

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
ESPECIALIZAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS**

**LUCAS MARINO BIANCHESSI SGANZERLA**

**ANÁLISE DOS ÍNDICES DE MÉRITO DE SISTEMAS  
FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM CURITIBA**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA**

**2018**

LUCAS MARINO BIANCHESSI SGANZERLA

**ANÁLISE DOS ÍNDICES DE MÉRITO DE SISTEMAS  
FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM CURITIBA**

Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior.

CURITIBA

2018

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

LUCAS MARINO BIANCHESSI SGANZERLA

### **ANÁLISE DOS ÍNDICES DE MÉRITO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM CURITIBA**

Esta Monografia de Especialização foi apresentada no dia 04 de julho de 2018, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energia Renováveis – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

**Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior**

Coordenador de Curso de Especialização em Energias Renováveis

---

**Prof. Romildo Alves dos Prazeres**

Chefe do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

#### **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior  
Orientador - UTFPR

---

Prof. Dr. Gerson Máximo Tiepolo  
UTFPR

---

Prof. Esp. Carlos Henrique Karam Salata  
UTFPR

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso
---

## RESUMO

SGANZERLA, Lucas Marino Bianchessi. **Análise Dos Índices De Mérito De Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede Em Curitiba.** 2018. 78 pág. Monografia (Especialização em Energias Renováveis) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Devido ao aumento contínuo da dependência e do consumo de energia elétrica no Brasil e no Mundo, a energia fotovoltaica pode contribuir para uma diversificação da matriz elétrica brasileira e evitar a dependência de geração a partir de hidroelétricas e térmicas, garantido maior confiabilidade para o sistema de geração de energia no Brasil. Isso vem do fato dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFVCR) serem alternativa para os centros urbanos, pois permitem a geração de energia no próprio local onde esta será consumida. Este trabalho tem como objetivo apresentar e analisar o desempenho de dezesseis SFVCR em Curitiba e comparar as fontes de dados históricos de irradiação solar disponíveis, sendo elas, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006 e 2017). A verificação do desempenho da instalação se dá principalmente por alguns indicadores, conhecidos como índices de mérito, que são: Produtividade, Fator de Capacidade e Desempenho Global. O estudo revelou que o Yield médio em 2017 dos 16 sistemas foi de 1207,5 kWp/kWh, o fator de capacidade médio de 13,8% e a taxa de desempenho médio de cinco sistemas avaliados foi de 76,7%, portanto os índices de mérito dos SFVCR, obtidos a partir dos dados de geração de energia elétrica, são compatíveis com o esperado. Além disso, os estudos realizados revelaram que quinze dos dezesseis sistemas utilizam inversores sem transformador, pois dessa forma as perdas no processo de conversão são menores e o modo de instalação dos painéis fotovoltaicos é um fator determinante para maximizar o desempenho do sistema fotovoltaico. Outro fato que o trabalho apresenta é a convergência entre os dados do INMET com os dados do Atlas de 2017, mostrando que este novo Atlas melhorou a confiabilidade dos dados de irradiação em Curitiba.

**Palavras Chaves:** Geração distribuída, Geração fotovoltaica, Índices de mérito.

## ABSTRACT

SGANZERLA, Lucas Marino Bianchessi. **Productivity Parameters Analysis in Photovoltaic Systems Grid-Connected in Curitiba.** 78 pg. Monograph (Specialization in Renewable Energies) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Due to the continuous increase in dependence and consumption of electric energy in Brazil and in the world, photovoltaic energy can contribute to a diversification of the Brazilian electricity matrix and avoid the dependence of generation from hydroelectric and thermal plants, guaranteeing greater reliability for the system generation in Brazil. This is due to the fact that Photovoltaic Systems Grid-Connected are alternatives to the urban centers, since they allow the generation of energy in the place where it will be consumed. This work aims to present and analyze the performance of sixteen systems in Curitiba and to compare the available sources of historical data of solar irradiation, being the National Institute of Meteorology (INMET) and the Brazilian Atlas of Solar Energy (2006 and 2017). The verification of the performance of the installation is mainly due to some indicators, known as performance parameters, which are: Productivity or Yield, Capacity Factor and Performance Ratio. The study showed that the average Yield in 2017 of the 16 systems was 1207.5 kWp/kWh, the average capacity factor of 13.8% and the average performance ratio of five systems evaluated was 76.7%, so the performance parameters of the systems, obtained from the electric energy generation data, are compatible with the expected. In addition, studies have revealed that fifteen of the sixteen systems use transformerless inverters, because in this way losses in the conversion process are lower and the way of installation of photovoltaic panels is a determining factor to maximize the performance of the photovoltaic system. Another fact that the work presents is the convergence between INMET data and the 2017 Atlas data, showing that this new Atlas improved the reliability of irradiation data in Curitiba.

**Keywords:** Distributed Generation, Photovoltaic Generation, Performance Parameters.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo de eficiência de tecnologias de células fotovoltaicas. ....	30
Tabela 2 - Produtividade EV (kWh/kWp).....	42
Tabela 3 - Fator de Capacidade EV (%) .....	42
Tabela 4 - Taxa de Desempenho EV (%).....	43
Tabela 5 - Produtividade e Fator de Capacidade Neville .....	46
Tabela 6 - Taxa de Desempenho Neville (%).....	46
Tabela 7 - Irradiação diária média no plano inclinado da empresa, Residencial 1 e 2 em kWh/m <sup>2</sup> .dia .....	50
Tabela 8 - Produtividade Empresa, Residencial 1 e 2 (kWh/kWp).....	51
Tabela 9 - Fator de Capacidade Empresa, Residencial 1 e 2 (%).....	52
Tabela 10 - Taxa de Desempenho Empresa, Residencial 1 e 2 (%).....	52
Tabela 11 - Produtividade Residencial 3 e Residencial 4 (kWh/kWp).....	55
Tabela 12 - Fator de Capacidade Residencial 3 e Residencial 4 (%) .....	55
Tabela 13 - Produtividade Residencial 5 e Residencial 6 (kWh/kWp).....	58
Tabela 14 - Fator de Capacidade Residencial 5 e Residencial 6 (%) .....	58
Tabela 15 - Produtividade Residencial 7, 8 e 9 (kWh/kWp) .....	62
Tabela 16 - Fator de Capacidade Residencial 7, 8 e 9 (%).....	62
Tabela 17 - Produtividade Residencial 10, 11, 12 e 13 (%) .....	66
Tabela 18 - Fator de Capacidade Residencial 10, 11, 12 e 13 (%) .....	67
Tabela 19 - Resumo dos índices de mérito de 2017 dos SFVCR estudados.....	68

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema fotovoltaico instalado em cobertura residencial.....	13
Figura 2 - Geração e Potência instalada Solar no Mundo - 2016.....	14
Figura 3 - Componentes da Radiação Solar. ....	18
Figura 4 - Distribuição das Estações Meteorológicas Automáticas pelo Brasil. ....	21
Figura 5 - Tipos de sistemas fotovoltaicos. ....	23
Figura 6 - Esquemático básico de um sistema fotovoltaico isolado - SFVI .....	24
Figura 7 - Esquemático básico do SFVCR.....	25
Figura 8 - Processo de agrupamento célula, módulo e painel fotovoltaico .....	26
Figura 9 - Estruturas moleculares dos semicondutores P e N.....	26
Figura 10 - Célula de (a) Silício Monocristalino e (b) Silício Policristalino .....	28
Figura 11 - Módulos fotovoltaicos de filmes finos.....	29
Figura 12 - a) inversor centralizado; b) inversor por string; c) inversor multi-string; d) inversores assimilados aos respectivos módulos FV. ....	33
Figura 13 - Mapa do mercado fotovoltaico .....	37
Figura 14 - Irradiação diária média no plano horizontal, estação A-807 INMET (kWh/m <sup>2</sup> .dia).....	39
Figura 15 - Vista dos módulos do Escritório Verde .....	40
Figura 16 - Valores de geração de energia do EV (kWh/mês) .....	41
Figura 17 - Irradiação diária média no plano inclinado do EV (kWh/m <sup>2</sup> .dia).....	41
Figura 18 - Vista dos módulos da Neville .....	44
Figura 19 - Valores de geração de energia do Neville (kWh/mês) .....	44
Figura 20 - Irradiação diária média no plano inclinado do Neville (kWh/m <sup>2</sup> .dia).....	45
Figura 21 - (a) Vista dos módulos da empresa (b) Vista dos módulos pela entrada da empresa. ....	47
Figura 22 - Valores de geração de energia da empresa (kWh/mês) .....	48
Figura 23 - Vista dos módulos fotovoltaicos no residencial 1 .....	48
Figura 24 - Valores de geração de energia do Residencial 1 (kWh/mês) .....	49
Figura 25 - Vista dos módulos fotovoltaicos no residencial 2.....	49
Figura 26 - Valores de geração de energia do Residencial 2 (kWh/mês) .....	49
Figura 27 - Vista dos módulos no residencial 3.....	53
Figura 28 - Valores de geração de energia do residencial 3 (kWh/mês).....	54
Figura 29 - Vista dos módulos no residencial 4.....	54
Figura 30 - Valores de geração de energia do residencial 4 (kWh/mês).....	54
Figura 31 - Vista dos módulos no residencial 5.....	56
Figura 32 - Valores de geração de energia do residencial 5 (kWh/mês).....	56
Figura 33 - Vista dos módulos no residencial 6.....	57
Figura 34 - Valores de geração de energia do residencial 6 (kWh/mês).....	57
Figura 35 - Vista dos módulos no residencial 7.....	59
Figura 36 - Valores de geração de energia do residencial 7 (kWh/mês).....	60
Figura 37 - Vista dos módulos no residencial 8.....	60
Figura 38 - Valores de geração de energia do residencial 8 (kWh/mês).....	60

Figura 39 - Vista dos módulos no residencial 9.....	61
Figura 40 - Valores de geração de energia do residencial 9 (kWh/mês).....	61
Figura 41 - Vista dos módulos no residencial 10.....	63
Figura 42 - Valores de geração de energia do residencial 10 (kWh/mês).....	63
Figura 43 - Vista dos módulos no residencial 11.....	64
Figura 44 - Valores de geração de energia do residencial 11 (kWh/mês).....	64
Figura 45 - Vista dos módulos no residencial 12.....	65
Figura 46 - Valores de geração de energia do residencial 12 (kWh/mês).....	65
Figura 47 - Vista dos módulos no residencial 13.....	65
Figura 48 - Valores de geração de energia do residencial 13 (kWh/mês).....	66
Figura 49 - Vista das coordenadas INMET e Atlas.....	70
Figura 50 - Irradiação fornecida pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar 1ª e 2ª edição .....	71
Figura 51 - Comparativo de dados de irradiação INMET e Atlas Brasileiro 2006.....	71
Figura 52 - Comparativo de dados de irradiação INMET e Atlas Brasileiro 2017.....	72



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
CC	Corrente contínua
CA	Corrente alternada
EPE	Empresa De Pesquisa Energética
EV	Escritório Verde
FC	Fator de Capacidade
FV	Fotovoltaico
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada ( <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> )
LER	Leilão de Energia de Reserva
LFA	Leilão de Energia de Fontes Alternativas
m <sup>2</sup>	Metros quadrados
MPP	Maximum Power Point (Ponto de Máxima Potência)
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PROINFRA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PR	<i>Performance Ratio</i> (Desempenho)
PWM	Modulador de Largura de Pulso ( <i>Pulse Width Modulation</i> )
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SFVCR	Sistema Fotovoltaico conectado á rede
SFVI	Sistema Fotovoltaico Isolado
SIN	Sistema Interligado Nacional
SWERA	Avaliação dos Recursos de Energia Solar e Eólica (Solar and Wind Energy Resource Assessment)
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
V	Volt
W	Watt
W <sub>p</sub>	Watt Pico
Y <sub>F</sub>	<i>Yield</i> (Produtividade)

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 TEMA .....	13
1.1.1 Delimitação do tema .....	13
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS.....	13
1.3 OBJETIVOS .....	15
1.3.1 Objetivo geral.....	15
1.3.2 Objetivos específicos.....	15
1.4 JUSTIFICATIVA .....	15
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	16
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
2.1 ENERGIA SOLAR NO BRASIL.....	17
2.2 RADIAÇÃO SOLAR .....	17
2.3 IRRADIÂNCIA.....	19
2.4 IRRADIAÇÃO .....	19
2.5 FONTES DE DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR .....	20
2.5.1 Estações Meteorológicas .....	20
2.5.2 Atlas Brasileiro de Energia Solar .....	21
2.5.3 Radasol.....	22
2.6 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	23
2.6.1 Sistema Fotovoltaico Isolado - SFVI.....	23
2.6.2 Sistema Fotovoltaico Conectado À Rede Elétrica - SFVCR .....	24
2.7 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....	25
2.7.1 Silício Monocristalino (m-Si) .....	27
2.7.2 Silício Policristalino (p-Si) .....	27
2.7.3 Filmes finos.....	28
2.7.4 Comparação de células fotovoltaicas .....	30
2.8 INVERSORES.....	31
2.9 ÍNDICES DE MÉRITO.....	34
2.9.1 Produtividade/ <i>Yield</i> .....	34

2.9.2	Fator de Capacidade .....	35
2.9.3	Taxa de Desempenho/ <i>Performance Ratio</i> .....	36
2.10	MERCADO FOTOVOLTAICO NO BRASIL.....	36
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISE DE DADOS .....</b>	<b>39</b>
3.1	PARÂMETROS DOS SISTEMAS .....	39
3.2	ESCRITÓRIO VERDE - UTFPR.....	40
3.2.1	Índices de Mérito EV .....	42
3.3	NEOVILLE - UTFPR.....	44
3.3.1	Índices de Mérito Neoville .....	45
3.4	EMPRESA DE CONTABILIDADE, RESIDENCIAL 1, RESIDENCIAL 2 .....	47
3.4.1	Comparativo Índices Empresa, Residência 1 e 2 .....	50
3.5	SISTEMAS RESIDENCIAIS 3 e 4.....	53
3.5.1	Comparação Índices Residências 3 e 4 .....	55
3.6	SISTEMA RESIDENCIAL 5 e 6.....	56
3.6.1	Comparação Índices Residências 5 e 6 .....	57
3.7	SISTEMA RESIDENCIAL 7, 8 e 9.....	59
3.7.1	Comparação Índices Residências 7, 8 e 9 .....	61
3.8	SISTEMA RESIDENCIAL 10, 11, 12 e 13.....	63
3.8.1	Comparação Índices Residências 10, 11, 12 e 13.....	66
3.9	RESUMO DOS SISTEMAS.....	67
<b>4.</b>	<b>COMPARATIVO DE BASES DE DADOS INMET E ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR .....</b>	<b>70</b>
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>74</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>77</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Durante toda a existência na Terra, o homem usou sua inteligência para sair da sua condição de pobreza, diminuir esforços físicos e aumentar sua qualidade de vida. Para isso, durante os últimos séculos, dominou o fogo para se aquecer, melhorou sua alimentação, domesticou animais e utilizou a força da água e dos ventos para o trabalho.

Posterior ao domínio do fogo, o entendimento do calor como uma forma de energia e produção de trabalho possibilitou a invenção da máquina a vapor e impulsionou o uso dos combustíveis fósseis (petróleo, carvão mineral, gás natural). Esses combustíveis são majoritariamente utilizados até os dias de hoje para o setor de transportes, para a indústria petroquímica e para a geração de eletricidade.

É fato que o uso destes combustíveis foi determinante para a transformação da nossa qualidade de vida, e também é notório que não há como produzir energia elétrica sem causar impacto ao ambiente, mas, no entanto, estas fontes produtoras de energia são mais agressivas que outras, como, por exemplo, as fontes de energia renováveis.

As fontes renováveis são assim chamadas quando a natureza conseguir renovar essa fonte de energia em uma velocidade maior que o ser humano a consome. Ao contrário das não renováveis, como o petróleo, que a natureza leva séculos para repor o petróleo nas reservas exploradas mundo afora. Assim, podemos classificar como renovável a geração de energia fotovoltaica, eólica, por hidrelétricas, pelo aproveitamento de marés e correntes marítimas, geotérmica e a provinda da biomassa, biogás.

De todas as energias citadas, a energia solar apresenta a maior convergência de vantagens buscadas pelo setor de geração de energia elétrica. Segundo Urbanetz (2010), a geração de energia fotovoltaica, como geração distribuída, apresenta uma alternativa de solução aos problemas inerentes da geração centralizada longe de centros urbanos, da transmissão e distribuição da energia elétrica, além de ser uma fonte de baixo impacto ambiental, sem ruídos, sem poluição e com a possibilidade de instalação dos módulos fotovoltaicos integrados na própria estrutura ou cobertura do edifício, como mostra a Figura 1.

**Figura 1 - Sistema fotovoltaico instalado em cobertura residencial.**



Fonte: Site O portal solar

## 1.1 TEMA

O presente trabalho tem por objetivo acompanhar e analisar o desempenho, por meio do cálculo dos índices de mérito, de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em Curitiba.

### 1.1.1 Delimitação do tema

Esse trabalho consiste em registrar os dados de geração de energia, irradiação solar e índices de mérito, os quais indicam a eficiência da planta de geração e se o sistema está configurado de forma que aproveite o recurso solar de forma otimizada (BENEDITO, 2009). Esses dados permitem avaliar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos selecionados, buscar problemas por baixo desempenho e trabalhar soluções para minimizar perdas em sistemas futuros. Os sistemas selecionados para análise foram: Escritório Verde (EV), Neville - UTFPR, 1 sistema empresarial e 13 sistemas residenciais. Este trabalho não apresenta um estudo detalhado sobre os fatores de perda dos sistemas fotovoltaicos conectados a rede.

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Mesmo com a crise econômica que o Brasil enfrenta e a consequente redução no consumo de energia elétrica, as projeções futuras para esta década é de aumento no consumo de eletricidade na rede em 3,6%, cerca de 200 TWh (EPE - Projeção da

Demanda de Energia Elétrica para os próximos 10 anos - 2017/2026). A diminuição do potencial para a instalação de novas usinas hidrelétricas torna mais desafiadora atingir a projeção para 2026. A utilização de usina térmica nem sempre é a melhor opção em termos financeiros e ambientais. Isso abre uma tendência a energias renováveis, eólica e solar, a primeira mais estruturada, representado cerca de 7% da geração na matriz elétrica brasileira (ABEeólica, 2016), e a solar, que tem características parecidas com a eólica, quanto à infinidade do recurso natural e sustentabilidade, mas com a vantagem da geração distribuída perto do local de consumo, diminuindo impactos ambientais e econômicos.

De acordo com a Figura 2, o Brasil não se configura entre os 15 países com maior geração por fonte solar em 2016. Mesmo com a sua extensão territorial, países como Bélgica e Grécia geraram mais energia que o Brasil. Isso pode ser explicado pelos incentivos desenvolvidos nesses países europeus, seja por subsídios ou retiradas/diminuição de impostos.

**Figura 2 - Geração e Potência instalada Solar no Mundo - 2016**

País	Geração (TWh)	% da Geração Total	Potência Instalada (MW)	Fator de Capacidade (%)	Expansão no Ano (GW)
1 China	66,2	1,1	78.070	13,2	34,5
2 Estados Unidos	56,8	1,3	40.300	18,6	14,7
3 Japão	49,5	4,9	42.750	14,9	8,6
4 Alemanha	38,2	5,9	41.275	10,8	1,5
5 Itália	22,9	8,1	19.279	13,7	0,4
6 Espanha	13,6	5,0	5.490	28,3	0,1
7 Índia	11,9	0,8	9.010	18,8	4,0
8 Reino Unido	10,3	3,1	11.727	11,0	2,0
9 França	8,3	1,5	7.130	13,8	0,6
10 Austrália	7,2	2,8	5.488	15,8	0,8
11 Coréia do Sul	5,2	0,9	4.350	15,2	0,9
12 Grécia	4,0	8,2	2.611	17,5	0,0
13 África do Sul	3,3	1,3	1.544	27,6	0,5
14 Canadá	3,1	0,5	2.715	13,4	0,2
15 Bélgica	3,0	3,6	3.422	10,1	0,2
Outros	29,7	0,4	26.313	14,6	6,3
<b>Mundo</b>	<b>333,1</b>	<b>1,4</b>	<b>301.473</b>	<b>14,4</b>	<b>75,1</b>
<b>% do mundo</b>	<b>1,4</b>		<b>4,7</b>		<b>34,9</b>

Fonte: Ministério de Minas e Energia - MME (2016).

A compreensão do comportamento dos índices de mérito de SFVCR para diferentes situações é importante para a melhoria do desempenho e dos custos da geração de energia elétrica fotovoltaico no Brasil e, assim, ajudar os empreendedores a superar os problemas existentes no Brasil.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo geral

Registrar e acompanhar os índices de mérito de sistemas fotovoltaicos conectados à rede instalados em Curitiba, a fim de avaliar a eficiência das plantas de geração submetidas ao estudo.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Coletar dados de potência e energia gerada dos sistemas de geração escolhidos;
- Calcular, por meio do programa Radiasol e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a irradiação solar média que incide nos painéis dos sistemas analisados;
- Calcular, comparar e avaliar os índices de mérito entre os sistemas de geração escolhidos;
- Comparar os dados históricos de irradiação do Atlas Brasileiro de Energia Solar de 2006 e 2017 com os obtidos pelo INMET;
- Ampliar e divulgar os conhecimentos já existentes, e os que serão apresentados nesse trabalho sobre energia solar.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

Atualmente, grande parte dos produtos e serviços disponíveis depende de energia elétrica, e essa dependência só tende a aumentar, com isso, é óbvio o aumento da demanda mundial por energia.

