{TUG}$	fator de potência referente às tomadas de uso geral	
G	irradiância solar incidente	$W/m^2$
I	corrente fornecida pela célula fotovoltaica	A
$I_0$	corrente de saturação reversa do diodo	A
$I_D$	corrente no diodo	A
$I_{ent\ máx\ conv}$	máxima corrente CC admitida na entrada do conversor CC-CA	A
$I_{MP}$	corrente no ponto de potência máxima	A
$I_P$	corrente na resistência paralela	A
$I_{SC}$	corrente de curto-circuito	A
k	constante de Boltzmann	$1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
L	latitude geográfica local	graus
n	fator de idealidade do diodo	
$P_{conv}$	potência CA nominal do conversor CC-CA	W
$P_{ger\ FV}$	potência máxima (ou de pico) do gerador fotovoltaico	Wp
$P_{média\ FV}$	potência média fornecida pelo sistema fotovoltaico ao longo do dia	W
$P_{MP}$	potência máxima ou de pico	Wp
q	carga elétrica do elétron	$1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$
$S_{ilum}$	potência aparente total referente à iluminação	VA
$S_{TUE}$	potência aparente associada a cada tomada de uso específico	VA
$S_{TUG}$	potência aparente total referente às tomadas de uso geral	VA
T	temperatura	K ou °C
V	tensão nos terminais da célula	V
$V_{ent\ máx\ conv}$	máxima tensão CC admitida na entrada do conversor CC-CA	V

$V_{ent\ máxSPPM}$	tensão CC máxima de operação na entrada do SPPM do conversor	V
$V_{ent\ mínSPPM}$	tensão CC mínima de operação na entrada do SPPM do conversor	V
$V_{MP}$	tensão no ponto de potência máxima	V
$V_{MP\ máx}$	máxima tensão de potência máxima (na menor temperatura de operação prevista)	V
$V_{MP\ mín}$	mínima tensão de potência máxima (na maior temperatura de operação prevista)	V
$V_{MP\ STC}$	tensão de máxima potência nas condições-padrão de ensaio	V
$V_{OC\ máx}$	tensão máxima de circuito aberto de um módulo fotovoltaico (na menor temperatura de operação prevista)	V
$V_{OC\ STC}$	tensão de circuito aberto nas condições-padrão de ensaio	V
$V_{OC}$	tensão de circuito aberto	V
$\beta_{MP}$	coeficiente de temperatura para a tensão de máxima potência	%/°C
$\beta_{OC}$	coeficiente de temperatura para a tensão de circuito aberto	%/°C
$\eta$	eficiência	

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
1.1	UTILIZAÇÃO DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS NO SEGMENTO RESIDENCIAL.....	16
1.2	OBJETIVO DO TRABALHO.....	17
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	18
2.1	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	18
2.2	UTILIZAÇÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO MUNDO.....	18
2.3	UTILIZAÇÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL.....	21
2.4	VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	23
<b>3</b>	<b>ASPECTOS CONCEITUAIS</b> .....	25
3.1	SISTEMA FOTOVOLTAICO .....	25
3.2	TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS .....	25
3.3	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DISTRIBUÍDOS CONECTADOS À REDE.....	26
3.4	COMPONENTES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DISTRIBUÍDOS CONECTADOS À REDE.....	27
3.5	CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	28
<b>3.5.1</b>	<b>Silício cristalino (c-si)</b> .....	29
<b>3.5.2</b>	<b>Filmes finos</b> .....	29
<b>3.5.3</b>	<b>Circuito elétrico equivalente e curvas I-V e P-V</b> .....	31
<b>3.5.4</b>	<b>Parâmetros elétricos</b> .....	33
<b>3.5.5</b>	<b>Associações de células</b> .....	34
<b>3.5.6</b>	<b>Efeitos da irradiância e da temperatura</b> .....	36
3.6	MÓDULO FOTOVOLTAICO .....	36
<b>3.6.1</b>	<b>Identificação das características elétricas</b> .....	37
3.7	CONVERSOR CC-CA.....	38
<b>3.7.1</b>	<b>Circuitos que compõem o conversor CC-CA</b> .....	39
3.8	REGULADOR CC-CC.....	40
<b>3.8.1</b>	<b>Regulador CC-CC do tipo <i>boost</i></b> .....	40
3.9	SEGUIDOR DO PONTO DE POTÊNCIA MÁXIMA (SPPM).....	41

3.10	INVERSOR CC-CA .....	42
3.10.1	<b>Classificação dos inversores</b> .....	43
3.10.2	<b>Princípio de funcionamento dos inversores</b> .....	44
3.11	OUTRAS FUNÇÕES DO CONVERSOR CC-CA .....	47
3.12	DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO DE SFCRS .....	48
4	<b>APLICAÇÃO</b> .....	49
4.1	PROJETO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO .....	49
4.2	PROJETO DE UM SFCR RESIDENCIAL .....	49
4.3	PROJETO DE EDIFICAÇÃO SUSTENTÁVEL DENTRO DO CAMPUS DA FACULDADE DE ENGENHARIA DE GUARATINGUETÁ (FEG) - UNESP .....	49
4.4	PROJETO DO SFCR A SER IMPLEMENTADO NA EDIFICAÇÃO SUSTENTÁVEL .....	51
4.4.1	<b>Localização da edificação e estimativa do recurso solar disponível</b> .....	51
4.4.2	<b>Determinação da área disponível para a instalação dos módulos e estimativa da potência elétrica obtida pela geração fotovoltaica</b> .....	53
4.4.3	<b>Determinação das características do conversor CC-CA</b> .....	55
4.4.4	<b>Determinação da demanda da residência</b> .....	61
5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	64
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	65

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 UTILIZAÇÃO DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS NO SEGMENTO RESIDENCIAL

Atualmente, muito se fala em sociedade sustentável e nas possíveis formas de se atingir essa condição. A sustentabilidade baseia-se no conceito de utilização dos recursos naturais no presente, de modo a garantir a mesma disponibilidade para gerações futuras.

A geração de energia elétrica geralmente está associada a fontes emissoras de gases poluentes que têm contribuído para alterações climatológicas, as quais afetam o equilíbrio ambiental natural do planeta. Isso ocorre no hemisfério norte, devido à utilização de termelétricas e, recentemente, o mesmo vem acontecendo no Brasil, através da complementação energética de sua base hidrelétrica.

A utilização de fontes de energia renováveis e não poluentes é um dos caminhos que conduzem a uma sociedade sustentável. Enquadram-se como tal as fontes provenientes da energia da biomassa, hidrelétrica, eólica, oceânica, geotérmica e solar fotovoltaica.

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão da luz solar em eletricidade. Um sistema fotovoltaico é constituído pelos componentes responsáveis por essa conversão e pela adequação dos valores das grandezas elétricas envolvidas, para que enfim os consumidores possam utilizar a energia elétrica gerada.

Um sistema fotovoltaico do tipo residencial conectado à rede caracteriza-se por gerar energia elétrica de forma distribuída, e apresentar o gerador (painéis fotovoltaicos) próximo ao ponto de consumo. Opõe-se aos modos tradicionais de geração, baseados em grandes usinas construídas em locais distantes dos consumidores.

Por ser conectado à rede elétrica de distribuição local, esse tipo de sistema permite que o consumidor complemente sua necessidade energética através da energia proveniente da rede. Pode também fornecer energia à mesma, caso a geração seja maior que o consumo.

Pela sua localização geográfica, o Brasil apresenta um grande potencial associado à irradiação solar necessária para a geração fotovoltaica. A instalação de sistemas distribuídos residenciais contribui para o aumento da disponibilidade de eletricidade no país, reduzindo a necessidade da utilização de fontes de energia não renováveis e aliviando a geração pelas tradicionais usinas hidrelétricas.

## 1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo a respeito dos sistemas fotovoltaicos distribuídos conectados à rede, no segmento residencial. Apresentam-se suas características e aspectos conceituais relacionados aos circuitos elétricos e eletrônicos que fazem parte dos equipamentos que os compõem, favorecendo o entendimento das tecnologias envolvidas. A partir de tais elementos, procede-se ao dimensionamento e seleção de equipamentos para um sistema fotovoltaico a ser instalado em uma residência.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho de graduação é dividido em seis capítulos, no qual o capítulo dois traz uma revisão bibliográfica do tema, sendo apresentadas informações a respeito do mesmo no âmbito mundial e nacional.

O terceiro capítulo apresenta detalhes sobre o tipo de sistema fotovoltaico abordado, principalmente em relação aos circuitos elétricos e eletrônicos que fazem parte dos equipamentos necessários ao seu funcionamento.

As etapas necessárias para o projeto de um sistema fotovoltaico residencial são abordadas no capítulo quatro, em que as mesmas são aplicadas em um caso real. O quinto capítulo traz as considerações finais a respeito do estudo desenvolvido.

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão da luz solar em eletricidade. Essa conversão acontece através do efeito fotovoltaico, relatado por Edmond Becquerel, em 1839, quando há o surgimento de uma diferença de potencial nas extremidades de um material semicondutor devido à absorção de luz.

A célula fotovoltaica, fabricada de material semicondutor, é a unidade fundamental do processo de conversão. Devido a sua baixa tensão e corrente de saída, são agrupadas diversas células, formando um módulo fotovoltaico (PINHO; GALDINO, 2014).

### **2.2 UTILIZAÇÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO MUNDO**

Na década de 1950, nos Estados Unidos, iniciou-se a produção industrial de células fotovoltaicas. Seu desenvolvimento foi motivado pela busca por fontes de energia para sistemas de telecomunicações instalados em locais remotos e pela “corrida espacial”. A célula fotovoltaica era, e ainda é, o meio mais adequado de fornecer energia para equipamentos eletroeletrônicos no espaço (PINHO; GALDINO, 2014).

A crise do petróleo de 1973 fez aumentar o interesse em aplicações terrestres para a energia solar fotovoltaica, no entanto, para tornar economicamente viável essa forma de conversão de energia era necessário reduzir o custo de produção das células. Assim, houve investimentos em pesquisas sobre novos métodos e materiais para a sua produção, o que foi gerando a redução de seu custo e promovendo sua crescente utilização (PINHO; GALDINO, 2014; VALLÊRA; BRITO, 2006).

Durante a maior parte da década de 1990, os Estados Unidos foram líderes mundiais na produção de células. No final dessa década, políticas de governo na Alemanha e no Japão resultaram no desenvolvimento dessa tecnologia, motivadas, entre outros fatores, pela redução da emissão de gás carbônico (CO<sub>2</sub>).

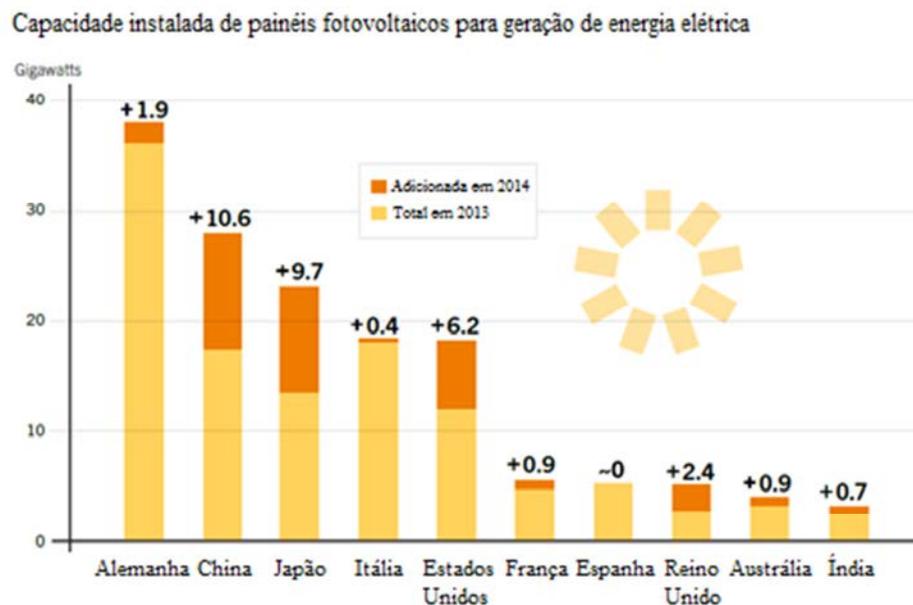
Na Ásia, a China destaca-se como produtora de módulos fotovoltaicos. Há muitas indústrias instaladas em países asiáticos, no entanto, várias delas têm a tecnologia desenvolvida nos Estados Unidos e em países europeus. Os mesmos deslocaram suas fábricas para a Ásia em busca da redução de custos de produção, devido à existência de uma cadeia

produtiva estabelecida, mão de obra qualificada e barata e incentivos para a implantação de fábricas, por meio de fontes de financiamento (PINHO; GALDINO, 2014).

De acordo com o Relatório Mundial da Situação das Energias Renováveis de 2015 (*Renewables 2015 Global Status Report*), produzido pela REN21 (*Renewable Energy Policy Network for the 21st Century* - Conjunto de políticas de energias renováveis para o século 21), os painéis solares fotovoltaicos têm desempenhado um importante papel na geração de eletricidade em alguns países, com custos que vêm sendo reduzidos, tornando-se competitivos frente a outras formas de geração de energia elétrica.

A Figura 2.1 mostra os dez países com as maiores capacidades de geração de eletricidade por painéis solares até 2013, e as capacidades adicionadas em 2014.

Figura 2.1 – Capacidade instalada de geração fotovoltaica até 2013 e capacidade adicionada em 2014.



Fonte: Adaptada de (REN21, 2015).

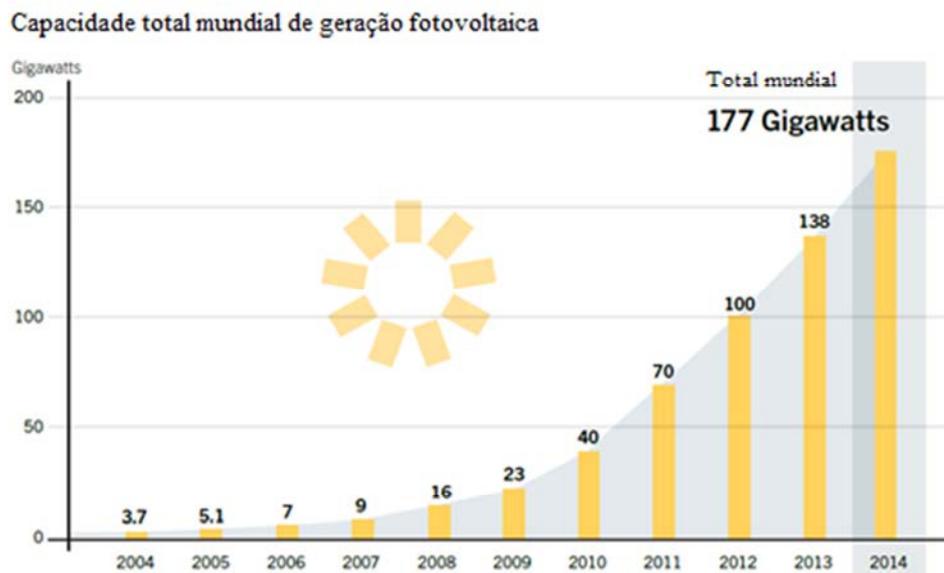
A China, o Japão e os Estados Unidos foram os países que mais aumentaram sua capacidade em 2014. Contudo, a América Latina e alguns países africanos também ampliaram suas instalações.

