

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANA CAROLINE RIBAS  
FERNANDA HAHN DE CASTRO

**CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO AO DELT  
E ANÁLISE DA EFICÁCIA DA LIMPEZA DOS MÓDULOS**

CURITIBA

2018

ANA CAROLINE RIBAS  
FERNANDA HAHN DE CASTRO

**CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO AO DELT  
E ANÁLISE DA EFICÁCIA DA LIMPEZA DOS MÓDULOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Rogers Demonti

CURITIBA  
2018

## TERMO DE APROVAÇÃO

ANA CAROLINE RIBAS  
FERNANDA HAHN DE CASTRO

### CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO AO DELT E ANÁLISE DA EFICÁCIA DA LIMPEZA DOS MÓDULOS

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

---

Prof. Dr. Rogers Demonti (Orientador)  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

---

Prof. Dr. João da Silva Dias  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

---

Prof. Dra. Juliana Luísa Müller lamamura  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Curitiba, 20 de junho de 2018.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente a Deus, por nos proporcionar todas as oportunidades para chegar até aqui, por ter nos capacitado e dado força, fé e sabedoria para vencermos os obstáculos e alcançarmos nossos objetivos.

Aos nossos pais e irmãos, por toda a dedicação, incentivo, força, apoio e amor incondicional depositados em nós durante toda essa caminhada.

Aos nossos amigos, que ao longo dos anos em que frequentamos a universidade, nos deram todo o apoio necessário para que essa etapa fosse mais leve e alegre, sempre nos motivando nos momentos de dificuldade.

“Sonhos determinam o que você quer. Ação determina o que você conquista.”

(Aldo Novak)

## RESUMO

O aumento da demanda de energia elétrica e a busca por fontes que causem um menor impacto no meio ambiente, resulta na necessidade da busca por fontes alternativas de energia. A energia solar está se mostrando bastante promissora e vem se difundindo no mundo todo, além disso, esta tecnologia vem apresentando um aperfeiçoamento constante e rápido, tornando cada vez mais favorável à sua utilização. Afim de estudar e obter a eficiência do sistema fotovoltaico conectado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, no seguinte trabalho foram realizados os cálculos de índices de mérito (produtividade, taxa de desempenho e fator de capacidade). Foram utilizados para os cálculos, de dados de irradiância disponibilizados pelo Sistema Meteorológico do Paraná (Simepar) e dados de geração de energia fornecidas pelo próprio inversor de frequência da usina instalada. Na sequência foi realizada a comparação dos dados calculados com os índices de mérito de dois outros sistemas que tiveram esse mesmo estudo em outras literaturas. Os resultados se mostraram satisfatórios e na sua maioria superiores aos outros sistemas. Foi também realizada uma limpeza da superfície das placas, com o objetivo de analisar a eficácia desta. Com a comparação dados de anos anteriores, constatou-se que houve um aumento significativo na geração de energia elétrica.

Palavras-chave: Sistemas fotovoltaicos; Índices de mérito; Limpeza de módulos fotovoltaicos;

## **ABSTRACT**

The electricity demand increase and the search for sources that cause less environment impacts, leads to the need to look for alternative energy sources. Solar energy is proving to be very promising and it is being spread all over the world. In addition, this technology presents constant and prompt improvement, making its use more feasible. In order to study and to obtain the efficiency of the photovoltaic system connected to the Department of Electrical Engineering of Universidade Federal do Paraná, in this study were calculated the merit indicators (yield, performance ratio and capacity factor). In order to get the results, irradiance data provided by the Paraná Meteorological System (Simepar) and data from energy generation, provided by the frequency inverter of the installed plant were used. In the sequence, the calculated data were compared with the merit indicator of two other systems that had this same study in other literatures. The results were satisfactory and mostly superior in comparison to others systems. A cleansing of the modules surface was also done in order to analyze its efficiency. Comparing provided data from previous years, it was verified that there was a significant increase in electric energy generation.

Keywords: Photovoltaic systems; Merit indicators; Photovoltaic modules cleansing.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Distribuição por fontes da matriz energética do Brasil em 2016 ....	19
Figura 2 - Potencial de geração solar fotovoltaica no Brasil.....	22
Figura 3 - Componentes de um sistema fotovoltaico .....	24
Figura 4 - Célula fotovoltaica.....	25
Figura 5 - Processo de fabricação da célula de silício monocristalino .....	26
Figura 6 - Célula fotovoltaica de silício monocristalino.....	27
Figura 7 - Célula fotovoltaica de silício policristalino .....	27
Figura 8 - Componentes de um módulo fotovoltaico de silício cristalino .....	29
Figura 9 - Componentes de uma célula de filme fino .....	29
Figura 10 - Associação de células (módulos) em série .....	30
Figura 11 - Associação de células (módulos) em paralelo .....	30
Figura 12 - Inversor de frequência do sistema estudado .....	31
Figura 13 - Demonstração da influência do posicionamento da usina fotovoltaica localizada no hemisfério sul .....	32
Figura 14 - Radiação incidente sobre a superfície terrestre.....	33
Figura 15 - Influência da irradiância na variação de corrente com temperatura da célula de 25°C.....	34
Figura 16 - Gráfico corrente x tensão para diferentes temperaturas.....	35
Figura 17 - Gráfico de tensão x corrente de um conjunto de 4 módulos na qual a célula de um módulo foi sombreada.....	36
Figura 18 - Imagem de satélite do Centro Politécnico.....	40
Figura 19 - Módulos fotovoltaicos do sistema instalado .....	41
Figura 20 - Inclinação real dos módulos.....	42
Figura 21 - Orientação azimutal dos módulos fotovoltaicos .....	42

Figura 22 - Inversor de frequência e comunicador do sistema fotovoltaico conectado ao DELT.....	43
Figura 23 - Interface da plataforma <i>Sunnyportal</i> .....	44
Figura 24 - Gráfico de geração de energia elétrica mensal (kWh).....	45
Figura 25 - Irradiação média diária mensal no plano horizontal fornecida pelo Simepar (kWh/m <sup>2</sup> .dia) .....	47
Figura 26 – Sensor de irradiância e temperatura instalado junto ao sistema. .	47
Figura 27 - Interface inicial do programa Radiasol.....	48
Figura 28 - Interface do programa Radiasol para inserção de informações... .	49
Figura 29 - Dados de irradiação ajustados para o plano inclinado (kWh/m <sup>2</sup> .dia) . .....	50
Figura 30 - Sistema fotovoltaico instalado na Copel .....	53
Figura 31 - Sistema fotovoltaico instalado na ELCO .....	53
Figura 32 - Comparação dos dados de irradiação no plano inclinado do SIMEPAR com a do sensor instalado .....	59
Figura 33 - Sujeira depositada nos módulos antes da limpeza .....	60
Figura 34 - Momento da limpeza dos módulos.....	61
Figura 35 - Gráfico com curvas da irradiância do dia 22 e 24 de janeiro de 2018 sobrepostas.....	62
Figura 36 - Gráfico da geração e irradiação total dos dias 22 e 24 de janeiro de 2018 .....	63
Figura 37- Gráfico com curvas da geração de energia do dia 22 e 24 de janeiro de 2018 sobrepostas.....	63
Figura 38 - Gráfico de comparação da geração de energia em dias com irradiação 3,20 kWh .....	64

Figura 39 - Energia gerada durante 2016 .....	65
Figura 40 - Gráfico de comparação da geração de energia em dias com irradiação 3,60 kWh .....	66
Figura 41 - Gráfico de comparação da geração de energia em dias com irradiação 2,20 kWh .....	67
Figura 42 - Gráfico de comparação da geração de energia em dias com irradiação 3,70 kWh .....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ângulos recomendados de inclinação para os módulos de acordo com a latitude.....	33
Tabela 2 - Exemplo de dados de irradiância fornecidos pelo Simepar.....	46
Tabela 3 - Produtividade ou <i>yield</i> (kWh/kWp) .....	51
Tabela 4 - Taxa de desempenho (%) .....	51
Tabela 5 - Fator de capacidade (%).....	52
Tabela 6 - Comparação entre a Produtividade do sistema conectado ao DELT e a do sistema da Copel (kWh/kWp) .....	54
Tabela 7 - Comparação da taxa de desempenho do sistema conectado ao DELT e ao da Copel (%) .....	55
Tabela 8 - Comparação da fator de capacidade do sistema conectado ao DELT e ao da Copel (%) .....	56
Tabela 9 - Comparação entre a Produtividade do sistema conectado ao DELT com o sistema da ELCO (kWh/kWp).....	57
Tabela 10 - Comparação entre a taxa de desempenho do sistema conectado ao DELT e a do sistema da ELCO (%).....	57
Tabela 11 - Comparação entre a fator de capacidade do sistema conectado ao DELT e a do sistema da ELCO (%).....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CA - Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

COPEL - Companhia Paranaense de Energia

CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica

DELT - Departamento de Engenharia Elétrica

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

EVA - Acetato de etil vinila

FV – Fotovoltaico

GD – Geração Distribuída

IEA - PVPS - *International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programm*

IM - Índices de Mérito

Inmetro - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

PVF - Fluoreto de polivinila

SFCR - Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Simepar - Sistema Meteorológico do Paraná

TCO - Óxido condutor transparente

UFPR - Universidade Federal do Paraná

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	16
1.2	OBJETIVOS .....	16
1.2.1	Objetivo Geral.....	16
1.2.2	Objetivos Específicos .....	16
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>19</b>
2.1	MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA .....	19
2.2	ENERGIA SOLAR.....	20
2.2.1	Radiação .....	20
2.2.2	Irradiância.....	21
2.2.3	Irradiação.....	21
2.3	POTENCIAL SOLAR BRASILEIRO .....	22
2.3.1	Potencial solar no Paraná.....	23
2.4	EFEITO FOTOVOLTAICO .....	23
2.5	COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO .....	24
2.5.1	Células fotovoltaicas.....	25
2.5.1.1	Silício monocrystalino (m-Si) .....	26
2.5.1.2	Silício policristalino .....	27
2.5.1.3	Filmes finos .....	28
2.5.2	Módulos fotovoltaicos .....	28
2.5.2.1	Associação de módulos .....	29
2.5.3	Inversor.....	31
2.6	FATORES DE INFLUÊNCIA NO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	32
2.6.1	Orientação e inclinação dos módulos fotovoltaicos .....	32
2.6.2	Influência da irradiação solar .....	33
2.6.3	Influência da temperatura .....	35
2.6.4	Sombreamento .....	35
2.6.5	Sujeira residual depositada na superfície dos módulos.....	36
2.7	INCENTIVOS À GERAÇÃO FOTOVOLTAICA.....	37

<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO AO DELT</b> .....	<b>39</b>
3.1	METODOLOGIA .....	39
3.2	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA INSTALADO .....	40
3.3	ÍNDICES DE MÉRITO .....	44
3.3.1	Produtividade ou yield .....	44
3.3.2	Taxa de desempenho ou performance ratio .....	45
3.3.2.1	Irradiação média .....	46
3.3.2.2	Irradiação no plano inclinado .....	48
3.3.3	Fator de capacidade .....	50
3.4	ANÁLISES E RESULTADOS .....	50
3.4.1	Índices de mérito .....	50
3.4.1.1	Comparação dos índices de mérito calculados com outros trabalhos .....	52
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DA EFICÁCIA DA LIMPEZA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS</b> .....	<b>60</b>
4.2	ANÁLISES E RESULTADOS .....	61
4.2.1	Análise da taxa de desempenho para avaliação da eficácia da limpeza .....	61
4.2.2	Análise comparativa entre o dia precedente e posterior à limpeza .....	62
4.2.3	Análise comparativa entre dias com irradiações médias semelhantes para análise da eficácia da limpeza .....	64
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>69</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda energética brasileira vem se mostrando crescente devido ao aumento populacional, à utilização da tecnologia cada vez mais presente no dia a dia das pessoas e também presente em todos os setores econômicos. De acordo com o estudo de previsão de carga lançado em 2018 pela ONS, essa carga tende a aumentar 20% até 2022. Além disso, a preocupação com o meio ambiente e as mudanças climáticas que estão evidentes nos dias de hoje, implica à matriz energética, a necessidade de buscar formas alternativas de geração de energia elétrica que tenham menor impacto e emissões de gases de efeito estufa. Atualmente 68,1% da matriz energética brasileira é constituída de fontes hídricas que são renováveis (EPE, 2017), porém, apresentam um grande abalo social e ambiental na região de sua construção e, portanto, acaba não sendo uma opção propícia atualmente.

Considerando esse contexto, a energia solar mostra-se uma opção bastante promissora já que utiliza uma fonte renovável que é o Sol e o processo de geração de energia é limpo, ou seja, não emite gases residuais. Devido ao aumento da utilização desses sistemas no mundo, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) criou uma regulamentação - 482/2012 - para autorizar a utilização de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica e a política de créditos de energia. Desde de então, muitos consumidores têm instalado esse tipo de gerador para diminuir a conta de energia elétrica contribuindo assim com o meio ambiente.