O aumento de demanda de energia combinado com a tendência de mudança do horário de pico podem se tornar problemas para uma matriz elétrica baseada em poucos tipos de fontes de energia. As energias renováveis, em especial neste trabalho a energia fotovoltaica, podem contribuir para uma diversificação da matriz elétrica brasileira e complementar a geração de hidroelétricas e térmicas, garantido maior confiabilidade para o sistema de geração de energia no Brasil.

Mesmo sendo a necessidade de diversificar a matriz elétrica relativamente conhecida, e o grande potencial para a geração de energias renováveis, o Brasil ainda esbarra em desincentivos governamentais, aproveitando pouco dos recursos naturais disponíveis. Assim, este trabalho pode enfatizar a importância da energia solar, analisando alguns fatores de desempenho e eficiência de alguns sistemas fotovoltaicos, buscando um desenvolvimento em maior escala do aproveitamento desta fonte de energia.

## 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Segundo Gil (2008), os procedimentos metodológicos podem ser divididos quanto aos objetivos e aos procedimentos técnicos. Esta monografia se baseia na pesquisa bibliográfica quanto à técnica, ou seja, é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos. E quanto aos objetivos, ela se baseia na pesquisa descritiva pelo fato de realizar um estudo de caso de sistemas fotovoltaicos em Curitiba.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 1 - Apresenta o tema, os objetivos, os problemas e premissas, a justificativa para realização deste trabalho, os objetivos a serem alcançados e a metodologia de pesquisa que será adotada.
- Capítulo 2 - Fundamentação teórica e revisão bibliográfica sobre energia solar, sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica e apresentação dos índices a serem analisados nas plantas fotovoltaicas.
- Capítulo 3 - Apresentação dos sistemas fotovoltaicos selecionados, dos dados coletados e dos índices de mérito de cada planta fotovoltaica.
- Capítulo 4 - Resultados e comparações dos sistemas escolhidos sob o aspecto dos fatores apresentados no capítulo 3. E comparativo entre os valores de irradiação disponibilizados no Atlas Brasileiro de Energia Solar de 2006, 2017 e pelo INMET.
- Capítulo 5 - Considerações finais sobre o estudo realizado.



## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 ENERGIA SOLAR NO BRASIL

O Brasil, conforme MME (2017), possuía, ao final de 2016, 81 MWp de energia solar fotovoltaica instalados, o que representa cerca de 0,05% da capacidade instalada total no país. Do total de 81 MWp existentes em 2016, 24 MWp correspondiam à geração centralizada e 57 MWp à geração distribuída.

A baixa utilização da energia solar no Brasil chama mais atenção quando verificamos as condições favoráveis ao desenvolvimento da fonte no país. O Brasil, de acordo com EPE (2012), possui altos níveis de insolação e grandes reservas de quartzo de qualidade, que podem gerar importante vantagem competitiva para a produção de silício com alto grau de pureza, células e módulos solares, produtos esses de alto valor agregado (NASCIMENTO, 2017).

De acordo com Pereira *et al.* (2017), a média anual de irradiação global apresenta uma boa uniformidade no Brasil, com médias relativamente altas em todo o território. O valor máximo de irradiação global – 6,1 kWh/m<sup>2</sup> - ocorre no norte do estado da Bahia. Essa área apresenta um clima semi-árido com baixa precipitação ao longo do ano. A menor irradiação solar global – 3,6 kWh/m<sup>2</sup> – ocorre no litoral norte de Santa Catarina, caracterizado pela ocorrência de precipitação bem distribuída ao longo do ano.

Desta forma, percebe-se que o Brasil, mesmo nas regiões menos favorecidas de radiação solar, seja por localização geográfica ou por fatores climáticos, apresenta uma média acima da grande maioria dos países que mais investem na energia fotovoltaica, como por exemplo, a Alemanha, que possui média diária horizontal de 2,81 kWh/m<sup>2</sup> (DGS, 2008).

### 2.2 RADIAÇÃO SOLAR

A energia proveniente do Sol é uma forma de energia renovável, praticamente inesgotável, que está disponível gratuitamente e pode ser aproveitada para suprir parte das necessidades da sociedade, seja para aplicações de aquecimento ou para a geração de eletricidade (VIANA, 2010).

Além disso, ela origina o ciclo das águas que permite a geração de eletricidade por meio das hidrelétricas, a radiação solar que induz a circulação atmosférica em larga escala, gerando assim, os ventos. E essa radiação solar fornece também energia suficiente para o desenvolvimento de animais e plantas que, ao virarem resíduos, geraram os combustíveis fósseis como o petróleo, gás natural e o carvão (PINHO; GALDINO, 2014).

A energia do Sol pode atingir diretamente uma superfície absorvedora em terra ou sofrer diversos efeitos antes que isso ocorra, devido a interações com os gases atmosféricos e nuvens, como mostra a Figura 3. Também podem ocorrer reflexões no solo e objetos próximos, de forma que a radiação total que atinge a superfície absorvedora é a soma de três componentes (BENEDITO, 2009):

- Radiação direta: componente da radiação solar que percorre o caminho do Sol a superfície sem sofrer espelhamento ou reflexão.
- Radiação difusa: porção que atinge a superfície absorvedora após ter sido espelhada pelos gases atmosféricos ou refletida pelas nuvens.
- Albedo: componente da radiação solar que atinge o corpo absorvedor após ter sido refletida pelo solo ou por objetos próximos.

**Figura 3 - Componentes da Radiação Solar.**



Fonte: Viana (2010).

## 2.3 IRRADIÂNCIA

A irradiância,  $G$ , é uma grandeza que quantifica a radiação solar e, é expressa em  $W/m^2$  (Potência por Área) (VILLALVA *et al.*, 2012 *apud* TONIN, 2017).

A irradiância solar que atinge a camada atmosférica, perpendicular à superfície da terra, é de aproximadamente  $1.367 W/m^2$ , denominada constante solar. Entretanto, nem toda essa radiação chega à superfície da Terra. A atmosfera terrestre reduz este valor através de reflexão, absorção e espalhamento. O nível de irradiância que chega à superfície da Terra é de  $1.000 W/m^2$ . Sendo esse valor considerado como valor padrão para a especificação da potência nominal de uma célula ou de um módulo fotovoltaico. (PINHO e GALDINO, 2014).

A norma brasileira NBR 10899:2006 define alguns termos técnicos relacionados a grandeza da irradiância, como:

- irradiância solar ( $G$ ): taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície, normalmente medida em  $W/m^2$  ;
- irradiância difusa ( $G_{DIF}$ ): potência radiante do céu, recebida em uma unidade de área em uma superfície horizontal, excluída da irradiância direta;
- irradiância direta ( $G_{DIR}$ ): irradiância solar incidente em uma superfície, sem ter sido espalhada pela atmosfera, podendo ser normal ou horizontal;
- irradiância global ( $G_{HOR}$ ): potência radiante solar, recebida em uma unidade de área em uma superfície horizontal, sendo igual à irradiância direta mais a irradiância difusa;
- irradiância devido ao albedo ( $G_{ALB}$ );
- irradiância total ( $G_{TOT}$ ): potência radiante solar total com as componentes direta, difusa e de albedo, recebido em uma unidade de área em uma superfície com inclinação qualquer;

## 2.4 IRRADIAÇÃO

A irradiação é a grandeza usada para medir a energia solar incidente sobre uma área por um determinado tempo ( $Wh/m^2$ ), que expressa energia por área. Esta medida é útil para fazer dimensionamentos dos sistemas fotovoltaicos, pois pode

definir o recurso solar disponível em uma região específica (VILLALVA *et al.*, 2012 *apud* TONIN, 2017).

A norma brasileira NBR 10899:2006 define alguns termos técnicos relacionados a grandeza da irradiação, como:

- irradiação solar ( $I$ ) ou ( $H$ ): irradiância solar integrada durante um intervalo de tempo especificado, medida em  $\text{Wh/m}^2$ , sendo simbolizada por “ $I$ ”, quando integrada no tempo de uma hora, ou por “ $H$ ”, quando integrado no tempo de um dia;
- irradiação difusa ( $I_{DIF}$ ) ou ( $H_{DIF}$ ): irradiância difusa integrada durante um intervalo de tempo especificado;
- irradiação direta ( $I_{DIR}$ ) ou ( $H_{DIR}$ ): irradiância direta integrada durante um espaço de tempo especificado;
- irradiação global ( $I_{HOR}$ ) ou ( $H_{HOR}$ ): irradiância global integrada durante um intervalo de tempo especificado;
- irradiação total ( $I_{TOT}$ ) ou ( $H_{TOT}$ ): irradiância total integrada durante um intervalo de tempo especificado.
- Condições-padrão de referência para ensaio: Temperatura de junção da célula em  $25^{\circ}\text{C}$ , irradiância total de  $1000 \text{ W/m}^2$  normal à superfície de ensaio e espectro AM (massa de ar) 1,5, sendo simbolizada por “STC” (*Standard Test Conditions*).

## 2.5 FONTES DE DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR

### 2.5.1 Estações Meteorológicas

Uma estação meteorológica automática (EMA) coleta, de minuto em minuto, as informações meteorológicas (temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação, direção e velocidade dos ventos, radiação solar) representativas da área em que está localizada. A cada hora, estes dados são integralizados e disponibilizados para serem transmitidos, via satélite, para a sede do INMET, em Brasília. O conjunto dos dados recebidos é validado, através de um controle de qualidade e armazenado em um banco de dados. Além disto, os dados são

disponibilizados gratuitamente, em tempo real, através da internet ([http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/pg\\_automaticas.php](http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/pg_automaticas.php)) para o público em geral.

Para verificação do desempenho real de uma instalação de energia solar fotovoltaica é necessário utilizar dados reais do período avaliado, pois variações climáticas atípicas ocorridas em um determinado mês ou em um ano podem levar a indicadores errados. Neste trabalho serão utilizados os dados de irradiação solar global horizontal do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, especificamente da estação A-807, localizada em Curitiba, Figura 4.

**Figura 4 - Distribuição das Estações Meteorológicas Automáticas pelo Brasil.**



Fonte: INMET (2017).

### 2.5.2 Atlas Brasileiro de Energia Solar

Em 2006, foi publicado o Atlas Brasileiro de Energia Solar, desenvolvido no escopo do projeto SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment), considerada, até 2017, a referência mais atual e completa sobre a estimativa do potencial de energia solar no Brasil. Este projeto teve início em 2001, sob coordenação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e foi concebido através do

levantamento de dados climatológicos de estações de medição e imagens de satélites, no período entre os anos de 1995 e 2005.

Em 2017, foi publicado o Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2ª Edição visando melhorar ainda mais a confiabilidade e acurácia da base de dados produzida e disponibilizada para acesso público. Nesta 2ª edição, o período de medição fora dentre os anos de 1999 a 2015. Os dados disponibilizados pelo Atlas referem-se aos valores médios das estimativas do total diário de irradiação global horizontal e também disponibilizam a irradiação incidente sobre um plano inclinado igual à latitude, com sentido para o equador. O Atlas em pdf e a base de dados de irradiação em Excel estão disponível para download em: [http://labren.ccst.inpe.br/atlas\\_2017.html#](http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html#).

Para estimar a geração de um SFVCR são necessárias as características de irradiação do local. Portanto, os dados obtidos dos atlas solarimétricos de irradiação global são imprescindíveis para estimar a geração de energia e, conseqüentemente, avaliar a viabilidade da utilização de SFVCR em determinado local.

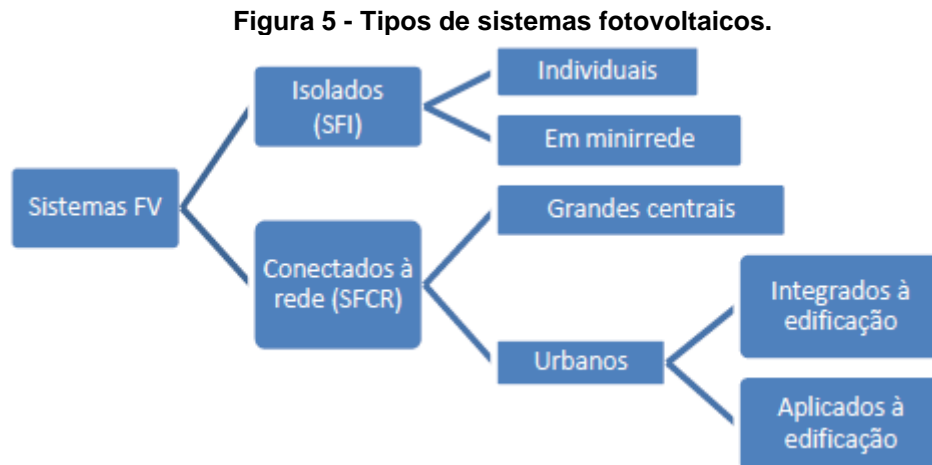
### 2.5.3 Radasol

Por ser referente à irradiação incidente no plano horizontal e com sentido a linha do equador, os dados do INMET precisam ser modelados para abranger os diferentes ângulos de inclinação que um SFV possa se encontrar. Um software que pode auxiliar na elaboração de arquivos de dados de sequências de radiação solar é o RADIASOL, elaborado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e que permite a obtenção de resultados horários, diários e mensais de radiação solar sobre superfícies inclinadas em diferentes orientações. O cálculo da intensidade da radiação solar em superfícies inclinadas é um procedimento trabalhoso devido ao elevado número de operações envolvidas, além de modelos matemáticos de distribuição temporal e espacial da radiação solar. Para isso, o software RADIASOL utiliza internamente modelos matemáticos disponíveis na literatura. O software gratuito RADIASOL pode ser encontrado para download em <http://www.solar.ufrgs.br/>.

## 2.6 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados de duas maneiras segundo a norma NBR 11704:2008, seja sistema fotovoltaico isolado (SFVI) ou conectado a rede (SFVCR).

A aplicação dos sistemas FV pode ser categorizada conforme a Figura 5.



Fonte: Urbanetz (2010).

### 2.6.1 Sistema Fotovoltaico Isolado - SFVI

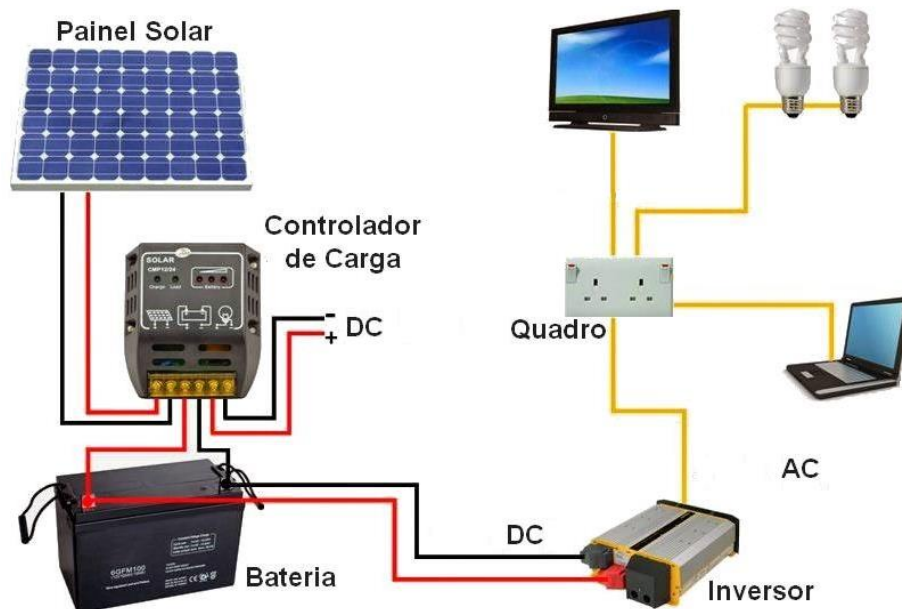
Os sistemas fotovoltaicos isolados são aqueles que não possuem qualquer conexão com o sistema público de fornecimento de energia elétrica. O sistema abastece diretamente os aparelhos que utilizarão a energia e são geralmente construídos com um propósito local e específico. Esta solução é bastante utilizada em locais remotos já que muitas vezes é o modo mais econômico e prático de se obter energia elétrica nestes lugares. Exemplos de uso são sistemas de bombeamento de água, eletrificação de cercas, rádio de comunicação, sinalização e estações replicadoras de sinal.

A Figura 6 mostra os quatro componentes do sistema fotovoltaico isolado. Os SFVI são compostos basicamente por quatro equipamentos:

- Painel fotovoltaico: tem a propriedade de transformar a radiação solar em corrente elétrica contínua;

- Controlador de carga: equipamento eletrônico destinado a controlar e monitorar a carga e/ou descarga do banco de baterias, evitando sobrecargas e descargas profundas e, aumentando assim, a vida útil do banco de baterias;
- Inversor: equipamento eletrônico destinado a converter a tensão contínua, proveniente do painel ou do banco de baterias, em tensão alternada;
- Bateria: tem a função de armazenar a energia elétrica para ser utilizada em momentos em que o sol não esteja presente e não haja outra fonte de energia (URBANETZ, 2010).

**Figura 6 - Esquemático básico de um sistema fotovoltaico isolado - SFVI**

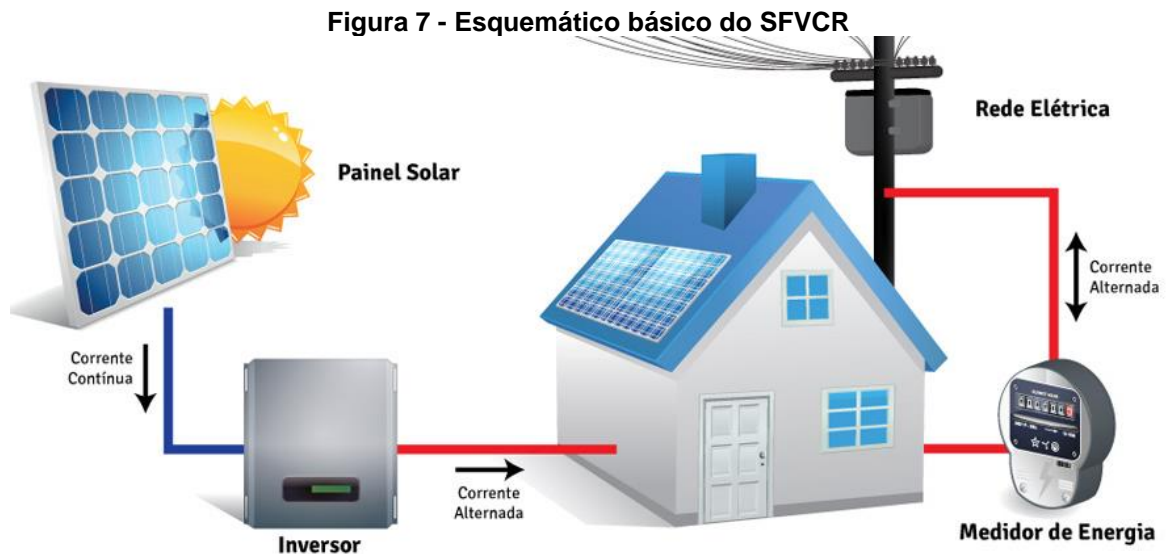


Fonte: North Solar (2018).

### 2.6.2 Sistema Fotovoltaico Conectado À Rede Elétrica - SFVCR

Os SFVCRs são constituídos por: painel FV e inversor. Não são utilizados elementos para armazenar a energia elétrica. Basicamente, a rede elétrica da concessionária é vista como o elemento armazenador, pois toda a energia gerada é colocada em paralelo com a energia da rede (URBANETZ, 2010). A Figura 7 mostra a configuração básica de um sistema conectado à rede.





Fonte: Real Solar (2018).

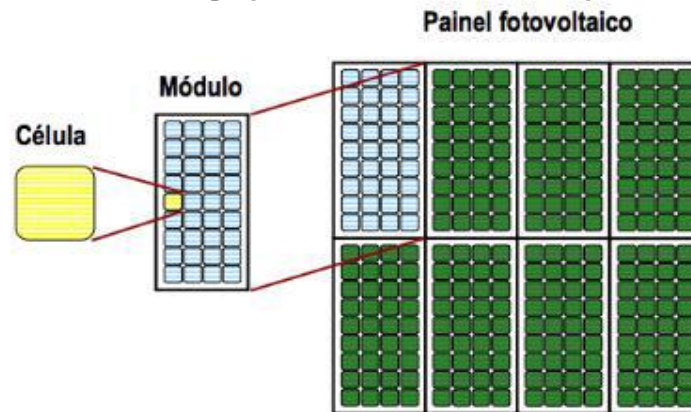
Para o SFVCR também é necessário um medidor bidirecional, que é responsável por registrar a quantidade de energia gerada/injetada na rede, em kWh, e a energia consumida da concessionária, em kWh.

## 2.7 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

A célula fotovoltaica é um dispositivo fabricado com material semicondutor, normalmente o silício, e é o responsável pelo processo de conversão direta da luz em eletricidade, fenômeno esse denominado de efeito fotovoltaico. Deste efeito obtém-se a energia solar fotovoltaica (PINHO; GALDINO, 2014).