Embora a maioria dos mercados da União Europeia tenha declinado pelo terceiro ano consecutivo, a região, particularmente a Alemanha, continua como líder mundial em relação à

capacidade de geração e à contribuição para o fornecimento de eletricidade a partir da energia solar fotovoltaica (REN21, 2015).

Em 2014, a capacidade mundial instalada teve um crescimento de cerca de 40 GW, aumentando a capacidade total mundial para aproximadamente 177 GW. A Figura 2.2 mostra a capacidade total mundial entre os anos de 2004 e 2014.

Figura 2.2 – Capacidade total mundial de geração fotovoltaica entre os anos de 2004 e 2014.



Fonte: Adaptada de (REN21, 2015).

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede têm registrado um crescimento mundial superior ao dos sistemas isolados. A maior parte dos investimentos em sistemas conectados à rede, principalmente na Europa, deve-se a políticas públicas de incentivo, que têm por objetivo promover o desenvolvimento dessa tecnologia (TIEPOLO et al., 2014).

A utilização da tecnologia fotovoltaica para a geração de eletricidade está se tornando cada vez mais competitiva, em razão tanto dos seus custos decrescentes, quanto dos custos crescentes de outras formas de geração de energia. O que estimula também sua utilização é a preocupação com os impactos ambientais (PINHO; GALDINO, 2014).

### 2.3 UTILIZAÇÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL

No Brasil, na década de 1950, iniciou-se o desenvolvimento de módulos fotovoltaicos no Instituto Nacional de Tecnologia (INT) e no Centro Tecnológico de Aeronáutica (CTA), atualmente Centro Técnico Aeroespacial.

Nos anos de 1970, no Instituto Militar de Engenharia (IME), iniciaram-se estudos de tecnologias de filmes finos. Nessa época, o desenvolvimento tecnológico do Brasil, no setor de energia solar fotovoltaica, equiparava-se ao de países de destaque no setor, incentivado pela crise internacional do petróleo (PINHO; GALDINO, 2014).

Nos anos de 1980 e 1990 houve o desenvolvimento de tecnologias relacionadas à purificação de silício para uso em células fotovoltaicas e à fabricação das mesmas em universidades e centros de pesquisa públicos, bem como em empresas privadas. No entanto, na década de 1990, a difusão da tecnologia fotovoltaica no Brasil ficou defasada em relação ao que ocorria em países como Alemanha e Japão, cujos incentivos estavam direcionados ao desenvolvimento tecnológico e industrial (PINHO; GALDINO, 2014).

Em 1994, o Governo Federal, através do Ministério de Minas e Energia (MME), instituiu o Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (PRODEEM) para promover o acesso à energia elétrica por localidades isoladas não supridas pela rede elétrica convencional, baseando-se principalmente em sistemas fotovoltaicos isolados. Tal programa envolve a participação de universidades, centros de pesquisa, secretarias estaduais de energia e concessionárias federais e estaduais, através do qual foram adquiridos diversos sistemas fotovoltaicos (CÂMARA NOTÍCIAS, 2004; PINHO; GALDINO, 2014).

Em 2003, foi criado pelo Governo Federal o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica - Programa Luz para Todos (LpT), que tem por objetivo acabar com a exclusão elétrica no país. O Programa é coordenado pelo MME, operacionalizado pela Eletrobras e executado pelas concessionárias de energia elétrica e cooperativas de eletrificação rural, em parceria com os governos estaduais. As concessionárias podem utilizar recursos subsidiados no investimento dos sistemas de atendimento. Os trabalhos estão relacionados principalmente à extensão das redes, mas também contemplam a instalação de sistemas fotovoltaicos (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2015).

O PRODEEM passou a ser parte integrante do LpT, sendo utilizado em circunstâncias específicas definidas pelo MME (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2011).

Os primeiros sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil foram instalados no final dos anos de 1990 em concessionárias de energia, universidades e centros de pesquisa. A Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf) foi pioneira nesta área ao instalar, em 1995, um sistema fotovoltaico em sua sede em Recife, PE. Outros sistemas pioneiros foram instalados na USP (São Paulo, SP), na UFSC (Florianópolis, SC), na UFRGS (Porto Alegre, RS) e no Cepel (Rio de Janeiro, RJ) (PINHO; GALDINO, 2014).

Ainda não existe no Brasil um desenvolvimento significativo de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Isso decorre do alto custo de sua implementação, entretanto, houve uma redução do mesmo de cerca de 40% entre 1996 e 2006 e de 60% entre 2009 e 2011. Dos custos totais de um sistema conectado à rede, cerca de 60% correspondem aos módulos fotovoltaicos e 40% à preparação e instalação da estrutura, inversores, transformadores e outros equipamentos necessários (TIEPOLO et al., 2014).

Em 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) definiu uma regulamentação para sistemas fotovoltaicos conectados à rede, que trata da micro e mini geração distribuída, correspondendo a potências iguais ou inferiores a 100 kW, e superiores a 100 kW até 1 MW, respectivamente. A regulamentação prevê o sistema de compensação de energia elétrica, de acordo com o qual é feito um balanço entre a energia consumida e a gerada na unidade consumidora (PINHO; GALDINO, 2014; TIEPOLO et al., 2014).

Em relação a usinas fotovoltaicas, o Brasil possui 25 unidades em operação, totalizando uma potência instalada de aproximadamente 11 MW (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015).

Com o aumento do número de instalações de sistemas fotovoltaicos no Brasil, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) criou um grupo de trabalho para atuar nesta área, como parte do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), formado por especialistas de universidades e centros de pesquisa e representantes de órgãos públicos e privados. O grupo estabeleceu requisitos para a etiquetagem dos componentes utilizados em sistemas fotovoltaicos (módulos, inversores, controladores de carga e baterias) e definiu os laboratórios habilitados a efetuarem os ensaios. Diversos componentes disponíveis no mercado nacional já se encontram etiquetados, conforme as tabelas disponibilizadas pelo INMETRO. Para serem comercializados, os equipamentos precisam também do registro do INMETRO (PINHO; GALDINO, 2014).

O Comitê Brasileiro de Eletricidade (COBEI), da ABNT, também criou um grupo técnico a respeito de sistemas fotovoltaicos que foi responsável pela elaboração, entre outras, das normas NBR 16149 (Sistemas Fotovoltaicos - Características da interface de conexão

com a rede elétrica de distribuição) e NBR 16150 (Sistemas Fotovoltaicos - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição - Procedimento de ensaio de conformidade), com base nas normas IEC.

O Brasil recebe índices elevados de radiação solar, no entanto, seu aproveitamento para a geração de energia elétrica é pequeno, comparado com países europeus, onde a radiação solar é menor e a tecnologia fotovoltaica é muito mais utilizada (PINHO; GALDINO, 2014).

A capacidade de sistemas fotovoltaicos instalados no Brasil até 2013, incluindo sistemas isolados e conectados à rede, é da ordem de 40 MW, sendo a maior parte proveniente de sistemas isolados (BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO, 2014).

O mercado brasileiro ainda não apresenta atratividade para a instalação no país de indústrias de módulos fotovoltaicos e de equipamentos que são utilizados nos sistemas. Sem políticas públicas de incentivo, estima-se que o mercado fotovoltaico brasileiro irá crescer de maneira lenta (PINHO; GALDINO, 2014).

Segundo Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (2012), o ritmo de crescimento do mercado continuará lento devido a vários fatores: apesar da redução dos custos, o investimento para a instalação de um sistema fotovoltaico ainda é elevado, principalmente para consumidores residenciais; as distribuidoras ainda apresentam restrições em relação à energia fotovoltaica por receio de que a geração distribuída resulte na perda de seu mercado cativo; há falta de políticas específicas de financiamentos e de modelos de comercialização adequados e, também, os consumidores têm pouco conhecimento sobre a energia fotovoltaica como opção para a obtenção de energia elétrica.

## 2.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

De acordo com América do Sol (2015) e Salamoni (2009), a utilização da energia solar fotovoltaica apresenta vantagens como:

- Diversificação da matriz energética;
- Baixo impacto ambiental, sem poluição ou ruído;
- Boa alternativa para levar energia elétrica a localidades de difícil acesso, não supridas pela rede convencional;
- Edifícios com tecnologia fotovoltaica integrada não exigem área física dedicada;

- Módulos fotovoltaicos podem ser considerados um material de revestimento arquitetônico no caso de sua instalação em prédios e casas, reduzindo custos e dando à edificação uma aparência inovadora;
- Sistemas próximos aos pontos de consumo apresentam perdas de energia e investimentos reduzidos em relação à transmissão e distribuição.

As desvantagens associadas ao uso da energia solar fotovoltaica são:

- A radiação solar, e conseqüentemente a quantidade de energia elétrica produzida, varia de acordo com o período do dia e as estações do ano;
- Os painéis fotovoltaicos têm um baixo rendimento;
- O custo das células fotovoltaicas ainda é elevado.

### 3 ASPECTOS CONCEITUAIS

#### 3.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO

Um sistema fotovoltaico é um conjunto de componentes que tem a finalidade de transformar a energia solar em elétrica.

Segundo Pinho e Galdino (2014), tal sistema é composto por um bloco gerador, um bloco de condicionamento de potência e, dependendo da necessidade, um bloco de armazenamento.

O bloco gerador é constituído de módulos fotovoltaicos em diferentes associações, cabos elétricos para interligá-los e estruturas de suporte. O bloco de condicionamento de potência pode conter reguladores CC-CC, seguidor de ponto de potência máxima, inversores CC-CA, controladores de carga (se houver armazenamento) e dispositivos de proteção, supervisão e controle. O bloco de armazenamento possui baterias e/ou outras formas de armazenamento de energia elétrica.

#### 3.2 TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em duas categorias principais: isolados e conectados à rede. Nos dois casos podem operar a partir somente da fonte fotovoltaica ou combinar outras fontes de energia, quando são chamados de híbridos. A escolha entre as opções depende da aplicação e/ou da disponibilidade dos recursos energéticos (PINHO; GALDINO, 2014).

De acordo com Jannuzzi, Varella e Gomes (2009), os sistemas fotovoltaicos possuem quatro aplicações, duas na categoria de sistemas isolados e duas na categoria de sistemas conectados à rede. Tais aplicações são:

- Sistemas fotovoltaicos domésticos isolados ou autônomos: fornecem energia elétrica a residências e não estão conectados à rede de distribuição da concessionária local.
- Sistemas fotovoltaicos não domésticos isolados: fornecem energia para diversas aplicações, como telecomunicações e bombeamento de água. Não estão conectados à rede.
- Sistemas fotovoltaicos distribuídos conectados à rede: fornecem energia ao consumidor, que pode usar a energia da rede elétrica convencional para complementar a quantidade de energia demandada; podendo também gerar créditos de energia com a concessionária caso a energia gerada seja superior à demandada.

- Sistemas fotovoltaicos centralizados conectados à rede: são estações de geração de energia centralizadas, cujo fornecimento é proporcionado a diversos clientes. Normalmente estão distantes dos pontos de consumo.

Os estudos apresentados neste trabalho são direcionados para sistemas fotovoltaicos distribuídos conectados à rede, no segmento residencial.

### 3.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DISTRIBUÍDOS CONECTADOS À REDE

Os sistemas fotovoltaicos distribuídos são caracterizados pelo uso de geradores de energia elétrica descentralizados, instalados próximos aos locais de consumo. Diferentemente dos sistemas isolados, os sistemas distribuídos conectados à rede só podem ser empregados em locais já atendidos pela rede de distribuição de energia elétrica (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

No Brasil, esse tipo de sistema, quando integrado a edificações, pode ser enquadrado na classificação de micro ou mini rede (até 1 MW), conforme a resolução Aneel nº 482/2012, ou na categoria de autoprodutores de energia, obedecendo ao Decreto Federal nº 2003/1996, que dispõe sobre a produção de energia por produtores independentes e autoprodutores (PINHO; GALDINO, 2014).

Em muitos países, é permitido que os proprietários de micro e mini redes vendam energia a outros consumidores. No Brasil, tais redes são empregadas apenas para consumo próprio, podendo gerar créditos de energia com a concessionária nos períodos em que a geração é maior que o consumo (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Os sistemas fotovoltaicos integrados a edificações não necessitam da criação de novos espaços para sua instalação, podendo ser aplicados em locais já existentes, como por exemplo, sobre telhados, servindo também como um diferencial arquitetônico. Tais sistemas podem ser melhor aproveitados quando definidos ainda na fase de projeto da edificação (PINHO; GALDINO, 2014).

Os sistemas distribuídos conectados à rede apresentam benefícios ao meio ambiente e à população, visto que tratam de uma fonte de energia renovável, não poluente e que não gera ruídos. Por não necessitarem da utilização dos sistemas de transmissão e distribuição, estes serão aliviados, e não haverá perdas de energia associadas ao seu uso (RÜTHER; ZILLES, 2011; VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Em sistemas fotovoltaicos distribuídos enquadrados como micro ou mini redes, é utilizada a medição bidirecional para quantificar a energia elétrica ativa consumida da rede e a energia elétrica ativa injetada na rede através da geração fotovoltaica. Em instalações de baixa tensão, tal medição pode ser feita através de dois medidores unidirecionais, um para aferir a energia consumida e outro a gerada (ANEEL, 2012).

### 3.4 COMPONENTES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DISTRIBUÍDOS CONECTADOS À REDE

De acordo com Pinho e Galdino (2014), sistemas fotovoltaicos conectados à rede não necessitam do uso de baterias e/ou outras formas de armazenamento de energia, pois a energia produzida é injetada na rede e utilizada através da mesma. Nesses sistemas, a geração fotovoltaica representa uma fonte complementar para o sistema elétrico ao qual está conectada.