Há alguns anos atrás, os componentes utilizados em SFCR eram considerados de alto custo, tornando assim inviável a utilização por pequenos consumidores devido à demora do retorno do investimento inicial. Atualmente com o aumento da demanda e a redução dos custos com a produção em série desses componentes, esse investimento mostra-se mais viável e vêm transformando-se em uma alternativa para os consumidores.

Visando o desenvolvimento dessa tecnologia, foi instalado nas dependências do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, um sistema fotovoltaico conectado à rede que proporciona à comunidade acadêmica a possibilidade de realizar análises e estudos relacionados ao tema.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O sistema fotovoltaico conectado ao DELT foi instalado em agosto de 2014 e desde então sua performance nunca foi avaliada. Além disso, segundo a empresa que instalou o sistema, uma única limpeza havia sido realizada um ano após a instalação. Com isso, constatou-se a necessidade de realizar um estudo para a determinação do rendimento e eficiência do sistema, bem como uma análise relacionada à eficiência da limpeza dos módulos.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo para avaliar o desempenho do sistema fotovoltaico conectado ao DELT, com base nos índices de mérito calculados através dos dados fornecidos pelo sistema de medição do inversor e dados de irradiância fornecidos pelo Simepar. Complementarmente, foi realizada a comparação de dados de geração de energia do sistema antes e após a limpeza dos módulos, a fim de verificar se há diferenças significativas devido às impurezas presentes na superfície dos módulos fotovoltaicos.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Obter dados solarimétricos para estudo do sistema fotovoltaico conectado ao Departamento de Engenharia Elétrica localizado no centro politécnico da Universidade Federal do Paraná;
- b) A partir dos dados obtidos, calcular os índices de mérito do sistema;
- c) Comparar os índices de mérito calculados, com outros sistemas da literatura, a fim de verificar a performance do sistema;
- d) Estudar os dados de geração de energia antes e após a limpeza dos módulos, para análise da sua eficácia;
- e) Comparar os dados do sensor de irradiação instalado junto ao sistema, com os dados de irradiação fornecidos pelo Simepar.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo do presente trabalho apresenta uma introdução ao tema de estudo, uma justificativa para sua realização e a descrição dos objetivos a serem alcançados com o seu desenvolvimento.

No segundo capítulo são abordados por meio de fundamentação teórica a revisão bibliográfica sobre o tema. Foi apresentado a definição de conceitos básicos para tratar o tema de energia solar fotovoltaica, como radiação, irradiância e irradiação, um panorama da atual matriz energética brasileira e também o potencial que o Brasil tem para a geração desse tipo de energia. Ainda na revisão bibliográfica, foram apresentados os aspectos mais técnicos relacionados ao trabalho, como a explicação dos componentes dos sistemas fotovoltaicos, o panorama das tecnologias de células fotovoltaicas existentes atualmente no mercado, aspectos técnicos relacionados à maneira como os módulos são instalados, os fatores de maior influência na geração de energia através de placas fotovoltaicas, que devem ser considerados na execução do projeto bem como posterior manutenção, e finalmente um breve parecer sobre os incentivos à geração fotovoltaica existentes atualmente.

O capítulo seguinte, trata da caracterização do sistema instalado no DELT. Neste capítulo primeiramente é explicado a metodologia a ser utilizada para fazer a análise e todos os índices de mérito a serem calculados são explicados. É apresentado também os dados de irradiação que foram coletados para obtenção dos IMs, tanto no plano horizontal como no plano inclinado a partir do software Radiasol, e esses são comparados com os dados de irradiação fornecidos pelo sensor instalado junto às placas. Logo após, são apresentados os valores dos três índices de mérito obtidos, e estes são comparados com índices de mérito de outros sistemas obtidos em outros trabalhos.

O quarto capítulo trata da análise comparativa dos dados de geração antes e após a limpeza dos módulos. Para isso, foram analisados gráficos de curva de potência do dia anterior e posterior à limpeza e também foram selecionados dias que obtiveram a mesma irradiação solar média diária disponível, e suas respectivas gerações diárias foram comparadas.

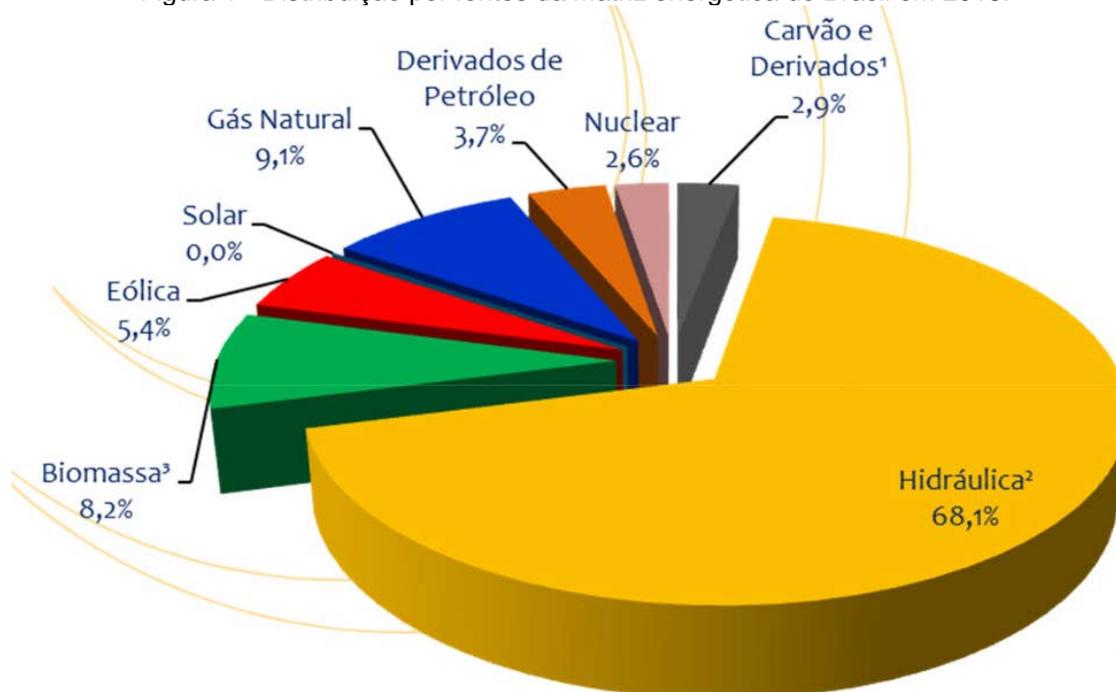
Finalmente, o quinto e último capítulo apresenta as considerações finais e conclusões alcançadas com os resultados obtidos através da realização deste trabalho, bem como sugestões para possíveis trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

O Brasil apresenta uma matriz energética predominantemente renovável, dada principalmente pela grande quantidade de usinas hidrelétricas que são favorecidas pelo relevo e a geografia do Brasil. A busca por fontes alternativas de energia que não sejam prejudiciais ao meio ambiente é constante e vem se consolidando ano a ano, com cada vez mais participação na matriz energética brasileira. As energias solar e eólica se destacam como sendo as principais formas de geração de energia limpa, adicionando-se ainda o fato que o Brasil recebe uma intensa radiação solar durante o ano todo (PEREIRA, et al. 2017). A energia eólica vem crescendo com índices próximos a 30% por ano e hoje já ocupa 6,7% da matriz brasileira, já a energia solar ocupa apenas 0,01% da capacidade instalada no Brasil (EPE, 2017).

Figura 1 - Distribuição por fontes da matriz energética do Brasil em 2016.



Fonte: EPE (2017).

Com a regulamentação governamental feita pela Resolução ANEEL 482/2012, está aumentando cada vez mais o número de instalações de microgeração distribuída devido à redução significativa dos custos de instalação e dos equipamentos, o aumento da eficiência dos painéis fotovoltaicos e o maior

incentivo fiscal por parte do governo (PEREIRA, et al. 2017). A resolução permite o uso de micro e minigeração distribuída de energia fotovoltaica conectadas à rede elétrica pública e com sistema de compensação, com isso, é possível que a energia excedente gerada seja injetada na rede de distribuição gerando créditos em energia (kWh) que podem ser deduzidos da fatura de energia elétrica. O prazo de validade dos créditos é de 60 meses, sendo que eles podem também ser usados para abater o consumo de unidades consumidoras do mesmo titular situadas em outro local, desde que na área de atendimento de uma mesma distribuidora (ANEEL, 2015). Com base em projeções feitas pela EPE, a estimativa é que a participação da energia solar na matriz energética brasileira será de mais de 30% em 2030, onde 8,2 dos 25 gigawatts se darão por geração distribuída em casas, edifícios comerciais e públicos, condomínios e na área rural (PEREIRA, et al. 2017).

## 2.2 ENERGIA SOLAR

O Sol gera uma energia inesgotável de calor e luz e é responsável pela origem de praticamente todas as outras formas de energia. A energia que o planeta Terra recebe é de aproximadamente  $1,5 \times 10^{18}$  kWh, quantia 10.000 vezes maior que o consumo de energia neste período do mundo todo, por isso, a energia solar é uma das alternativas energéticas que está entre as mais propícias de aproveitamento para suprir a grande demanda esperada nos próximos anos (CRESESB, 2006). Além de ser essencial para a vida humana na terra, o Sol oferece um potencial enorme de utilização por meio de sistemas de captação e conversão de energia. A energia solar fotovoltaica é uma das possíveis formas de conversão da energia do sol em energia elétrica através das células fotovoltaicas e será discutida mais a fundo no decorrer deste trabalho (NOGUEIRA, et al. 2017).

### 2.2.1 Radiação

A radiação é um dos três processos físicos de transferência de energia de um ponto a outro, junto com a condução e a convecção. Na radiação, a energia é transferida através de ondas eletromagnéticas, não precisando assim de um meio para se propagar (DANTAS, et al. 2006). A radiação é propagada em

direção à terra em sua maior parte na forma eletromagnética e emana direta ou indiretamente do Sol. As atmosferas solar e terrestre absorvem parte da radiação emitida pelo Sol em direção à Terra, assim, a radiação que chega na superfície terrestre é formada por dois componentes, uma direta e uma indireta - a radiação dispersa. A combinação dos dois componentes da radiação pode também ser chamada de radiação global. A luz visível é somente parte da radiação global e equivale a um intervalo de onda do espectro eletromagnético que compreende a faixa dos 400 aos 700 nm. A composição da radiação solar é dada por 59% de energia térmica, 40% de radiação luminosa visível e 1% de radiação ultravioleta, não visível aos olhos humanos (LIMA, 1992).

### 2.2.2 Irradiância

A irradiância é definida como uma determinada quantidade de radiação solar emitida por unidade de área (ABNT, 2013), podendo assim também ser chamada de potência média por unidade de área proveniente do Sol. A irradiância solar recebida na camada externa da atmosfera é de  $1360 \text{ W/m}^2$ , porém, devido a reflexão das nuvens, absorção atmosférica, etc. a Terra recebe de fato aproximadamente  $1000 \text{ W/m}^2$  (LIMA, 1992). A indústria fotovoltaica determinou essa como a irradiância padrão para especificação e dimensionamento de projetos fotovoltaicos (TONIN, 2017) e esse será o valor utilizado nos cálculos deste trabalho.

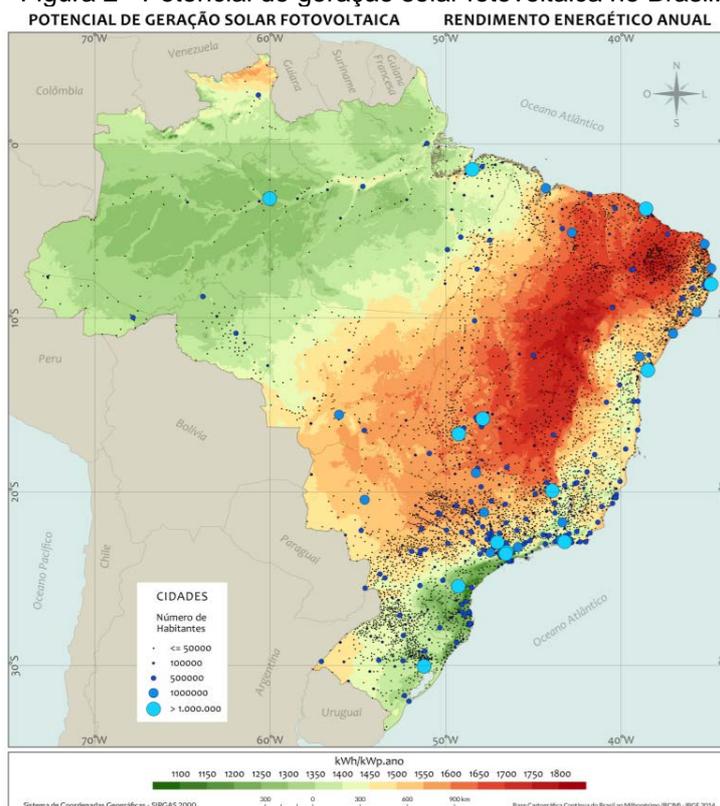
### 2.2.3 Irradiação

Os termos radiação e irradiação são constantemente utilizados de maneira errônea, sem distinção entre si. É necessário então esclarecer a diferença entre radiação instantânea e integrada. A radiação instantânea é a irradiância já descrita anteriormente. A radiação integrada, também chamada de irradiação é definida como a quantidade de radiação solar que atravessa determinada superfície, sem a necessidade de um meio material para se propagar. Em aspectos numéricos, é equivalente à integração da irradiância, no intervalo de tempo em questão, e sua unidade de medida é  $\text{Wh/m}^2$  (ROSA, 2003).