Estas células são associadas eletricamente em arranjos série/paralelo a fim de formar um módulo FV. Para gerar a energia requerida pela carga, módulos são associados (formando um painel FV) a fim de obter-se o nível de tensão e corrente desejados, como mostra a Figura 8 (URBANETZ, 2010).

Figura 8 - Processo de agrupamento célula, módulo e painel fotovoltaico

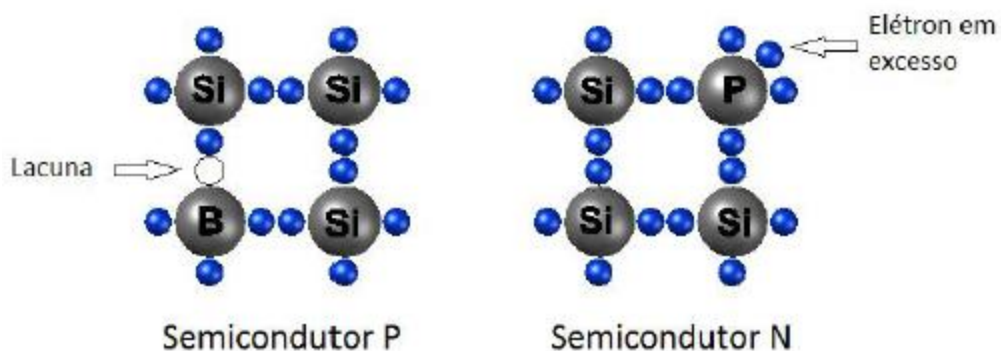


Fonte: LEVA *et al.*, 2015

A célula fotovoltaica utiliza dois tipos diferentes de silício, com o objetivo de criar cargas negativas e positivas. Para criar uma carga negativa (receptora de elétron, dopante tipo P), o silício é combinado com boro, e para criar uma carga positiva (doadora de elétron, dopante tipo N), o silício é combinado com o fósforo. Esta combinação cria mais elétrons no silício carregado positivamente e menos elétrons no silício carregado negativamente. O silício carregado positivamente é unido ao silício carregado negativamente e forma-se uma junção chamada de *pn*, (PINHO e GALDINO, 2014).

Quando a junção *pn* é exposta à energia solar, os fótons de luz fazem com que alguns dos elétrons que circundam os átomos se desprendam, e esses elétrons livres vão migrar, através da corrente elétrica, para a parte da célula de silício que está com ausência de elétrons, como mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Estruturas moleculares dos semicondutores P e N.



Fonte: Adaptado de VILLALVA e GAZOLLI, 2013.

Assim, os elétrons irão fluir em uma direção constantemente, deixando átomos e preenchendo lacunas em átomos diferentes. Este fluxo de elétrons cria uma corrente elétrica, ou, o que é chamado de energia solar fotovoltaica.

Os materiais semicondutores mais utilizados para fabricação dessas células, em ordem decrescente de utilização, são: silício (Si) cristalino (c-Si), multicristalino (m-Si), amorfo (a-Si) e microcristalino ( $\mu$ -Si); telúrio (Te); cádmio (Cd); cobre (Cu); índio (I); gálio (Ga); selênio (Se), entre outros (RÜTHER, 2004).

### 2.7.1 Silício Monocristalino (m-Si)

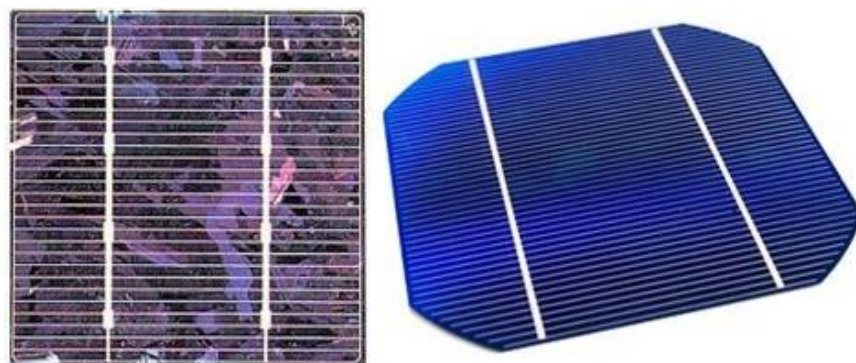
As células monocristalinas são fabricadas a partir da serragem de lingotes de silício monocristalino. Esses lingotes são obtidos a partir do silício purificado, extraído do mineral quartzo, muito abundante na crosta terrestre. O lingote de silício monocristalino é constituído de uma estrutura cristalina única, por isso possui aspecto brilhante e uniforme. O lingote é serrado e fatiado para produzir lâminas de silício, ou wafers. Os wafers são submetidos a processos de dopagem, durante os quais são formadas as camadas P e N que originam as propriedades fotovoltaicas. O wafer dopado recebe depois os eletrodos, o tratamento antirreflexivo e as células são cortadas nas laterais para a remoção de possíveis causadores de curto-circuito, dando origem à célula fotovoltaica. Uma célula monocristalina tem aspecto uniforme, podendo apresentar coloração azulada ou preta, dependendo do tipo de tratamento antirreflexivo empregado. As células de silício monocristalino são as mais eficientes disponíveis comercialmente em larga escala. Os módulos fotovoltaicos construídos de células monocristalinas tipicamente têm eficiência de 16%, Figura 10a (VILLALVA *et al.*, 2012).

### 2.7.2 Silício Policristalino (p-Si)

O silício policristalino possui um processo de fabricação menos complexo do que o silício monocristalino, pois se utiliza de temperaturas mais baixas do que as empregadas na fabricação do monocristalino. O lingote de silício policristalino é formado por um aglomerado de inúmeros cristais, os quais possuem tamanhos e orientações espaciais diferentes. No contorno desses cristais concentram-se os

defeitos que tornam o material menos eficiente, em termos de conversão, do que o monocristalino. Os wafers policristalinos, bem como as células acabadas, possuem aparência heterogênea e aspecto bastante distinto do silício monocristalino. Os módulos fotovoltaicos policristalinos têm eficiências de conversão ligeiramente inferior às dos monocristalinos, contudo, possuem um menor custo de produção, visto que a perfeição cristalina é menor do que no caso do silício monocristalino e, o processamento é mais simples (RÜTHER, 2004), Figura 10b (VILLALVA *et al.*, 2012).

**Figura 10 - Célula de (a) Silício Monocristalino e (b) Silício Policristalino**



Fonte: BlueSol (2018).

### 2.7.3 Filmes finos

Os dispositivos de filmes finos são fabricados pela pulverização de finas camadas de silício sobre uma base feita de material rígido ou flexível. O custo dos filmes finos é menor, pois em sua fabricação não há serragem de lingotes, ocorrendo menos desperdício de material e menor consumo de energia, pois os processos de fabricação empregam temperaturas menores do que as utilizadas na fabricação do silício cristalino. Além disso, a fabricação é menos complexa, tornando mais simples a automatização dos processos e facilitando a produção em grande volume. Os módulos fotovoltaicos de filmes finos, como os mostrados na Figura 11, são constituídos de uma única célula.

**Figura 11 - Módulos fotovoltaicos de filmes finos.**



**Fonte: ENEL Soluções.**

Apesar do baixo custo de fabricação, os dispositivos de filmes finos têm baixa eficiência e exigem maior área instalada para produzir a mesma energia que produzem as tecnologias cristalinas, tornando mais elevados os custos de instalação. Uma vantagem dos filmes finos é o seu baixo coeficiente de redução de potência com o aumento da temperatura, o que os torna mais adequados para locais com temperaturas muito elevadas. Os módulos de filmes finos sofrem degradação de maneira mais acelerada do que os cristalinos, o que pode ser um aspecto muito inconveniente para esta tecnologia (VILLALVA *et al.*, 2012).

A designação filme fino é usada para diferentes tecnologias, como:

- **Silício amorfo (a-Si):** foi a primeira tecnologia de filmes finos desenvolvida e, apesar de sua baixa eficiência de conversão (5 a 9%), além disso, a eficiência dessa tecnologia diminui durante os primeiros 6 a 12 meses de funcionamento devido à degradação induzida pela luz, até chegar a um valor estável. Atualmente, este efeito tem sido minimizado pela adoção de células com múltiplas camadas, e alguns fabricantes fornecem garantias similares às aquelas de módulos de silício cristalino. (PINHO; GALDINO, 2014);
- **Silício microcristalino (uc-Si):** vem substituindo o silício amorfo por apresentar simultaneamente características positivas do silício cristalino (mono e policristalino) e do silício amorfo, como a produção em massa, o menor desperdício de material e o reduzido consumo de energia no processo de fabricação. Ou seja, utiliza a maior eficiência do silício cristalino e mantém a

eficiência da célula em altas temperaturas, característica essa do silício amorfo. As células microcristalinas apresentam eficiências comerciais de até 9% (VILLALVA *et al.*, 2012);

- **Telureto de cádmio (CdTe):** O CdTe vem competindo com a utilização do c-Si e a-Si nas aplicações modernas, e também é encontrado em filmes finos. O seu custo de produção em larga escala é extremamente baixo e sua eficiência é maior comparada aos módulos de a-Si. O grande inconveniente de sua utilização é a alta toxicidade dos elementos e a baixa abundância dos mesmos (RUTHER, 2004);
- **CIGS (cobre-índio-gálio-selênio):** dentre as tecnologias de filmes finos, essa é a mais eficiente (9 a 11%) e também é um forte competidor no mercado, mas também tem problemas com pouca abundância de matéria-prima e custo elevado (URBANETZ, 2015).

#### 2.7.4 Comparação de células fotovoltaicas

As diferentes tecnologias de células disponíveis no mercado possuem custos e eficiências diferentes. A Tabela 1 resume as diferenças de eficiência de conversão energética entre os tipos de células fotovoltaicas mais comercialmente ativas e a eficiência dos módulos fotovoltaicos:

**Tabela 1 - Comparativo de eficiência de tecnologias de células fotovoltaicas.**

Tecnologia FV		Eficiência de Conversão da Célula em laboratório	Eficiência de Conversão da Módulo
Cristalino	Silício Mono (m-Si)	25%	14 - 21 %
	Silício Poli (p-Si)	21,3%	14 - 16,5 %
Filmes Finos	Silício Amorfo (a-Si)	13,6%	6 - 9 %
	Silício microcristalino (uc-Si)	12%	7 - 9 %
	Telureto de cádmio (CdTe)	22,1%	9 - 12 %
	CIGS	22,3%	8 - 14 %

Fonte: Adaptado de CENTER FOR SUSTAINABLE SYSTEMS (2017).

É importante não confundir a eficiência das células solares fotovoltaicas com a eficiência dos módulos fotovoltaicos. A eficiência da célula fotovoltaica determina as dimensões de um módulo fotovoltaico de potência-pico definida, sendo que, quanto maior é a eficiência da célula, menor será o tamanho do módulo. Enquanto que os

módulos têm sua eficiência baseada na sua área total e na potência-pico que consegue fornecer.

A eficiência das células fotovoltaicas é limitada pela quantidade de radiação solar total que efetivamente é utilizada para gerar energia elétrica. Alguns dos fatores que causam perdas e limitam uma maior eficiência são, por exemplo:

- Reflexão e sombreamento dos contatos frontais;
- Absorção incompleta de fótons, quando o fóton não atinge exatamente a junção  $pn$ ;
- Recombinação de elétrons, após o desprendimento do elétron ele deve ser capturado pelo condutor do módulo para ser utilizado no circuito que alimenta as cargas da instalação, caso contrário o elétron recombina;
- Resistência em série, perdas térmicas na condução elétrica;
- Efeitos da temperatura, o aumento de temperatura causa uma diminuição significativa da tensão do módulo, logo, resultando em uma redução da potência do módulo.

Os fabricantes trabalham em técnicas de produção aprimoradas que visam diminuir as perdas individuais e coletivas das células fotovoltaicas, para alcançar a máxima eficiência.

## 2.8 INVERSORES

Os módulos fotovoltaicos geram energia em corrente contínua, porém a maioria das cargas de residências, comércios e indústrias são alimentadas em corrente alternada. Para que essa energia gerada seja amplamente utilizada é necessário converter tensão e corrente contínua (CC) em tensão e corrente alternada (CA), e isso é possível utilizando-se um equipamento eletrônico conhecido como inversor.

De acordo com o tipo de configuração do sistema, como visto na seção 2.6, o inversor poderá ser especificado como, inversor para sistemas isolados ou para conectado a rede. No caso de sistemas isolados, o inversor recebe a energia acumulada nas baterias, transforma a tensão contínua em uma onda senoidal sem qualquer referência externa, pois afinal trata-se de um sistema isolado. No caso dos

sistemas conectados a rede, existe uma interconexão entre o inversor e a rede pública, portanto, as ondas de tensão da saída do inversor em CA devem se adequar à rede, estando na mesma fase e possuindo características semelhantes às ondas da rede, de modo a permitir o paralelismo de geradores. Para fazer esse paralelismo de geradores, existem dois tipos de inversores mais utilizados: aqueles que usam o sinal da rede para a sincronização (comutados pela rede) e aqueles que utilizam um circuito eletrônico interno para a mesma finalidade (auto-comutados). (URBANETZ, 2010)

Nos SFCRs, anomalias na qualidade de energia da rede elétrica pública podem fazer com que o inversor rejeite a rede. Essa rejeição impede o funcionamento do inversor, não permitindo a geração fotovoltaica. (URBANETZ, 2010).

Outra função importante, encontrada nos inversores mais atuais, é a busca pelo ponto de máxima potência (MPP - *Maximum Power Point*) do gerador FV, que é o ponto onde a potência gerada nos painéis, produto tensão x corrente, apresenta seu máximo valor que varia constantemente devido às mudanças de temperatura e de irradiância. Logo, sistemas que buscam operar no MPP apresentam melhoras em seu desempenho, por ter a tensão de operação do arranjo fotovoltaico controlada (URBANETZ, 2010) (RÜTHER, 2004).

Para realizar a conversão CC/CA, as chaves eletrônicas controláveis, que atuam nos inversores, bloqueiam e conduzem o sinal de tempo em tempo produzindo ondas alternadas e através de técnicas de PWM (*Pulse Width Modulation*) são moduladas. São nesses momentos, de atuação das chaves eletrônicas, que ocorrem as maiores perdas elétricas do inversor (PINHO e GALDINO, 2014).

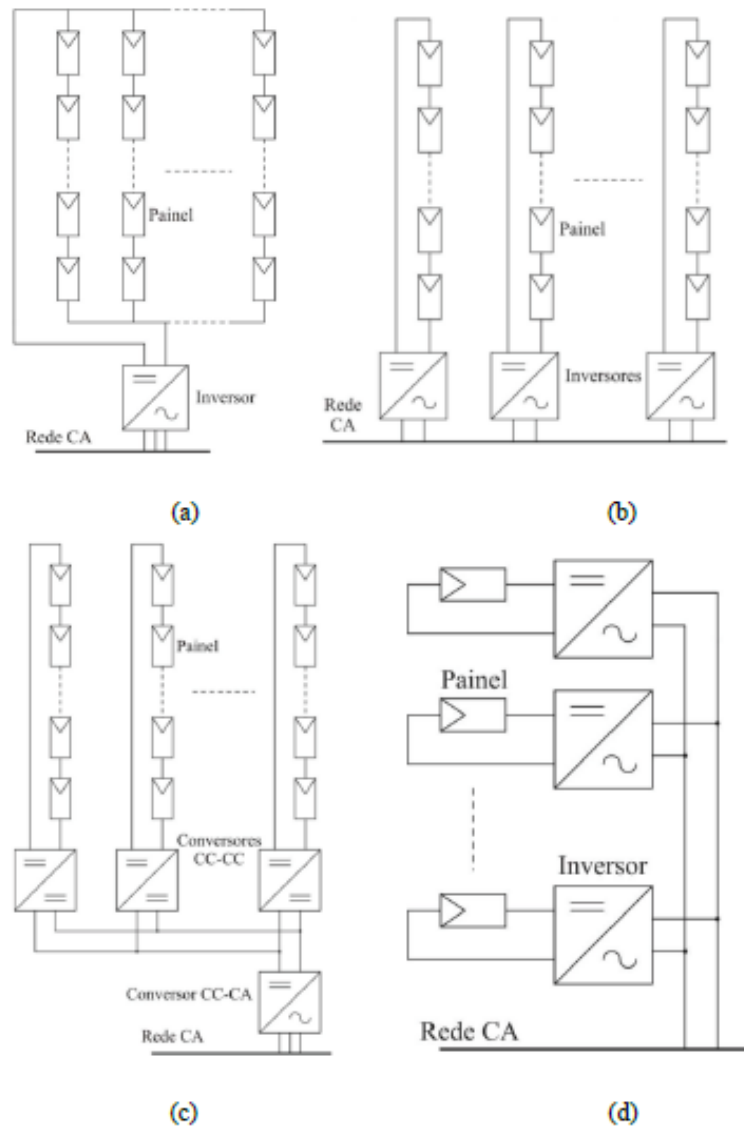
Outros fatores que acarretam perdas nos inversores são as fortes componentes harmônicas geradas neste processo de conversão, fazendo-se necessários processos de filtragem de sinal com a utilização de indutores e capacitores para obtenção de uma onda senoidal pura. As topologias tanto quanto à configuração de seu circuito eletrônico, quanto à combinação dos módulos aos inversores também interferem na eficiência (PINHO e GALDINO, 2014).

Com o passar do tempo, a complexidade dos sistemas aumentou e o processo de fabricação desses equipamentos evoluiu de tal modo que, atualmente, existem inversores com eficiência de até 97% que se tornam economicamente viáveis para muitas aplicações.



As combinações dos módulos fotovoltaicos com as topologias de inversores são enquadradas em quatro tipos de configurações, mostradas na Figura 12 (URBANETZ, 2010).

**Figura 12 - a) inversor centralizado; b) inversor por string; c) inversor multi-string; d) inversores assimilados aos respectivos módulos FV.**



**Fonte: URBANETZ, 2010.**

Na Figura 12 (a) é representada a configuração do inversor centralizado, onde os módulos conectados em série formam fileiras que, por sua vez, são dispostas em paralelo e interligadas a um mesmo inversor. As grandes vantagens desta forma de configuração é o custo reduzido e a simplicidade da estrutura.

O esquema (b) mostra a configuração do inversor por *string*. Essa configuração elimina ligações em paralelo, diminui as perdas ocasionadas por sombreamento e

permite utilizar em um mesmo sistema fotovoltaico séries FV com orientações diferentes, propiciando um aumento da eficiência energética e da confiabilidade do sistema. A desvantagem é o aumento dos custos, uma vez que é necessário um maior número de inversores de menor potência.

O esquema (c) representa a configuração do inversor *multi-string*, ou seja, os módulos são agregados em diferentes grupos com modos de instalação diferentes permitindo assim uma maior flexibilidade para a busca do MPP.

No esquema (d) são representados inversores assimilados aos módulos FV, sendo assim, cada módulo irá se interligar com um inversor que terá por objetivo trabalhar com o MPP de seu módulo associado. O alto custo e o acoplamento particular entre módulos e inversores, ambos com vidas úteis incompatíveis, são as principais desvantagens dessa configuração.

## 2.9 ÍNDICES DE MÉRITO

Os índices de mérito são indicadores que permitem a comparação de desempenho entre sistemas fotovoltaicos que operam em diferentes condições de localidade e configuração (BENEDITO, 2009). Portanto, com estes dados, podemos realizar uma comparação direta do desempenho elétrico entre sistemas, independentemente do tipo de tecnologia utilizada, localização do sistema, irradiação incidente nos módulos ou inclinação do arranjo.

### 2.9.1 Produtividade/*Yield*

O *Yield* permite comparar sistemas fotovoltaicos instalados em uma mesma região desde que possuam identicidades técnicas e elétricas. Isso porque não leva em consideração a irradiação que incide nos módulos e as perdas elétricas ou por eficiência do sistema.

Sua fórmula, equação (1), expressa a relação entre duas grandezas, a energia gerada (kWh) e potência instalada (kWp) expressa pela integral da potência entregue ao sistema e a potência instalada de cada módulo fotovoltaico, normalmente vinculada a um período anual de operação (URBANETZ; et. al., 2014a).

$$YF = \frac{\int_0^T P(t)dt}{P_n} = \frac{E(t)}{P_n} \quad (1)$$

Onde,

$P(t)$  é a potência entregue pelo sistema no instante  $t$ , em (kW);

$P_N$  é a potência nominal do painel solar, em (kWp);

$T$  é o período de integração em número de dias equivalente ao tempo analisado.

$YIELD$  é a produtividade de energia para no instante  $t$ , em (kWh/kWp)

$E(t)$  é a energia gerada pelo sistema em corrente alternada no instante  $t$ , em (kWh);

Como a potência nominal dos módulos é calculada em condições normais de operação (irradiância de 1000W/m<sup>2</sup> a 25° C), e é igual para todos os modelos, este índice permite uma comparação com outros sistemas, quanto a eficiência da conversão CC para CA, diferentes configurações e ambientes de montagem. (MARION *et al.*, 2005)

## 2.9.2 Fator de Capacidade

Este índice,  $C_F$ , representa a razão da energia gerada e entregue para o sistema com a energia gerada caso o sistema operasse durante 100% do tempo em potência nominal, equação (2). Normalmente esse tempo de análise é de 1 ano. A geração solar no Brasil apresenta fatores entre 13% a 18% dependendo das variantes do sistema. (BENEDITO, 2009).

$$C_F = \frac{\int_0^T P(t)dt}{P_n \times T} = \frac{E(t)}{P_n \times T} = \frac{YF}{T} \quad (2)$$

Onde,

$T$  é o período de tempo desejado para avaliação, 1 ano = 8760 horas. O valor da energia deve ser registrado neste mesmo intervalo de tempo.