Em sistemas isolados da rede, o uso de baterias (ou outro dispositivo armazenador de energia) é necessário para atender a demanda em períodos em que a geração é nula ou insuficiente, quando a irradiância solar é baixa (à noite ou em dias nublados ou chuvosos). Assim, parte da energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos durante o dia é armazenada para ser usada em tais situações.

Pode-se também utilizar baterias em sistemas conectados à rede para a operação ilhada do sistema fotovoltaico, no caso de falta de energia da rede elétrica. Sistemas assim são encontrados na Europa e nos Estados Unidos. No Brasil, para o caso de micro e mini geração, não há regulamentação prevendo esse tipo de operação, devendo o sistema fotovoltaico ser desconectado da rede em casos de ilhamento (quando a rede de distribuição está sem energia elétrica e só o sistema de geração fotovoltaica é capaz de fornecê-la) (PINHO; GALDINO, 2014).

De modo geral, um sistema fotovoltaico distribuído conectado à rede é composto por módulos fotovoltaicos, formados por células fotovoltaicas, um conversor CC-CA para conectar os módulos à rede, constituído de diferentes tipos de circuitos, e dispositivos de proteção, supervisão e controle. Nos próximos itens, são explicados os componentes mencionados.

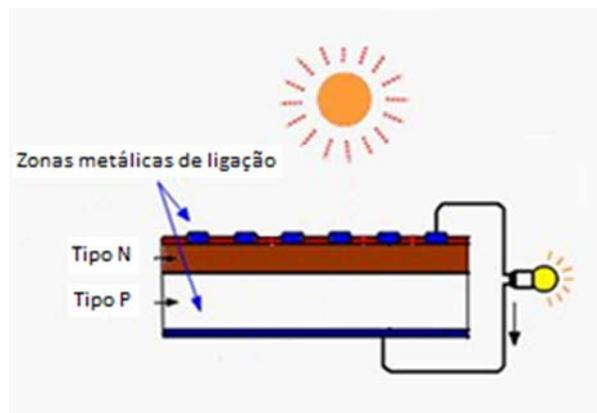
### 3.5 CÉLULA FOTOVOLTAICA

A célula fotovoltaica tem a função de converter a energia solar em elétrica através do efeito fotovoltaico. É composta por duas camadas de material semicondutor, dopadas de modo diferente, formando uma camada do tipo N, com excesso de elétrons (negativa) e uma do tipo P, com déficit de elétrons, ou lacunas (positiva).

Quando as duas camadas são unidas, formando uma junção PN, elétrons da camada N migram para a P e é formada uma barreira de potencial entre elas. Se a célula não estiver iluminada, os elétrons e lacunas permanecem presos atrás dessa barreira.

Quando há a incidência de fótons, provenientes da luz solar, sobre a camada N, os elétrons adquirem energia e vão para a camada P, caso exista um condutor externo entre as duas camadas, conforme mostrado na Figura 3.1. Esse fluxo de elétrons gera uma corrente elétrica que pode ser utilizada em diversas aplicações (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Figura 3.1 – Célula fotovoltaica iluminada pela luz solar.



Fonte: Adaptada de (VIRIDIAN, 2016).

As células fotovoltaicas fabricadas de silício cristalino (c-Si) dominam o mercado mundial atualmente. Também são utilizadas tecnologias baseadas em filmes finos de silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), telureto de cádmio (CdTe), arseneto de gálio (GaAs), disseleneto de cobre e índio (CIS) e disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) (ALMEIDA, 2012; PINHO; GALDINO, 2014).

A seguir, são apresentadas algumas características das tecnologias empregadas na fabricação das células.

### 3.5.1 Silício cristalino (c-si)

As células de c-Si são as mais utilizadas, no entanto, seu custo é elevado e as possibilidades de reduzi-lo já estão praticamente esgotadas (SILVA, 2003).

Há dois tipos de c-Si, o monocristalino (m-Si) e o policristalino (p-Si). Neste último, ao invés de se formar um único cristal, o material é solidificado em forma de um bloco composto de pequenos cristais. A partir do corte de um bloco de p-Si ou lingotes de m-Si são obtidas lâminas, nas quais são fabricadas as células fotovoltaicas.

O custo das células de p-Si é inferior ao das células de m-Si, entretanto, a presença de interfaces entre os vários cristais no p-Si reduz sua eficiência.

A eficiência média das células comerciais de m-Si é de 16,5% e das células de p-Si é de 14,5% a 16,2% (PINHO; GALDINO, 2014).

### 3.5.2 Filmes finos

Aproximadamente 12% da produção mundial de células fotovoltaicas correspondem às que utilizam filmes finos. Sua alta absorção óptica, se comparada a do c-Si, permite fabricar células bastante finas, em que camadas de diferentes semicondutores são depositadas sucessivamente sobre superfícies rígidas ou flexíveis. O consumo de energia e materiais para a sua fabricação é reduzido, resultando em menores custos (PINHO; GALDINO, 2014).

#### a) Silício amorfo hidrogenado (a-Si:H)

O silício amorfo é aquele que não apresenta estrutura cristalina, mas preserva suas propriedades de semicondutor. As células fotovoltaicas feitas desse material têm maior utilização em relógios, calculadoras e dispositivos de baixo consumo.

A desvantagem dessa tecnologia é sua baixa eficiência, que é da ordem de 10% para os melhores módulos comerciais. Por outro lado, o a-Si:H apresenta um menor coeficiente de temperatura que o c-Si, além de menor perda de eficiência em condições de baixa irradiância (COSTA, 2012; PINHO; GALDINO, 2014).

### **b) Telureto de cádmio (CdTe)**

As células fotovoltaicas de CdTe apresentam eficiência em torno de 16,7%, e os melhores módulos comerciais alcançam 14,4% de eficiência. Não se observou a degradação da potência dos módulos com o tempo de exposição à radiação solar, sendo que os fabricantes garantem que a mesma estará em 80% do valor inicial após 25 anos de operação, garantia similar aos módulos de c-Si. No entanto, os módulos de CdTe foram introduzidos no mercado há menos tempo, tendo seu histórico de instalações comerciais pouco mais de 10 anos.

As restrições associadas ao uso dessa tecnologia devem-se ao fato de o cádmio ser tóxico e apresentar restrições ambientais e à disponibilidade limitada do telúrio (COSTA, 2012; PINHO; GALDINO, 2014).

### **c) Arseneto de gálio (GaAs)**

O GaAs permite a obtenção de células de alta eficiência, no entanto, por possuírem um custo de produção elevado, não são competitivas em aplicações terrestres, sendo mais utilizadas no espaço. Sua eficiência em laboratório é da ordem de 27,5% (COSTA, 2012; FALCÃO, 2005).

### **d) Disseleneto de cobre e índio (CIS) e disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS)**

As células de CIS ou CIGS apresentam alta eficiência em relação a outros tipos de células, estando em torno de 19,6% para testes em laboratório. A eficiência dos módulos é de aproximadamente 15,7% (COSTA, 2012; PINHO; GALDINO, 2014).

Possuem boa aparência estética, encontrando aplicações arquitetônicas diversas. Em relação à estabilidade, os fabricantes afirmam que não há degradação considerável, oferecendo garantia de 25 anos (PINHO; GALDINO, 2014).

As dificuldades de produção dessas células estão relacionadas à obtenção de filmes uniformes em grandes superfícies e a pouca abundância dos elementos envolvidos (CÂMARA, 2011; PINHO; GALDINO, 2014).

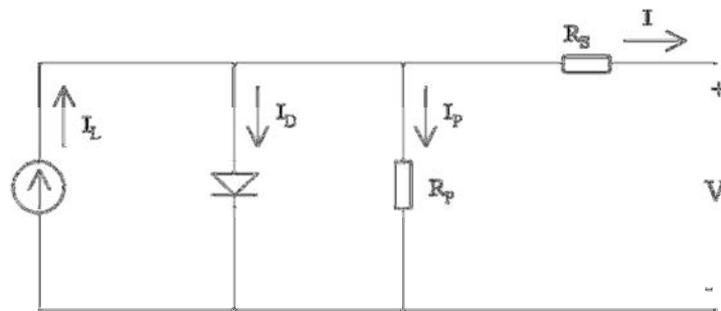
### 3.5.3 Circuito elétrico equivalente e curvas I-V e P-V

A Figura 3.2 apresenta o circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica. Os componentes do circuito têm a função de representar o que segue (PINHO; GALDINO, 2014):

- $I_L$  (fonte de corrente): corrente gerada pelos fótons absorvidos da radiação solar;
- D (diodo): junção PN no escuro;
- $R_P$  (resistência paralela): impurezas e defeitos na estrutura, principalmente próximos às bordas, produzindo um caminho interno para uma corrente de fuga, o que reduz a corrente efetivamente fornecida pelo dispositivo;
- $R_S$  (resistência série): resistência do material semicondutor, dos contatos metálicos e da junção metal-semicondutor.

Para células de boa qualidade, a resistência paralela é alta, resultando em uma pequena corrente de fuga, e a resistência série é baixa, o que faz com que a queda de tensão sobre a mesma seja pequena (HECKTHEUER, 2001).

Figura 3.2 – Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica.



Fonte: (HECKTHEUER, 2001).

A corrente no diodo ( $I_D$ ) é dada pela equação (3.1).

$$I_D = I_0 \left[ e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right] \quad (3.1)$$

sendo:

$I_0$ : corrente de saturação reversa do diodo [A];

q: carga elétrica do elétron [ $1,6 \times 10^{-19}$  C];

V: tensão nos terminais da célula [V];

n: fator de idealidade do diodo, número adimensional geralmente entre 1 e 2, obtido por ajuste de dados experimentais medidos;

k: constante de Boltzmann [ $1,38 \times 10^{-23}$  J/K];

T: temperatura absoluta [K].

A corrente na resistência paralela ( $I_p$ ) é dada pela equação (3.2).

$$I_p = \frac{V + R_S I}{R_p} \quad (3.2)$$

sendo:

I: corrente em  $R_S$ , que é a corrente fornecida pela célula fotovoltaica [A].

A corrente “I” pode ser escrita como mostrado na equação (3.3), em que todos os termos já foram definidos.

$$I = I_L - I_D - I_p \quad (3.3)$$

Reescrevendo a equação (3.3) em função das equações (3.1) e (3.2), obtém-se a equação (3.4), em que foi considerada a queda de tensão em  $R_S$ , dada por  $I \times R_S$ .

$$I = I_L - I_0 \left[ e^{\frac{q(V+IR_S)}{nkT}} - 1 \right] - \frac{V + R_S I}{R_p} \quad (3.4)$$

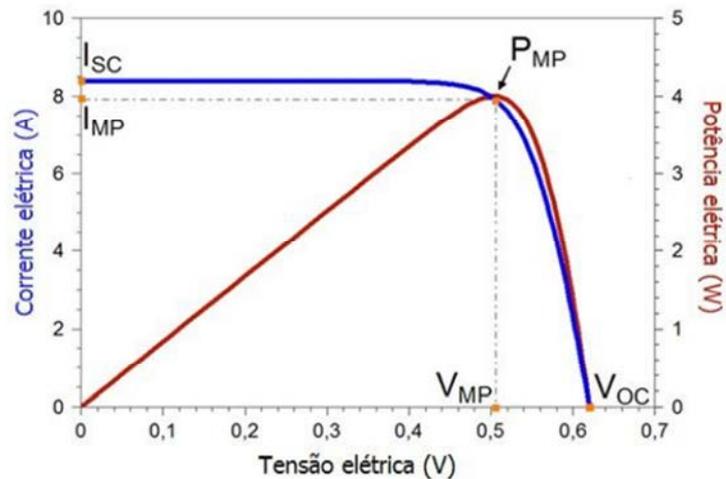
A equação (3.4) representa a curva característica, ou I-V, de uma célula fotovoltaica.

Para a obtenção da curva, a célula é exposta a condições-padrão de ensaio (STC – *standard test conditions*), obtidas em laboratório. Os resultados são também usados para a determinação de seu desempenho e para classificar e comparar as células.

As condições-padrão, ou STC, são: irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$ , temperatura da célula de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  e distribuição espectral para a massa de ar de 1,5 (COSTA, 2012).

Na Figura 3.3 é apresentada a curva I-V típica de uma célula fotovoltaica de Si (em azul). A curva P-V (em vermelho) é obtida a partir dos dados da curva I-V.

Figura 3.3 – Curvas I-V (em azul) e P-V (em vermelho) de uma célula fotovoltaica de Si de 156 mm x 156 mm sob condições-padrão de ensaio.



Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014).

Os pontos destacados na Figura 3.3 representam:

- $I_{SC}$ : corrente de curto-circuito;
- $V_{OC}$ : tensão de circuito aberto;
- $P_{MP}$ : potência máxima ou de pico;
- $I_{MP}$ : corrente no ponto de potência máxima;
- $V_{MP}$ : tensão no ponto de potência máxima.

### 3.5.4 Parâmetros elétricos

De acordo com Pinho e Galdino (2014), a partir da curva I-V mostrada na Figura 3.3, podem ser determinados os seguintes parâmetros elétricos que caracterizam as células fotovoltaicas:

- Tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ): tensão entre os terminais da célula quando não há corrente circulando. É a máxima tensão que a célula pode produzir.
- Corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ ): corrente medida na célula quando a tensão em seus terminais é nula. É a máxima corrente que se pode obter.
- Fator de forma (FF): razão entre a máxima potência da célula e o produto da corrente de curto-circuito pela tensão de circuito aberto, como mostra a equação (3.5), sendo  $0 < FF < 1$ . Quanto maior o valor de FF, melhor.

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} \quad (3.5)$$

- Eficiência ( $\eta$ ): parâmetro que define quão eficiente é o processo de conversão da energia solar em elétrica. É a relação entre a potência máxima produzida pela célula e a potência da energia solar incidente, dada pela equação (3.6).

$$\eta = \frac{P_{MP}}{A G} \cdot 100\% = \frac{V_{OC} I_{SC} FF}{A G} \cdot 100\% \quad (3.6)$$

sendo:

A: área da célula [ $m^2$ ];

G: irradiância solar incidente [ $W/m^2$ ].

A unidade da potência da célula fotovoltaica é o Wp (watt-pico), que é associada às condições-padrão de ensaio (STC).

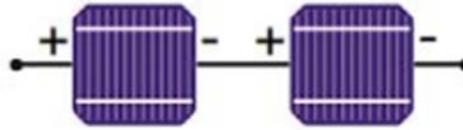
### 3.5.5 Associações de células

As células fotovoltaicas podem ser associadas em série e/ou em paralelo de forma a se obterem os níveis de tensão e corrente desejados.