## 2.3 POTENCIAL SOLAR BRASILEIRO

O Brasil é considerado um dos países com maior capacidade instalada de energia renovável e limpa, porém é preciso investimento em fontes alternativas de energia para que essa situação se perca nos próximos anos (VILLALVA, 2018). A pouca utilização da energia solar como forma de geração de energia no Brasil é destacada quando se observa as condições favoráveis do desenvolvimento da fonte no Brasil. Segundo o EPE (2012), além dos altos níveis de insolação, o Brasil possui uma das maiores reservas de quartzo do mundo, trazendo o país mais uma vez para uma posição vantajosa com a produção de silício - material utilizado para produção das placas fotovoltaicas - com alto grau de pureza. A figura 2 mostra o potencial de geração solar fotovoltaica no Brasil.

Figura 2 - Potencial de geração solar fotovoltaica no Brasil.



Fonte: Atlas Brasileiro da Energia Solar (2017).

O mapa da figura 2 apresenta uma coincidência animadora entre a concentração da população brasileira e a disponibilidade de irradiação anual. Com um preço mais competitivo e acessível para as instalações de micro e

minigeração, vem ocorrendo desde 2016 um crescimento considerável nesse tipo de instalação residencial. Grandes empresas de energia começam a explorar o mercado oferecendo mecanismos de financiamento através dos quais o consumidor paga o custo da instalação do sistema de captação solar fotovoltaica com a economia de energia que o sistema proporciona. Com essas novas maneiras de abordagem do cliente e o crescente aumento das tarifas residenciais, a opção de gerar sua própria energia através do sol vem se mostrando cada vez mais vantajosa (INPE, 2017).

### 2.3.1 Potencial solar no Paraná

Segundo o Atlas de Energia Solar do Paraná (2017), o estado tem um dos maiores potenciais de energia solar do país. Esse foi um resultado que surpreendeu os responsáveis pelo estudo, que não esperavam um potencial tão significativo para o Paraná. Curitiba em específico, é considerada uma cidade fria e com pouca incidência solar, porém, foi constatado que apesar da menor incidência solar nos meses de inverno, a energia fotovoltaica gerada é relativamente alta nesse período. Isso acontece porque as baixas temperaturas acabam aumentando a potência de geração do painel fotovoltaico, compensando assim a baixa incidência solar da estação (TECPAR, 2017).

Segundo Herlon (2017), Superintendente de Energias Renováveis de Itaipu, a metade norte do estado do Paraná se equipara ao potencial de geração do Nordeste, já a metade sul, apesar do potencial reduzido, ainda é muito melhor que diversos países europeus. A região Nordeste tem mais dias de sol, mas também vários momentos com temperatura acima dos 28°C, o que prejudica a eficiência das placas (RESENDE, 2017).

## 2.4 EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico acontece quando elétrons, em alguns tipos de materiais, devido à presença da luz solar (ou outras formas de energia) sofrem uma excitação (ANEEL, 2005). Essa excitação é ocasionada pela diferença de potencial causada na estrutura do material semicondutor quando absorve a luz incidente. A célula fotovoltaica faz apenas o papel de capturar a energia elétrica e não de armazenar. Ela somente gera um fluxo de elétrons num circuito elétrico,

durante o período que houver incidência solar sobre sua superfície (ALMEIDA, et al. 2017).

A história do efeito fotovoltaico começa com o seu descobrimento por Edmond Becquerel em 1839, primeiramente visto como uma diferença de potencial nos terminais de uma célula eletroquímica quando submetida à luz. O primeiro instrumento fotovoltaico proveniente dos estudos da física do estado sólido foi em 1876, mas só em 1956 foi possível o início da produção em escalas maiores, seguindo o crescimento da área de eletrônica. Os primeiros grandes incentivadores da tecnologia fotovoltaica foram as empresas do setor de telecomunicações, para desenvolvimento de fontes de energia para sistemas isolados instalados longe de áreas urbanizadas. Após as empresas de telecomunicações, vieram os incentivos da chamada “corrida espacial”. A célula fotovoltaica oferece a quantidade de energia necessária para longos períodos de alimentação de equipamentos no espaço, com o menor custo peso e segurança (CEPEL, 2014).

## 2.5 COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

O sistema fotovoltaico é composto por alguns componentes cada um com sua funcionalidade. Na figura 3 são apresentados os principais equipamentos que compõem uma usina fotovoltaica conectada à rede elétrica.

Figura 3 - Componentes de um sistema fotovoltaico.



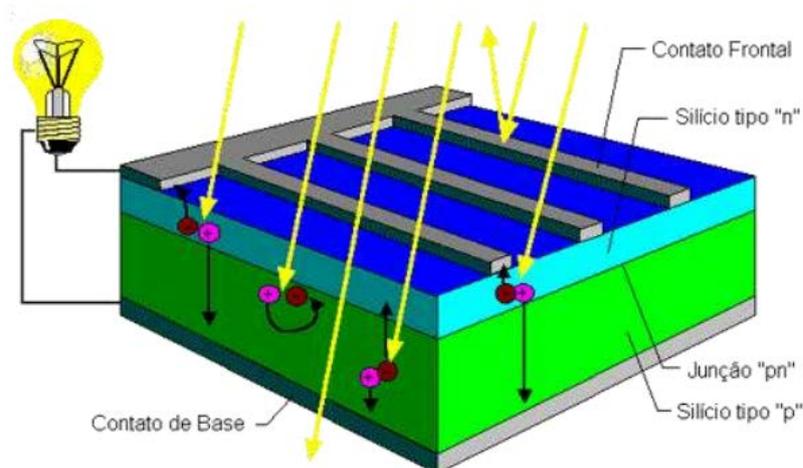
Fonte: TEKHOUSE (2018).

Para compreender o funcionamento de todo o sistema, a seguir é abordado a função de cada um dos principais equipamentos.

### 2.5.1 Células fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são dispositivos semicondutores que tem a função de converter a energia dos fótons, providos pelo Sol e absorvidos pela célula, em energia elétrica (RAMOS, 2016). Ela é formada tipicamente de silício dopado com fósforo, para obter um elétron a mais na camada de valência dos átomos resultando em um material tipo n, e boro para se obter o material tipo p com um elétron a menos na camada de valência (CEMIG, 2012). Na sua maioria, as células fotovoltaicas são formadas por junções p-n e o efeito fotovoltaico gera uma diferença de potencial entre as extremidades do cristal que resulta em uma corrente elétrica contínua (CC) (RAMOS, 2016). Para a captação dessa, são inseridos contatos metálicos nos módulos que são chamados de *busbar*. Na figura 4 é mostrada a representação de uma célula fotovoltaica e seu funcionamento.

Figura 4 - Célula fotovoltaica.



Fonte: CRESESB (2006).

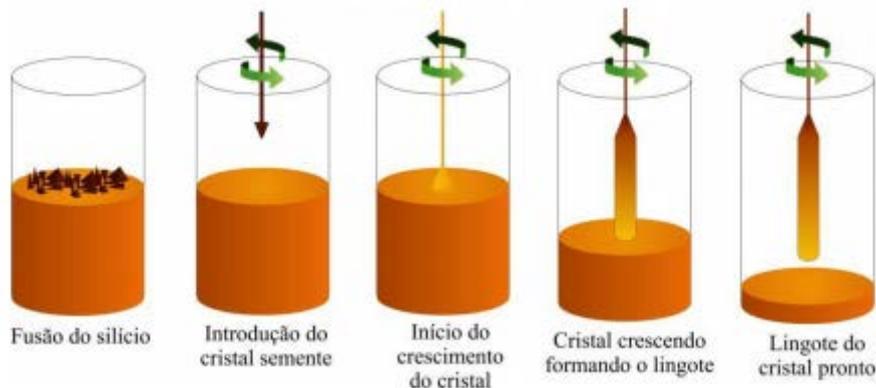
Atualmente as células mais utilizadas na geração de energia, são as de silício monocristalino e policristalino devido ao alto rendimento de conversão. Segundo Tonin (2017), vários outros materiais estão sendo aplicados na fabricação de células fotovoltaicas como o silício amorfo (a-Si), silício

microcristalino ( $\mu\text{-Si}$ ), telureto de cádmio (CdTe), índio e gálio e selênio (CIGS), que serão abordados a seguir.

### 2.5.1.1 Silício monocristalino (m-Si)

Segundo o CRESESB (2006), as células de silício monocristalino são as mais utilizadas historicamente na geração de energia. O rendimento das células com esse material mostra-se elevado comparado a outros tipos existentes e pode atingir o intervalo de 14% a 25% em eficiência (ALMEIDA, et al. 2015). Para funcionar como célula fotovoltaica, o silício precisa atingir um grau de pureza de 99,9999% e ainda é necessário utilizá-lo junto com outros semicondutores (CRESESB, 2006). Esse tipo de célula é produzido a partir de um método chamado *Czochralski* no qual o silício é fundido, em temperatura controlada, com uma pequena quantidade de dopante tipo p e dessa substância, é retirado o silício monocristalino em formato cilíndrico chamado lingote (TONIN, 2017), conforme a figura 5.

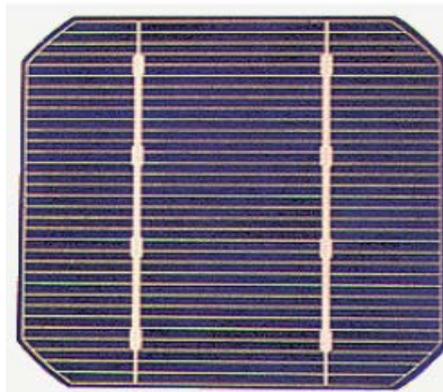
Figura 5 - Processo de fabricação da célula de silício monocristalino.



Fonte: MACHADO; MIRANDA (2014).

Os lingotes são cortados em finas camadas com espessura na ordem de 0,2 mm (CEPEL & CRESESB, 2014) e adicionados impurezas do tipo n para obter a junção na qual acontecerá o efeito fotovoltaico.

Figura 6 - Célula fotovoltaica de silício monocristalino.

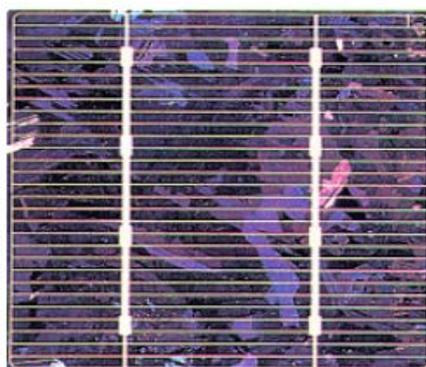


Fonte: CRESESB (2006).

#### 2.5.1.2 Silício policristalino

O silício policristalino demanda uma menor quantidade de energia na sua fabricação, já que utiliza temperaturas mais baixas (TONIN, 2017). Entretanto, a eficiência de conversão desse tipo de célula é menor quando comparada às de silício monocristalino (CRESESB, 2006), podendo alcançar uma média de eficiência de 20% (ALMEIDA, et al. 2015). O processo de fabricação desse tipo de célula é semelhante ao do monocristalino, porém, após o silício puro ser fundido, esse é resfriado logo em seguida formando vários cristais e então passa pela dopagem para obter a junção p-n (MACHADO, et al. 2014). Os cristais podem ser observados na célula da figura 7.

Figura 7 - Célula fotovoltaica de silício policristalino.



Fonte: CRESESB (2006).

### 2.5.1.3 Filmes finos

Segundo Tonin (2017), os dispositivos de filmes finos são produzidos através do empilhamento de finas camadas em material rígido ou flexível. Essas camadas podem ser compostas de diferentes materiais como: silício amorfo (a-Si), silício microcristalino ( $\mu\text{c-Si}$ ), telureto de cádmio (CdTe), CIGS (cobre, índio, gálio e selênio) ou OPV (célula fotovoltaica orgânica).