$P_N$  é a potência nominal do painel solar, em (kWp);

O fator de capacidade é comumente utilizado para comparar diferentes fontes de geração de energia. Neste aspecto, a geração solar distribuída, por ser dependente das condições climáticas combinado ao limitante natural de horas de sol por dia, fica atrás das outras fontes de energia, como as termelétricas, hidrelétricas e eólicas.

### 2.9.3 Taxa de Desempenho/*Performance Ratio*

A *Performance Ratio* (PR) de um SFCR é a razão entre a produtividade/*YIELD* (kWh/kWp) do sistema e a quantidade de horas de sol a 1.000 W/m<sup>2</sup> incidentes no painel FV, irradiação normalmente vinculada a um período anual de operação (URBANETZ et. al., 2014a).

Também conhecida como Desempenho Global, a PR pode ser definida como a razão entre o desempenho real do sistema e o desempenho máximo teórico possível, dada em porcentagem.

$$PR = \frac{E(t)}{P_n} \times \frac{G_{ref}}{H(t)} = \frac{YF}{H(t)} \quad (3)$$

Onde:

H(t) representa a irradiação no plano do painel fotovoltaico, no intervalo de tempo t, em kWh/m<sup>2</sup>.dia;

G<sub>ref</sub> representa a irradiância em condições padrão de teste STC, 1 kW/m<sup>2</sup>.

Este índice é o mais utilizado para a comparação de desempenho elétrico entre sistemas fotovoltaicos conectados à rede, já que considera as perdas no processo de geração de energia solar em energia elétrica em CA (BENEDITO, 2009). Ou seja, o PR permite a comparação direta entre sistemas de geração independente, devido a sua métrica englobar o cálculo para diferentes tecnologias e diferentes ocorrências de irradiação.

## 2.10 MERCADO FOTOVOLTAICO NO BRASIL

A atual visão do mercado da energia solar fotovoltaico no Brasil está delineando e criando assim segmentos que são divididos segundo algumas variáveis

discriminantes: o tamanho da instalação, as partes interessadas, a fim e a normativa aplicável, Figura 13.

**Figura 13 - Mapa do mercado fotovoltaico**

		CONECTADA A REDE DO DISTRIBUIDOR	TAMANHO	AS PARTES	A FIM	NORMATIVA APLICAVEL
MICROGERAÇÃO		SIM	< 75 kW	FAMILIAS, PEQUENAS EMPRESAS, CONDOMINIOS VERTICAIS	AUTOSUFICIENCIA ENERGETICA	RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL 482/2012
MINIGERAÇÃO		SIM	Entre 75 kW - 5 MW	MÉDIAS E GRANDES EMPRESAS, SHOPPINGS, HOTEIS, ORGANIZACOES PUBLICAS	AUTOSUFICIENCIA ENERGETICA	
MAXIGERAÇÃO PELO AUTOCONSUMO		NAO	> 5 MW	GRANDES EMPRESAS, POLOS INDUSTRIAIS	ABATER O CUSTO DA CONTA DE ENERGIA E SE TORNAR LIVRE DOS BLACK OUT	-
MAXIGERAÇÃO PELA VENDA DE ENERGIA	ATRAVÉS DE LEILÕES	SIM	> 5 MW	INVESTIDORES	PRODUZIR ENERGIA LIMPA PARA A SOCIEDADE	EDITAIS FEDERAIS OU ESTADUAIS
	NO MERCADO LIVRE	NÃO	SEJA O QUE FOR	INVESTIDORES	PRODUZIR ENERGIA LIMPA PARA AS EMPRESAS	-
GERAÇÃO RURAL		NÃO	SEJA O QUE FOR	PEQUENOS VILAREJOS OU EMPREENDIMENTOS LONGE DA REDE ELETRICA	AUTOSUFICIENCIA ENERGETICA	-

**Fonte: Real Solar (2018) - Adaptado.**

A Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL criou os segmentos da Micro e Mini Geração que permite a qualquer proprietário instalar uma pequena planta solar fotovoltaica (abaixo de 1 MW e, posteriormente ampliada pela Resolução Normativa 687/2015 para 5 MW). A regulamentação formou assim o sistema de compensação de energia que permite a injeção de energia em excesso na rede em troca de créditos em kWh na conta de luz. Então não precisa mais consumir toda a energia produzida no momento da geração, uma vez que ela poderá ser injetada na rede e, nos meses seguintes (até 36 meses), o consumidor receberá créditos em kWh na conta de luz referentes a esta eletricidade gerada, mas não consumida.

Além do sistema de compensação, existe a possibilidade da comercialização de energia solar realizada por duas esferas de mercado: o Ambiente de Contratação Regulada (ACR), por meio de leilões, e o Ambiente de Contratação Livre (ACL) ou mercado livre. Todos os contratos, sejam do ACR ou do ACL, têm de ser registrados na CCEE, e servem de base para a contabilização e liquidação das diferenças no mercado de curto prazo. (CCEE, 2018).

Quanto aos leilões, eles são a principal forma de contratação de energia no Brasil. Por meio desse mecanismo, concessionárias, permissionárias e autorizadas de serviço público de distribuição de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN) garantem o atendimento à totalidade de seu mercado no ACR. Quem realiza os leilões de energia elétrica é a CCEE, por delegação da Aneel. O critério de menor tarifa é utilizado para definir os vencedores do certame, visando à eficiência na contratação de energia.

A outra possibilidade de venda de energia é pelo mercado livre, neste mercado, a contratação, o tipo de contrato e o preço da energia é decidido livremente entre vendedor e comprador.

Sobre a geração rural, as concessionárias de distribuição de eletricidade têm por obrigação no Brasil atender a todos os moradores da sua área de concessão, sejam eles moradores de centros urbanos ou zonas rurais distantes. Mas, as maiores dificuldades e custos para levar luz estão justamente nas áreas rurais, onde comunidades de baixa densidade populacional muitas vezes se encontram em locais de difícil acesso e longe das linhas de transmissão, isto quando não estão próximos a áreas de proteção ambiental. Deste modo, o uso de sistemas isolados de geração fotovoltaica se torna a melhor opção.

### 3. RESULTADOS E ANÁLISE DE DADOS

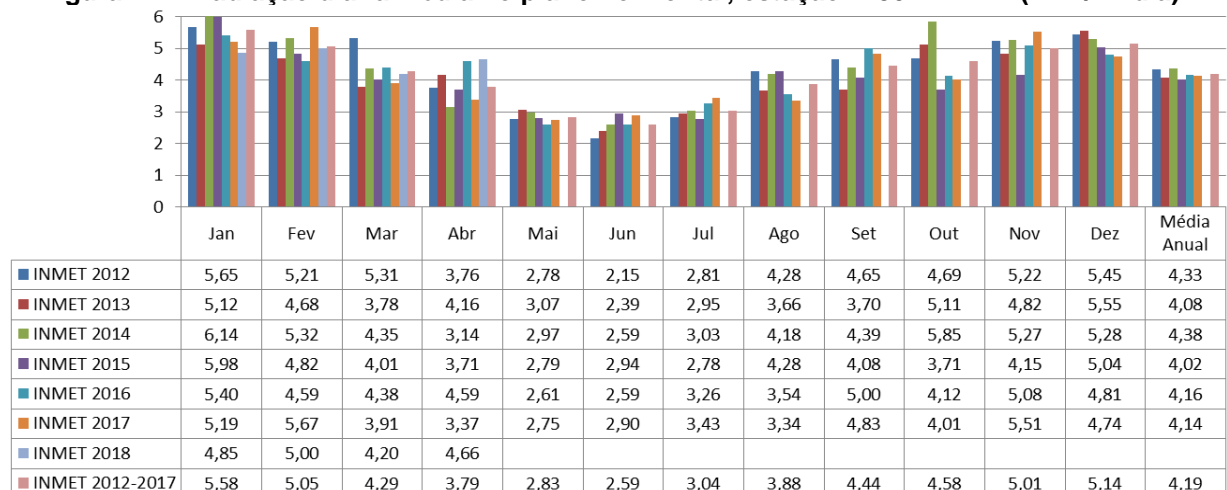
#### 3.1 PARÂMETROS DOS SISTEMAS

A análise dos índices de mérito para este trabalho é realizada a partir de dados coletados de sistemas fotovoltaicos distintos instalados em Curitiba. Os dados de irradiação no plano horizontal foram coletados através do site do INMET (Estação Curitiba – A807). Os dados de geração de cada sistema foram coletados nas respectivas plataformas online dos sistemas de seus inversores.

Para coletar os dados do INMET, foram analisadas as estações meteorológicas automáticas existentes, e a estação A807 é a mais indicada, pois está situada em Curitiba. Os dados disponibilizados pelo INMET contêm os dados de irradiação solar global no plano horizontal detalhados em dia e hora do período analisado e na unidade de medida em  $\text{kJ/m}^2$ .

Os dados de irradiação do INMET são utilizados para calcular a taxa de desempenho ou *performance ratio* do sistema fotovoltaico, sendo a variável “H” na equação (3) previamente analisada. A unidade desta variável na fórmula está em “ $\text{kWh/m}^2$ ”, portanto é necessário transformar a unidade dos dados do INMET de  $\text{kJ/m}^2$  para  $\text{kWh/m}^2$ , bastando multiplicar os valores de  $\text{kJ/m}^2$  por 0,000278. Com os dados convertidos em  $\text{kWh/m}^2$ , é possível transformar a irradiação por hora em dias médios mensais de irradiação. Para isso, primeiramente foram somadas as irradiações das 24h de cada dia, e em seguida feito uma média diária mensal. Assim, chega-se a Figura 14.

**Figura 14 - Irradiação diária média no plano horizontal, estação A-807 INMET ( $\text{kWh/m}^2$ .dia).**



Fonte: Adaptado de Tonin (2017)

Como já dito, os índices de fator de capacidade (FC) e Produtividade ( $Y_F$ ) não necessitam os dados de irradiação, apenas o *performance ratio* (PR), porém esses dados só podem ser usados para um painel fotovoltaico que esteja sem inclinação com a horizontal, para qualquer outra configuração esses dados de irradiação devem ser trabalhados no programa RADIASOL. Através dele é possível inserir os valores de irradiação no plano horizontal, inclinação, desvio azimutal (em relação ao norte geográfico), e assim identificar a irradiação para qualquer plano e obter o *performance ratio* do sistema fotovoltaico analisado.

### 3.2 ESCRITÓRIO VERDE - UTFPR

O sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica do Escritório Verde da UTFPR, Figura 15, foi inaugurado em dezembro de 2011 e opera de forma ininterrupta desde então. Seu painel fotovoltaico possui 10 módulos (KYOCERA, modelo KD-210GX-LP de tecnologia de silício policristalino, conectados em série) com uma potência instalada de 2,1 kWp, conectados à rede através de um inversor monofásico, com transformador, em 220 V de 2 kW (PVPOWERED modelo PVP2000), e ocupa uma área de 15 m<sup>2</sup>. A inclinação e orientação do painel acompanhou a estrutura do telhado (15 graus de inclinação e 22 graus oeste de desvio em relação ao norte), não seguindo o modo ideal de posicionamento (Inclinação igual à latitude e voltado para o norte geográfico), fato que limita seu máximo desempenho (URBANETZ *et al.*, 2016).

**Figura 15 - Vista dos módulos do Escritório Verde**

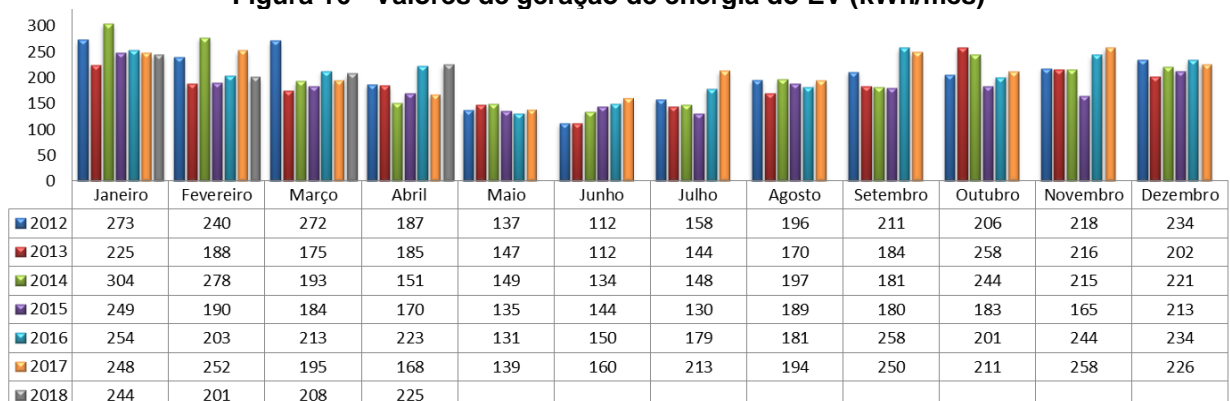


Fonte: FUSANO, 2013.



A análise do desempenho do SFVCR do Escritório Verde é feita com base nos valores de energia gerada durante os seis anos de operação do sistema (2012-2017) e com os valores de irradiação incidentes no painel fotovoltaico. A geração de energia elétrica é proporcional à irradiação incidente no painel fotovoltaico, onde nos meses de verão – maior incidência solar – há maior geração de energia elétrica e nos meses de inverno – menor incidência solar – há menor geração (URBANETZ *et al.*, 2014a). A Figura 16 mostra os dados de energia gerada pelo EV, desde janeiro de 2012.

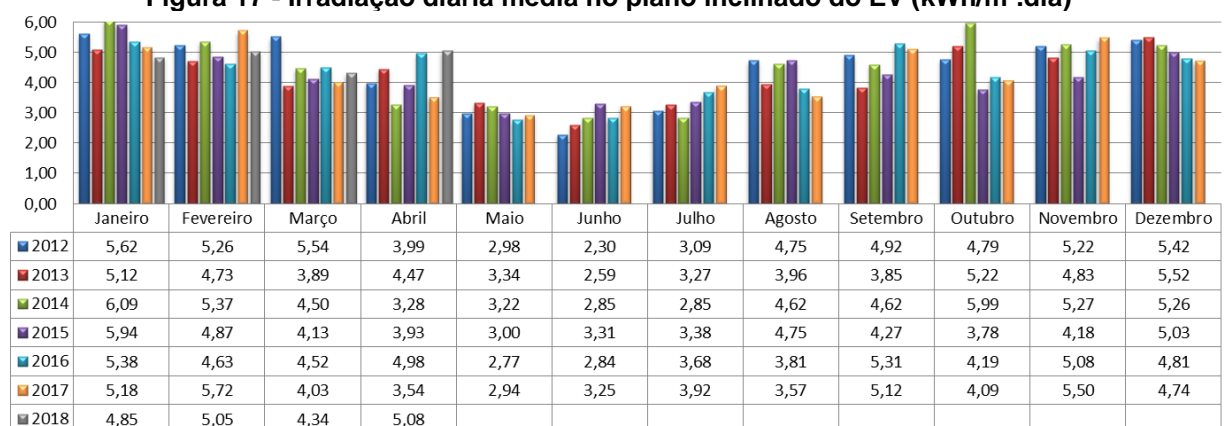
**Figura 16 - Valores de geração de energia do EV (kWh/mês)**



Fonte: Adaptado de Tonin (2017)

A Figura 17 mostra a irradiação diária média no plano inclinado em kWh/m<sup>2</sup>.dia. Esses dados são adquiridos após utilização do programa RADIASOL, que, como já dito na seção 2.5.3, permite, a partir da inserção de valores de irradiação no plano horizontal ano a ano (Figura 14), identificar os valores de irradiação para qualquer plano específico.

**Figura 17 - Irradiação diária média no plano inclinado do EV (kWh/m<sup>2</sup>.dia)**



Fonte: Adaptado de Tonin (2017)

### 3.2.1 Índices de Mérito EV

Os índices de mérito do Escritório Verde, produtividade (*yield*), fator de capacidade e taxa de desempenho são apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4.

**Tabela 2 - Produtividade EV (kWh/kWp)**

Yield (kWh/kWp)							
Mês	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Jan	130,0	107,1	144,76	118,57	120,95	118,10	116,19
Fev	114,3	89,5	132,38	90,48	96,67	120,00	95,71
Mar	129,5	83,3	91,90	87,62	101,43	92,86	99,05
Abr	89,0	88,1	71,90	80,95	106,19	80,00	107,14
Mai	65,2	70,0	70,95	64,29	62,38	66,19	
Jun	53,3	53,3	63,81	68,57	71,43	76,19	
Jul	75,2	68,6	70,48	61,90	85,24	101,43	
Ago	93,3	81,0	93,81	90,00	86,19	92,38	
Set	100,5	87,6	86,19	85,71	122,86	119,05	
Out	98,1	122,9	116,19	87,14	95,71	100,48	
Nov	103,8	102,9	102,38	78,57	116,19	122,86	
Dez	111,4	96,2	105,24	101,43	111,43	107,62	
<b>Anual</b>	<b>1163,8</b>	<b>1050,5</b>	<b>1150,0</b>	<b>1015,2</b>	<b>1176,7</b>	<b>1197,1</b>	

Fonte: Autor

**Tabela 3 - Fator de Capacidade EV (%)**

Fator de Capacidade (%)							
Mês	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Jan	17,47%	14,40%	19,46%	15,94%	16,26%	15,87%	15,62%
Fev	16,42%	13,32%	19,70%	13,46%	13,89%	17,86%	14,24%
Mar	17,41%	11,20%	12,35%	11,78%	13,63%	12,48%	13,31%
Abr	12,37%	12,24%	9,99%	11,24%	14,75%	11,11%	14,88%
Mai	8,77%	9,41%	9,54%	8,64%	8,38%	8,90%	
Jun	7,41%	7,41%	8,86%	9,52%	9,92%	10,58%	
Jul	10,11%	9,22%	9,47%	8,32%	11,46%	13,63%	
Ago	12,54%	10,88%	12,61%	12,10%	11,58%	12,42%	
Set	13,96%	12,17%	11,97%	11,90%	17,06%	16,53%	
Out	13,18%	16,51%	15,62%	11,71%	12,86%	13,50%	
Nov	14,42%	14,29%	14,22%	10,91%	16,14%	17,06%	
Dez	14,98%	12,93%	14,14%	13,63%	14,98%	14,46%	
<b>Anual</b>	<b>13,25%</b>	<b>12,00%</b>	<b>13,16%</b>	<b>11,60%</b>	<b>13,41%</b>	<b>13,70%</b>	

Fonte: Autor

**Tabela 4 - Taxa de Desempenho EV (%)**

Taxa de Desempenho (%)							
Mês	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Jan	74,59%	67,54%	76,74%	64,41%	72,52%	73,54%	77,22%
Fev	74,89%	67,58%	87,99%	66,35%	71,99%	74,89%	67,69%
Mar	75,46%	69,12%	65,94%	68,39%	72,39%	74,33%	73,62%
Abr	74,32%	65,74%	73,01%	68,59%	71,08%	75,33%	70,30%
Mai	70,52%	67,57%	71,15%	69,22%	72,65%	72,63%	
Jun	77,29%	68,53%	74,68%	69,01%	83,84%	78,14%	
Jul	78,62%	67,64%	79,77%	59,08%	74,72%	83,55%	
Ago	63,40%	65,88%	65,47%	61,13%	72,97%	83,50%	
Set	68,11%	75,84%	62,20%	66,91%	77,12%	77,52%	
Out	66,13%	75,92%	62,57%	74,43%	73,69%	79,34%	
Nov	66,24%	70,93%	64,72%	62,66%	76,24%	74,40%	
Dez	66,33%	56,26%	64,55%	65,05%	74,73%	73,24%	
<b>Anual</b>	<b>71,33%</b>	<b>68,21%</b>	<b>70,73%</b>	<b>66,27%</b>	<b>74,49%</b>	<b>76,70%</b>	

Fonte: Autor

A Tabela 4 apresenta a taxa de desempenho do EV, ano a ano. Alguns fatores que influenciam negativamente no desempenho do sistema, além da inclinação e orientação mencionada, é o sombreamento do painel fotovoltaico que ocorre no final do dia; acúmulo de sujeira; o rendimento máximo do inversor do EV é 92%, baixo quando comparado aos inversores atuais que chegam a 98%.

O EV estando localizado na região central de Curitiba sofre maior influência do acúmulo de sujeira quando comparado a bairros residenciais em regiões mais periféricas de Curitiba, podemos perceber esse fator após a primeira limpeza realizada em agosto de 2013 (de 65,88% em agosto para 75,84% em setembro). A mesma situação pode ser observada após a limpeza em setembro de 2015 e após a limpeza do dia 01/09/2016.