#### a) Associação em série

Na associação em série, o terminal positivo de uma célula é conectado ao terminal negativo de outra, conforme se mostra na Figura 3.4. É conveniente que as curvas I-V das células sejam semelhantes, o quanto mais possível. Células cujas curvas são parecidas, são consideradas idênticas.

Figura 3.4 – Células fotovoltaicas associadas em série.



Fonte: Adaptada de (PINHO; GALDINO, 2014).

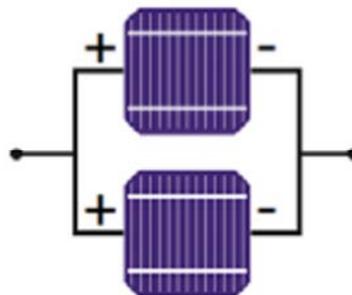
Quando células idênticas associadas em série estão submetidas às mesmas condições de irradiância e temperatura, a corrente que circula por elas é a mesma, e a tensão nos extremos da associação é dada pela soma das tensões de cada célula. Assim, quando se deseja aumentar a tensão, devem-se associar as células em série (HECKTHEUER, 2001).

Se células de diferentes correntes de curto-circuito são conectadas em série, a corrente da associação será limitada pela menor corrente. Tal caso não é recomendado na prática, pois pode causar superaquecimento (PINHO; GALDINO, 2014).

#### **b) Associação em paralelo**

Na associação em paralelo, os terminais positivos das células são conectados entre si, assim como os negativos, de acordo com o que se apresenta na Figura 3.5. Assim como para a conexão em série, as células devem ter suas curvas I-V semelhantes, para que possam ser consideradas idênticas. Caso contrário, também poderá ocorrer o superaquecimento.

Figura 3.5 – Células fotovoltaicas associadas em paralelo.



Fonte: Adaptada de (PINHO; GALDINO, 2014).

Quando células idênticas associadas em paralelo estão submetidas às mesmas condições de irradiância e temperatura, a tensão sobre todas as células é a mesma, e a corrente fornecida pela associação é dada pela soma das correntes que circula por cada célula. Assim, quando se deseja aumentar a corrente, as células devem ser associadas em paralelo (HECKTHEUER, 2001).

### **3.5.6 Efeitos da irradiância e da temperatura**

A irradiância solar e a temperatura da célula influenciam em suas características elétricas.

A corrente gerada pela célula aumenta linearmente com o aumento da irradiância, já a tensão gerada aumenta de forma logarítmica, sendo esta última uma variação pouco significativa.

A tensão nos terminais da célula diminui significativamente com o aumento de sua temperatura, enquanto que a corrente produzida sofre uma pequena elevação, geralmente desprezível (DEMONTE, 2003; PINHO; GALDINO, 2014).

## **3.6 MÓDULO FOTOVOLTAICO**

Uma única célula fotovoltaica produz uma tensão baixa (da ordem de 0,5 a 0,8 V para células de Silício), que não é suficiente para a maioria das aplicações práticas. Um módulo fotovoltaico é composto por células fotovoltaicas conectadas eletricamente, com a finalidade de produzir valores de tensão e corrente convenientes (ALMEIDA, 2012; PINHO; GALDINO, 2014).

O número de células de um módulo e a forma como estão conectadas (em série e/ou em paralelo) dependem da tensão e corrente desejadas. Deve-se ter cuidado ao selecionar as células que serão reunidas para a obtenção de um módulo, já que a incompatibilidade de suas características elétricas faz com que sejam produzidos módulos de baixa qualidade (PINHO; GALDINO, 2014).

As células fotovoltaicas são frágeis, assim, seu encapsulamento em placas rígidas ou flexíveis para a obtenção de módulos também tem a função de proporcionar proteção mecânica e contra as intempéries (ALMEIDA, 2012).

Os módulos fotovoltaicos são caracterizados pelos mesmos parâmetros elétricos e curvas características que as células, sendo também afetados pelo valor da irradiância solar e da temperatura.

Assim como as células, os módulos podem ser conectados em série e/ou em paralelo, para serem obtidas as correntes e tensões desejadas. Ao definir como serão associados os módulos, é necessário ter informações a respeito da instalação e dos componentes que serão utilizados, pois as correntes e tensões resultantes devem ser compatíveis com os mesmos (PINHO; GALDINO, 2014).

### 3.6.1 Identificação das características elétricas

Algumas informações essenciais, relacionadas às características elétricas dos módulos, normalmente constam na etiqueta afixada em cada módulo, como mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Dados que constam na etiqueta do módulo fotovoltaico.

Informação	Significado ou importância da informação
Nome do fabricante	Identificação do responsável pela qualidade do módulo
Identificação do modelo	Pelo modelo pode-se identificar a folha de dados técnicos com informações sobre tecnologia, potência e tolerância
Número de série	O número de série é obrigatório para registro, qualificação, rastreabilidade e garantia do produto
Tensão máxima do sistema	Indica o maior valor de tensão de circuito aberto de um arranjo onde o módulo pode ser instalado
Tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ )	Multiplicando-se $V_{OC}$ de cada módulo pelo número de módulos em série em um arranjo, obtém-se $V_{OC}$ do arranjo
Corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ )	Multiplicando-se $I_{SC}$ de cada módulo pelo número de módulos em paralelo em um arranjo, obtém-se $I_{SC}$ do arranjo
Tensão de máxima potência ( $V_{MP}$ )	Multiplicando-se $V_{MP}$ de cada módulo pelo número de módulos em série em um arranjo, obtém-se $V_{MP}$ nominal do arranjo
Corrente de máxima potência ( $I_{MP}$ )	Multiplicando-se $I_{MP}$ de cada módulo pelo número de módulos em paralelo em um arranjo, obtém-se $I_{MP}$ nominal do arranjo
Potência nas condições-padrão de ensaio (STC)	Potência máxima nominal do módulo nas condições de irradiância de $1.000 \text{ W/m}^2$ , espectro AM 1,5 e temperatura de célula de $25^\circ\text{C}$
Temperatura nominal da célula nas condições de operação (NOCT)	Temperatura das células do módulo nas condições de irradiância de $800 \text{ W/m}^2$ , temperatura ambiente de $20^\circ\text{C}$ e velocidade de vento de $1 \text{ m/s}$

### 3.7 CONVERSOR CC-CA

O conversor CC-CA é um dispositivo eletrônico que tem a função de fornecer energia elétrica em corrente alternada (CA) a partir de uma fonte em corrente contínua (CC). A tensão CA de saída deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequados às cargas a serem alimentadas.

Em um sistema fotovoltaico, a função do conversor é converter a energia elétrica gerada em corrente contínua pelos módulos fotovoltaicos em energia elétrica em corrente alternada. Esta última é fornecida aos consumidores, no caso de sistemas fotovoltaicos isolados (SFIs), ou é injetada na rede elétrica, no caso de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCRs) (PINHO; GALDINO, 2014).

O conversor utilizado em SFCRs funciona apenas quando a rede está em operação. Se a mesma estiver desenergizada por motivo de falha ou manutenção, o conversor deve desligar-se por duas razões: não foi projetado para operar sem a rede e deve garantir a segurança dos equipamentos conectados a ela e das pessoas que possam estar realizando sua manutenção (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Em SFCRs, a tensão de saída do conversor deve estar sincronizada com a tensão da rede e atender a determinados padrões exigidos pelas concessionárias de distribuição. Caso isso não ocorra, o conversor também deve ser desconectado da rede (PEREIRA; GONÇALVES, 2008).

Assim, em um SFCR, além de converter energia elétrica CC em CA, o conversor também tem a função de desconectar o sistema de geração fotovoltaica caso a rede esteja fora de operação ou quando os padrões da energia elétrica gerada não atendem às exigências da concessionária.

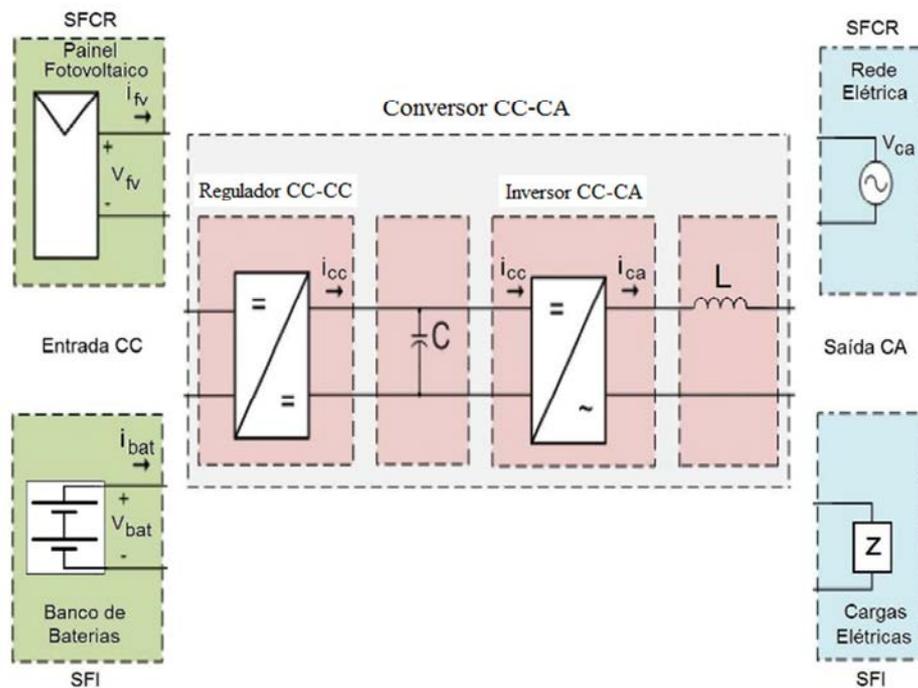
De modo geral, conversores para conexão à rede com potências de até 5 kW, aproximadamente, têm saída monofásica. Para potências superiores, é mais comum a utilização de conversores com saída trifásica, ou conversores monofásicos em associação trifásica. Para conversores de potências nominais de até dezenas de kW, a saída CA é geralmente em baixa tensão (127 V ou 220 V) (PINHO; GALDINO, 2014; VILLALVA; GAZOLI, 2012).

### 3.7.1 Circuitos que compõem o conversor CC-CA

Comercialmente, o conversor CC-CA é fornecido como um único equipamento, que faz a conexão entre os módulos fotovoltaicos e as cargas, no caso de um SFI, ou entre os módulos e a rede elétrica de distribuição, no caso de um SFCR, conforme ilustra a Figura 3.3. Todavia, o conversor é composto por diversos circuitos eletrônicos, como regulador CC-CC, seguidor do ponto de potência máxima (SPPM) e inversor CC-CA. Tais circuitos são explicados com mais detalhes nos itens 3.8, 3.9 e 3.10.

Na Figura 3.6, nota-se que, quando se trata de um conversor para SFCR, a entrada CC provém diretamente do painel fotovoltaico, enquanto que no caso de um conversor para SFI, a entrada CC é proveniente de um banco de baterias. O capacitor (C) tem a função de suavizar as oscilações da saída do regulador. O indutor (L) permite compatibilizar a saída do conversor CC-CA com a tensão da rede.

Figura 3.6 – Conversor CC-CA.



Fonte: Adaptada de (PINHO; GALDINO, 2014).

### 3.8 REGULADOR CC-CC

A tensão mínima proporcionada pelos módulos fotovoltaicos, que é aplicada à entrada do inversor CC-CA, deve ser equivalente ao valor de pico da tensão CA da rede, ou o dobro dela, dependendo da configuração da ponte inversora (PINHO; GALDINO, 2014). Dessa forma, o regulador CC-CC tem a função de adequar a tensão de saída dos módulos, já que seu valor não é constante e, se necessário, deve também proporcionar um aumento do seu valor, podendo assim ser aplicada ao inversor.

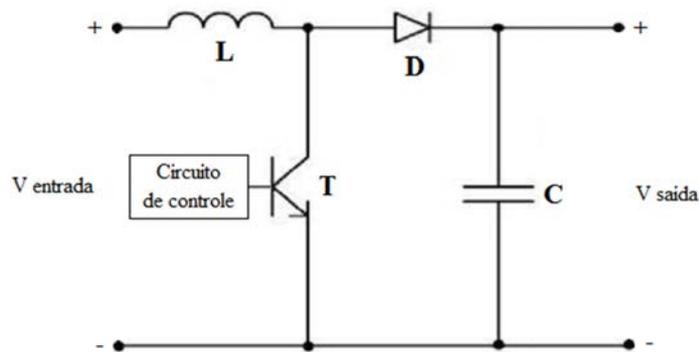
Um conversor CC-CA pode possuir transformador ou não. No Brasil, para SFCRs, o uso de um transformador de acoplamento é obrigatório para sistemas com potência instalada superior a 100 kWp, de forma que se o mesmo já não estiver incorporado no conversor CC-CA, deve ser instalado externamente (ANEEL, 2012).

O transformador pode fazer parte do regulador CC-CC interno ao conversor CC-CA. Como a aplicação deste trabalho é no segmento residencial, cuja potência instalada não é superior a 100 kWp, enquadrando-se portanto como micro geração, a utilização do transformador não é obrigatória. Desse modo, escolheu-se uma topologia de regulador CC-CC não isolado, ou seja, que não utiliza transformador, para ser explicada com detalhes, denominada “*boost*”.

#### 3.8.1 Regulador CC-CC do tipo *boost*

O regulador *boost* é um regulador chaveado que não utiliza transformador, sendo, portanto, do tipo não isolado. Sua tensão de saída é maior que a de entrada, sendo então um elevador de tensão, característica ideal para a aplicação em sistemas fotovoltaicos, já que muitas vezes é necessário aumentar a tensão proveniente dos módulos antes que a mesma seja aplicada ao inversor.

A Figura 3.7 apresenta o circuito de um regulador *boost*. O dispositivo de chaveamento T, apesar de estar representado pelo símbolo de um BJT, pode ser também um MOSFET ou um IGBT. O circuito de controle utilizado para colocá-lo ou tirá-lo do estado de condução (fechar ou abrir a chave) normalmente utiliza modulação por largura de pulso (PWM – *pulse width modulation*) com frequência fixa (RASHID, 2014).

Figura 3.7 – Regulador *boost*.

Fonte: Da autora.