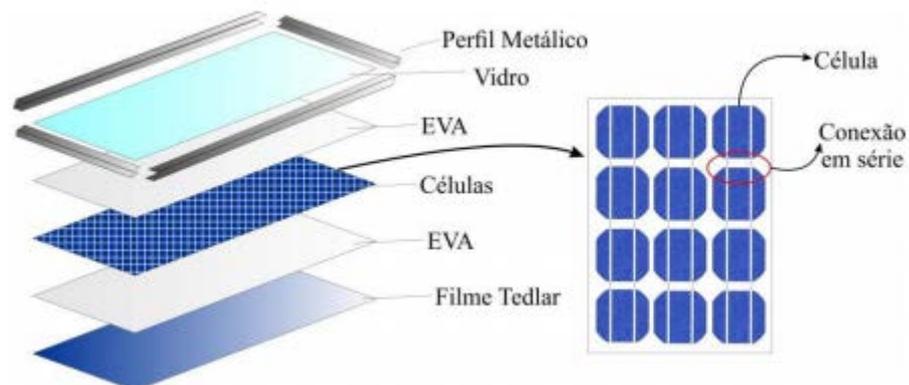
O custo de fabricação desse tipo de célula mostra-se menor quando comparado com células de silício monocristalino e policristalino. Isso se deve ao alto nível de absorção dos materiais empregados, que possibilita a utilização de finas camadas destes semicondutores resultando em economia de material. Além disso, os filmes finos consomem menos energia na sua fabricação (CEPEL & CRESESB, 2014).

Apesar do baixo custo na produção de filmes finos, esse tipo de célula apresenta baixa eficiência, com médias entre 5,5% e 9,5% (Inmetro, 2017), e para compensar isso é necessária uma área maior para produzir a mesma quantidade de energia que uma usina com módulos monocristalinos ou policristalinos produziria.

### 2.5.2 Módulos fotovoltaicos

Os módulos de silício cristalino são compostos pelas células ligadas em série, paralelo ou ambos e envolvidas por uma estrutura. Essa é formada por vidro temperado de alta transparência e folha de EVA (acetato de etil vinila), estabilizado para a radiação ultravioleta, com o objetivo de impedir a entrada de pó e umidade na parte frontal das células (CEPEL & CRESESB, 2014). Na parte posterior é aplicada novamente folha de EVA e a lâmina de PVF (fluoreto de polivinila), também conhecido como filme *Tedlar* (MACHADO, et al. 2014). Todas essas lâminas são montadas junto ao perfil metálico que geralmente é de alumínio. Na figura 8 é mostrada essa estrutura completa.

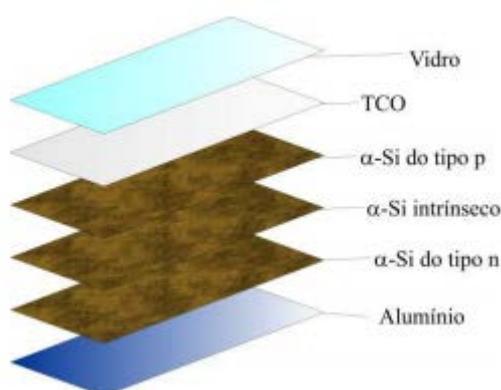
Figura 8 - Componentes de um módulo fotovoltaico de silício cristalino.



Fonte: MACHADO; MIRANDA (2014).

Os filmes finos não possuem módulos e a própria célula já é aplicada diretamente para a geração de energia. A parte frontal desta célula é formada de vidro transparente, seguido por TCO (óxido condutor transparente) que junto ao alumínio - situado na parte posterior - são responsáveis pela condução da corrente. Os filmes finos propriamente ditos, são compostos por um filme geralmente de silício amorfo, dopado do tipo p, seguido por um filme de material puro e um filme dopado do tipo n. Na figura 9 está representada a composição da estrutura (MACHADO, et al. 2014).

Figura 9 - Componentes de uma célula de filme fino.

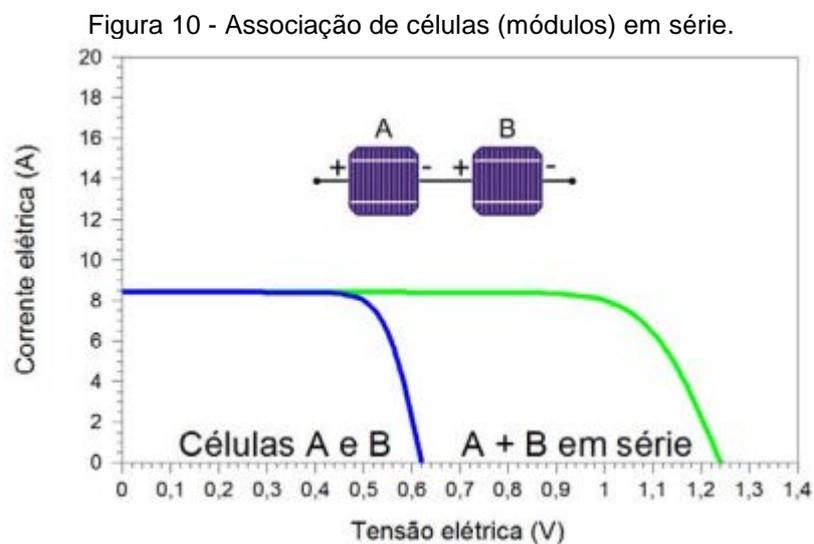


Fonte: MACHADO; MIRANDA (2014).

#### 2.5.2.1 Associação de módulos

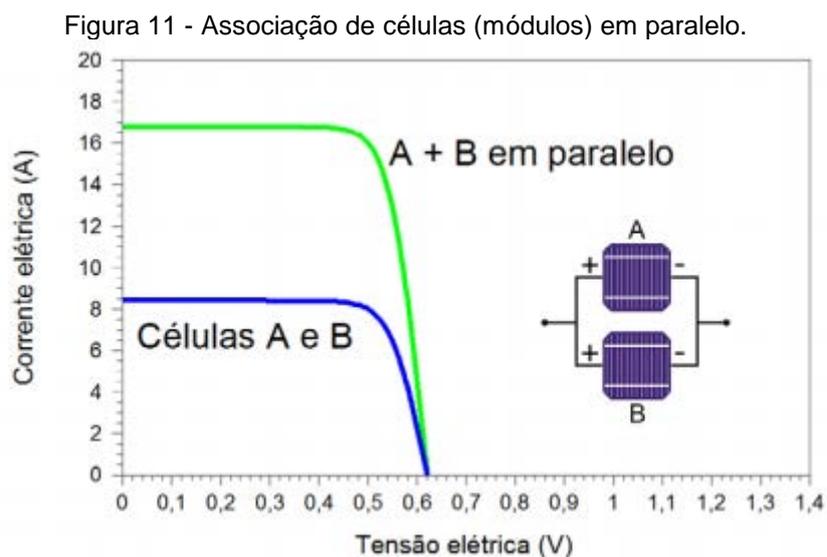
Para o funcionamento do sistema, a saída do arranjo de módulos fotovoltaicos deve ter uma tensão mínima para o inversor iniciar o seu funcionamento. Para atingir essa tensão mínima, chamada de tensão de

abertura do inversor, é necessária a associação de módulos em série. Desta forma a tensão de cada módulo se soma até atingir a tensão de abertura, enquanto a corrente de saída é a mesma que a corrente gerada no módulo. A figura 10 ilustra esse funcionamento.



Fonte: CEPEL & CRESESB (2014).

O inversor também tem uma tensão máxima que consegue suportar e é preciso respeitar esse limite para não sobrecarregar o equipamento. Para manter a tensão de saída, são associados módulos em paralelo e dessa forma, as correntes dos arranjos em série e então colocados em paralelo se somam.



Fonte: CEPEL & CRESESB (2014).

### 2.5.3 Inversor

O inversor é um componente eletrônico que converte a corrente contínua que provém dos módulos (CC) em corrente alternada (CA) para alimentar as cargas (CEPEL & CRESESB, 2014).

Os sistemas de geração comumente utilizados são os conectados à rede da concessionária de energia, a qual se comporta como a bateria do sistema, já que durante a noite os módulos não geram energia. O inversor deve ser homologado pelo Inmetro para garantir que esse não cause nenhum dano à rede. Além disso, esse tipo de inversor tem um sistema de sincronização que monitora a amplitude e frequência da rede e sincroniza esses parâmetros antes de permitir que a potência gerada flua para a instalação do local. Esse tipo de inversor deve possuir também um sistema de proteção no qual o inversor desliga em casos de queda de energia na rede, para que não haja acidentes provocados pela energização da rede durante manutenções.

Na figura 12 é apresentado o inversor do sistema estudado neste trabalho o qual funciona conectado à rede.

Figura 12 - Inversor de frequência do sistema estudado.



Fonte: As autoras (2018).

Outro tipo de inversor que é utilizado atualmente, são os de sistemas autônomos que trabalham juntamente com baterias, ou seja, durante o dia, os módulos geram energia e carregam as baterias e durante a noite o inversor é

alimentado pela energia, em corrente contínua, que foi armazenada e converte em corrente alternada para alimentar as cargas da instalação.

## 2.6 FATORES DE INFLUÊNCIA NO SISTEMA FOTOVOLTAICO

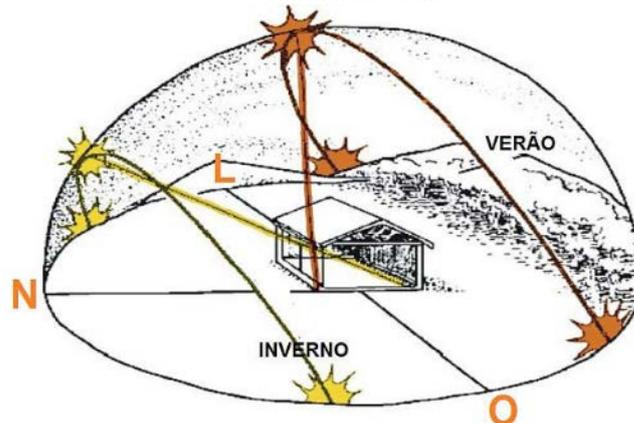
No dimensionamento de um sistema fotovoltaico, é importante levar em conta algumas variáveis que vão influenciar diretamente na geração de energia. A seguir serão abordados alguns desses fatores.

### 2.6.1 Orientação e inclinação dos módulos fotovoltaicos

Para alcançar o melhor aproveitamento da irradiação solar e obter a máxima geração do sistema fotovoltaico, é preciso adequar os módulos quanto a orientação e inclinação de acordo com a localidade do sistema.

Na figura 13, é mostrado um sistema fotovoltaico instalado no hemisfério sul e nela é possível observar que quando orientado para o norte geográfico, o sistema consegue atingir um maior rendimento pois os módulos ficarão expostos à irradiação solar por mais tempo ao longo do dia. No hemisfério norte, essa orientação inverte já que o Sol ficará relativamente posicionado mais ao sul.

Figura 13 - Demonstração da influência do posicionamento da usina fotovoltaica localizada no hemisfério sul.

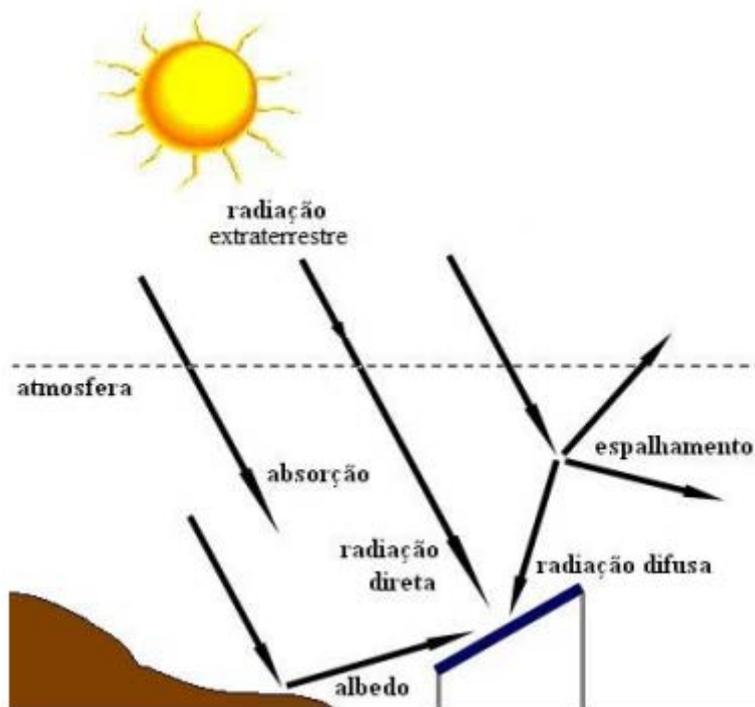


Fonte: PORTAL SOLAR (2018).