Os índices de mérito do EV (Yield anual médio de 1.125 kWh/kWp; PR médio de 71% e FC médio de 13%) são um pouco menores quando comparados com outros sistemas instalados mais recentes, no entanto já era esperado pelos motivos descritos anteriormente.

### 3.3 NEOVILLE - UTFPR

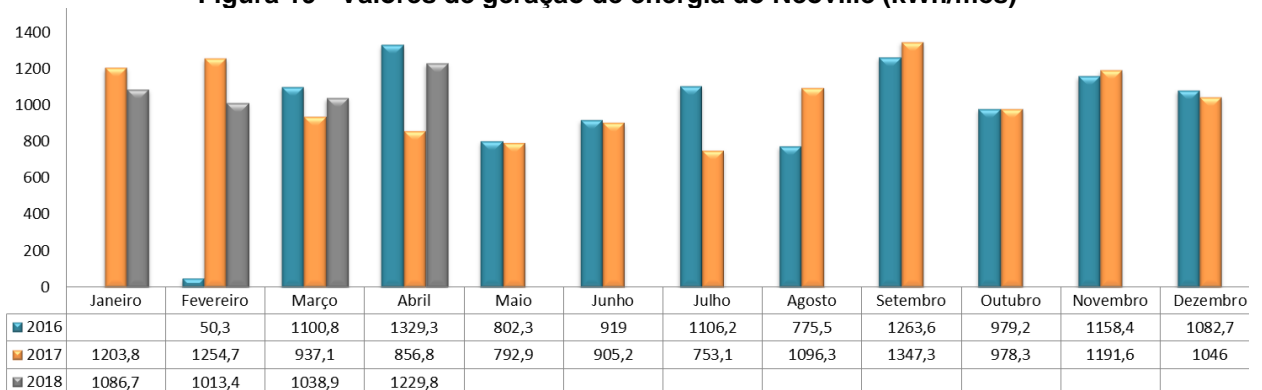
O Neville possui um sistema fotovoltaico doado pela ELCO Engenharia, apresentado na Figura 18, que entrou em operação no dia 29 de fevereiro de 2016. Possui duas *strings*, com 17 módulos conectados em série cada e um MPPT (seguidores do ponto de máxima potência) para cada *string*. Os 34 módulos (modelo ELCO-A300P) somam uma potência total de 10,2 kWp, e é conectado à rede através de um inversor de 10,3 kW (modelo CPS SCA 10KTL-DO) trifásico sem transformador em 380 V de alto rendimento, com eficiência de 98%. Está instalado na condição ideal, voltado para o norte geográfico. A Figura 19 mostra os dados de energia gerada pelo Neville, desde que esse entrou em operação.

**Figura 18 - Vista dos módulos da Neville**



Fonte: TONIN, 2017.

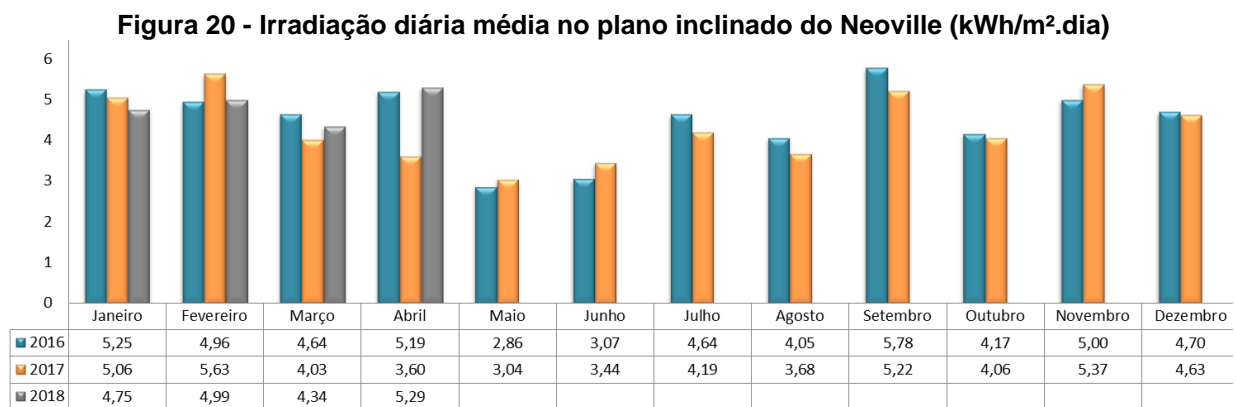
**Figura 19 - Valores de geração de energia do Neville (kWh/mês)**



Fonte: Adaptado de Tonin (2017)

De forma análoga aos cálculos realizados para o sistema do EV, calculou-se o valor da irradiação incidente no painel com base nos dados disponibilizados pelo INMET (Figura 14) e, utilizou-se o programa RADIASOL para encontrar o valor da irradiação no plano inclinado. Esse sistema encontra-se inclinado a 25° e orientado para o norte geográfico, ou seja, sem desvio azimutal. Em posse dessas informações, ajustou-se a inclinação para 25° no programa RADIASOL e obteve-se a irradiação diária média ao longo do ano no painel fotovoltaico do sistema em questão. A Figura 20 mostra esses valores de irradiação.

Observando a Figura 19, percebe-se uma baixa produção de energia elétrica no mês de agosto de 2016 em comparação ao mesmo ano de 2017, e que não é justificada pela irradiação, Figura 20, já que a irradiação de agosto/16 é maior que agosto/17. Isto também acontece no mês julho de 2017, e poderia ser justificada por um desligamento constante da rede pública nesse mês. Em abril de 2017 a diferença de geração existe, mas é justificada pela grande diferença de irradiação no plano do painel.



Fonte: Adaptado de Tonin (2017)

### 3.3.1 Índices de Mérito Neville

As Tabelas 5 e 6 apresentam os índices de mérito do Neville, produtividade (*yield*), fator de capacidade e taxa de desempenho, respectivamente. O SFV Neville não obteve resultados de produtividade para os dois primeiros meses de 2016, para obter um dado anual foi realizado um cálculo de extrapolação. Ou seja, se em 10

meses obteve-se um valor de 1.036 kWh/kWp então em 12 meses obter-se-ia 1.237.

**Tabela 5 - Produtividade e Fator de Capacidade Neville**

Yield (kWh/kWp)				Fator de Capacidade (%)			
Mês	2016	2017	2018	Mês	2016	2017	2018
Jan		118,02	106,54	Jan		15,86%	14,32%
Fev		123,01	99,35	Fev		18,31%	14,78%
Mar	107,92	91,87	101,85	Mar	14,51%	12,35%	13,69%
Abr	130,32	84,00	120,57	Abr	18,10%	11,67%	16,75%
Mai	78,66	77,74		Mai	10,57%	10,45%	
Jun	90,10	88,75		Jun	12,51%	12,33%	
Jul	108,45	73,83		Jul	14,58%	9,92%	
Ago	76,03	107,48		Ago	10,22%	14,45%	
Set	123,88	132,09		Set	17,21%	18,35%	
Out	96,00	95,91		Out	12,90%	12,89%	
Nov	113,57	116,82		Nov	15,77%	16,23%	
Dez	106,15	102,55		Dez	14,27%	13,78%	
Anual	1237,3*	1212,1		Anual	14,06%	13,88%	

Fonte: Autor

\* Dados extrapolados para 12 meses.

**Tabela 6 - Taxa de Desempenho Neville (%)**

Taxa de Desempenho (%)			
Mês	2016	2017	2018
Jan		75,3%	72,4%
Fev		78,0%	71,1%
Mar	75,0%	73,6%	75,6%
Abr	83,7%	77,7%	76,0%
Mai	88,7%	82,5%	
Jun	97,8%	85,9%	
Jul	75,4%	56,8%	
Ago	60,6%	94,3%	
Set	71,4%	84,4%	
Out	74,3%	76,2%	
Nov	75,7%	72,5%	
Dez	72,9%	71,4%	
Anual	77,55%	77,38%	

Fonte: Autor

Os índices de mérito do Neville mostram um melhor desempenho em comparação ao EV, mesmo com as falhas de geração citadas anteriormente, que ficam mais evidentes na Tabela 6 nos meses de Agosto/16 e Julho/17. Isto se deve

ao fato do Neville possuir desvio azimutal igual a zero, inclinação igual a latitude, possuir um inversor sem transformador e com rendimento máximo de 98%.

### 3.4 EMPRESA DE CONTABILIDADE, RESIDENCIAL 1, RESIDENCIAL 2

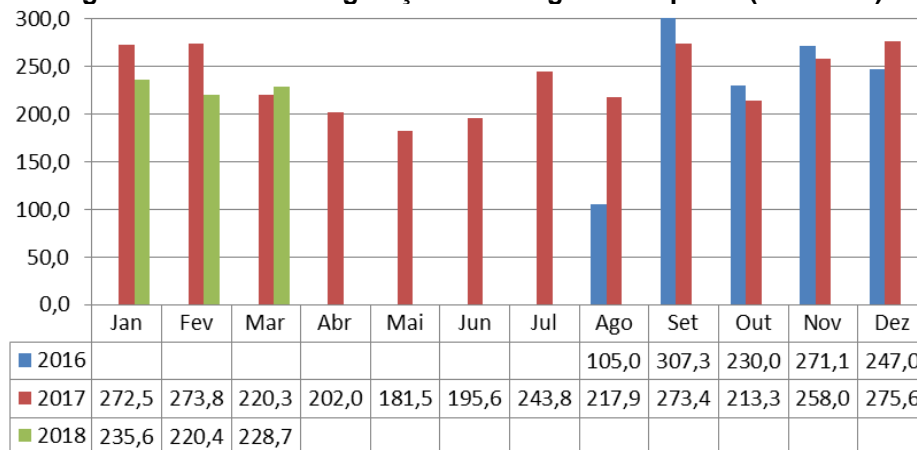
O sistema fotovoltaico da empresa de contabilidade, instalado no bairro CIC, começou a operar em agosto de 2016, Figura 21a. Seu painel ocupa uma área de 14,6 m<sup>2</sup> e possui 9 módulos de 260 W<sub>P</sub> (de tecnologia de silício policristalino, conectados em série) com uma potência instalada de 2,34 kW<sub>p</sub>, conectados à rede através de um inversor monofásico em 220 V de 3 kW (SE-TL3kA monofásico, sem transformador).

Para obter a orientação do sistema instalado utilizou-se o programa *Google Earth* para identificar o norte geográfico e o calcular um desvio de 10° oeste do painel fotovoltaico. O dado foi confirmado após uma medição com uma bússola no local. Quanto à inclinação do painel fotovoltaico, diferente dos outros casos, ele não foi instalado junto ao telhado, como pode ser visto na Figura 21b. Por comparação aos outros sistemas, estabeleceu-se uma inclinação de 20°. A Figura 22 mostra os dados de energia gerada pela Empresa, desde que esse sistema entrou em operação.

**Figura 21 - (a) Vista dos módulos da empresa (b) Vista dos módulos pela entrada da empresa.**



Fonte: (a) Solar Energy (2018) e (b) Acervo Próprio.

**Figura 22 - Valores de geração de energia da empresa (kWh/mês)**

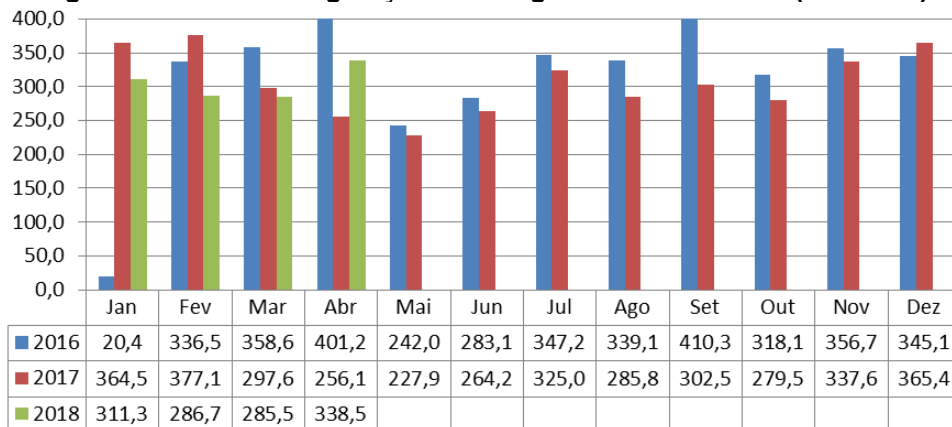
**Fonte: Autor**

O sistema residencial 1 está instalado no telhado de uma residência particular, no bairro Santo Inácio e, está em operação desde final de janeiro de 2016, Figura 23. O sistema de potência instalada de 3 kWp é composto por 10 módulos de silício policristalino, modelo ELCO A300-P, que estão instalados sobre o telhado da residência, com orientação de 2º leste e inclinação de 22º. Por sua vez, esse sistema emprega um inversor modelo SE-TL3kA monofásico, sem transformador. E os dados de geração de energia são apresentados na Figura 24.

**Figura 23 - Vista dos módulos fotovoltaicos no residencial 1**

**Fonte: TONIN, 2017.**



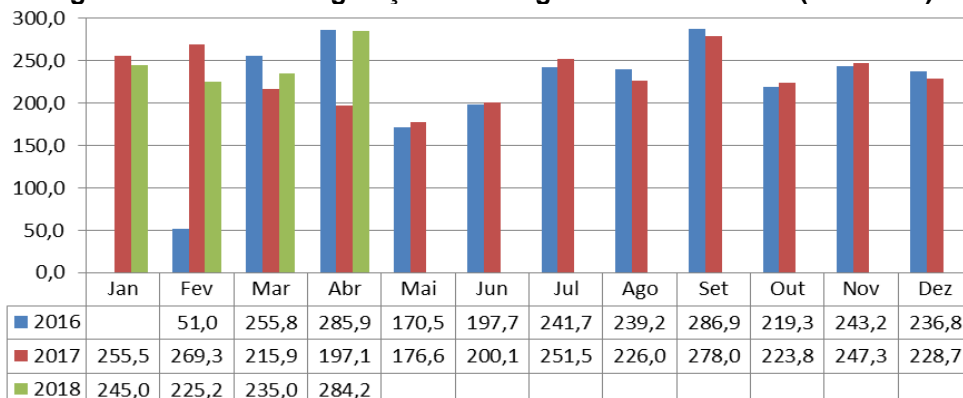
**Figura 24 - Valores de geração de energia do Residencial 1 (kWh/mês)**

Fonte: Adaptado de Tonin (2017)

O sistema residencial 2 está instalado no telhado de uma residência particular, no bairro Bigorriho e, está em operação desde final de março de 2016, Figura 25. O sistema de potência instalada de 2,4 kWp é composto por 10 módulos de silício policristalino, que estão instalados sobre o telhado da residência ocupando uma área de 16,3 m<sup>2</sup>, com desvio de 15° oeste em relação ao norte e inclinação de 20°. Esse sistema emprega um inversor modelo SE-TL3kA monofásico, sem transformador.

**Figura 25 - Vista dos módulos fotovoltaicos no residencial 2**

Fonte: Solar Energy (2018)

**Figura 26 - Valores de geração de energia do Residencial 2 (kWh/mês)**

Fonte: Autor.

### 3.4.1 Comparativo Índices Empresa, Residência 1 e 2

As Tabelas 7, 8, 9 e 10 apresentam os dados de irradiação no plano inclinado de cada sistema e os índices de mérito, produtividade (*yield*), fator de capacidade e taxa de desempenho, respectivamente.

**Tabela 7 - Irradiação diária média no plano inclinado da empresa, Residencial 1 e 2 em kWh/m<sup>2</sup>.dia**

Irradiação diária média no plano inclinado (kWh/m <sup>2</sup> .dia)									
Mês	2016			2017			2018		
	Empresa	Res 1	Res 2	Empresa	Res 1	Res 2	Empresa	Res 1	Res 2
Jan	5,33	5,30	5,33	5,13	5,11	5,13	4,81	4,79	4,81
Fev	4,62	4,61	4,62	5,70	5,68	5,70	5,03	5,01	5,03
Mar	4,55	4,55	4,55	4,04	4,04	4,04	4,35	4,35	4,35
Abr	5,12	5,16	5,10	3,59	3,60	3,58	5,19	5,24	5,18
Mai	2,83	2,85	2,83	3,01	3,03	3,00			
Jun	2,93	2,96	2,92	3,38	3,42	3,37			
Jul	3,83	4,06	3,82	4,10	4,27	4,08			
Ago	3,90	3,93	3,90	3,65	3,67	3,64			
Set	5,40	5,43	5,39	5,20	5,22	5,19			
Out	4,20	4,19	4,19	4,08	4,08	4,08			
Nov	5,05	5,03	5,05	5,46	5,43	5,46			
Dez	4,76	4,74	4,77	4,70	4,68	4,70			
Anual	<b>4,38</b>	<b>4,40</b>	<b>4,37</b>	<b>4,33</b>	<b>4,35</b>	<b>4,33</b>			

Fonte: Autor

A irradiação diária média incidente no plano dos painéis convergem para o mesmo valor na média anual, com vantagem para o Residencial 1 que fora instalado em melhores condições (22° de inclinação e 2° leste). Outro fato comprovado é que os sistemas com menor inclinação (Empresa e Residencial 2, 20° de inclinação) têm maior irradiação incidente nos meses de Outubro a Março, já que a menor inclinação favorece a geração no Verão, mas essa vantagem não compensa no valor anual, como pode ser visto na Tabela 7.

**Tabela 8 - Produtividade Empresa, Residencial 1 e 2 (kWh/kWp)**

Mês	Yield (kWh/kWp)								
	2016			2017			2018		
	Empresa	Res 1	Res 2	Empresa	Res 1	Res 2	Empresa	Res 1	Res 2
Jan				116,5	121,5	106,5	100,7	129,7	102,1
Fev		112,2		117,0	125,7	112,2	94,2	119,5	93,8
Mar		119,5	106,6	94,1	99,2	90,0	97,7	119,0	97,9
Abr		133,7	119,1	86,3	85,4	82,1	112,0	141,0	118,4
Mai		80,7	71,0	77,6	76,0	73,6			
Jun		94,4	82,4	83,6	88,1	83,4			
Jul		115,7	100,7	104,2	108,3	104,8			
Ago		113,0	99,7	93,1	95,3	94,2			
Set	131,3	136,8	119,5	116,8	100,8	115,8			
Out	98,3	106,0	91,4	91,2	93,2	93,3			
Nov	115,9	118,9	101,3	110,3	112,5	103,0			
Dez	105,6	115,0	98,7	117,8	121,8	95,3			
Anual		1359,2*	1188,5*	1208,4	1227,7	1154,1			

Fonte: Autor

\* Dados extrapolados para 12 meses.

O SFV Residencial 1 e 2 não obtiveram resultados de produtividade para os primeiros meses de 2016, para obter um dado anual foi realizado um cálculo de extrapolação, com o intuito de estimar o valor médio anual da produtividade do sistema em questão. Ou seja, se em 11 meses do residencial 1 obteve-se um valor de 1.246 kWh/kWp então em 12 meses obter-se-ia 1.359,2 kWh/kWp.

Nas Tabelas 8 e 9, constata-se que o residencial 1 tem a melhor produtividade e FC em comparação aos outros dois sistemas. Mas também nota-se que o Residencial 1 teve a maior queda de produção entre os anos de 2016 e 2017. Apesar da pouca diferença de irradiação entre os anos, o *yield* caiu 130 kWh/kWp e o FC caiu 1,5%.