Quando a chave T é fechada, ou seja, o dispositivo é colocado em condução, a corrente circula apenas pelo indutor L e por T, sendo que L é carregado. Quando a chave é aberta (dispositivo desligado), a corrente deixa de passar por T e flui através de L, do diodo D, do capacitor C e da carga que estiver conectada aos terminais de saída. Nesse momento, o indutor tem sua polaridade invertida e passa a fornecer energia ao circuito. Dessa forma, o capacitor se carrega com a tensão de entrada (proveniente dos módulos fotovoltaicos) acrescida da tensão no indutor. Portanto, a tensão no capacitor é maior que a de entrada. Quando a chave for fechada novamente, o capacitor é quem fornecerá energia à carga, cuja tensão será igual a do capacitor.

A função do diodo é não deixar que o capacitor se descarregue através da chave, fazendo com que forneça energia somente à carga quando a chave estiver fechada.

### 3.9 SEGUIDOR DO PONTO DE POTÊNCIA MÁXIMA (SPPM)

As curvas I-V e P-V de um módulo fotovoltaico são afetadas pelas condições climáticas, principalmente pela irradiância solar e pela temperatura. Quando as curvas são alteradas, altera-se também o ponto de máxima potência do módulo ( $P_{MP}$ ). Surge-se então a necessidade de buscar tal ponto para diferentes condições climáticas, de forma que a tensão extraída do módulo seja a que proporciona a maior potência, a fim de evitar perdas. O circuito responsável por executar essa busca é chamado de seguidor do ponto de potência máxima (SPPM), ou, em inglês, *maximum power point tracker* (MPPT) (BRITO et al., 2010).

Conversores CC-CA para SFCRs normalmente possuem um SPPM na entrada do regulador CC-CC.

Um dispositivo SPPM pode ser dividido em dois blocos: condicionamento de potência e controle. O bloco de potência é o próprio regulador CC-CC chaveado. O bloco de controle realiza o ajuste da tensão de polarização do gerador fotovoltaico através de algoritmos que atuam sobre o controle eletrônico (*driver*) dos dispositivos de chaveamento do regulador.

O algoritmo de controle tem como entrada dados instantâneos de tensão e corrente de operação do gerador fotovoltaico (além de, eventualmente, outros parâmetros como temperatura da célula e irradiância solar). Sua implementação pode ser feita de forma analógica ou, mais comumente, digital, através de microprocessadores ou processamento digital de sinais (DSP – *digital signal processing*) (PINHO; GALDINO, 2014).

O seguimento do ponto de potência máxima pode ser realizado através de métodos diretos ou indiretos. Os métodos diretos, ou de seguimento verdadeiro, utilizam medições em tempo real da corrente e da tensão disponíveis para encontrar o ponto de potência máxima do gerador fotovoltaico, não necessitando de informações prévias sobre suas características e são, em princípio, capazes de reagir a variações rápidas nas condições de operação dos módulos.

Os métodos indiretos (também chamados de quase-seguimento) utilizam um sinal de referência (irradiância, temperatura dos módulos, corrente de curto-circuito ou tensão de circuito aberto de uma célula de referência ou do próprio gerador fotovoltaico) para estimar o ponto de máxima potência. Essa informação é confrontada com uma base de dados ou algum modelo matemático com as características previamente determinadas do gerador fotovoltaico. Por serem sujeitos a imprecisões e incapazes de detectar os efeitos de sombreamentos parciais, envelhecimento e acúmulo de sujeira sobre os módulos, os métodos indiretos são pouco utilizados (PINHO; GALDINO, 2014).

Uma comparação entre as principais técnicas utilizadas para a obtenção do ponto de potência máxima de painéis fotovoltaicos pode ser vista em Brito et al. (2010).

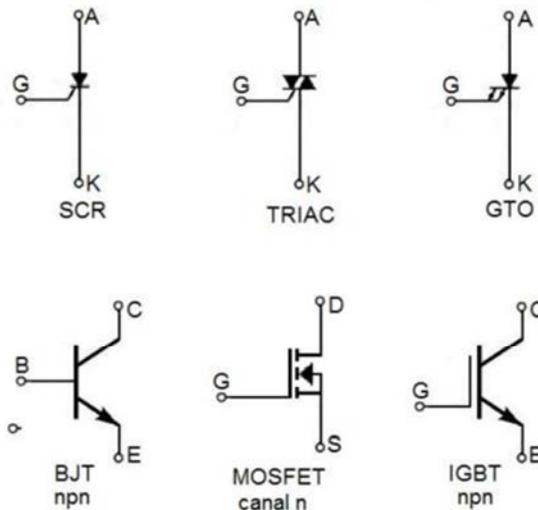
### 3.10 INVERSOR CC-CA

Conforme a Figura 3.6, a saída do regulador CC-CC vai para a entrada do inversor CC-CA, que converte a tensão CC em CA, para que possa ser injetada na rede elétrica, no caso de SFCRs.

O inversor é composto por dispositivos semicondutores de potência, operando como chaves eletrônicas controláveis.

Os principais dispositivos utilizados são: SCR, TRIAC e GTO, genericamente denominados de tiristores, e BJT, MOSFET e IGBT, chamados de transistores (ALMEIDA, 2012; PINHO; GALDINO, 2014). Os símbolos dos componentes mencionados são apresentados na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Símbolos de componentes utilizados em inversores CC-CA (A – anodo; K – catodo; G – gate; B – base; C – coletor; E – emissor; D – dreno; S – fonte).



Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014).

### 3.10.1 Classificação dos inversores

Segundo Pinho e Galdino (2014), os inversores podem receber duas classificações de acordo com seu princípio de funcionamento: comutados pela rede (comutação natural) e autocomutados (comutação forçada). Os autocomutados podem ser do tipo fonte de tensão (VSI) ou fonte de corrente (CSI).

Os inversores comutados pela rede (para SFCRs) utilizam tiristores como elementos de chaveamento, que são capazes de suportar altas tensões e correntes e, apesar de sua robustez e simplicidade, apresentam baixa qualidade de tensão e corrente de saída (devido à alta quantidade de harmônicos), necessitando da utilização de filtros complexos, onerosos e que implicam em perdas.

Com o surgimento de dispositivos como os MOSFETs e IGBTs, a utilização de inversores a tiristor foi sendo reduzida, ficando restrita a aplicações de potência elevada (acima de 100 kW) e a acionadores (*drivers*) de motores elétricos de grande porte.

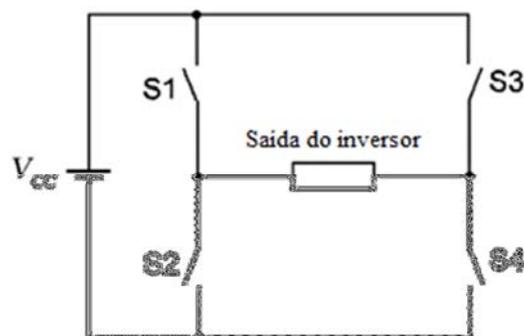
Nos inversores autocomutados, os elementos de chaveamento são semicondutores que podem ser postos em estado de condução ou de corte através de um terminal de controle. Geralmente são utilizados IGBTs ou MOSFETs, que permitem um bom controle da forma de onda e do valor da tensão de saída.

Em sistemas fotovoltaicos, a configuração fonte de tensão (VSI) é a mais utilizada. O controle pode ser feito por tensão ou corrente, dependendo da grandeza de saída utilizada como referência. Devido a sua estabilidade diante de perturbações na rede e à facilidade no controle do fator de potência, o controle por corrente é adotado na maioria dos inversores para SFGRs, já o controle por tensão é mais utilizado em inversores para SFIs (PINHO; GALDINO, 2014).

### 3.10.2 Princípio de funcionamento dos inversores

O princípio de funcionamento de um inversor CC-CA é baseado no circuito monofásico em ponte completa (*full bridge*) apresentado na Figura 3.9. As chaves S1, S2, S3 e S4 estão representadas de forma genérica e podem, em princípio, ser qualquer um dos dispositivos semicondutores apresentados no item 3.10, devendo estar associados aos correspondentes circuitos de controle. A fonte CC ( $V_{CC}$ ) é proveniente da saída do regulador CC-CC.

Figura 3.9 – Inversor CC-CA monofásico em ponte completa.

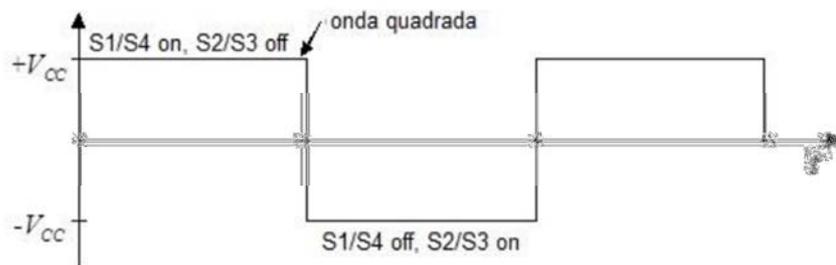


Fonte: Adaptada de (PINHO; GALDINO, 2014).

Quando S1 e S4 são ligadas, permanecendo S2 e S3 desligadas, a corrente na saída do inversor flui da esquerda para a direita. Quando S2 e S3 são ligadas, permanecendo S1 e S4 desligadas, a corrente flui da direita para a esquerda. Assim, quando o par de chaves de uma diagonal é ligado, obtém-se determinada polaridade de tensão na saída do inversor e, quando o par da outra diagonal é ligado, tal polaridade é invertida. Em ambos os casos, a amplitude da tensão na saída do inversor é  $V_{CC}$ , se forem desconsideradas as quedas de tensão nas chaves (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Se as chaves forem acionadas aos pares de forma alternada e sincronizada (S1/S4 e S2/S3) em uma dada frequência, o sinal de tensão resultante na saída do inversor será uma onda quadrada CA, variando de  $-V_{CC}$  a  $+V_{CC}$ , como mostra a Figura 3.10. Apesar de ter como vantagem a simplicidade, esse tipo de acionamento não permite o controle da amplitude nem do valor eficaz (RMS) da tensão (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 3.10 – Onda quadrada na saída do inversor CC-CA.

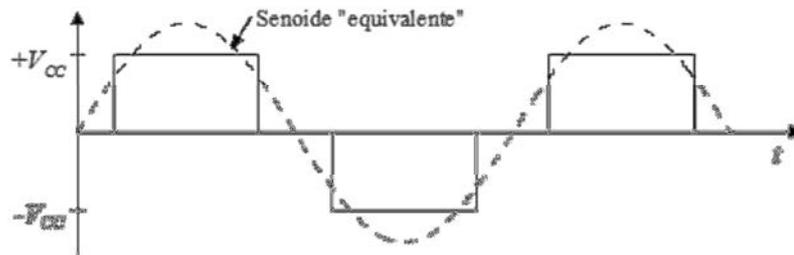


Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014).

Se, ao desligar o par S1/S4, o par S2/S3 não for ligado logo em seguida (e o mesmo ocorrer quando for desligado S2/S3 e ligado S1/S4), haverá a defasagem de um determinado ângulo (tempo), provocando cancelamentos de tensão em determinados intervalos do ciclo. O resultado na saída do inversor será uma onda quadrada modificada (ou onda senoidal modificada), como mostrada na Figura 3.11.

Nesse caso, a tensão RMS de saída passa a poder ser controlada através do ângulo de defasagem no disparo dos dispositivos de chaveamento, e a forma de onda apresenta menor distorção harmônica (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 3.11 – Onda quadrada modificada na saída do inversor CC-CA.



Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014).

As saídas dos inversores de onda quadrada e onda quadrada modificada apresentam alta distorção harmônica, cuja atenuação pode ser feita através de filtros que, além de caros, complexos e volumosos, geralmente consomem muita potência. Dessa forma, o uso desses tipos de inversores é limitado a aplicações em SFIs e, mesmo assim, para a alimentação de cargas não críticas (PINHO; GALDINO, 2014).

Com a modificação do tipo de chaveamento e o aumento do número de pulsos a cada semiciclo, reduz-se a distorção harmônica, e a forma de onda vai se aproximando da senoidal.

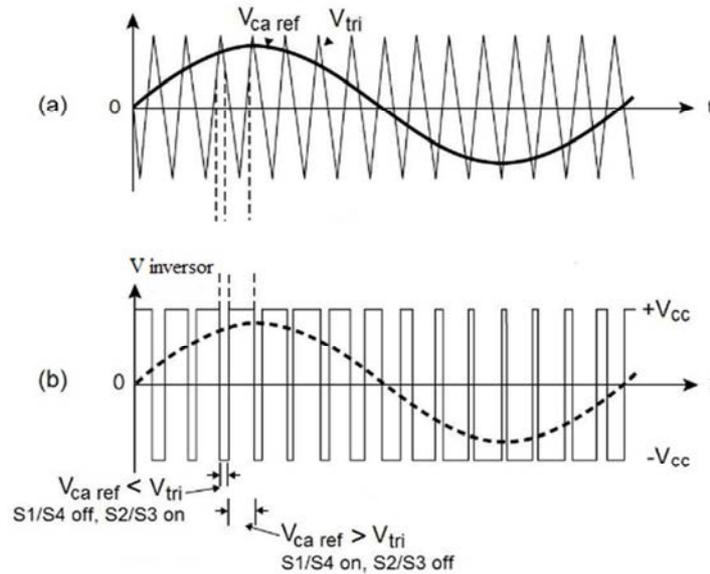
Em inversores modernos, o tipo de controle mais utilizado é a modulação por largura de pulso (PWM – *pulse width modulation*), que se baseia no acionamento das chaves a uma frequência constante, porém com um ciclo de trabalho (razão entre o tempo de condução e o período) variando ao longo do semiciclo, proporcionalmente ao valor instantâneo de um sinal de referência (PINHO; GALDINO, 2014).

A Figura 3.12(a) apresenta uma possível estratégia de chaveamento PWM, em que uma tensão de referência ( $V_{ca\ ref}$ ), que é uma senóide na frequência da rede (60 Hz), é comparada com um sinal triangular ( $V_{tri}$ ) de frequência superior, ambas geradas no circuito de controle do inversor CC-CA.

Quando a tensão de referência tem valor superior ao da onda triangular, são postas em condução as chaves S1/S4 (S2/S3 permanecem desligadas), sendo aplicada uma tensão positiva ( $+V_{CC}$ ) na saída do inversor. Quando a tensão de referência é inferior à onda triangular, ocorre o inverso, ou seja, são ligadas as chaves S2/S3 (S1/S4 ficam desligadas) e é aplicada uma tensão negativa ( $-V_{CC}$ ) à saída do inversor (PINHO; GALDINO, 2014).

Após uma filtragem com filtro passa-baixa para retirar os harmônicos de alta frequência, o sinal de saída é praticamente senoidal, conforme mostrado na Figura 3.12(b).