A radiação que incide na superfície terrestre é dividida em três partes: componente direta que vem diretamente do Sol, componente difusa que consiste na radiação que sofreu espalhamento ao atingir a atmosfera terrestre e a

radiação difusa devido ao albedo que é a radiação refletida pela superfície terrestre. Na figura 14 são ilustradas essas componentes citadas.

Figura 14 - Radiação incidente sobre a superfície terrestre.



Fonte: CEPEL & CRESESB (2014).

Ao inclinar o módulo, esse ficará exposto aos três tipos de radiação e dessa forma o sistema gerará uma maior quantidade de energia elétrica. O ângulo de inclinação varia de acordo com a latitude e deve ter no mínimo  $10^\circ$  para evitar o acúmulo de sujeira na superfície (BOSH, 2011). Na tabela 1 são mostrados os ângulos recomendados.

Tabela 1 - Ângulos recomendados de inclinação para os módulos de acordo com a latitude.

Site Latitude	Horizontal Tilt Angle
0-10	= 10 Degrees
11-20	= Latitude
21-30	= Latitude + 5~
31-40	= Latitude + 10~
41+	= Latitude + 15~

Fonte: BOSH (2011).

## 2.6.2 Influência da irradiação solar

Cada região do planeta possui uma quantidade de irradiação que incide sobre ela, algumas regiões possuem mais e outras menos e esse fator deve ser

levado em consideração no dimensionamento de um sistema fotovoltaico. Isso deve ser levado em conta pois para locais com grande quantidade de irradiação, a potência da usina será menor que em locais com menor irradiação.

Segundo o CEPEL e o CRESESB (2014), é possível identificar a variação de corrente pela equação 1, para a determinação da corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ). Essa aumenta proporcionalmente à irradiação.

$$I_{sc} = I_{sc_{STC}} \times \frac{G}{1000} \quad (1)$$

$I_{sc}$  (A): Corrente de curto-circuito do módulo para uma determinada irradiação (G) e temperatura 25°C;

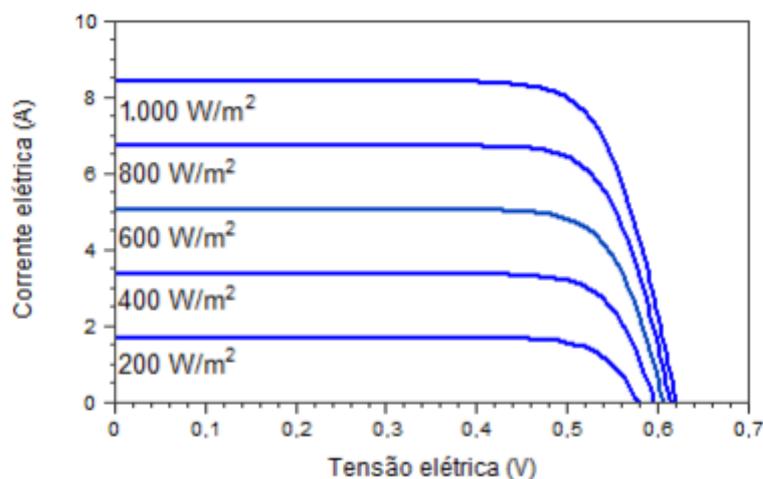
$I_{sc_{STC}}$  (A): Corrente de curto-circuito do módulo nas condições padronizadas de laboratório (STC);

1000 (W/m<sup>2</sup>): Irradiância nas condições padronizadas de laboratório;

G (W/m<sup>2</sup>): Irradiância incidente sobre o módulo.

Na figura 15 são mostradas simulações de curva para diferentes irradiações e dessa forma é possível identificar essa influência que reflete diretamente na corrente gerada no sistema, fazendo com que em regiões de maior quantidade de irradiação solar, a potência de saída seja maior.

Figura 15 - Influência da irradiação na variação de corrente com temperatura da célula de 25°C.

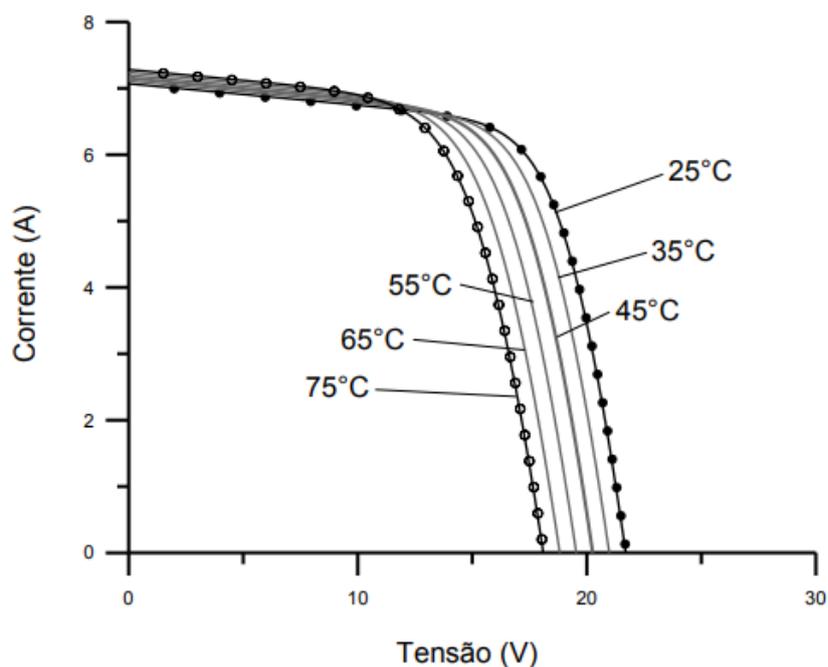


Fonte: CEPEL & CRESESB (2014).

### 2.6.3 Influência da temperatura

Os altos índices de irradiância provocam o aumento de temperatura na célula que traz variações tanto na tensão como na corrente. Na figura 16 é evidente que quanto maior a temperatura, a tensão de saída dos módulos tem uma queda considerável, enquanto a corrente tem um aumento mínimo e, portanto, a potência resultante dos módulos diminui.

Figura 16 - Gráfico corrente x tensão para diferentes temperaturas.

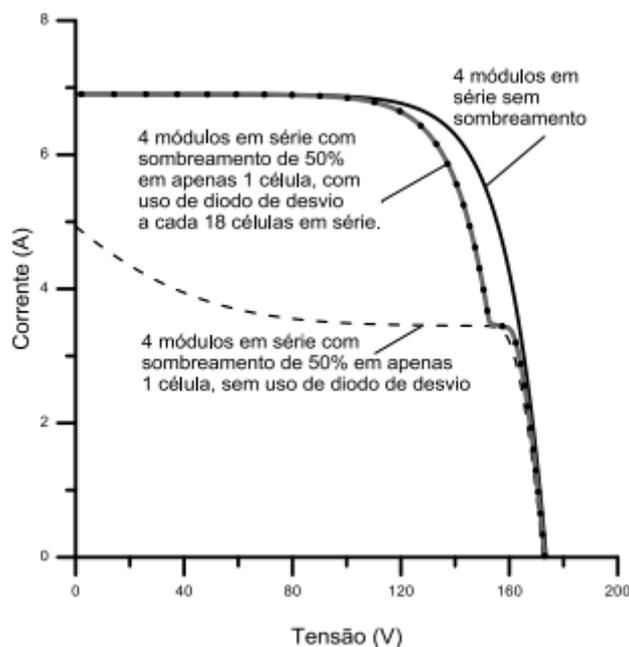


Fonte: CEPEL & CRESESB (2014).

### 2.6.4 Sombreamento

Como as células fotovoltaicas estão ligadas em série no módulo de silício cristalino, o sombreamento de uma delas diminuirá a corrente produzida pelo conjunto de células. Quando esse módulo está ligado em série com outros, a corrente total será reduzida prejudicando todo o sistema. Na figura 17 é mostrado o sombreamento de uma célula que faz com que a corrente total de um conjunto de 4 módulos reduza pela metade.

Figura 17 - Gráfico de tensão x corrente de um conjunto de 4 módulos na qual a célula de um módulo foi sombreada.



Fonte: CEPEL & CRESESB (2014).

#### 2.6.5 Sujeira residual depositada na superfície dos módulos

As células fotovoltaicas dependem exclusivamente da incidência solar direta para gerar energia, por isso, para que a célula possa captar o máximo de fótons possíveis, é importante que as placas sejam limpas periodicamente (DUARTE, et al. 2015). Quando um sistema fotovoltaico está instalado em locais pouco chuvosos ou com muito particulado na atmosfera, os módulos podem acumular uma poeira residual, resultando em redução da radiação incidente no semicondutor fotoativo (SINHA, et al. 2014).

Para os módulos fotovoltaicos com inclinação de pelo menos  $10^\circ$ , a própria chuva é suficiente para limpá-los. Todavia, para módulos com inclinações menores e em casos onde a ocorrência de chuva fica baixa por um certo período, pode ocorrer um acúmulo de sujeira mais aderente, bem como sujeiras causadas por fatores externos (e.g. excremento de pássaros), justificando-se assim a necessidade de limpeza periódica (HICKEL, et al. 2016).

Os módulos fotovoltaicos são ainda mais afetados quando associados em série, pois tem como desvantagem o efeito do mau funcionamento de uma célula - gerado pelo sombreamento devido ao acúmulo de poeira e poluição atmosférica - sobre as demais, afetando assim a geração de energia do sistema

como um todo. Além de afetar a produção de energia pela barreira física da irradiação solar, a célula afetada fica submetida a uma tensão inversa igual a soma das tensões das demais células, causando assim dissipação da potência gerada pelas outras células e, por consequência, a elevação da temperatura que pode gerar danos irreversíveis às células - fenômeno conhecido pela formação de pontos quente ou *hot spot* (REVISTA CIENTÍFICA FAESA, 2013).

Para minimizar a ocorrência do fenômeno acima descrito, diodos de *bypass* são ligados em paralelo com as células, porém, segundo Pereira (2012) além da instalação dos diodos, é de extrema importância realizar a limpeza periódica dos módulos fotovoltaicos, principalmente no período de inverno, pois a camada homogênea formada pelo depósito de material particulado no painel pode diminuir o desempenho na produção de energia elétrica em até 5%.

## 2.7 INCENTIVOS À GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Segundo o *The Boston Consulting Group* (2017) o Brasil está cercado de elementos que levaram a um crescimento significativo do uso da energia solar em outros países. O país é colocado no topo dos mercados mais promissores do mundo devido a fatores como a alta taxa de radiação solar, as tarifas de energia elétrica cobradas em uma base puramente variável e principalmente uma expectativa elevada de aumento do consumo de energia a longo prazo. A ANEEL fez recentemente uma revisão nas regras do sistema de compensação de energia elétrica. A introdução de novos planos de incentivo financiados pelo governo irá ativar um mercado que poderá levar a capacidade instalada de energia solar fotovoltaica crescer rapidamente, gerando assim impactos consideráveis em empresas de energia elétrica e suas economias.

Os principais componentes da resolução nº687 emitida pela ANEEL em novembro de 2015, que estabelecem uma estrutura para que a distribuição de energia solar possa ser em escala mais ampla e com potencial de retorno financeiro mais efetivo aos investidores, estão listados a seguir:

- Permissão para que geradores de até 5 MW insiram energia na rede e gerem créditos, compensando assim as contas de energia elétrica;

- Estabelece validade de 60 meses para os créditos obtidos pelo produtor de energia elétrica;
- Introduce o conceito de energia solar compartilhada, permitindo que diferentes clientes se beneficiem de uma única instalação de energia solar como se fosse um único cliente;
- Permite que os clientes participantes distribuam os créditos gerados entre diversas contas de serviço, por exemplo em uma propriedade comercial de vários inquilinos ou prédios residenciais;
- Permite que os créditos não utilizados por uma instalação geradora sejam utilizados em outro local, desde que estejam na mesma área de concessão e o proprietário de ambos os locais seja o mesmo.

### 3 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO AO DELT

#### 3.1 METODOLOGIA

Para fazer a análise do desempenho do sistema fotovoltaico estudado, será utilizado o conceito de índices de mérito. Os índices de mérito, também conhecidos como IMs, são fórmulas algébricas que expressam um compromisso entre duas características ou propriedades. Em sua forma mais simples um IM é geralmente uma fração, tendo no numerador a propriedade que se quer maximizar e no denominador a que se deseja minimizar. Assim, quanto maior o valor obtido, mais adequado é o índice analisado. A utilização desse conceito, permite que a análise deixe de ser feita com informações que atendam à um problema específico, passando a fornecer informações que permitam julgar o desempenho de diversos sistemas sobre diferentes condições (FERRANTE, 2000).