**Tabela 9 - Fator de Capacidade Empresa, Residencial 1 e 2 (%)**

<b>Fator de Capacidade (%)</b>									
<b>Mês</b>	<b>2016</b>			<b>2017</b>			<b>2018</b>		
	<b>Empresa</b>	<b>Res 1</b>	<b>Res 2</b>	<b>Empresa</b>	<b>Res 1</b>	<b>Res 2</b>	<b>Empresa</b>	<b>Res 1</b>	<b>Res 2</b>
<b>Jan</b>				15,7%	16,3%	14,3%	13,5%	17,4%	13,7%
<b>Fev</b>		16,1%		17,4%	18,7%	16,7%	14,0%	17,8%	14,0%
<b>Mar</b>		16,1%	14,3%	12,7%	13,3%	12,1%	13,1%	16,0%	13,2%
<b>Abr</b>		18,6%	16,5%	12,0%	11,9%	11,4%	15,6%	19,6%	16,4%
<b>Mai</b>		10,8%	9,5%	10,4%	10,2%	9,9%			
<b>Jun</b>		13,1%	11,4%	11,6%	12,2%	11,6%			
<b>Jul</b>		15,6%	13,5%	14,0%	14,6%	14,1%			
<b>Ago</b>		15,2%	13,4%	12,5%	12,8%	12,7%			
<b>Set</b>	18,2%	19,0%	16,6%	16,2%	14,0%	16,1%			
<b>Out</b>	13,2%	14,3%	12,3%	12,3%	12,5%	12,5%			
<b>Nov</b>	16,1%	16,5%	14,1%	15,3%	15,6%	14,3%			
<b>Dez</b>	14,2%	15,5%	13,3%	15,8%	16,4%	12,8%			
<b>Anual</b>		<b>15,52%</b>	<b>13,50%</b>	<b>13,82%</b>	<b>14,05%</b>	<b>13,20%</b>			

Fonte: Autor

**Tabela 10 - Taxa de Desempenho Empresa, Residencial 1 e 2 (%)**

<b>Performance Ratio (%)</b>									
<b>Mês</b>	<b>2016</b>			<b>2017</b>			<b>2018</b>		
	<b>Empresa</b>	<b>Res 1</b>	<b>Res 2</b>	<b>Empresa</b>	<b>Res 1</b>	<b>Res 2</b>	<b>Empresa</b>	<b>Res 1</b>	<b>Res 2</b>
<b>Jan</b>				73,2%	76,8%	66,9%	67,6%	70,0%	68,5%
<b>Fev</b>		83,9%		73,3%	79,0%	70,4%	66,9%	68,1%	66,7%
<b>Mar</b>		84,7%	75,6%	75,2%	79,2%	71,9%	72,5%	70,6%	72,7%
<b>Abr</b>		86,4%	77,8%	80,2%	79,0%	76,4%	71,9%	71,8%	76,2%
<b>Mai</b>		91,4%	81,1%	83,2%	80,9%	79,1%			
<b>Jun</b>		106,4%	94,0%	82,5%	85,8%	82,5%			
<b>Jul</b>		92,0%	85,0%	82,0%	81,9%	82,9%			
<b>Ago</b>		92,8%	82,5%	82,4%	83,8%	83,5%			
<b>Set</b>	81,0%	84,0%	73,9%	74,9%	64,4%	74,4%			
<b>Out</b>	75,5%	81,7%	70,3%	72,1%	73,7%	73,7%			
<b>Nov</b>	76,5%	78,9%	66,9%	67,4%	69,1%	63,0%			
<b>Dez</b>	71,5%	78,3%	66,8%	80,9%	84,0%	65,4%			
<b>Anual</b>	<b>76,14%</b>	<b>87,30%</b>	<b>77,40%</b>	<b>77,27%</b>	<b>78,15%</b>	<b>74,17%</b>			

Fonte: Autor

Na Tabela 10, o valor de PR do mês de Junho de 2016 ultrapassa os 100%, possivelmente, havia nuvens próximas à região onde está a estação do INMET em Curitiba, reduzindo assim, a irradiância medida. Ao passo, que tais nuvens não estavam interferindo o SFV Residencial 1, e dessa forma, o cálculo da taxa de desempenho superou o valor de 100%. Este erro que aconteceu em 2016, não aconteceu em 2017 nas mesmas proporções, assim os valores de desempenho dos sistemas no ultimo ano estão mais precisos.

A taxa de desempenho, ou PR, dos sistemas em 2017 ficaram bem próximas, entre 78% e 74%. O SFV residencial 1 além de ser o sistema com melhor produção de energia, também se mostra como o melhor em limitar as perdas do sistema, inclusive se comparado ao EV ( $PR_{\text{anual}} = 76,70$ ) e Neville ( $PR_{\text{anual}} = 77,25$ ).

Os próximos sistemas não irão contemplar a análise do índice de Taxa de Desempenho, pela dificuldade de conseguir a localização dos sistemas, bem como a inclinação do painel fotovoltaico. Portanto, os índices vistos nas próximas seções são o Fator de Capacidade e a Produtividade. Além disso, os sistemas com mais características similares entre si foram agrupados para efeito de comparação. Todos os dados dos sistemas apresentados nas próximas seções foram coletados dos sites da ANEEL e da empresa Solar Energy, abertos para consulta pública.

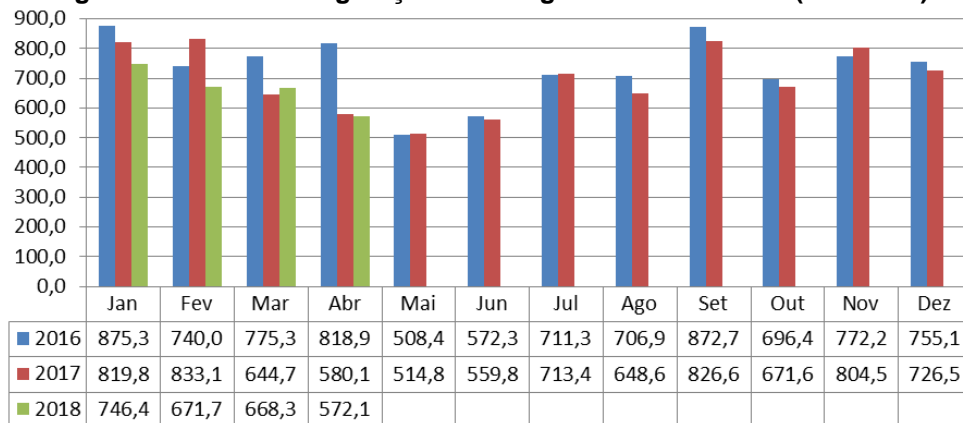
### 3.5 SISTEMAS RESIDENCIAIS 3 e 4

O sistema residencial 3 está instalado no telhado de uma residência particular em Santo Felicidade e em operação desde 2015, Figura 27. O sistema de potência instalada de 6,86 kWp é composto por 28 módulos de silício policristalino. Esse sistema emprega dois inversores de 3 kW cada modelo SE-TL3k monofásico, sem transformador. A Figura 28 mostra os dados de energia gerada pelo sistema. A geração de energia elétrica total do ano de 2016 foi de 8,8 MWh e em 2017 8,3 MWh.

**Figura 27 - Vista dos módulos no residencial 3**



Fonte: Solar Energy (2018)

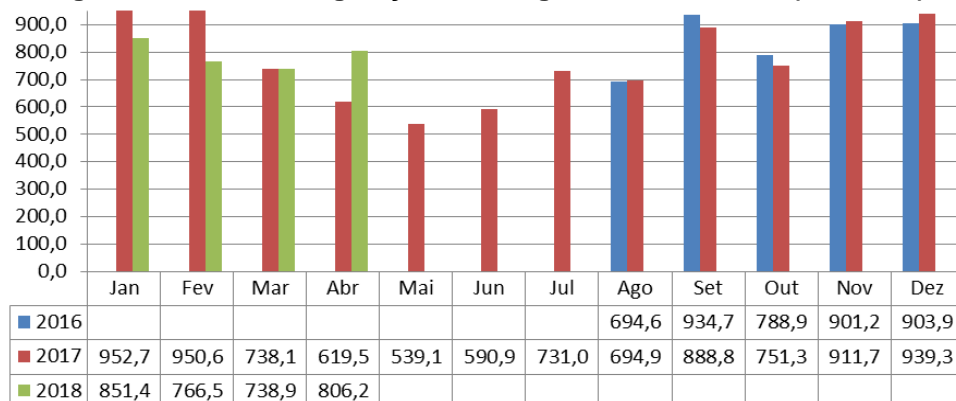
**Figura 28 - Valores de geração de energia do residencial 3 (kWh/mês)**

Fonte: Autor.

O sistema residencial 4 está instalado no telhado de uma residência particular em Santa Felicidade e em operação desde agosto de 2016, Figura 29. O sistema de potência instalada de 7,5 kWp é composto por 30 módulos de silício policristalino, ocupando uma área de 45,4 m<sup>2</sup>. Esse sistema emprega três inversores de 3 kW, modelo SE-TL3k monofásico, sem transformador. A Figura 30 mostra os dados de energia gerada pelo sistema, a geração total no ano 2017 de 9,3 MWh.

**Figura 29 - Vista dos módulos no residencial 4**

Fonte: Solar Energy (2018)

**Figura 30 - Valores de geração de energia do residencial 4 (kWh/mês)**

Fonte: Autor.

### 3.5.1 Comparação Índices Residências 3 e 4

As Tabelas 11 e 12 apresentam os índices de mérito, produtividade (*yield*) e fator de capacidade, respectivamente, das residências 3 e 4.

**Tabela 11 - Produtividade Residencial 3 e Residencial 4 (kWh/kWp)**

Mês	Yield (kWh/kWp)					
	2016		2017		2018	
	Res 3	Res 4	Res 3	Res 4	Res 3	Res 4
Jan	127,6		119,5	127,0	108,8	113,5
Fev	107,9		121,4	126,7	97,9	102,2
Mar	113,0		94,0	98,4	97,4	98,5
Abr	119,4		84,6	82,6	83,4	107,5
Mai	74,1		75,0	71,9		
Jun	83,4		81,6	78,8		
Jul	103,7		104,0	97,5		
Ago	103,0	92,6	94,5	92,7		
Set	127,2	124,6	120,5	118,5		
Out	101,5	105,2	97,9	100,2		
Nov	112,6	120,2	117,3	121,6		
Dez	110,1	120,5	105,9	125,2		
<b>Anual</b>	<b>1283,5</b>		<b>1216,3</b>	<b>1241,1</b>		

Fonte: Autor.

**Tabela 12 - Fator de Capacidade Residencial 3 e Residencial 4 (%)**

Mês	Fator de Capacidade (%)					
	2016		2017		2018	
	Res 3	Res 4	Res 3	Res 4	Res 3	Res 4
Jan	17,1%		16,1%	17,1%	14,6%	15,3%
Fev	15,5%		18,1%	18,9%	14,6%	15,2%
Mar	15,2%		12,6%	13,2%	13,1%	13,2%
Abr	16,6%		11,7%	11,5%	11,6%	14,9%
Mai	10,0%		10,1%	9,7%		
Jun	11,6%		11,3%	10,9%		
Jul	13,9%		14,0%	13,1%		
Ago	13,9%	12,4%	12,7%	12,5%		
Set	17,7%	17,3%	16,7%	16,5%		
Out	13,6%	14,1%	13,2%	13,5%		
Nov	15,6%	16,7%	16,3%	16,9%		
Dez	14,8%	16,2%	14,2%	16,8%		
<b>Anual</b>	<b>14,62%</b>		<b>13,92%</b>	<b>14,20%</b>		

Fonte: Autor.

As tabelas trazem um comparativo entre os valores de produtividade anual de cada um dos sistemas, nos anos de 2016 e 2017, percebe-se que o valor da

produtividade, que é resultado da relação da energia gerada dividido pela potência fotovoltaica instalada, foi muito próximo, com diferença de aproximadamente 2% no total do ano de 2017. Outro fato é que entre os meses de outubro a março, ou, aproximadamente, entre as estações de primavera e verão, o SFV Residencial 4 tem valores de produtividade superiores ao SFV Residencial 3 e, a situação é inversa nos meses de abril a setembro. O fator de capacidade dos sistemas em 2017 também é muito próximo, diferem 0,3% entre si.

### 3.6 SISTEMA RESIDENCIAL 5 e 6

Esse grupo se caracteriza pela utilização de um inversor monofásico de 4 kW de potência, modelo SE-TL4kA ou B, sem transformador, empregando um painel com módulos conectados em série.

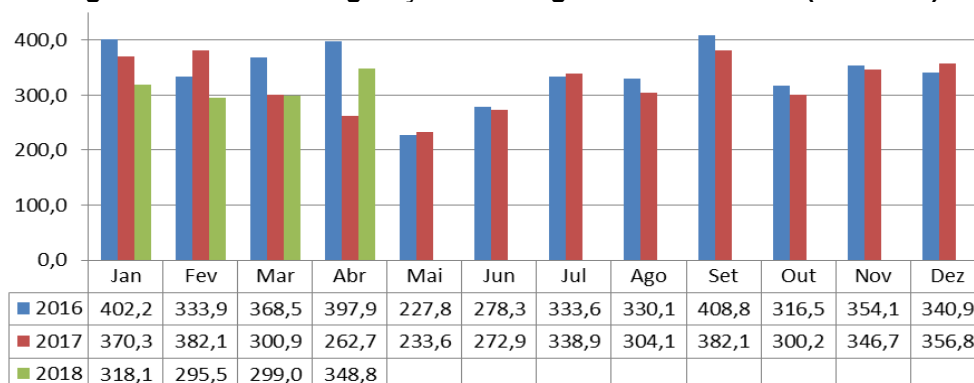
O sistema residencial 5 está instalado no telhado de uma residência particular no Mossunguê e em operação desde o final de 2015, Figura 31. O sistema de potência instalada de 3,25 kWp é composto por 13 módulos de silício policristalino, ocupando uma área de 21,6 m<sup>2</sup>. A Figura 32 mostra os dados de energia gerada pelo sistema.

**Figura 31 - Vista dos módulos no residencial 5**



Fonte: Solar Energy (2018)

**Figura 32 - Valores de geração de energia do residencial 5 (kWh/mês)**



Fonte: Autor.



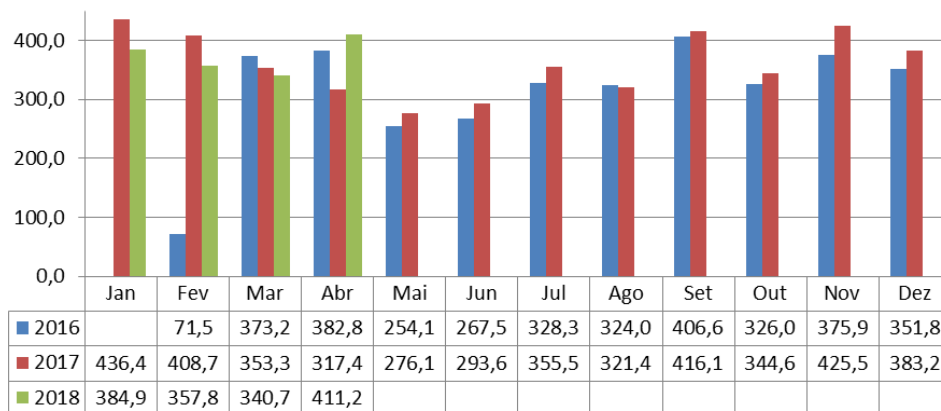
O sistema residencial 6 está instalado no telhado de uma residência particular e em operação desde setembro de 2014, mas contém dados registrados apenas a partir de fevereiro de 2016, Figura 33. O sistema de potência instalada de 3,36 kWp é composto por 14 módulos de silício policristalino, ocupando uma área de 16,3 m<sup>2</sup>. A Figura 34 mostra os dados de energia gerada desde o início de operação do sistema.

**Figura 33 - Vista dos módulos no residencial 6**



Fonte: Solar Energy (2018)

**Figura 34 - Valores de geração de energia do residencial 6 (kWh/mês)**



Fonte: Autor.

### 3.6.1 Comparação Índices Residências 5 e 6

As Tabelas 13 e 14 apresentam e comparam os índices de mérito dos dois sistemas residenciais, nos anos de 2016 e 2017.

**Tabela 13 - Produtividade Residencial 5 e Residencial 6 (kWh/kWp)**

Mês	Yield (kWh/kWp)					
	2016		2017		2018	
	Res 5	Res 6	Res 5	Res 6	Res 5	Res 6
Jan	123,8		113,9	129,9	97,9	114,6
Fev	102,7		117,6	121,6	90,9	106,5
Mar	113,4	111,1	92,6	105,1	92,0	101,4
Abr	122,4	113,9	80,8	94,5	107,3	122,4
Mai	70,1	75,6	71,9	82,2		
Jun	85,6	79,6	84,0	87,4		
Jul	102,6	97,7	104,3	105,8		
Ago	101,6	96,4	93,6	95,7		
Set	125,8	121,0	117,6	123,8		
Out	97,4	97,0	92,4	102,6		
Nov	109,0	111,9	106,7	126,6		
Dez	104,9	104,7	109,8	114,0		
<b>Anual</b>	<b>1259,3</b>	<b>1210,7*</b>	<b>1185,0</b>	<b>1289,2</b>		

Fonte: Autor.

\* Dados extrapolados para 12 meses.

O SFV Residencial 6 não obteve resultados de produtividade para os meses de janeiro e fevereiro de 2016, a medição iniciou-se em março, foi realizado um cálculo de extrapolação para estimar o valor anual da produtividade do sistema. Ou seja, em 10 meses obteve-se 1.030,27 kWh/kWp então em 12 meses obter-se-ia 1.210,7 kWh/kWp.

**Tabela 14 - Fator de Capacidade Residencial 5 e Residencial 6 (%)**

Mês	Fator de Capacidade (%)					
	2016		2017		2018	
	Res 5	Res 6	Res 5	Res 6	Res 5	Res 6
Jan	16,6%		15,3%	17,5%	13,2%	15,4%
Fev	14,8%		17,5%	18,1%	13,5%	15,8%
Mar	15,2%	14,9%	12,4%	14,1%	12,4%	13,6%
Abr	17,0%	15,8%	11,2%	13,1%	14,9%	17,0%
Mai	9,4%	10,2%	9,7%	11,0%		
Jun	11,9%	11,1%	11,7%	12,1%		
Jul	13,8%	13,1%	14,0%	14,2%		
Ago	13,7%	13,0%	12,6%	12,9%		
Set	17,5%	16,8%	16,3%	17,2%		
Out	13,1%	13,0%	12,4%	13,8%		
Nov	15,1%	15,5%	14,8%	17,6%		
Dez	14,1%	14,1%	14,8%	15,3%		
<b>Anual</b>	<b>14,35%</b>	<b>13,75%</b>	<b>13,56%</b>	<b>14,75%</b>		

Fonte: Autor.

Ao contrario do ano de 2016 onde os dados dos dois sistemas se aproximaram entre si, no ano de 2017 os dados divergiram entre si, o sistema 5 teve uma redução de quase 100 kWh/kWp e 0,8% de fator de capacidade, enquanto que o sistema 6 teve um aumento nesses índices. Nessas circunstâncias, em todos os meses de 2017, o sistema 6 teve uma produtividade em média 8% maior em relação ao sistema 5. Considerando que a diferença de irradiação entre os sistemas no ano de 2017 não tenha sido um fator decisivo, já que ambos estão situados na mesma região, essa situação de diminuição de produtividade constante durante todo ano pode ser fator também do acúmulo de sujeira nos módulos do Residencial 5.

### 3.7 SISTEMA RESIDENCIAL 7, 8 e 9

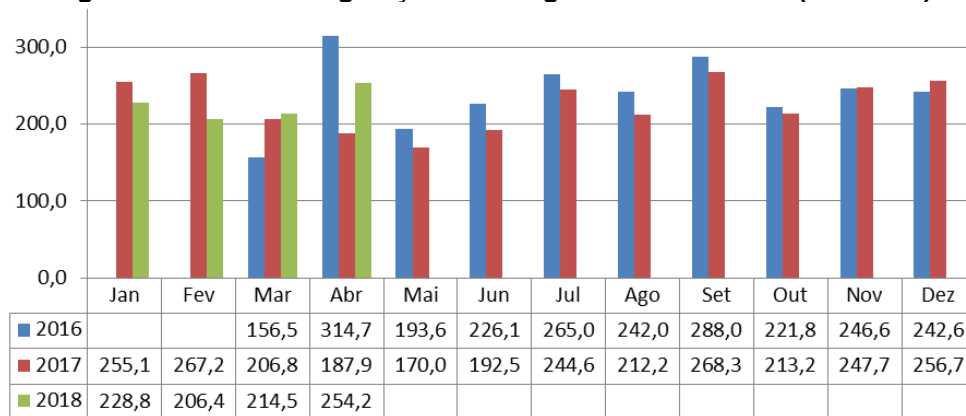
Esse grupo se caracteriza pela utilização de um inversor monofásico de 3 kW de potência, modelo SE-TL3kA, sem transformador, empregando painéis com potências entre 2,25 a 2,4 kW com 9 ou 10 módulos conectados em série.

O sistema residencial 7 está instalado no telhado de uma residência particular em Santa Felicidade e em operação desde março de 2016, Figura 35. O sistema de potência instalada de 2,25 kWp é composto por 9 módulos de silício policristalino, ocupando uma área de 14,58 m<sup>2</sup>. A Figura 36 mostra os dados de energia gerada desde o início de operação do sistema.

**Figura 35 - Vista dos módulos no residencial 7**



**Fonte: Solar Energy (2018)**

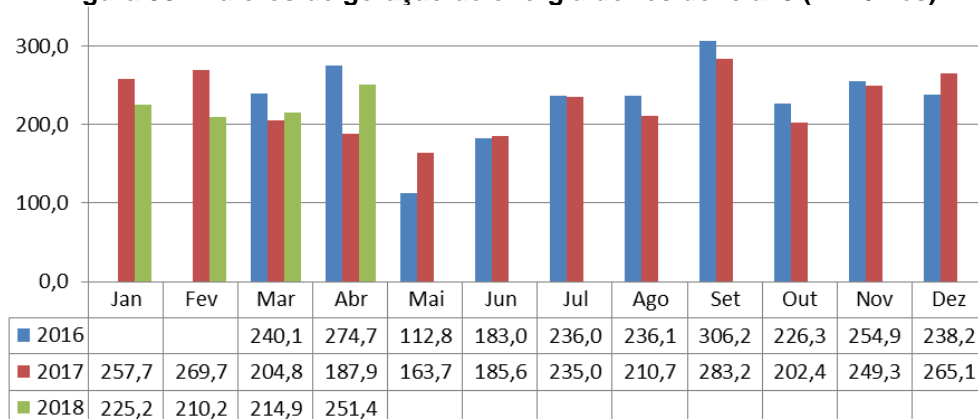
**Figura 36 - Valores de geração de energia do residencial 7 (kWh/mês)**

**Fonte: Autor**

O sistema residencial 8 está instalado no telhado de uma residência particular em Lamenha Pequena e em operação desde março de 2016, Figura 37. O sistema de potência instalada de 2,34 kWp é composto por 9 módulos de silício policristalino, ocupando uma área de 14,58 m<sup>2</sup>. A Figura 38 mostra os dados de energia gerada desde o início de operação do sistema.