Figura 3.12 – Controle PWM para um inversor CC-CA – (a) Tensões de controle ( $V_{ca\ ref}$  e  $V_{tri}$ ) e (b) Tensão na saída do inversor ( $V_{inversor}$ ).



Fonte: Adaptada de (PINHO; GALDINO, 2014).

O princípio de funcionamento de um inversor CC-CA trifásico é semelhante ao descrito para o circuito monofásico da Figura 3.9, sendo que ao mesmo é incluído mais um par de dispositivos de chaveamento. O controle PWM trifásico utilizaria como referência uma onda triangular e três ondas senoidais defasadas de  $120^\circ$  (PINHO; GALDINO, 2014).

### 3.11 OUTRAS FUNÇÕES DO CONVERSOR CC-CA

Os conversores CC-CA geralmente apresentam funções de monitoração e aquisição de dados, disponibilizando ao usuário informações operacionais. Entre os dados que podem fornecer estão: energia diária gerada, estado do equipamento, histórico de falhas, valores instantâneos de  $P_{CC}$  (potência CC),  $P_{CA}$  (potência CA),  $V_{CC}$  (tensão CC),  $V_{CA}$  (tensão CA), entre outros.

Alguns equipamentos permitem a conexão de sensores externos (irradiância solar, temperatura, etc). Os dados podem ser consultados no próprio painel do equipamento ou transferidos através de interfaces como USB e redes *wireless* para análise detalhada em um computador (PINHO; GALDINO, 2014).

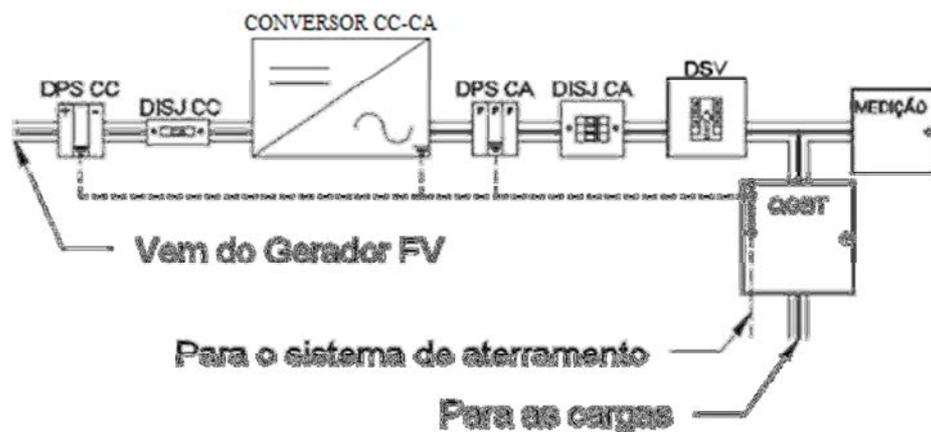
### 3.12 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO DE SFCRS

Alguns equipamentos utilizados em sistemas fotovoltaicos apresentam dispositivos de proteção integrados, como os anti-ilhamento, presentes na maioria dos conversores CC-CA para SFCRs. Além dos dispositivos de proteção integrados aos equipamentos, deve ser prevista a instalação de dispositivos externos de proteção, como disjuntores, dispositivos de proteção contra surtos (DPS), sistemas de aterramento e sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) (PINHO; GALDINO, 2014; VILLALVA; GAZOLI, 2012).

No caso de SFCRs, deve haver uma chave seccionadora sob carga, chamada de dispositivo de seccionamento visível (DSV), utilizada para garantir a desconexão da geração fotovoltaica durante procedimentos de manutenção da rede.

O SPDA deve proteger a área onde está instalado o gerador fotovoltaico e a estrutura de abrigo dos dispositivos de condicionamento de potência, devendo estar conectado a um sistema de aterramento adequado, assim como os DPSs, o conversor CC-CA e o barramento de aterramento do quadro geral da instalação (PINHO; GALDINO, 2014).

A Figura 3.13 apresenta uma instalação típica de dispositivos de proteção em um SFCR.



Fonte: Adaptada de (PINHO; GALDINO, 2014).

## **4 APLICAÇÃO**

### **4.1 PROJETO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO**

Quando se trata de um SFI, procura-se atender integralmente a necessidade de energia elétrica do consumidor, assim, o primeiro passo é estimá-la, para então proceder ao projeto do sistema fotovoltaico.

No caso de um SFCR, o consumo de energia da instalação é menos importante, pois pode ser complementado com a energia elétrica da rede de distribuição. A quantidade de energia suprida pelo sistema fotovoltaico pode ser determinada pela área disponível para a instalação dos módulos ou pelo valor do investimento que o consumidor deseja realizar (PINHO; GALDINO, 2014; VILLALVA; GAZOLI, 2012).

### **4.2 PROJETO DE UM SFCR RESIDENCIAL**

A seção 3.7 do módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) trata do acesso à rede de distribuição através da micro e mini geração distribuída, que compreende os SFCRs residenciais, devendo ser seguida durante seu projeto.

Também deve ser respeitada a norma específica da concessionária local de distribuição que, de acordo com o PRODIST, deve estar acessível na página de internet da empresa, em um processo que se inicia pela solicitação de acesso (PINHO; GALDINO, 2014).

A seguir, é apresentado o projeto de uma edificação sustentável, que contempla a utilização de sistema fotovoltaico para a geração de energia elétrica.

### **4.3 PROJETO DE EDIFICAÇÃO SUSTENTÁVEL DENTRO DO CAMPUS DA FACULDADE DE ENGENHARIA DE GUARATINGUETÁ (FEG) - UNESP**

Há um projeto de edificação sustentável a ser implementado dentro do campus da FEG - UNESP, cujas informações foram apresentadas por João Victor Mussi através de Relatório Científico entregue à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), em 2013.

No projeto, a edificação sustentável é dividida em duas partes: a Agência de Sustentabilidade e a Casa do Professor Visitante.

A Agência de Sustentabilidade tem como objetivo acolher estudantes, professores e eventual público externo com interesse na área ambiental. Devem ser previstas estações de trabalho que proporcionem o atendimento ao público e o desenvolvimento de pesquisas e estudos voltados aos interesses da universidade, principalmente do campus de Guaratinguetá, onde a agência estará localizada.

A Casa do Professor Visitante visa a acolher professores e pesquisadores de outras instituições, que venham ao campus de Guaratinguetá para realizar atividades referentes à melhoria dos cursos de graduação e pós-graduação (MUSSEI, 2013).

A Figura 4.1 apresenta uma planta do projeto da edificação sustentável, contendo a Agência de Sustentabilidade e a Casa do Professor Visitante.

Figura 4.1 – Planta do projeto da edificação sustentável.



#### 4.4 PROJETO DO SFCR A SER IMPLEMENTADO NA EDIFICAÇÃO SUSTENTÁVEL

O sistema fotovoltaico a ser implementado na edificação sustentável é do tipo distribuído conectado à rede. As principais etapas de seu projeto são descritas a seguir.

##### 4.4.1 Localização da edificação e estimativa do recurso solar disponível

Antes de proceder ao dimensionamento do sistema fotovoltaico, deve-se definir sua localização e estimar o recurso solar disponível no local.

A edificação em questão deverá ser construída na cidade de Guaratinguetá/SP, dentro do campus da FEG-UNESP.

Para estimar o recurso solar disponível no local foi usado o programa SunData, disponibilizado em Cresesb (2015). Tal programa destina-se à determinação da irradiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território brasileiro, auxiliando no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos (CRESESB, 2015).

Para a obtenção do valor da irradiação solar, devem-se informar as coordenadas geográficas (latitude e longitude) da cidade de interesse. O programa fornece valores de irradiação para três cidades próximas. Caso a cidade de interesse não seja listada, devem-se utilizar os dados da cidade mais próxima.

A cidade de Guaratinguetá possui latitude 22,804539° sul e longitude 45,190854° oeste. Ao serem inseridos tais valores no programa, o mesmo forneceu a Tabela 4.1, que apresenta os valores de irradiação solar, em kWh/(m<sup>2</sup>.dia), no plano horizontal, correspondentes às médias diárias mensais para os doze meses do ano de três cidades próximas.

Tabela 4.1 – Irradiação solar diária média mensal no plano horizontal para cidades próximas à Guaratinguetá.

##### Localidades próximas

Latitude: 22,804539° S  
Longitude: 45,190854° O

#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m <sup>2</sup> .dia]												Média	Delta			
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set			Out	Nov	Dez
<input checked="" type="checkbox"/>	Lorena	Lorena	SP	BRA	22,7308° S	45,124722° O	10,7	5,35	5,23	4,65	4,07	3,49	3,02	3,49	3,95	3,95	4,65	5,35	5,12	4,36	2,33
<input checked="" type="checkbox"/>	Pindamonhangaba	Pindamonhangaba	SP	BRA	22,9° S	45,461666° O	29,7	5,00	4,61	4,61	3,81	3,28	2,78	3,22	3,78	4,03	4,22	5,06	6,17	4,13	2,39
<input checked="" type="checkbox"/>	Tremembé	Tremembé	SP	BRA	22,9° S	45,549444° O	38,3	5,00	4,92	4,72	4,14	3,64	3,22	3,64	4,17	4,28	4,64	5,39	5,06	4,40	2,17

Fonte: (CRESESB, 2015).

Nota-se, pela Tabela 4.1, que a cidade de Guaratinguetá não foi listada. Decidiu-se então utilizar os dados da cidade de Lorena, que é a mais próxima.

Para cada uma das três localidades listadas, o programa também fornece os valores de irradiação solar convertidos do plano horizontal para planos inclinados com três diferentes ângulos de inclinação em relação ao plano horizontal: ângulo igual à latitude, ângulo que fornece o maior valor médio diário anual de irradiação solar e ângulo que fornece o maior valor mínimo diário anual de irradiação solar. Os valores correspondentes à cidade de Lorena são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Irradiação solar diária média mensal para a cidade de Lorena para diferentes ângulos de inclinação em relação ao plano horizontal.

#### Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Lorena  
Município: Lorena , SP - BRA  
Latitude: 22,7308° S  
Longitude: 45,124722° O  
Distância do ponto de ref. ( 22,804539° S; 45,190854° O ): 10,7 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m <sup>2</sup> .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	5,35	5,23	4,85	4,07	3,49	3,02	3,49	3,95	3,95	4,65	5,35	5,12	4,36	2,33
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	23° N	4,85	4,99	4,77	4,57	4,28	3,84	4,42	4,62	4,16	4,54	4,91	4,59	4,54	1,15
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	20° N	4,94	5,05	4,78	4,54	4,20	3,76	4,33	4,56	4,16	4,58	5,00	4,69	4,55	1,30
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	35° N	4,40	4,65	4,61	4,62	4,48	4,09	4,69	4,75	4,09	4,28	4,48	4,15	4,44	,66

Fonte: (CRESESB, 2015).

Tais inclinações apresentam-se como sugestões para a instalação dos módulos fotovoltaicos. A escolha de seu valor depende principalmente das atividades para as quais a instalação se destina e dos requisitos do projeto. Em geral, o valor da latitude local é usado como ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos.

Os valores de irradiação solar obtidos pelo SunData são apenas orientações para auxiliar no dimensionamento do sistema fotovoltaico, pois são valores consolidados de um histórico de medições que varia ao longo dos anos (CRESESB, 2015).

No atual projeto, é utilizado o menor valor de irradiação solar correspondente ao ângulo de inclinação igual à latitude, que é 3,84 kWh/(m<sup>2</sup>.dia), referente ao mês de junho. Escolheu-se utilizar o menor dos valores a fim de dimensionar um sistema fotovoltaico que consiga suprir a demanda para a qual foi projetado pelo maior tempo possível. Se o maior valor fosse utilizado, o mesmo poderia não ser obtido em determinados períodos do dia.

Para obter o valor da irradiância solar (em  $W/m^2$ ) a partir do valor da irradiação, divide-se este último por 24, a fim de eliminar a unidade “hora”, e multiplica-se por 1000, para transformar de “quilowatt” para “watt”. Assim, a irradiação de 3,84 kWh/(m<sup>2</sup>.dia) corresponde a uma irradiância média ao longo do dia de 160 W/m<sup>2</sup>.

#### 4.4.2 Determinação da área disponível para a instalação dos módulos e estimativa da potência elétrica obtida pela geração fotovoltaica

Para estimar o valor da potência elétrica que será obtida pela geração fotovoltaica, precisa-se ter conhecimento da área disponível para a instalação dos módulos. No atual projeto, os mesmos serão instalados sobre o telhado da edificação.

A cidade de Guaratinguetá encontra-se no hemisfério sul, em que o lado da edificação voltado para o norte é o que apresenta insolação e ventilação mais adequadas. O escritório da Agência de Sustentabilidade e o quarto da Casa do Professor Visitante são os cômodos que ficarão localizados na face norte da edificação (MUSSI, 2013).

Considerando que o telhado possuirá duas águas e que a cumeeira ficará posicionada sobre a parede esquerda do escritório da Agência de Sustentabilidade (tendo como referência a planta da Figura 4.1), a água maior, voltada para o norte, que cobrirá toda a Agência de Sustentabilidade e parte da Casa do Professor Visitante, deverá ser utilizada para a instalação dos módulos fotovoltaicos.

Villalva e Gazoli (2012) sugerem que a inclinação dos módulos seja associada à latitude geográfica local, de acordo com o que é apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Determinação do ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos.

Latitude geográfica do local (L)	Ângulo ( $\alpha$ ) de inclinação recomendado [graus]
0° a 10°	10
11° a 20°	L
21° a 30°	L + 5
31° a 40°	L + 10
41° ou mais	L + 15

Fonte: (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Considerando que a água do telhado utilizada para a instalação dos módulos terá a mesma inclinação destes, determinada pela Tabela 4.3 ( $\alpha = 22,8^\circ + 5^\circ = 27,8^\circ \approx 28^\circ$ ), a área disponível para a instalação dos módulos será 60,12 m<sup>2</sup>. Para o cálculo dessa área não foram considerados os beirais do telhado, visto que não apresentam uma sustentação adequada para a instalação dos painéis fotovoltaicos.

Através da equação (3.6), pode-se calcular a potência média diária fornecida pelo sistema fotovoltaico, sendo  $A = 60,12 \text{ m}^2$  (área da água do telhado voltada para o norte),  $G = 160 \text{ W/m}^2$  (irradiância média diária) e  $\eta = 15,4\%$  (considerando-se um módulo comercial de silício policristalino).

$$P_{\text{média}} = \eta \cdot A \cdot G = 0,154 \cdot 60,12 \cdot 160 = 1481 \text{ W}$$

Nota-se que, apesar da potência ter sido calculada pela equação (3.6), ela não representa o valor da potência máxima, e sim da potência média fornecida ao longo de um dia, já que o valor da irradiância, usado no cálculo, foi obtido através da irradiação solar média diária.