A metodologia de IMs pode ser utilizada em diversas áreas. Na engenharia de sistemas fotovoltaicos os índices de mérito são utilizados para avaliar se um determinado sistema está operando de forma otimizada e aproveitando o recurso solar disponível da melhor forma possível. Com isso, pode-se comparar sistemas de diferentes potências instaladas, em diferentes localidades e conseqüentemente com diferentes índices de irradiação solar disponível, possibilitando melhor avaliação do desempenho individual de cada sistema (BENEDITO, 2009).

Com o aumento do uso de sistemas fotovoltaicos para geração de energia elétrica e a necessidade de atribuir maior credibilidade às tecnologias, foi constatado a necessidade de padronizar os métodos de avaliação dos sistemas FV. Foi a partir de então que os índices de mérito para monitoramento de sistemas fotovoltaicos foram sugeridos pela *International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programm* (IEA-PVPS) (FUSANO, 2013).

Nos próximos capítulos, os três índices de mérito comumente utilizados em SFCR serão definidos e, na sequência, serão apresentados os valores alcançados para o sistema fotovoltaico instalado no DELT bem como o

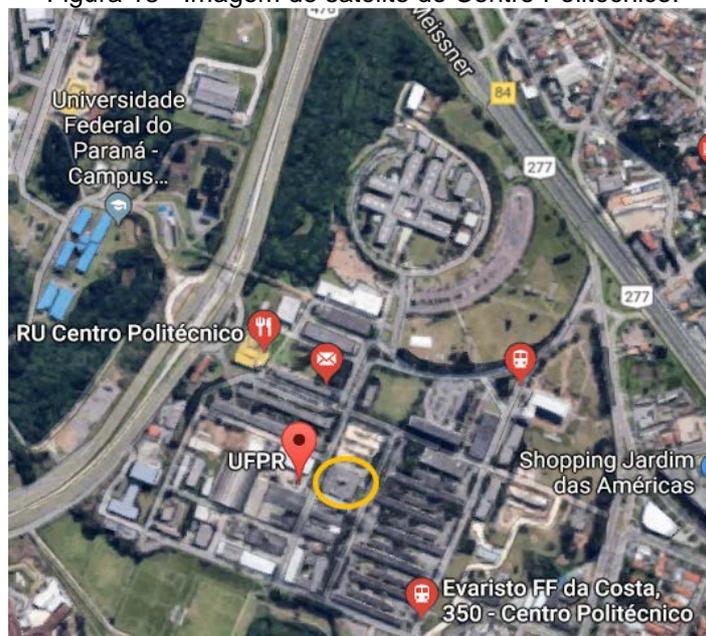
desenvolvimento necessário a partir dos dados adquiridos para a realização dos cálculos.

No capítulo 3.4.1.1 será realizada a comparação dos índices de mérito obtidos com outros encontrados em estudos similares de diferentes sistemas, a fim de verificar se os resultados estão compatíveis com os resultados da literatura atualmente disponível e verificar se o sistema está se comportando da forma como deveria ou se é necessário uma reavaliação do sistema para que este possa ser otimizado e melhor utilizado.

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA INSTALADO

Para realização deste trabalho, foi escolhido estudar e caracterizar o sistema fotovoltaico instalado no prédio do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, localizado dentro do Centro Politécnico em Curitiba. As coordenadas geográficas do local são latitude de  $25^{\circ}27'04''S$  e longitude de  $49^{\circ}14'01''W$ . A figura 18 mostra a imagem de satélite da região, e em amarelo destacado o local exato do prédio onde está instalado o sistema.

Figura 18 - Imagem de satélite do Centro Politécnico.



FONTE: Google Maps (2018).

O sistema está instalado em cima do telhado do prédio do DELT e entrou em operação dia 08 de agosto de 2014. Consiste de 12 placas fotovoltaicas conectadas em série, que estão exibidas na figura 19, cada uma com medidas

aproximadas de 1 m x 1,95 m e potência de 290 Wp, totalizando então uma área aproximada de 23,3 m<sup>2</sup> e uma potência instalada total de 3,48 kWp.

Figura 19 - Módulos fotovoltaicos do sistema instalado.



Fonte: As autoras (2018).

Para se obter a máxima geração fotovoltaica acumulada anual, a inclinação do módulo deve ser semelhante à latitude do local e orientado para a linha do equador (URBANETZ, 2014). No caso do sistema estudado, um melhor aproveitamento seria obtido com os módulos instalados com aproximadamente 25° de inclinação. O sistema instalado no DELT foi projetado para uma inclinação de 10°, segundo informações da EGNEX, empresa que fez o projeto e a instalação do sistema. Porém, pode-se observar na figura 20 que foi verificado que a inclinação real dos módulos é somente de 6°, o que acaba diminuindo ainda mais a eficiência real com relação à projetada.

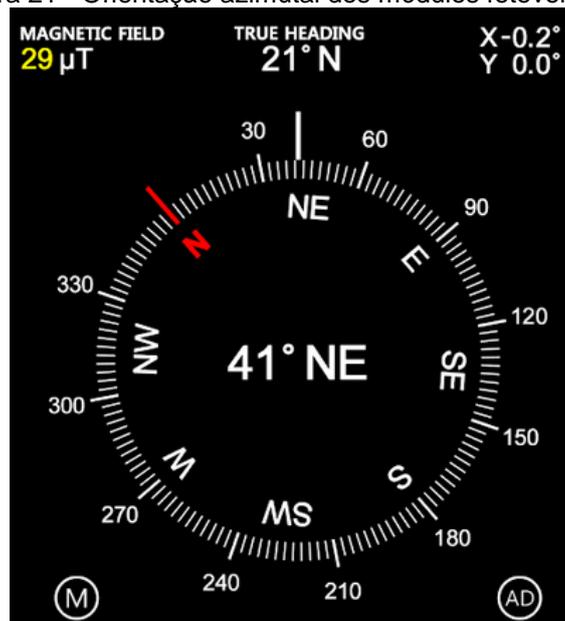
Figura 20 - Inclinação real dos módulos.



Fonte: As autoras (2018).

Quanto à orientação azimutal, o módulo está direcionado geograficamente a  $21^\circ$ , tendo como referência  $0^\circ$  a orientação norte e o deslocamento positivo em direção leste compreendendo ângulos entre 0 e  $359^\circ$ . Essa orientação é menos flexível e mais difícil de se atingir o valor ideal ( $0^\circ$ ) pois depende da orientação da estrutura física onde os módulos fotovoltaicos estão instalados.

Figura 21 - Orientação azimutal dos módulos fotovoltaicos.



Fonte: As autoras (2018).

Conforme a figura 21, na bússola são indicados os ângulos do norte magnético e o norte verdadeiro. Esse é utilizado como o azimute do sistema que é levado em consideração nos cálculos da performance do gerador fotovoltaico.

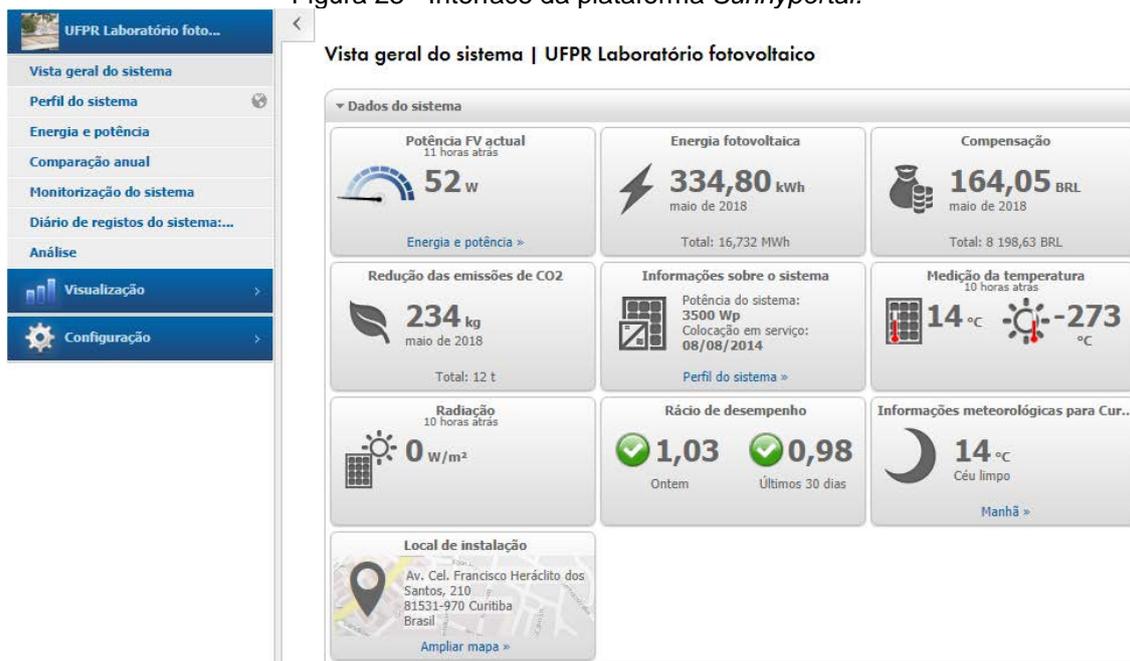
O inversor, apresentado na figura 22 é da marca SMA e possui 3,6 kW. Ao lado dele está o equipamento de comunicação necessário para o monitoramento remoto que vai enviar os dados coletados de geração, irradiância e temperatura do módulo para a rede de internet, os quais podem ser encontrados na plataforma online chamada *Sunnyportal*.

Figura 22 - Inversor de frequência e comunicador do sistema fotovoltaico conectado ao DELT.



Fonte: As autoras (2018).

A plataforma de monitoramento *Sunnyportal* é intuitiva e traz informações bastante relevantes para os usuários desse sistema. Na figura 23, é apresentado a interface da plataforma com informações gerais do gerador fotovoltaico.

Figura 23 - Interface da plataforma *Sunnyportal*.

Fonte: As autoras (2018).

### 3.3 ÍNDICES DE MÉRITO

#### 3.3.1 Produtividade ou *yield*

A Produtividade ( $Y$ ), também chamada na literatura de *yield*, é definida pela razão entre a quantidade de energia gerada e a potência nominal instalada do sistema - considerando as condições normais de teste (irradiância sendo  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura ambiente de  $25 \text{ °C}$ ). Essa razão representa o número de horas que o arranjo fotovoltaico precisaria operar na sua potência nominal para fornecer o mesmo tanto de energia.

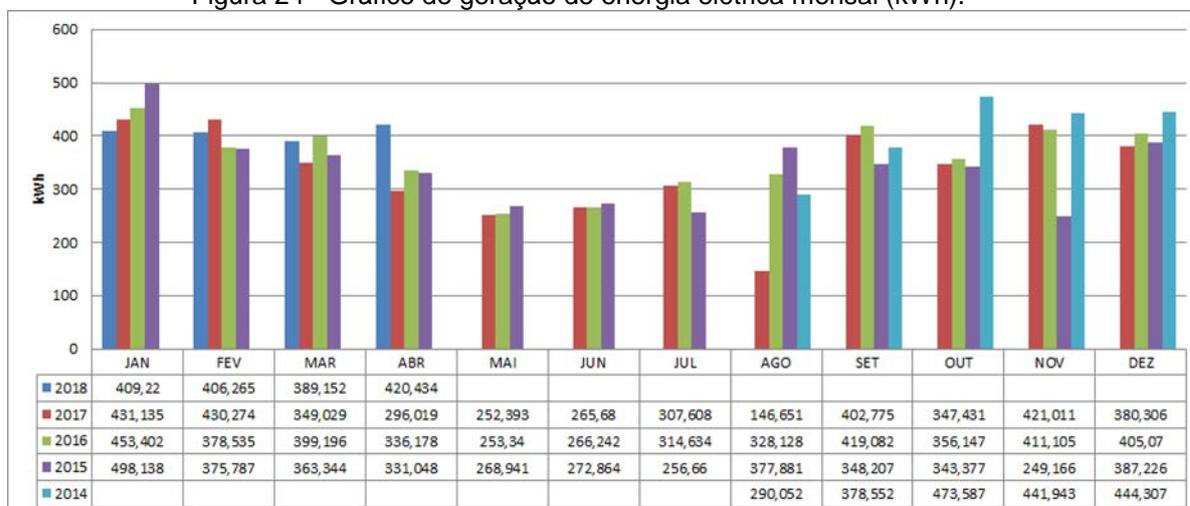
$$Y = \frac{\text{Energia Gerada (kWh)}}{\text{Potência FV (kWp)}} \quad (2)$$

O *yield* normaliza a quantidade de energia gerada quando se diz respeito ao tamanho do sistema, sendo assim uma maneira conveniente de comparar a energia produzida por sistemas de diferentes tamanhos (CHIONCEL, et al. 2010).

Os dados de geração de energia elétrica foram obtidos através do sistema de monitoramento acoplado ao inversor citado anteriormente, onde pode-se ter acesso a esses dados, tanto na forma de gráfico como tabela. Na figura 24 é

exibido o gráfico de geração de energia do sistema fotovoltaico estudado entre agosto de 2014 (data da instalação do sistema) e abril de 2018.