**Figura 37 - Vista dos módulos no residencial 8**

**Fonte: Solar Energy (2018)**

**Figura 38 - Valores de geração de energia do residencial 8 (kWh/mês)**

**Fonte: Autor**

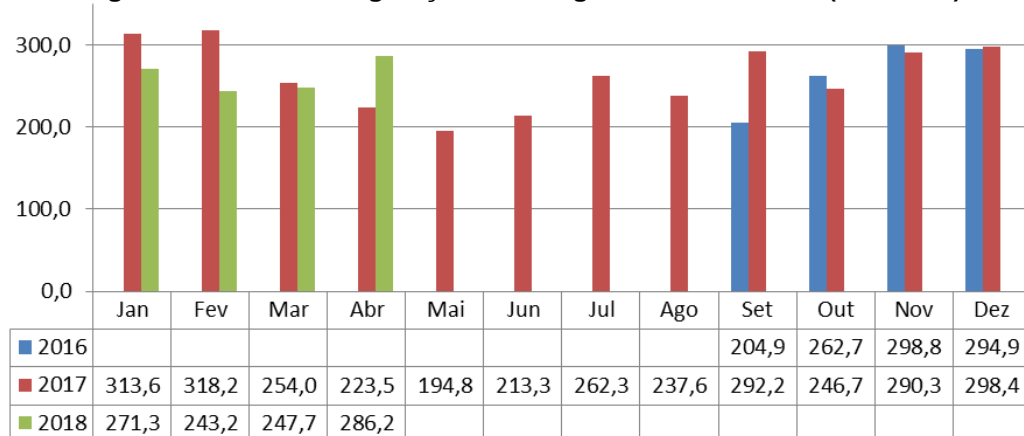
O sistema residencial 9 está instalado no telhado de uma residência particular no bairro Fanny e em operação desde setembro de 2016, Figura 39. O sistema de potência instalada de 2,4 kWp é composto por 10 módulos de silício policristalino, ocupando uma área de 16,2 m<sup>2</sup>. A Figura 40 mostra os dados de energia gerada desde o início de operação do sistema.

**Figura 39 - Vista dos módulos no residencial 9**



Fonte: Solar Energy (2018)

**Figura 40 - Valores de geração de energia do residencial 9 (kWh/mês)**



Fonte: Autor

### 3.7.1 Comparação Índices Residências 7, 8 e 9

Nas Tabelas 15 e 16 comparam-se os índices de mérito dos dois sistemas residenciais, nos anos de 2016, 2017 e 2018.

Tabela 15 - Produtividade Residencial 7, 8 e 9 (kWh/kWp)

Mês	Yield (kWh/kWp)								
	2016			2017			2018		
	Res 7	Res 8	Res 9	Res 7	Res 8	Res 9	Res 7	Res 8	Res 9
Jan				113,4	110,1	130,7	101,7	96,2	113,0
Fev				118,8	115,3	132,6	91,7	89,8	101,3
Mar	69,6	102,6		91,9	87,5	105,8	95,3	91,8	103,2
Abr	139,9	117,4		83,5	80,3	93,1	113,0	107,4	119,3
Mai	86,0	48,2		75,6	70,0	81,2			
Jun	100,5	78,2		85,6	79,3	88,9			
Jul	117,8	100,9		108,7	100,4	109,3			
Ago	107,6	100,9		94,3	90,0	99,0			
Set	128,0	130,9	85,4	119,2	121,0	121,8			
Out	98,6	96,7	109,5	94,8	86,5	102,8			
Nov	109,6	108,9	124,5	110,1	106,5	121,0			
Dez	107,8	101,8	122,9	114,1	113,3	124,4			
Anual	1278,3*	1183,7*		1209,9	1160,3	1310,4			

Fonte: Autor

\* Dados extrapolados para 12 meses.

Assim como o SFV Residencial 6, os sistemas 7 e 8 não obtiveram resultados de produtividade para os meses de janeiro e fevereiro de 2016, para isso foi estimado o valor médio anual da produtividade do sistema em questão.

Tabela 16 - Fator de Capacidade Residencial 7, 8 e 9 (%)

Mês	Fator de Capacidade (%)								
	2016			2017			2018		
	Res 7	Res 8	Res 9	Res 7	Res 8	Res 9	Res 7	Res 8	Res 9
Jan				15,2%	14,8%	17,6%	13,7%	12,9%	15,2%
Fev				17,7%	17,2%	19,7%	13,7%	13,4%	15,1%
Mar	9,3%	13,8%		12,4%	11,8%	14,2%	12,8%	12,3%	13,9%
Abr	19,4%	16,3%		11,6%	11,2%	12,9%	15,7%	14,9%	16,6%
Mai	11,6%	6,5%		10,2%	9,4%	10,9%			
Jun	14,0%	10,9%		11,9%	11,0%	12,3%			
Jul	15,8%	13,6%		14,6%	13,5%	14,7%			
Ago	14,5%	13,6%		12,7%	12,1%	13,3%			
Set	17,8%	18,2%	11,9%	16,6%	16,8%	16,9%			
Out	13,2%	13,0%	14,7%	12,7%	11,6%	13,8%			
Nov	15,2%	15,1%	17,3%	15,3%	14,8%	16,8%			
Dez	14,5%	13,7%	16,5%	15,3%	15,2%	16,7%			
Anual	14,53%	13,45%		13,84%	13,28%	15,00%			

Fonte: Autor

Nas Tabelas 15 e 16, os dados dos sistemas mantêm um padrão e se assemelham entre si, mas o Residencial 9, em todos os meses de 2017, apresenta

mais produtividade, cerca de 8,3% maior que o Residencial 7 e 13% maior que o Residencial 8.

### 3.8 SISTEMA RESIDENCIAL 10, 11, 12 e 13

Esse grupo se caracteriza pela utilização de um inversor monofásico de 2 kW de potência, modelo SE-TL2k sem transformador, empregando painéis com potências entre 1,56 a 2 kW com 6,7 ou 8 módulos conectados em série e com início de operação entre dezembro de 2015 a agosto de 2016.

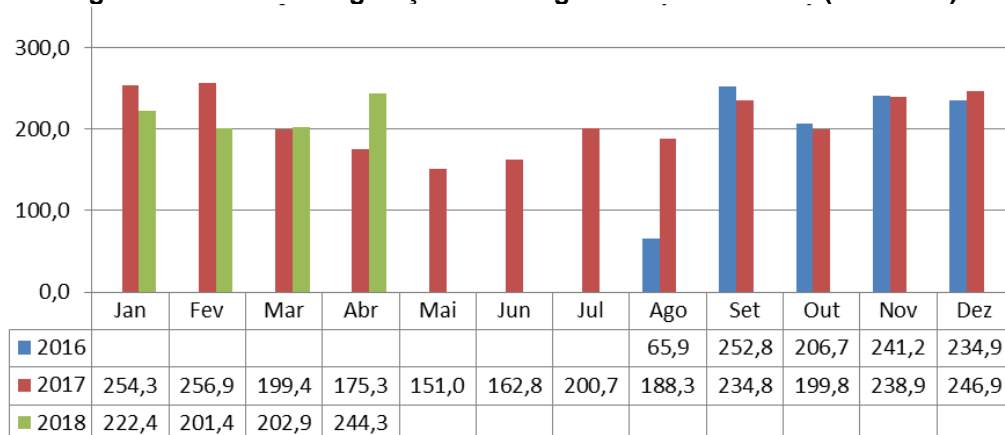
O sistema residencial 10 está instalado no telhado de uma residência particular no bairro CIC e em operação desde agosto de 2016, Figura 41. O sistema de potência instalada de 2 kWp é composto por 8 módulos de silício policristalino, ocupando uma área de 12,98 m<sup>2</sup>. A Figura 42 mostra os dados de energia gerada desde o início de operação do sistema.

**Figura 41 - Vista dos módulos no residencial 10**



Fonte: Solar Energy (2018)

**Figura 42 - Valores de geração de energia do residencial 10 (kWh/mês)**



Fonte: Autor

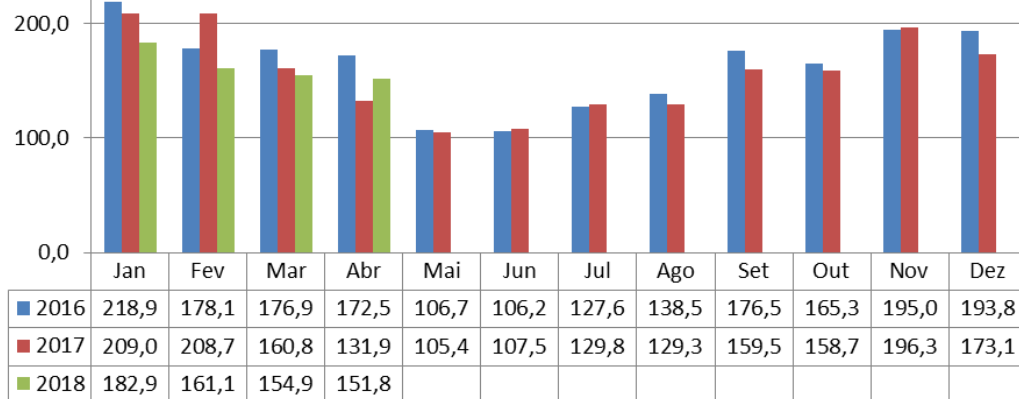
O sistema residencial 11 está instalado no telhado de uma residência particular no Hauer e em operação desde o final de 2015, Figura 43. O sistema de potência instalada de 1,75 kWp é composto por 7 módulos de silício policristalino, ocupando uma área de 11,36 m<sup>2</sup>. A Figura 44 mostra os dados de energia gerada desde o início de operação do sistema.

**Figura 43 - Vista dos módulos no residencial 11**



Fonte: Solar Energy (2018)

**Figura 44 - Valores de geração de energia do residencial 11 (kWh/mês)**



Fonte: Autor

O sistema residencial 12 está instalado no telhado de uma residência particular no bairro Tingui e em operação desde abril de 2016, Figura 45. O sistema de potência instalada de 1,56 kWp é composto por 6 módulos de silício policristalino, ocupando uma área de 9,7 m<sup>2</sup>. A Figura 46 mostra os dados de energia gerada do sistema.

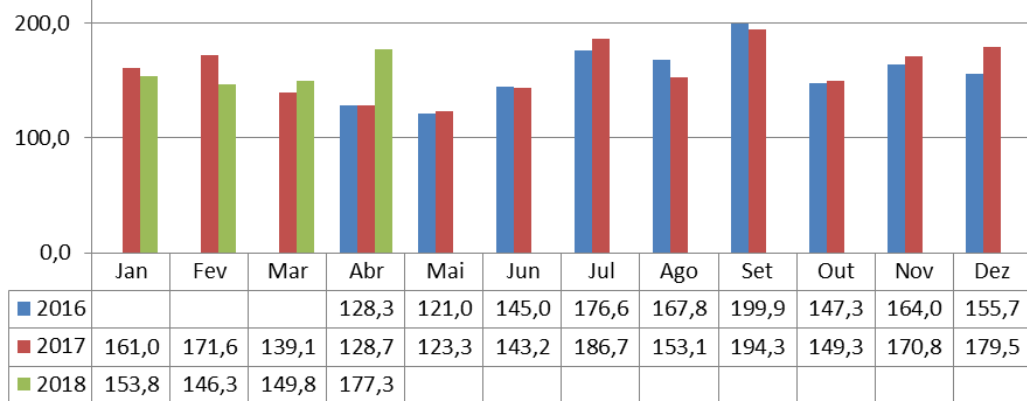


**Figura 45 - Vista dos módulos no residencial 12**



Fonte: Solar Energy (2018)

**Figura 46 - Valores de geração de energia do residencial 12 (kWh/mês)**



Fonte: Autor

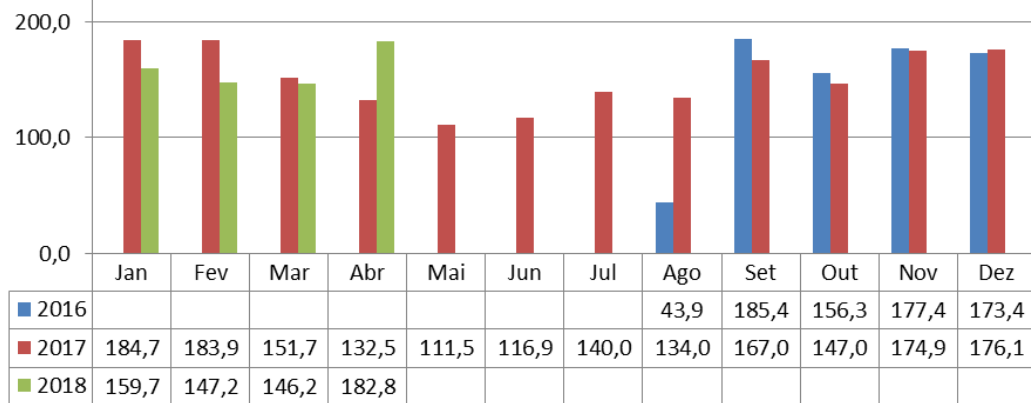
O sistema residencial 13 está instalado no telhado de uma residência na Grande Curitiba, próxima do bairro Uberaba e em operação desde julho de 2016, Figura 47. O sistema de potência instalada de 1,56 kWp é composto por 6 módulos de silício policristalino, ocupando uma área de 13 m<sup>2</sup>. A Figura 48 mostra os dados de energia gerada pelo sistema.

**Figura 47 - Vista dos módulos no residencial 13**



Fonte: Solar Energy (2018)

**Figura 48 - Valores de geração de energia do residencial 13 (kWh/mês)**



Fonte: Autor

### 3.8.1 Comparação Índices Residências 10, 11, 12 e 13

As Tabelas 17 e 18 apresentam e comparam os índices de mérito dos quatro sistemas residenciais, nos anos de 2016, 2017 e 2018.

**Tabela 17 - Produtividade Residencial 10, 11, 12 e 13 (%)**

Mês	Yield (kWh/kWp)											
	2016				2017				2018			
	Res 10	Res 11	Res 12	Res 13	Res 10	Res 11	Res 12	Res 13	Res 10	Res 11	Res 12	Res 13
Jan		125,1			127,2	119,4	103,2	118,4	111,2	104,5	98,6	102,4
Fev		101,8			128,5	119,3	110,0	117,9	100,7	92,1	93,8	94,4
Mar		101,1			99,7	91,9	89,2	97,2	101,5	88,5	96,0	93,7
Abr		98,6	82,2		87,7	75,4	82,5	84,9	122,2	86,7	113,7	117,2
Mai		61,0	77,6		75,5	60,2	79,0	71,5				
Jun		60,7	92,9		81,4	61,4	91,8	74,9				
Jul		72,9	113,2		100,4	74,2	119,7	89,7				
Ago		79,1	107,6		94,2	73,9	98,1	85,9				
Set	126,4	100,9	128,1	118,8	117,4	91,1	124,6	107,1				
Out	103,4	94,5	94,4	100,2	99,9	90,7	95,7	94,2				
Nov	120,6	111,4	105,1	113,7	119,5	112,2	109,5	112,1				
Dez	117,5	110,7	99,8	111,2	123,4	98,9	115,1	112,9				
Anual		1117,7	1201,4*		1254,5	1068,6	1218,3	1166,8				

Fonte: Autor

Análogo ao que foi feito com outros sistemas, o sistema 12 não obteve as medições do primeiro trimestre de 2016, para obter um dado anual, estimou-se uma produtividade anual com base na média dos outros 9 meses. A Tabela 17 mostra que o Residencial 11 tem a pior produtividade entre os quatro sistemas, cerca de 9,2% (98 kWh/kWp) menos produtividade do que o Residencial 13 e 17% (186 kWh/kWp) do que o Residencial 10.

**Tabela 18 - Fator de Capacidade Residencial 10, 11, 12 e 13 (%)**

Mês	Fator de Capacidade (%)											
	2016				2017				2018			
	Res 10	Res 11	Res 12	Res 13	Res 10	Res 11	Res 12	Res 13	Res 10	Res 11	Res 12	Res 13
Jan		16,8%			17,1%	16,1%	13,9%	15,9%	14,9%	14,0%	13,3%	13,8%
Fev		14,6%			19,1%	17,7%	16,4%	17,5%	15,0%	13,7%	14,0%	14,0%
Mar		13,6%			13,4%	12,4%	12,0%	13,1%	13,6%	11,9%	12,9%	12,6%
Abr		13,7%	11,4%		12,2%	10,5%	11,5%	11,8%	17,0%	12,0%	15,8%	16,3%
Mai		8,2%	10,4%		10,1%	8,1%	10,6%	9,6%				
Jun		8,4%	12,9%		11,3%	8,5%	12,7%	10,4%				
Jul		9,8%	15,2%		13,5%	10,0%	16,1%	12,1%				
Ago		10,6%	14,5%		12,7%	9,9%	13,2%	11,5%				
Set	17,6%	14,0%	17,8%	16,5%	16,3%	12,7%	17,3%	14,9%				
Out	13,9%	12,7%	12,7%	13,5%	13,4%	12,2%	12,9%	12,7%				
Nov	16,8%	15,5%	14,6%	15,8%	16,6%	15,6%	15,2%	15,6%				
Dez	15,8%	14,9%	13,4%	14,9%	16,6%	13,3%	15,5%	15,2%				
Anual		12,74%	13,66%		14,36%	12,24%	13,93%	13,35%				

Fonte: Autor

O baixo índice de *Yield* e FC da Residência 11, quando comparados a sistemas similares, levanta a dúvida das causas deste problema, podendo ser a inclinação e orientação ruim do sistema, já que ele fora instalado junto ao telhado impossibilitando a situação ideal, essa hipótese poderia ser averiguada pelo índice de *performance ratio*. Outras hipóteses para a baixa produtividade são sombreamentos parcial durante o dia, grande acúmulo de sujeira ou até mesmo pela alta temperatura no painel, impossibilitando os módulos converter com maior eficiência a irradiação solar em corrente elétrica.

### 3.9 RESUMO DOS SISTEMAS

Dispondo-se do fato de todos os sistemas estudados apresentaram dados completos para o ano de 2017, foi realizado uma listagem dos índices de mérito de cada sistema para efeitos de comparação.

A Tabela 19 revela os índices de produtividade, fator de capacidade e *performance ratio*, do ano de 2017, dos 16 sistemas estudados.

Tabela 19 - Resumo dos índices de mérito de 2017 dos SFVCR estudados

SFVCR	Yield (kWh/kWp)	FC (%)	PR (%)	Potência (kWp)	Inclinação Painel FV	Desvio Azimutal
EV	1197,1	13,70	76,70	2,1	15°	22° O
Neoville	1212,1	13,88	77,25	10,2	25°	0°
Empresa	1208,4	13,82	77,27	2,34	20°	10° O
Residencial 1	1227,7	14,04	78,15	3	22°	2° L
Residencial 2	1154,1	13,20	74,17	2,4	20°	15° L
Residencial 3	1216,3	13,92		6,86		
Residencial 4	1241,1	14,20		7,5		
Residencial 5	1185,0	13,56		3,35		
Residencial 6	1289,2	14,75		3,36		
Residencial 7	1209,9	13,84		2,25		
Residencial 8	1160,3	13,28		2,34		
Residencial 9	1310,4	15,00		2,4		
Residencial 10	1254,5	14,36		2		
Residencial 11	1068,6	12,24		1,75		
Residencial 12	1218,3	13,93		1,56		
Residencial 13	1166,8	13,35		1,56		
<b>Média 2017</b>	<b>1207,49</b>	<b>13,82</b>	<b>76,71</b>			

Fonte: Autoria própria

Como revela a Tabela 19, a produtividade média no ano de 2017 foi de 1207,5 kWh/kWp, o fator de capacidade de 13,8% e a taxa de desempenho dos cinco sistemas que foram incluídos nesse índice foi de 76,7%.

O Residencial 9 foi o que apresentou o maior valor de produtividade, 1.310,4 kWh/kWp e FC de 15%, sendo seguido pelo Residencial 6 com 1.289,2 kWh/kWp e 14,75%. O sistema que obteve a menor produtividade foi o Residencial 11 com 1.068,6 e FC de 12,24%, ou seja, uma produtividade de aproximadamente 22% inferior ao Residencial 9. A taxa de desempenho média dos SFV foi de 76,7%, sendo o Residencial 1 a maior taxa de desempenho, 78,15%, e o Residencial 2 com a menor taxa, 74,17%.

Analisando os sistemas que se têm dados de inclinação e desvio azimutal, poderia se esperar dados melhores do Neoville em comparação aos demais, pelo fato deste sistema encontrar-se inclinado a 25° e orientado para o norte geográfico. Em contrapartida o EV teve, em 2017, o melhor desempenho nos três índices analisados desde o início de sua operação. Em 2017, os dados do EV e da Empresa se

aproximaram dos dados do Neville, apesar do pior posicionamento dos painéis FV destes dois sistemas.

Os outros sistemas, em que os dados de posicionamento do painel FV não foram coletados, foram separados em grupos de acordo com o modelo de inversor utilizado. Tendo uma similaridade elétrica dentro dos grupos de sistemas, pode-se dizer que o posicionamento do painel FV é um fator determinante na comparação de sistemas, principalmente em longo prazo, já que em curto espaço de tempo, outros fatores como sujidade, desligamentos temporários e temperatura podem ser mais decisivos nos índices de mérito.