Considerando-se as características de um módulo fotovoltaico comercial, apresentadas na Tabela 4.4, observa-se que a área de cada módulo é 1,63 m<sup>2</sup>, sendo possível a instalação de 36 módulos sobre o telhado de área 60,12 m<sup>2</sup>. Como a potência máxima de cada módulo é 250 Wp, a potência máxima que o sistema poderá fornecer será 9000 Wp. Esse valor é bem superior à potência média calculada pela equação (3.6), pois se trata de um valor máximo, e não médio, e devido ao fato da potência máxima de cada módulo (250 Wp) ter sido obtida nas condições-padrão de ensaio (STC), cuja irradiância é diferente da utilizada no cálculo.

Tabela 4.4 – Características de um módulo fotovoltaico comercial (continua).

Material da célula	Silício policristalino
Número de células	60
Eficiência do módulo	15,4%
$P_{\text{MP}}$ (potência máxima ou de pico)	250 Wp
$I_{\text{MP}}$ (corrente no ponto de potência máxima)	8,39 A
$V_{\text{MP}}$ (tensão no ponto de potência máxima)	29,8 V
$I_{\text{SC}}$ (corrente de curto-circuito)	8,92 A

Tabela 4.4 – Características de um módulo fotovoltaico comercial (continuação).

$V_{OC}$ (tensão de circuito aberto)	37,6 V
Tensão máxima do sistema	1000 V
$\beta_{OC}$ (coeficiente de temperatura para a $V_{OC}$ )	- 0,32 %/°C
$\beta_{MP}$ (coeficiente de temperatura para a $V_{MP}$ )	- 0,42 %/°C
Dimensões do módulo	(1650 x 990 x 35) mm

Fonte: (YINGLI SOLAR, 2015).

#### 4.4.3 Determinação das características do conversor CC-CA

Para determinar as características do conversor CC-CA, comercialmente chamado de inversor, a ser utilizado em um SFCR, devem-se levar em conta os critérios descritos a seguir, de acordo com Pinho e Galdino (2014) e Villalva e Gazoli (2012), os quais são aplicados no dimensionamento do conversor a ser utilizado no SFCR da edificação sustentável.

##### a) Potência nominal

Em princípio, a potência nominal do conversor CC-CA deveria ser igual à potência máxima do gerador fotovoltaico (conjunto de módulos), entretanto, é comum subdimensionar o conversor, visto que a potência máxima do gerador só é atingida nas condições-padrão de ensaio (STC). Na maior parte do tempo, o gerador fotovoltaico fornece uma potência abaixo de sua capacidade nominal.

Outra razão é que, caso os módulos apresentem potência superior à potência nominal do conversor, este último não será danificado, apenas não vai proporcionar o máximo aproveitamento da potência do gerador fotovoltaico.

O fator de dimensionamento do inversor (FDI) representa a relação entre a potência nominal CA do conversor (comumente chamado de inversor) e a potência de pico do gerador fotovoltaico, conforme a equação (4.1).

$$FDI = \frac{P_{conv}}{P_{ger\ FV}} \quad (4.1)$$

sendo:

$P_{conv}$ : potência CA nominal do conversor CC-CA [W];

$P_{ger\,FV}$ : potência máxima (ou de pico) do gerador fotovoltaico [Wp].

Quando o conjunto de módulos disponibiliza uma potência superior à capacidade do conversor, a potência de saída deste último fica limitada ao seu valor nominal, havendo perdas de energia ao longo de um dado período de tempo (PEREIRA; GONÇALVES, 2008).

Macêdo (2006) e Pereira e Gonçalves (2008) afirmam que se o FDI for igual ou superior à 0,6, não haverá perdas significativas de energia. Diante disso, escolheu-se utilizar um FDI igual a 0,6 para determinar a potência do conversor CC-CA, de acordo com a equação (4.1).

$$P_{conv} = FDI \cdot P_{ger\,FV} = 0,6 \cdot 9000 = 5400\,W$$

## b) Tensão de entrada

A tensão de entrada do conversor CC-CA é a soma das tensões dos módulos fotovoltaicos associados em série. A tensão de circuito aberto da associação nunca deve ultrapassar a máxima tensão permitida na entrada do conversor. Assim, esse critério deve ser analisado com atenção, pois uma sobretensão na entrada do conversor pode danificá-lo de maneira irreversível.

A máxima tensão do sistema ocorre quando o painel fotovoltaico está em circuito aberto em baixas temperaturas. Isso pode acontecer durante o inverno, quando a tensão se eleva em função das temperaturas baixas e o conversor ainda não se conectou à rede, devido à baixa irradiância, ou em função de uma falha na rede, que automaticamente desconecta o sistema, deixando os módulos em circuito aberto.

A tensão de circuito aberto de um módulo fotovoltaico pode ser estimada para diferentes temperaturas através da equação (4.2).

$$V_{oc}(T) = V_{oc\,STC} [1 + \beta_{oc} (T - 25)] \quad (4.2)$$

sendo:

$V_{oc}(T)$ : tensão de circuito aberto na temperatura T [V];

$V_{oc\,STC}$ : tensão de circuito aberto nas condições-padrão de ensaio (STC) [V];

$\beta_{oc}$ : coeficiente de temperatura para a tensão de circuito aberto [%/°C];

T: temperatura para a qual se deseja estimar o valor da tensão de circuito aberto [°C].

O número máximo de módulos em série que pode ser conectado ao conversor é determinado pela equação (4.3).

$$n^{\circ} \text{ de módulos em série} < \frac{V_{\text{ent máx conv}}}{V_{\text{OC máx}}} \quad (4.3)$$

sendo:

$V_{\text{ent máx conv}}$ : máxima tensão CC admitida na entrada do conversor CC-CA [V];

$V_{\text{OC máx}}$ : tensão de circuito aberto de um módulo fotovoltaico para a menor temperatura de operação prevista [V].

Considerando-se que na região de Guaratinguetá, durante o inverno, a temperatura dos módulos seja no mínimo 10 °C, pode-se calcular a tensão de circuito aberto nessa temperatura para um módulo com as características apresentadas na Tabela 4.4, através da equação (4.2).

$$V_{\text{OC}}(10 \text{ °C}) = 37,6 [1 + (-0,0032)(10 - 25)] = 39,4 \text{ V}$$

O número máximo de módulos que podem ser associados em série no presente projeto é obtido pela equação (4.3), a partir do valor estimado para a tensão de circuito aberto em 10 °C e da máxima tensão CC admitida na entrada do conversor CC-CA, informada na Tabela 4.5, que apresenta características de um conversor comercial.

$$n^{\circ} \text{ de módulos em série} < \frac{600 \text{ V}}{39,4 \text{ V}}$$

$$n^{\circ} \text{ de módulos em série} < 15,2$$

Tabela 4.5 – Características de um conversor CC-CA comercial.

Potência CC máxima de entrada	6320 W
Corrente máxima de entrada	27,5 A
Tensão máxima de entrada	600 V
Faixa de tensão do SPPM	230 – 500 V
Potência CA nominal de saída	6000 W
Frequência	50 / 60 Hz

Fonte: (FRONIUS, 2015).

### c) Faixa de tensão de operação do SPPM

Além de fornecer uma tensão de circuito aberto, na menor temperatura de operação prevista, que não ultrapasse a máxima tensão admitida na entrada do conversor CC-CA, o número de módulos fotovoltaicos associados em série deve também resultar em tensões que atendam à faixa de operação do SPPM do conversor.

A tensão proporcionada por um módulo possui forte dependência da temperatura, assim, as condições extremas de verão e inverno devem ser utilizadas no dimensionamento.

Como a tensão varia inversamente com a temperatura, para as altas temperaturas de verão, a tensão de máxima potência dos módulos em série não deve ser inferior à mínima tensão necessária na entrada do SPPM. Já para as baixas temperaturas de inverno, seu valor não deve ser superior à tensão máxima de operação.

A tensão de máxima potência de um módulo fotovoltaico pode ser estimada para diferentes temperaturas através da equação (4.4).

$$V_{MP}(T) = V_{MP\ STC} [1 + \beta_{MP} (T - 25)] \quad (4.4)$$

sendo:

$V_{MP}(T)$ : tensão de máxima potência na temperatura T [V];

$V_{MP\ STC}$ : tensão de máxima potência nas condições-padrão de ensaio (STC) [V];

$\beta_{MP}$ : coeficiente de temperatura para a tensão de máxima potência [%/°C];

T: temperatura para a qual se deseja estimar o valor da tensão de máxima potência [°C].

O número de módulos fotovoltaicos que podem ser associados em série deve respeitar os limites apresentados pela equação (4.5).

$$\frac{V_{ent\ mín\ SPPM}}{V_{MP\ mín}} < n^{\circ}\ de\ módulos\ em\ série < \frac{V_{ent\ máx\ SPPM}}{V_{MP\ máx}} \quad (4.5)$$

sendo:

$V_{ent\ mín\ SPPM}$ : tensão CC mínima de operação na entrada do SPPM do conversor;

$V_{ent\ máx\ SPPM}$ : tensão CC máxima de operação na entrada do SPPM do conversor;

$V_{MP\ mín}$ : mínima tensão de potência máxima (na maior temperatura de operação prevista);

$V_{MP\ máx}$ : máxima tensão de potência máxima (na menor temperatura de operação prevista).

Considerando-se que na região de Guaratinguetá, durante o verão, a temperatura dos módulos possa chegar a cerca de 70 °C, e que no inverno seu valor seja no mínimo 10 °C, podem-se estimar pela equação (4.4) a mínima e a máxima tensão de máxima potência para um módulo com as características apresentadas na Tabela 4.4.

- Para  $T = 70\ ^{\circ}C$ :

$$V_{MP}(70\ ^{\circ}C) = 29,8 [1 + (-0,0042)(70 - 25)] = 24,17\ V$$

- Para  $T = 10\ ^{\circ}C$ :

$$V_{MP}(10\ ^{\circ}C) = 29,8 [1 + (-0,0042)(10 - 25)] = 31,68\ V$$

Considerando-se as características de um conversor CC-CA comercial, apresentadas na Tabela 4.5, pode-se calcular o número de módulos fotovoltaicos que podem ser conectados em série para o atual projeto, através da equação (4.5).

$$\frac{230\ V}{24,17\ V} < n^{\circ}\ de\ módulos\ em\ série < \frac{500\ V}{31,68\ V}$$

$$9,5 < n^{\circ}\ de\ módulos\ em\ série < 15,8$$

Para atender simultaneamente às condições determinadas pelas equações (4.3) e (4.5), conclui-se que o número de módulos fotovoltaicos associados em série deve estar entre 9,5 e 15,2. Decidiu-se então dividir os 36 módulos a serem utilizados no SFCR em 3 arranjos em paralelo, sendo cada um composto por 12 módulos em série.

O número de módulos em série também deve respeitar a tensão máxima suportável pelo sistema, a qual é informada pelo fabricante e, para o atual projeto, encontra-se especificada na Tabela 4.4, cujo valor é 1000 V.

Assim, ao serem associados 12 módulos em série, cuja tensão de circuito aberto de cada um seja considerada para uma temperatura de 10 °C, sendo, portanto, 39,4 V, tem-se que a tensão de circuito aberto total da associação é: 472,8 V ( $12 \times 39,4$  V), que não ultrapassa o valor máximo permitido (1000 V).

#### **d) Corrente máxima de entrada**

Deve-se respeitar o valor da corrente CC máxima de entrada do conversor CC-CA, a fim de não danificá-lo. Para isso, deve-se determinar o número máximo de associações em série que podem ser conectadas em paralelo, de acordo com a equação (4.6).

$$n^{\circ} \text{ de associações série conectadas em paralelo} < \frac{I_{ent \text{ máx conv}}}{I_{SC}} \quad (4.6)$$

sendo:

$I_{ent \text{ máx conv}}$ : máxima corrente CC admitida na entrada do conversor CC-CA [A];

$I_{SC}$ : corrente de curto-circuito de um módulo fotovoltaico nas condições-padrão de ensaio (STC) [A];

Considerando-se o módulo fotovoltaico e o conversor CC-CA com as características apresentadas nas Tabelas 4.4 e 4.5, respectivamente, pode-se determinar o número máximo de associações em série que podem ser colocadas em paralelo no presente projeto, através da equação (4.6).

$$n^{\circ} \text{ de associações série conectadas em paralelo} < \frac{27,5}{8,92}$$

$$n^{\circ} \text{ de associações série conectadas em paralelo} < 3,1$$

Observa-se que a quantidade de 3 associações em série a serem conectadas em paralelo, escolhida no item “c”, está em conformidade com a quantidade máxima permitida, que é 3,1.

#### 4.4.4 Determinação da demanda da residência

Para estimar o valor da potência elétrica que será suprida pelo sistema fotovoltaico, deve-se proceder ao cálculo da demanda da residência, conforme a NBR 5410 (ABNT, 2004). Determinam-se as potências referentes à iluminação, tomadas de uso geral (TUG) e tomadas de uso específico (TUE). A Tabela 4.6 apresenta a determinação de tais potências para a edificação em questão.

Para as TUEs, foram considerados os seguintes equipamentos, para os cômodos:

- Escritório da Agência de Sustentabilidade: um ar-condicionado de 3060 VA;
- Cozinha da Agência de Sustentabilidade: um micro-ondas de 1500 VA;
- Quarto da Casa do Professor Visitante: um ar-condicionado de 2050 VA;
- Área de serviço da Casa do Professor Visitante: uma máquina de lavar roupas de 1250 VA;
- Cozinha da Casa do Professor Visitante: um micro-ondas de 1500 VA.

Não foi considerado o chuveiro, visto que o aquecimento de água pode ser realizado por aquecedor solar.

Tabela 4.6 – Determinação das cargas de iluminação, das tomadas de uso geral e das tomadas de uso específico (AS - Agência de Sustentabilidade; CPV - Casa do Professor Visitante).