Figura 24 - Gráfico de geração de energia elétrica mensal (kWh).



Fonte: As autoras (2018).

### 3.3.2 Taxa de desempenho ou performance ratio

O cálculo da *performance ratio* tem como finalidade obter uma medida de desempenho global do sistema, ou seja, a capacidade em converter a irradiação incidente no plano dos módulos em energia elétrica. O valor resultante deste cálculo pode ser comparado com os de outros sistemas, independentemente da localização geográfica de cada um deles. Essa medida é expressa em porcentagem (%) e pode ser calculada para um ano de operação, conhecida como *performance ratio* anual, ou mensalmente, conhecida como *performance ratio* mensal.

$$PR = \frac{yield}{Irradiação/1000} (\%) \quad (3)$$

Nessa equação da taxa de desempenho, não são levadas em consideração os efeitos da temperatura e da velocidade do vento do local. Para condições de mesma irradiação e temperaturas extremamente discrepantes entre si (BIZZARRI, et al. 2013), são utilizadas outras equações com coeficientes de ajustes.

A irradiação utilizada no cálculo deve ser a incidente no plano inclinado da placa fotovoltaica localizada em determinada região e para a obtenção desses dados, foram seguidas as etapas descritas a seguir.

### 3.3.2.1 Irradiação média

Para se obter a irradiação média, foram solicitados os dados de irradiância ao Simepar que é o centro meteorológico do Paraná e está localizado no Centro Politécnico da UFPR, mesmo local do sensor de irradiância e do sistema fotovoltaico estudado. Os dados fornecidos foram de irradiância na unidade de  $W/m^2$ , de 15 em 15 minutos. A tabela 2 mostra um exemplo dos dados entre 12h e 13h do dia 01 de fevereiro de 2018.

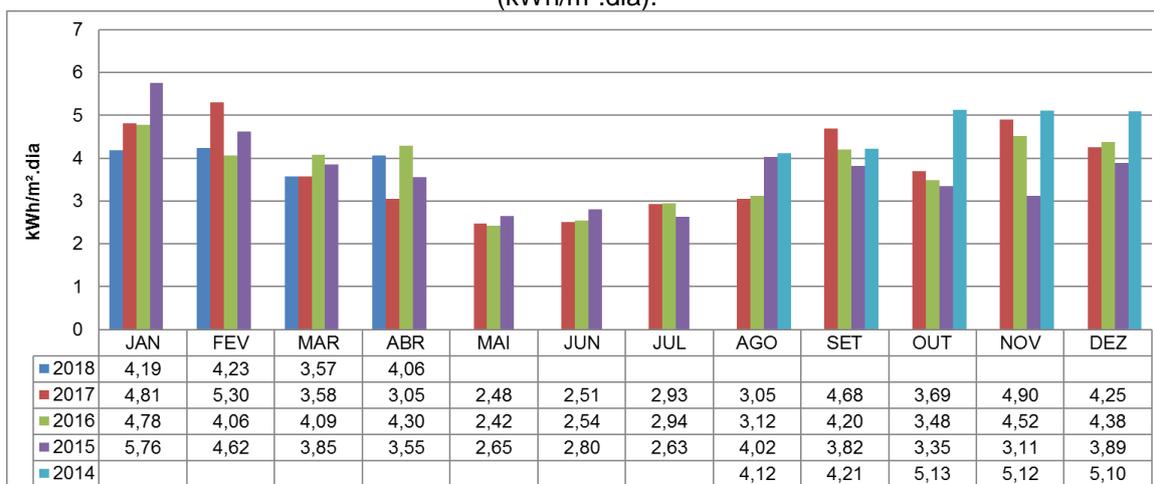
Tabela 2 - Exemplo de dados de irradiância fornecidos pelo Simepar.

Ano	Mês	Dia	Hora	Irradiância
2018	02	01	12:00:00	529,1
2018	02	01	12:15:00	478,8
2018	02	01	12:30:00	539,3
2018	02	01	12:45:00	652,6

Fonte: As autoras (2018).

Para chegar na irradiação diária, primeiramente foi calculado a média de irradiância em cada hora. No exemplo da tabela 2, a média na hora é 549,95  $W/m^2$ . Para obter a irradiação diária, as 24 médias de irradiância do dia foram integradas no tempo e assim foi obtido o valor da irradiação diária em  $Wh/m^2$ . Em seguida, para que os cálculos de índices de mérito pudessem ser realizados mensalmente, foi calculado a irradiação média diária mensal e os resultados foram obtidos em  $kWh/m^2.dia$ . Os valores resultantes estão apresentados no gráfico da figura 25.

Figura 25 - Irradiação média diária mensal no plano horizontal fornecida pelo Simepar (kWh/m<sup>2</sup>.dia).



Fonte: As autoras (2018).

O sistema instalado possui um medidor de irradiância posicionado ao lado dos módulos fotovoltaicos e um de temperatura que fica embaixo de um dos módulos. Essas informações são coletadas e enviadas para a plataforma do inversor. Devido às falhas nesses dispositivos, parte desses dados foram perdidos, impossibilitando a utilização dos mesmos nesse estudo. Na figura 26 é mostrado esse sensor que já está medindo a irradiância no plano inclinado, pois está na mesma estrutura das placas.

Figura 26 – Sensor de irradiância e temperatura instalado junto ao sistema.



Fonte: As autoras (2018).

Para a confirmação da conformidade desses dados, foram comparados a irradiação de alguns dias com a irradiação fornecida pelo Simepar. O resultado é mostrado no capítulo 3.4.

### 3.3.2.2 Irradiação no plano inclinado

A irradiação, obtida a partir dos dados coletados do Simepar, corresponde à irradiação incidente no plano horizontal. Como as placas instaladas no telhado do DELT estão inclinadas  $6^\circ$  e orientados  $21^\circ$  em relação ao norte geográfico, é necessário ajustar os dados para se obter a irradiação real que incide no plano dos módulos fotovoltaicos.

Para o cálculo da taxa de desempenho, o valor de irradiação utilizado na equação 3, deve ser no plano inclinado e para adequar os valores da tabela da figura 24, é utilizado um software disponibilizado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) chamado Radasol. Na figura 27 é mostrada a interface inicial do programa na qual são inseridos o país e a localidade da estação meteorológica da região estudada e desta forma o programa insere automaticamente a média de irradiação dos últimos 12 meses.

Figura 27 - Interface inicial do programa Radasol.

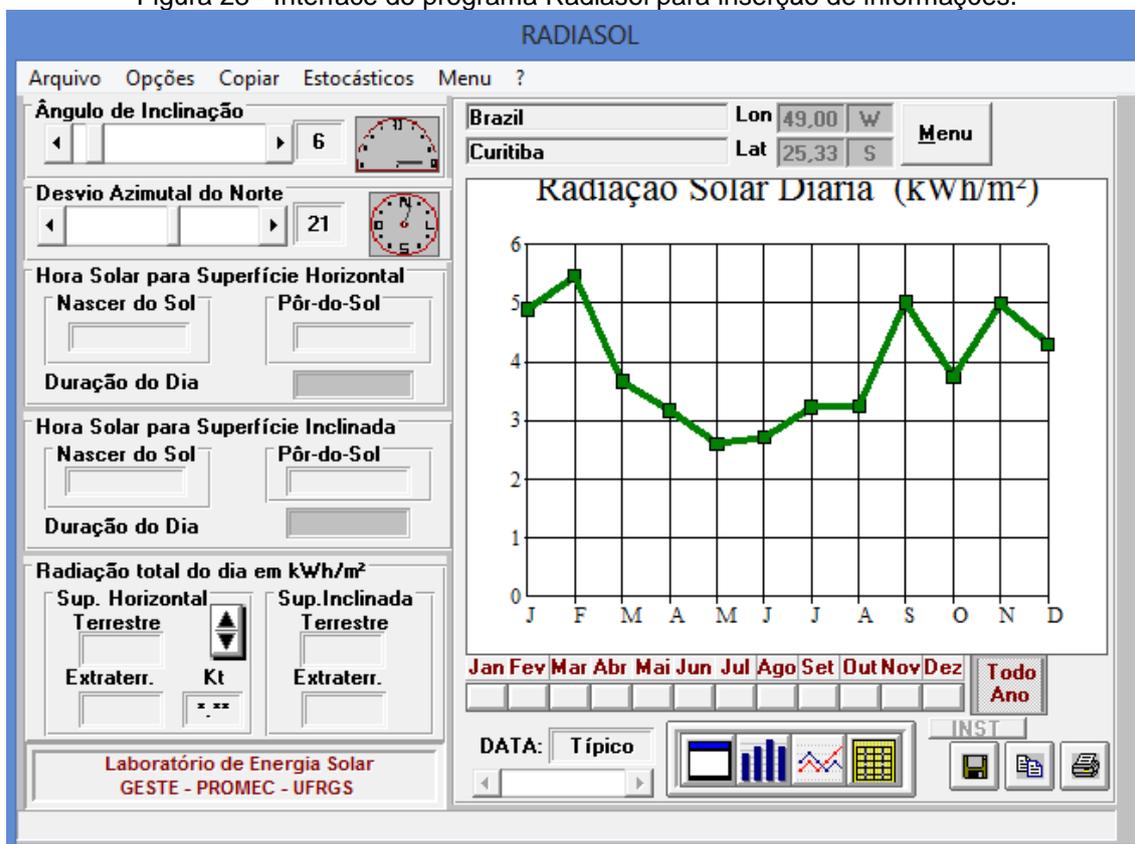
Latitude		N/S:		Longitude		E/W:					
25,33		S		49,00		W					
JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
4,81	5,30	3,58	3,05	2,48	2,51	2,93	3,05	4,68	3,69	4,90	4,25
Radiação em kWh/m <sup>2</sup>											

Fonte: As autoras (2018).

Como é necessário a utilização dos dados históricos de irradiação, mostrados na figura 24, esses dados foram inseridos manualmente para a determinação da irradiação no plano inclinado mês a mês desde agosto de 2014, na época da instalação do sistema.

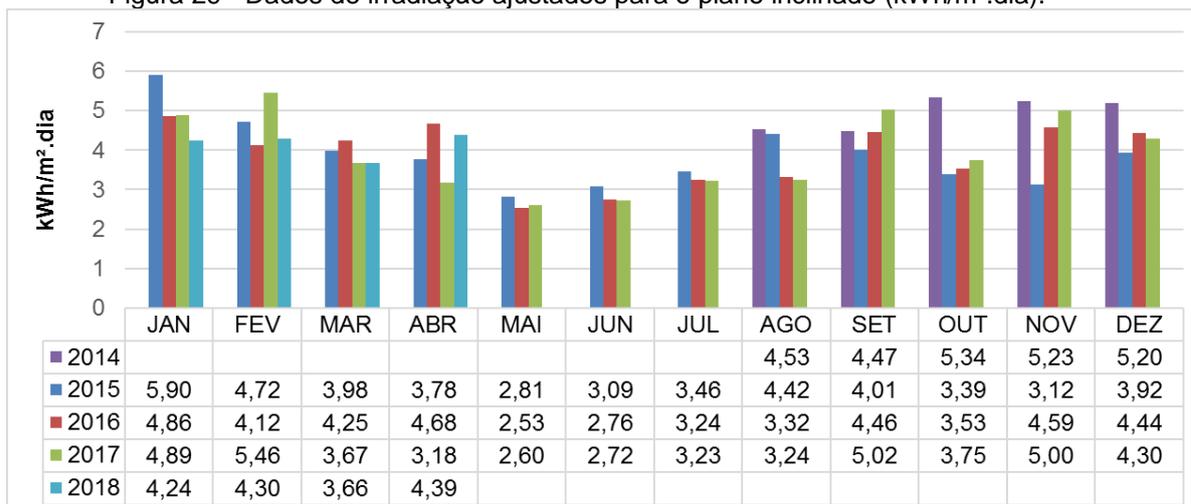
Outras variáveis necessárias são a inclinação dos módulos fotovoltaicos e a orientação deles em relação ao norte geográfico e assim, é possível gerar um gráfico e tabela com informações de irradiação ajustada para o plano inclinado como é mostrado na figura 28.

Figura 28 - Interface do programa Radiasol para inserção de informações.



Fonte: As autoras (2018).

Os dados resultantes do programa são mostrados no gráfico da figura 29 na qual é possível notar que os valores aumentaram em comparação aos dados da irradiação no plano horizontal, devido à inclinação e orientação dos módulos. Com esses dados e a produtividade calculada anteriormente, é calculado então a taxa de desempenho do sistema.

Figura 29 - Dados de irradiação ajustados para o plano inclinado (kWh/m<sup>2</sup>.dia).

Fonte: As autoras (2018).