Outro fato é que todos os sistemas usam módulos com tecnologia de silício policristalino, porque apesar da eficiência do painel ser ligeiramente menor que a monocristalino, o custo de sua fabricação é inferior, trazendo rentabilidade na relação custo-benefício. E apenas o EV possui inversor com transformador, os inversores mais modernos já não utilizam transformadores, pois dessa forma as perdas no processo de conversão são menores, além de esses equipamentos serem mais compactos e possuírem tecnologia mais avançada do que os inversores com transformador. Em sistemas aterrados, onde é necessário um isolamento galvânico entre o lado CC do sistema e o lado CA, utilizam-se inversores com um transformador interno que exercem tal função.

#### 4. COMPARATIVO DE BASES DE DADOS INMET E ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR

Neste capítulo, foi realizada uma breve comparação da base de dados de irradiação do ATLAS publicado em 2006, da 2ª edição do ATLAS publicado em 2017 e da base de dados do INMET para a cidade de Curitiba. Para isso, foram coletados os dados do INMET da estação A-807 e dos ATLAS publicados de forma gratuita via internet nos *links* mencionados na seção 2.5 deste trabalho.

Com o objetivo de verificar a possível diferença entre os valores de irradiação colhidos pelo piranômetro da estação A807 do INMET e os valores disponibilizados pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006 e 2017), foram selecionadas as coordenadas dos pontos de referência de cada Atlas que mais se aproximam da localização do INMET, como mostra a Figura 49.

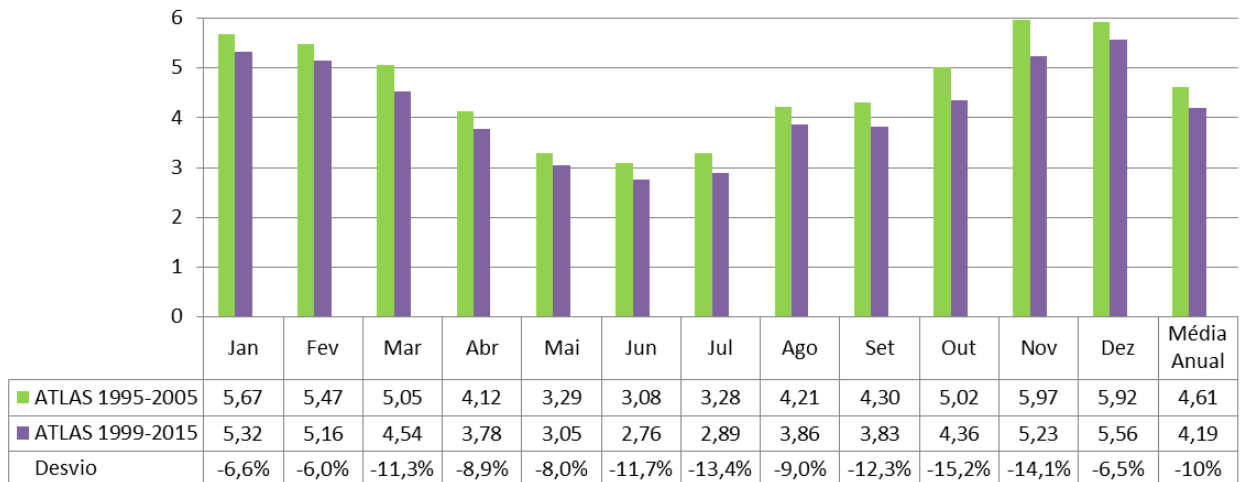
**Figura 49 - Vista das coordenadas INMET e Atlas**



Fonte: Adaptado de Google Earth (2018)

As coordenadas geográficas dos pontos mais próximos à estação INMET são: para o Atlas 2006: (-25,43°; -49,27°) e para o Atlas 2017: (-25,4005°; -49,249°). Assim, com a posse dos pontos de referência definidos, foi possível obter os valores de irradiação no plano horizontal, Figura 50.

**Figura 50 - Irradiação fornecida pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar 1ª e 2ª edição  
IRRADIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA NO PLANO HORIZONTAL (kWh/m<sup>2</sup>.dia)**

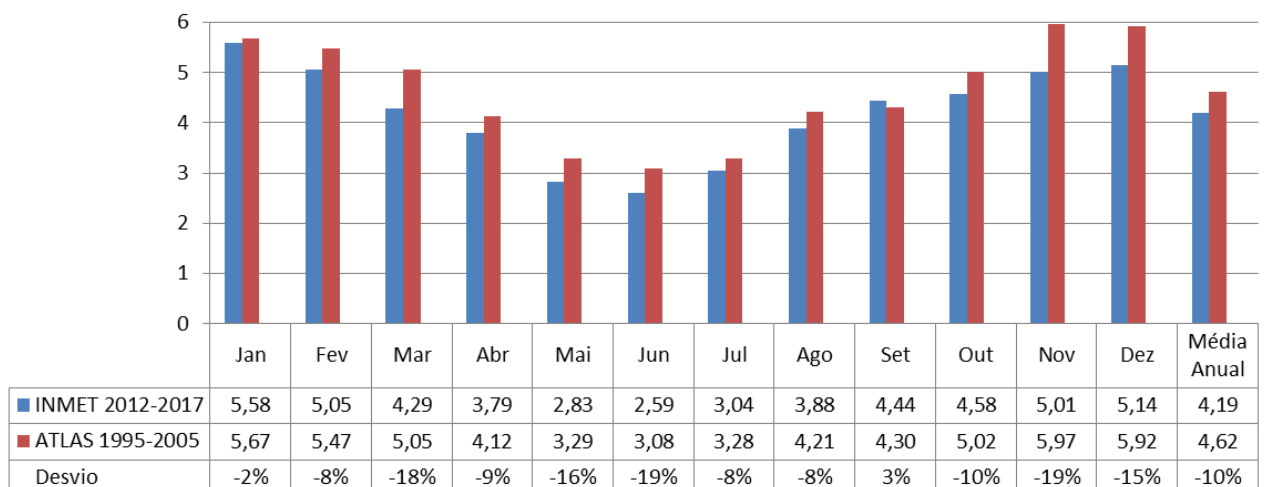


Fonte: Adaptado Atlas 2006 e Atlas 2017.

Na comparação entre a 1ª e a 2ª edição do atlas, apresentada na Figura 53, constata-se que os valores de irradiação do Atlas (2017) são menores em todos os meses do ano e cerca de 10% menor na média anual. Isso se deve ao fato do Atlas de 2ª edição apresentar uma base maior de dados (17 anos), o que aumenta a confiabilidade da base. Esta afirmação se confirma na Figura 52, onde a média de 17 anos do Atlas (2017) converge com a média do INMET (2012-2017).

Na Figura 51, tem-se a comparação dos dados coletados no INMET (2012-2017) com os dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006).

**Figura 51 - Comparativo de dados de irradiação INMET e Atlas Brasileiro 2006  
IRRADIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA NO PLANO HORIZONTAL (kWh/m<sup>2</sup>.dia)**

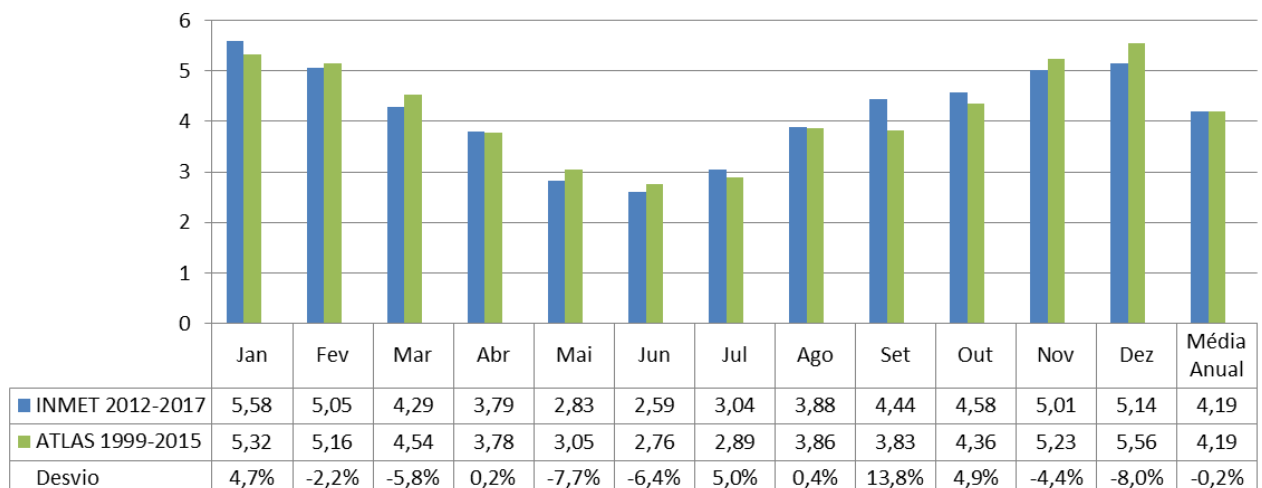


Fonte: Autoria própria

Nota-se que os valores do Atlas sempre foram superiores aos valores disponibilizados pelo INMET, na média 10% superior, esses valores elevados implicam que os anos que contemplam os dados do ATLAS, foram anos de irradiação solar elevada. A principal justificativa para tal situação é o fato do ATLAS realizar uma média histórica de dados colhidos ao longo de dez anos, ao passo que o INMET mostra os valores reais de irradiância colhidos a cada hora. Outro fator que contribui para essa discrepância é a distância entre as coordenadas geográficas do INMET e do Atlas, visto que ambos se encontram a 4,5 km e então, a irradiância nesses lugares evidentemente é diferente, visto que sobre um dos locais podem ter tido mais nuvens do que no outro, por exemplo. (TONIN, 2017).

Na Figura 52, tem-se a comparação dos dados coletados no INMET (2012-2017) com os dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

**Figura 52 - Comparativo de dados de irradiação INMET e Atlas Brasileiro 2017  
IRRADIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA NO PLANO HORIZONTAL (kWh/m<sup>2</sup>.dia)**



**Fonte: Autoria própria.**

Nesta comparação, obteve-se uma convergência muito maior entre as bases de dados, confirmando a expectativa de que o Atlas Brasileiro de 2017 melhoraria a confiabilidade dos dados. Os meses com mais e menos irradiação correspondem ao mês de Janeiro e Junho, respectivamente. O mês de maior discrepância foi em Setembro com um erro de 14%.

Outro dado importante é a irradiação média anual do Atlas de 2017, esse é o dado utilizado para as estimativas de geração de energia e para o cálculo da potência



fotovoltaica necessária dos painéis solares, ele apresenta um desvio de apenas 0,2% da média do INMET, mostrando-se confiável para essa aplicação.

A significativa melhora da convergência de médias anuais entre Atlas e INMET (de 10% de desvio para 0,2%) mostra que os fatores que causavam este desvio elevado foram minimizados e a tecnologia de captação de dados aperfeiçoada. Além de tornar mais determinante o fator da diferença, inevitável, de irradiação entre dois pontos diferentes.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, foram abordados alguns dos conhecimentos existentes sobre energia solar, como, por exemplo, os conceitos de radiação, irradiância e irradiação solar. Também foram apresentados as configurações de dois tipos de sistemas fotovoltaicos, o sistema isolado e o conectado a rede. Destes sistemas, os componentes detalhados foram a célula fotovoltaica, o módulo fotovoltaico e os inversores. Conjuntamente, foi exposto um quadro que delinea como está a atual visão do mercado da energia solar fotovoltaico no Brasil de acordo com algumas variáveis discriminantes: o tamanho da instalação fotovoltaica, as partes interessadas, objetivos e a normativa aplicável.

Para embasar o estudo de caso do trabalho também foram discutidas as bases de dados de irradiação disponíveis, INMET e Atlas Brasileiro de Energia Solar, e que são utilizadas para cálculos de dimensionamento, expectativas de geração e principalmente avaliação de desempenho por meio dos índices de mérito.

Os métodos para a realização deste estudo foram iniciados a partir do levantamento de dados das características elétricas e de geração de energia de cada SFVCR, da coleta de dados de radiação solar no plano horizontal a partir do banco de dados do INMET, da adaptação dos valores de radiação no RADIASOL e dos cálculos dos índices de mérito para cada sistema.

Com a posse destes dados, foi possível calcular os índices de mérito - Fator de Capacidade e Produtividade - para os 16 SFVCR estudados, e a Taxa de Desempenho para 5 SFVCR estudados em que foi possível coletar informações de orientação e inclinação dos painéis fotovoltaicos. Assim, foram apresentados dados comparativos de 16 sistemas instalados na região de Curitiba, os quais estão operando de modo ininterrupto. Segundo dados da ANEEL, Curitiba tem registrado 252 SFVCR, portanto os sistemas abordados representam uma amostra de 6,4% do total de sistemas.

Como os índices de Produtividade e Fator de Capacidade são melhores aplicados quando os SFV em análise apresentam características técnicas e elétricas similares, dividiram-se os 13 SFV residenciais, mais o da Empresa, em grupos de acordo com a potência do inversor. Assim, os grupos dividiram-se em os que utilizam inversores de 2kW, 3kW e 4kW, tornando o fator de posicionamento do painel mais determinante na análise de Produtividade. Algumas características dos 16 SFV

analisados revelaram que todos os sistemas, com exceção do EV que fora instalado em 2012, utilizam inversores sem transformador, pois dessa forma as perdas no processo de conversão são menores; todos os sistemas utilizam tecnologia policristalino.

Quanto aos índices, o estudo revelou que o *Yield* médio em 2017 dos 16 sistemas foi de 1207,5 kWp/kWh, o fator de capacidade médio de 13,8% e a taxa de desempenho médio de cinco sistemas avaliados foi de 76,7%. Dentre eles, o Residencial 9 foi o que apresentou o maior valor de produtividade, 1.310,4 kWh/kWp e FC de 15%. O sistema que obteve a menor produtividade foi o Residencial 11 com 1.068,6 e FC de 12,24%, ou seja, uma produtividade de aproximadamente 22% inferior ao Residencial 9. A taxa de desempenho média dos SFV foi de 76,7%, sendo o Residencial 1 a maior taxa de desempenho, 78,15%, e o Residencial 2 com a menor taxa, 74,17%. De modo geral, os índices individuais de cada sistema variaram pouco entre si e apenas os dois sistemas citados que destoaram da média.

Analisando os SFV com dados de inclinação e orientação, notou-se que os maiores índices de Produtividade e Fator de Capacidade foram dos sistemas melhores posicionados (NEOVILLE e Residencial 1), enquanto que os piores orientados (EV e Residencial 2) obtiveram os piores resultados. Apesar da análise neste estudo apenas considerar o fator de posicionamento, fica evidente que outros fatores afetam o sistema em curto prazo, por exemplo, o sistema da Empresa, que apesar do posicionamento pior que o do NEOVILLE, seus índices ficaram muito próximos, acusando algum fator de perda na planta do NEOVILLE.

O último estudo do trabalho foi a comparação realizada entre as bases de dados históricos disponíveis, INMET (2012-2017), Atlas de 2006 (1995-2005) e o Atlas de 2017 (1999-2015), com o objetivo de apontar as diferenças entre eles. Através da comparação mês a mês, foi possível analisar as médias mensais do INMET com os dados do Atlas de 2006, e encontrou-se uma variação considerável chegando a 19% de diferença nos meses de Junho e Novembro. A diferença das médias anuais chegou a 10%. Enquanto que, a comparação entre INMET e Atlas de 2017, a maior diferença de irradiação foi na ordem de 8% no mês de Dezembro e a diferença de irradiação média anual foi praticamente de 0%. Isso comprova a convergência entre os dados do INMET com os dados do Atlas de 2017, mostrando que o novo Atlas melhorou a confiabilidade dos dados de irradiação em Curitiba. Ao analisar a média diária anual das duas bases, nota-se que quanto maior for à amostragem de dados do INMET,

existe uma tendência de se aproximar percentualmente com os dados do ATLAS 2017.

Neste trabalho, conclui-se que o EV, após mais de 6 anos de operação, continua a operar de forma adequada, inclusive com índices de desempenho melhores que nos primeiros anos. Enquanto que, para os outros sistemas, valores mais precisos serão obtidos para um período de análise maior, de vários anos, onde variações sazonais serão diluídas pelo maior volume de dados de observação. Os índices de mérito terão maior consistência e relevância à medida que mais estudos de desempenho forem sendo gerados ao longo dos anos. Verificou-se também que os SFCR integrados à construção são uma ótima opção para produzir eletricidade nos próprios locais onde ela se faz necessária, sem a necessidade de grandes plantas geradoras, que demandam grandes investimentos, áreas de ocupação e tempo de construção.

## 6. REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 10899 - Energia Solar Fotovoltaica - Terminologia**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira, 2006.

ABNT. **NBR 11704 - Sistemas Fotovoltaicos - Classificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira, 2008.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Energia Solar**. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia\\_Solar%283%29.pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar%283%29.pdf)>. Acesso em 20 de novembro de 2017.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Unidades Consumidoras com Geração Distribuída - PR**. Disponível em: [http://www.2.aneel.gov.br/scg/gd/gd\\_estadu\\_dual\\_detalhe.asp?uf=PR](http://www.2.aneel.gov.br/scg/gd/gd_estadu_dual_detalhe.asp?uf=PR)> Acesso em 02 de março de 2018.

BENEDITO, R. S. **Caracterização da Geração Distribuída de Eletricidade por Meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, no Brasil, sob os Aspectos Técnico, Econômico e Regulatório**. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, 2009.

CENTER FOR SUSTAINABLE SYSTEMS. University of Michigan. **Photovoltaic Energy Factsheet**, Agosto 2017. Disponível em: <http://css.umich.edu/factsheets/photovoltaic-energy-factsheet>. Acesso em 01 de março de 2018.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Energia Solar Princípios e Aplicações**. 2006. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial\\_solar\\_2006.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf)>.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia - PDE. **Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2017-2026)**. Rio de Janeiro, 2017.

Estações Automáticas A-807. **INMET**. Disponível em: [www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas).

FUSANO, Renato Hideo. **Análise dos índices de mérito do sistema fotovoltaico conectado à rede do escritório verde da UTFPR**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.  
GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

HINRICHS, R. A. **Energia e Meio Ambiente**. 3. ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. INPE, 2006.

PEREIRA E. B.; MARTINS F. R.; GONÇALVES A. R.; COSTA R. S.; LIMA F. J. L.; RÜTHER R.; ABREU S. L.; TIEPOLO G. M.; PEREIRA S. V.; SOUZA J. G.. **Atlas brasileiro de energia solar - 2ª edição**. INPE, 2017. Disponível em: [http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas\\_Brasileiro\\_Energia\\_Solar\\_2a\\_Edicao.pdf](http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf)

PINHO, João T.; GALDINO, Marco A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. CRESESB. 2014.

REAL SOLAR. **Energia Solar**. Disponível em: <http://www.real-solar.com/como-funciona>

NASCIMENTO, Rodrigo Limp. **Energia Solar No Brasil: Situação E Perspectivas**. Estudo Técnico. Consultoria Legislativa. Câmara dos Deputados. Março/2014.

SHAYANI, R. A. **Medição do rendimento global de um sistema fotovoltaico isolado utilizando módulos de 32 células**. Tese de Mestrado. Universidade de Brasília. 2006.

TIEPOLO, Gerson Máximo. **Estudo do potencial de geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no estado do Paraná**. 2015. 230p. Tese Doutorado – Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

TONIN, Fabianna Stumpf. **Caracterização de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, na cidade de Curitiba**. 2017. 131 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

UFRGS, “Programa RADIASOL”, Laboratório de Energia Solar, 2012.

URBANETZ JUNIOR, Jair. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade**. 2010. 189 p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – UFSC, Florianópolis – SC, 2010.

URBANETZ JUNIOR, Jair. **Energia Fotovoltaica – Módulo introdução**. 2014.

URBANETZ JUNIOR, Jair; CASAGRANDE JUNIOR, Eloy; TIEPOLO, Gerson M. **Acompanhamento do desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica do escritório verde da UTFPR**. IX Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. 2014a.

URBANETZ JUNIOR, Jair; CHINVELSKI, Tiago; SIMÃO, Carla A. F.; MAKISHI, Lilian M. M. **Primeiro sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica homologado pela Copel**. V Congresso Brasileiro de Energia Solar. 2014b.

URBANETZ JUNIOR, Jair. **Energia Solar Fotovoltaica e o Desempenho do SFVCR do Escritório Verde da UTFPR**. Palestra IEP. Curitiba, PR. 2015.

VIANA, Trajano de Souza. **Potencial de Geração de Energia Elétrica com Sistemas Fotovoltaicos com Concentrador no Brasil**. 2010. 127p. Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

VILLALVA, M.; GRADELLA, M.; GAZOLI, J.; **Energia Solar Fotovoltaica Conceitos e Aplicações**. São Paulo: Érica, 2012. Disponível em: [http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2012/11/Ed81\\_fasc\\_energias\\_renovaveis\\_cap9.pdf](http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2012/11/Ed81_fasc_energias_renovaveis_cap9.pdf)> Acesso em 06 jan. 2018.