Local	Área [m <sup>2</sup> ]	Perímetro [m]	Iluminação		TUG		TUE	
			S [VA]	Qde	S [VA]	Qde	S [VA]	Qde
Escritório (AS)	21,44	21,07	340	2	400	4	3060	1
Cozinha (AS)	2,57	6,40	100	1	1200	2	1500	1
Banheiro 1 (AS)	2,06	5,60	100	1	600	1		
Banheiro 2 (AS)	2,00	5,33	100	1	600	1		
Quarto (CPV)	16,72	15,60	280	1	300	3	2050	1
Área de serviço (CPV)	1,07	3,87	100	1	600	1	1250	1
Cozinha (CPV)	8,15	10,40	100	1	1800	3	1500	1
Banheiro (CPV)	3,29	8,73	100	1	600	1		
Varanda	6,64	12,67	100	1	100	1		
<b>Total</b>			<b>1320</b>		<b>6200</b>		<b>9360</b>	

Fonte: Da autora.

A demanda da residência é calculada através da equação (4.7).

$$D = \{ [(S_{ilum} \cdot FP_{ilum}) + (S_{TUG} \cdot FP_{TUG})] \cdot d \} + \Sigma (S_{TUE} \cdot FP_{TUE} \cdot d) \quad (4.7)$$

sendo:

$S_{\text{ilum}}$ : potência aparente total referente à iluminação [VA];

$FP_{\text{ilum}}$ : fator de potência referente à iluminação;

$S_{\text{TUG}}$ : potência aparente total referente às tomadas de uso geral [VA];

$FP_{\text{TUG}}$ : fator de potência referente às tomadas de uso geral;

$S_{\text{TUE}}$ : potência aparente associada a cada tomada de uso específico [VA];

$FP_{\text{TUE}}$ : fator de potência associada a cada tomada de uso específico;

d: fator de demanda.

Assumindo-se que os fatores de potência para a iluminação, para as TUGs, para os ar-condicionados e para a máquina de lavar roupas são iguais a 0,8, e os fatores de potência para os micro-ondas são iguais a 1,0, calcula-se a demanda referente ao projeto em desenvolvimento através da equação (4.7), em que os fatores de demanda, 0,4 e 1,0, foram obtidos de Creder (2009).

$$D = \{ [ (1320 \cdot 0,8) + (6200 \cdot 0,8) ] \cdot 0,4 \} + (3060 \cdot 0,8 \cdot 1,0) + (2 \cdot 1500 \cdot 1,0 \cdot 1,0) \\ + (2050 \cdot 0,8 \cdot 1,0) + (1250 \cdot 0,8 \cdot 1,0) = 10494,4 W$$

Através da equação (4.8), pode-se calcular a porcentagem da demanda total da residência que o sistema fotovoltaico consegue suprir, considerando-se o valor de sua potência média ao longo do dia.

$$\text{suprimento de potência pelo sistema fotovoltaico} = \frac{P_{\text{média FV}}}{D_{\text{resid}}} \quad (4.8)$$

sendo:

$P_{\text{média FV}}$ : potência média fornecida pelo sistema fotovoltaico ao longo do dia [W];

$D_{\text{resid}}$ : demanda da residência [W].

Segue o cálculo para o projeto em questão, de acordo com a equação (4.8).

$$\text{suprimento de potência pelo sistema fotovoltaico} = \frac{1481}{10494,4} = 14,1\%$$

Se for considerada apenas a demanda referente à iluminação e TUGs, tem-se:

$$\text{suprimento de potência pelo sistema fotovoltaico} = \frac{1481}{2406,4} = 61,5\%$$

Observa-se que se for considerada a demanda total da residência, o sistema fotovoltaico consegue suprir 14,1% de seu valor. Se for levada em conta apenas a demanda associada aos circuitos de iluminação e TUGs, o suprimento passa a ser de 61,5%.

Vale lembrar que o valor da potência média fornecida pelo sistema foi determinado ao longo de um dia, e considerando-se o mês com menor média diária de irradiação solar, ou seja, a potência suprida pelo sistema fotovoltaico pode apresentar valores superiores aos calculados, em determinados períodos do dia, associados às diferentes épocas do ano, cuja irradiação solar é maior.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de painéis solares fotovoltaicos para a obtenção de energia elétrica contribui para a diversificação da matriz energética mundial e nacional e para o desenvolvimento sustentável da sociedade, visto que se trata de uma fonte limpa e renovável de energia.

Os sistemas fotovoltaicos distribuídos conectados à rede apresentam a vantagem de se localizarem próximos aos pontos de consumo, aliviando os sistemas de transmissão e distribuição e diminuindo as perdas de energia associadas ao seu uso.

O estudo dos circuitos elétricos e eletrônicos que fazem parte dos equipamentos que compõem esse tipo de sistema contribuiu para uma melhor compreensão de seu funcionamento, bem como para o dimensionamento e seleção dos componentes de um sistema fotovoltaico residencial real.

O projeto desenvolvido mostrou que o sistema é capaz de suprir cerca de 14% da demanda total da residência e aproximadamente 61% da demanda associada apenas aos circuitos de iluminação e tomadas de uso geral.

O valor da potência obtida através do sistema fotovoltaico foi considerado ao longo de um dia, sendo, portanto, um valor médio diário. Considerou-se também na determinação de tal valor o mês com menor média diária de irradiação solar, assim, a potência suprida pelo sistema pode apresentar valores superiores aos apresentados, de acordo com o período do dia e a época do ano, cuja irradiação solar pode ser maior.

O trabalho realizado permitiu a compreensão das principais etapas que compõem a determinação técnica dos elementos que formam um sistema fotovoltaico distribuído conectado à rede. Observou-se que as informações técnicas disponibilizadas, em determinadas circunstâncias, não são escritas de forma clara, gerando dúvidas quanto a sua interpretação. Tal fato exige atenção, obrigando a realização de uma leitura comparativa entre várias fontes de consulta. Diante disso, a iniciativa de organizar e elaborar um estudo referente às tecnologias envolvidas nos equipamentos e aos procedimentos de projeto de um sistema fotovoltaico constitui uma contribuição que favorece a difusão da utilização do mesmo.

Como sugestão de trabalhos futuros, destacam-se as análises econômicas e financeiras para a averiguação da viabilidade do empreendimento e os impactos da geração fotovoltaica distribuída no sistema elétrico em uma determinada localidade ou região.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Matriz de energia elétrica**. 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 12 ago. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST): Módulo 3 – Acesso ao sistema de distribuição**. 2012. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/modulo3\\_revisao\\_5.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/modulo3_revisao_5.pdf)>. Acesso em: 05 nov. 2015.

ALMEIDA, Marcelo Pinho. **Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. 2012. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-28062012-102236/en.php>>. Acesso em: 05 nov. 2015.

AMÉRICA DO SOL. **Energia fotovoltaica - benefícios e custos**. 2015. Disponível em: <<http://www.americadosol.org/vantagens/>>. Acesso em: 12 ago. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA (ABINEE). **Propostas para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira**. 2012. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2015.

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

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO (BNDES). **Perspectivas da energia solar e o apoio do BNDES ao setor**. 2014. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/hotsite/mmgd/slides/Antonio\\_Carlos\\_de\\_Andrada\\_Tovar.pdf](http://www.aneel.gov.br/hotsite/mmgd/slides/Antonio_Carlos_de_Andrada_Tovar.pdf)>. Acesso em: 12 ago. 2015.

BRITO, Moacyr A. G. de et al. Avaliação das principais técnicas para obtenção de MPPT de painéis fotovoltaicos. **2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - Induscon 2010**, [s.l.], p.1-6, nov. 2010. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/induscon.2010.5740002.

CÂMARA NOTÍCIAS. **O que é Prodeem?** 2004. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/camaranoticias/noticias/59255.html>>. Acesso em: 12 ago. 2015.

CÂMARA, Carlos Fernando. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. 2011. 68 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011. Disponível em: <<http://www.solenerg.com.br/files/monografia-Carlos-Fernando-Camara.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2015.

COSTA, Gonçalo Carlos Rosário da. **A contribuição dos sistemas solares térmicos e fotovoltaicos para o balanço energético dos edifícios residenciais unifamiliares**. 2012. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012. Disponível em: <[http://run.unl.pt/bitstream/10362/7525/1/Costa\\_2012.pdf](http://run.unl.pt/bitstream/10362/7525/1/Costa_2012.pdf)>. Acesso em: 05 nov. 2015.

CREDER, Hélio. **Instalações elétricas**. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos, 2009.

CRESESB - Centro de referência para energia solar e eólica Sérgio Brito. **Potencial solar - SunData**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 29 nov. 2015.

DEMONTI, Rogers. **Processamento da energia elétrica proveniente de módulos fotovoltaicos**. 2003. 164 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/84572/192007.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 05 nov. 2015.

FALCÃO, Vivienne Denise. **Fabricação de células solares de CdS / CdTe**. 2005. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <[http://www.ime.eb.br/arquivos/teses/se4/cm/dissertacaofinal\\_viviennedenise.pdf](http://www.ime.eb.br/arquivos/teses/se4/cm/dissertacaofinal_viviennedenise.pdf)>. Acesso em: 05 nov. 2015.

FRONIUS. **Inversor transformador Fronius IG Plus**. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/loja/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom/upload/File-1409348924.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2015.

HECKTHEUER, Lúcio Almeida. **Análises de associações de módulos fotovoltaicos**. 2001. 135 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande de Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <<ftp://ftp.solar.ufrgs.br/teses/hecktheu.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2015.

JANNUZZI, Gilberto de Martino; VARELLA, Fabiana K. de O. M.; GOMES, Rodolfo Dourado Maia. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil: panorama da atual legislação.** 2009. Disponível em: <[http://www.fem.unicamp.br/~jannuzzi/documents/RELATORIO\\_PROJETO\\_2\\_FINAL.pdf](http://www.fem.unicamp.br/~jannuzzi/documents/RELATORIO_PROJETO_2_FINAL.pdf)>. Acesso em: 05 nov. 2015.

MACÊDO, Wilson Negrão. **Análise do fator de dimensionamento do inversor aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede.** 2006. 201 f. Tese (Doutorado) - Curso de Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <<https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj2n5LYurbJAhXMsZAKHdkQDIQQFggcMAA&url=http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-29112006-153307/publico/TeseWilson1.pdf&usg=AFQjCNHTEDM2PWNARY2pt0liCJBKUlhkEg&sig2=CHmctetPHrPhmDhWH0d4kQ&bvm=bv.108194040,d.Y2I>>. Acesso em: 29 nov. 2015.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Manual de operacionalização - Programa Luz para Todos.** 2011. Disponível em: <[http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Manual\\_Operacionalizacao\\_LPT2011\\_2014\\_Revisao1.pdf](http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Manual_Operacionalizacao_LPT2011_2014_Revisao1.pdf)>. Acesso em: 12 ago. 2015.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Programa Luz para Todos.** 2015. Disponível em: <[http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos/Asp/o\\_programa.asp](http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos/Asp/o_programa.asp)>. Acesso em: 12 ago. 2015.

MUSSI, João Victor. **Edificações sustentáveis: estudo de incorporação de tecnologias renováveis.** Guaratinguetá. 2013.

PEREIRA, Osvaldo L. S.; GONÇALVES, Felipe F.. Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: estudo de caso do sistema de Tubarão-SC. **Revista Brasileira de Energia**, [s.l.], v. 14, n. 1, p.25-45, jan. 2008. Disponível em: <[http://new.sbpe.org.br/wp-content/themes/sbpe/img/artigos\\_pdf/v14n01/v14n01a2.pdf](http://new.sbpe.org.br/wp-content/themes/sbpe/img/artigos_pdf/v14n01/v14n01a2.pdf)>. Acesso em: 05 nov. 2015.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** 2014. CEPEL/CRESESB. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf)>. Acesso em: 12 ago. 2015.

RASHID, Muhammad H.. **Eletrônica de Potência: dispositivos, circuitos e aplicações.** 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.

REN21. **Renewables 2015 global status report - key findings.** Paris, 2015. Disponível em: <[http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/GSR2015\\_KeyFindings\\_lowres.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/GSR2015_KeyFindings_lowres.pdf)>. Acesso em: 12 ago. 2015.

RÜTHER, Ricardo; ZILLES, Roberto. Making the case for grid-connected photovoltaics in Brazil. **Energy Policy**, [s.l.], v. 39, n. 3, p.1027-1030, mar. 2011. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.12.021. Disponível em: <[http://ac.els-cdn.com/S0301421510009213/1-s2.0-S0301421510009213-main.pdf?\\_tid=e00b3e18-841b-11e5-9d82-00000aab0f26&acdnat=1446769276\\_b93dcd8fec07b1f89a052d547749864d](http://ac.els-cdn.com/S0301421510009213/1-s2.0-S0301421510009213-main.pdf?_tid=e00b3e18-841b-11e5-9d82-00000aab0f26&acdnat=1446769276_b93dcd8fec07b1f89a052d547749864d)>. Acesso em: 05 nov. 2015.

SALAMONI, Isabel Tourinho. **Um programa residencial de telhados solares para o Brasil: diretrizes de políticas públicas para a inserção da geração fotovoltaica conectada à rede elétrica**. 2009. 200 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/92659/270188.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 12 ago. 2015.

SILVA, Douglas Pereira da. **Sistema eletrônico para processamento de energia solar fotovoltaica, operando na máxima transferência de potência, com aplicação na alimentação de refrigeradores convencionais**. 2003. 225 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/85302/193381.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 05 nov. 2015.

TIEPOLO, Gerson Maximo et al. Photovoltaic generation potential of Paraná state, Brazil – a comparative analysis with european countries. **Energy Procedia**, [s.l.], v. 57, p.725-734, 2014. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.10.228. Disponível em: <[http://ac.els-cdn.com/S1876610214015951/1-s2.0-S1876610214015951-main.pdf?\\_tid=dbf1869a-841e-11e5-b59a-00000aacb360&acdnat=1446770557\\_4e733243551746ea02a4f694cc311cf7](http://ac.els-cdn.com/S1876610214015951/1-s2.0-S1876610214015951-main.pdf?_tid=dbf1869a-841e-11e5-b59a-00000aacb360&acdnat=1446770557_4e733243551746ea02a4f694cc311cf7)>. Acesso em: 12 ago. 2015.

VALLÊRA, António M.; BRITO, Miguel Centeno. Meio século de história fotovoltaica. **Gazeta de Física**, Lisboa, v. 29, n. 1-2, p.10-15, 2006. Trimestral. Disponível em: <<http://gazetadefisica.spf.pt/magazine/76/pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2015.

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Érica, 2012.

VIRIDIAN. **Energia solar fotovoltaica**. Disponível em: <<http://www.viridian.com.br/tecnologia/energia+solar+fotovoltaica/4>>. Acesso em: 11 fev. 2016.

YINGLI SOLAR. **YGE 60 células série 2**. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/loja/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom/upload/File-1438699024.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2015.