### 3.3.3 Fator de capacidade

O fator de capacidade consiste na relação da geração real do sistema e a energia gerada supondo que o sistema operasse na sua potência nominal durante um período de 24 horas e considerando o número de dias do mês, conforme a equação 4 (TONIN, 2017). Esse índice também é expresso em porcentagem (%).

$$FC = \frac{\text{Energia Gerada}}{\text{Potência FV} \times 24h \times n^{\circ} \text{ dias}} (\%) \quad (4)$$

## 3.4 ANÁLISES E RESULTADOS

### 3.4.1 Índices de mérito

Para obtenção do *yield*, os valores de geração de energia mostrados na tabela da figura 24 foram todos divididos por 3,48 kWp, o valor da potência total instalada do sistema já explicado anteriormente. Os resultados encontrados estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3 - Produtividade ou *yield* (kWh/kWp).

	2018	2017	2016	2015	2014
JAN	117,59	123,89	130,29	143,14	
FEV	116,74	123,64	108,77	107,98	
MAR	111,83	100,30	114,71	104,41	
ABR	120,81	85,06	96,60	95,13	
MAI		72,53	72,80	77,28	
JUN		76,34	76,51	78,41	
JUL		88,39	90,41	73,75	
AGO		42,14	94,29	108,59	83,35
SET		115,74	120,43	100,06	108,78
OUT		99,84	102,34	98,67	136,09
NOV		120,98	118,13	71,60	127,00
DEZ		109,28	116,40	111,27	127,67

Fonte: As autoras (2018).

Para o cálculo da *performance ratio*, é utilizado o valor da produtividade já calculada anteriormente na tabela 3 e a irradiação no plano inclinado apresentada na tabela da figura 29, conforme mostrado na equação 3. Como os dados de irradiação estão em kWh/m<sup>2</sup>.dia, é necessário dividir o valor encontrado pelo número de dias de cada mês. Os resultados de *performance ratio* obtidos são apresentados na tabela 4.

Tabela 4 - Taxa de desempenho (%).

	2018	2017	2016	2015	2014
JAN	89,55%	81,66%	86,50%	78,25%	
FEV	96,92%	80,82%	94,29%	81,64%	
MAR	98,48%	88,13%	87,09%	84,71%	
ABR	91,67%	89,30%	68,86%	84,00%	
MAI		89,91%	92,78%	88,62%	
JUN		93,66%	92,50%	84,53%	
JUL		88,36%	90,04%	68,86%	
AGO		42,02%	91,59%	79,28%	59,37%
SET		76,91%	89,98%	83,13%	81,08%
OUT		85,86%	93,65%	93,98%	82,22%
NOV		80,72%	85,83%	76,52%	80,91%
DEZ		81,98%	84,64%	91,47%	79,22%

Fonte: As autoras (2018).

Pode-se observar que os resultados dos meses de 2018 apresentam resultados superiores em comparação com os resultados obtidos nos anos anteriores. Isso se dá provavelmente devido à limpeza realizada nos módulos, que será melhor explicada no capítulo 4.

E finalmente, o fator de capacidade do sistema fotovoltaico que foi calculado a partir da equação 4, resultando nos dados apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Fator de capacidade (%).

	2018	2017	2016	2015	2014
JAN	15,81%	16,65%	17,51%	19,24%	
FEV	17,37%	18,40%	16,19%	16,07%	
MAR	15,03%	13,48%	15,42%	14,03%	
ABR	16,78%	11,81%	13,42%	13,21%	
MAI		9,75%	9,78%	10,39%	
JUN		10,60%	10,63%	10,89%	
JUL		11,88%	12,15%	9,91%	
AGO		5,66%	12,67%	14,59%	11,20%
SET		16,07%	16,73%	13,90%	15,11%
OUT		13,42%	13,76%	13,26%	18,29%
NOV		16,80%	16,41%	9,94%	17,64%
DEZ		14,69%	15,65%	14,96%	17,16%

Fonte: As autoras (2018).

#### 3.4.1.1 Comparação dos índices de mérito calculados com outros trabalhos

Para entender se os dados calculados são adequados e se a performance do sistema está como esperado, foram escolhidos dois trabalhos, os quais foram calculados os IMs de determinados sistemas fotovoltaicos. Ambos estão localizados em Curitiba-PR igualmente ao gerador FV estudado neste trabalho.

Um dos sistemas comparados está localizado dentro da Copel na Rua José Izidoro Biazetto, nº 158 no bairro Mossunguê que é apresentado na figura 30. Este gerador possui 20 módulos de 70 Wp, somando uma potência instalada de 1,4 kWp, inclinados 24° e com azimute de 0° (ODAKE, 2017). No estudo feito, foram calculados os índices de mérito para o ano de 2015.

Figura 30 - Sistema fotovoltaico instalado na Copel.



Fonte: ODAKE (2017).

O outro sistema fotovoltaico está localizado na Rua João Parolin, nº 295, na empresa ELCO que trabalha com soluções na área da engenharia elétrica. Esse gerador é composto por 36 módulos de 240 Wp inclinados  $20^\circ$  e com orientação de  $32^\circ$  em relação ao norte geográfico, somando uma potência instalada de 8,64 kWp (TONIN, 2017), conforme mostrado na figura 31. Esse gerador começou a operar no começo do ano de 2012 e no estudo realizado foram calculados os índices de mérito para o ano de 2013 até 2016.

Figura 31 - Sistema fotovoltaico instalado na ELCO.



Fonte: TONIN (2017).

Primeiramente foram comparados os IMs com os dados resultantes do estudo feito no sistema da Copel. A tabela 6 mostra essa comparação. Alguns meses ficaram faltantes devido ao desligamento do sistema ou falha no envio dos dados de geração de energia durante esses períodos.

Os valores resultantes de produtividade do sistema conectado ao DELT e o da Copel ficaram aproximados. Desta forma, foi verificado que os dados do sistema, estudado neste trabalho, estão apropriados e podem ser utilizados no estudo de comparação. A diferença da média dos meses comparados, ou seja, de fevereiro até outubro, teve como resultado uma produtividade 4% maior no sistema conectado ao DELT.

Tabela 6 - Comparação entre a Produtividade do sistema conectado ao DELT e a do sistema da Copel (kWh/kWp).

2015	Sistema do DELT	Sistema da COPEL
Janeiro	143,14	-
Fevereiro	107,98	102,14
Março	104,41	95,45
Abril	95,13	93,68
Maio	77,28	74,85
Junho	78,41	80,73
Julho	73,75	75,70
Agosto	108,59	115,36
Setembro	100,06	93,54
Outubro	98,67	82,08
Novembro	71,60	-
Dezembro	111,27	-
<b>Média (fev - out)</b>	<b>93,81</b>	<b>90,39</b>
<b>Média Total</b>	<b>97,52</b>	-

Fonte: As autoras (2018).

A comparação dos dados da taxa de desempenho, mostrado na tabela 7, foi bastante animadora, já que para o sistema conectado ao DELT, a média dos meses comparados ficou 15% superior que a média de valores do sistema da Copel.

Nota-se, que entre os meses de fevereiro até junho, a taxa de desempenho do sistema conectado ao DELT se manteve com uma média de 84,70%, enquanto o sistema da Copel apresentou variações consideráveis e resultados inferiores com uma média de 68,09% para esse mesmo intervalo. Além disso, o sistema da Copel apresentou um valor muito baixo no mês de outubro e esse pode ser resultado de alguma falha ou desligamento do sistema.

Tabela 7 - Comparação da taxa de desempenho do sistema conectado ao DELT e ao da Copel (%).

2015	Sistema do DELT	Sistema da COPEL
Janeiro	78,25%	-
Fevereiro	81,64%	70,97%
Março	84,71%	64,41%
Abril	84,00%	71,13%
Maio	88,62%	62,39%
Junho	84,53%	71,57%
Julho	68,86%	61,82%
Agosto	79,28%	84,39%
Setembro	83,13%	72,01%
Outubro	93,98%	55,05%
Novembro	76,52%	-
Dezembro	91,47%	-
<b>Média (fev - out)</b>	<b>83,19%</b>	<b>68,19%</b>
<b>Média Total</b>	<b>82,92%</b>	-

Fonte: As autoras (2018).

A diferença da média do fator de capacidade, mostrado na tabela 8, resultou uma superioridade de 0,47% do sistema conectado ao DELT. De acordo com Benedito (2009), o fator de capacidade de sistemas fotovoltaicos brasileiros fica entre 13% e 18% variando conforme a disponibilidade de irradiação solar. Percebe-se que a irradiação influencia diretamente a geração de energia, o que é refletido no fator de capacidade do sistema, ou seja, em regiões com maior irradiação o fator de capacidade é proporcionalmente maior. Constata-se que em ambos os sistemas, alguns meses tiveram resultados inferiores a 13%, o que é insatisfatório. Porém, percebe-se que a média quando considerado o ano inteiro do sistema conectado ao DELT ultrapassa os 13%.

Tabela 8 - Comparação da fator de capacidade do sistema conectado ao DELT e ao da Copel (%).

2015	Sistema do DELT	Sistema da COPEL
Janeiro	19,24%	-
Fevereiro	16,07%	15,20%
Março	14,03%	12,83%
Abril	13,21%	13,01%
Maio	10,39%	10,06%
Junho	10,89%	11,21%
Julho	9,91%	10,17%
Agosto	14,59%	15,51%
Setembro	13,90%	12,99%
Outubro	13,26%	11,03%
Novembro	9,94%	-
Dezembro	14,96%	-
<b>Média (fev - out)</b>	<b>12,92%</b>	<b>12,45%</b>
<b>Média Total</b>	<b>13,37%</b>	-

Fonte: As autoras (2018).

Agora, comparando com o sistema instalado na ELCO, os dados resultantes dos cálculos de índices de mérito para o ano de 2014 até 2016, estão apresentados na tabela 9.

Em 2014, não foi considerado o mês de agosto nas comparações pois como o sistema estudado foi instalado no dia 8, o valor de geração ficou conseqüentemente menor. Nessa comparação foram considerados os meses de setembro até dezembro e a média da produtividade ficou 16% maior no sistema conectado ao DELT. Esse melhor desempenho pode ser reflexo da recente instalação do sistema do DELT, resultando em boas condições do sistema como um todo.

No ano de 2015 a média da produtividade teve como resultado aproximadamente 97,50 (kwh/kWp) para ambos os sistemas fotovoltaicos, com diferença de 0,02% que pode ser desconsiderada. Da mesma forma, em 2016 o sistema conectado à ELCO apresentou um valor apenas 1,01% superior.

Tabela 9 - Comparação entre a Produtividade do sistema conectado ao DELT com o sistema da ELCO (kWh/kWp).

Mês	2014		2015		2016	
	DELT	ELCO	DELT	ELCO	DELT	ELCO
Janeiro	-	111,80	143,14	123,40	130,29	117,61
Fevereiro	-	108,45	107,98	94,93	108,77	98,29
Março	-	87,47	104,41	94,89	114,71	105,10
Abril	-	80,72	95,13	91,85	96,60	124,49
Maio	-	83,27	77,28	84,46	72,80	62,05
Junho	-	78,18	78,41	91,30	76,51	81,27
Julho	-	82,19	73,75	83,99	90,41	103,40
Agosto	83,35	112,88	108,59	120,26	94,29	104,48
Setembro	108,78	89,26	100,06	101,45	120,43	129,13
Outubro	136,09	119,54	98,67	88,54	102,34	102,66
Novembro	127,00	110,23	71,60	77,63	118,13	115,63
Dezembro	127,67	110,69	111,27	117,83	116,40	110,19
<b>Média</b>	<b>124,88</b>	<b>107,43</b>	<b>97,52</b>	<b>97,54</b>	<b>103,47</b>	<b>104,53</b>

Fonte: As autoras (2018).

A taxa de desempenho do sistema conectado ao DELT, mostrado na tabela 10, se manteve superior nos anos comparados. Em 2014 essa diferença atingiu 13,92%, enquanto em 2015 e 2016, esta diferença foi de 5,23% e 8,51% respectivamente.

Tabela 10 - Comparação entre a taxa de desempenho do sistema conectado ao DELT e a do sistema da ELCO (%).

Mês	2014		2015		2016	
	DELT	ELCO	DELT	ELCO	DELT	ELCO
Janeiro		59,96%	78,25%	67,81%	86,50%	71,12%
Fevereiro		72,58%	81,64%	70,02%	94,29%	73,52%
Março		62,84%	84,71%	74,17%	87,09%	75,00%
Abril		81,74%	84,00%	77,42%	68,86%	82,50%
Maio		82,76%	88,62%	90,25%	92,78%	72,00%
Junho		90,49%	84,53%	90,55%	92,50%	94,06%
Julho		77,50%	68,86%	87,85%	90,04%	88,95%
Agosto	59,37%	77,95%	79,28%	80,77%	91,59%	87,77%
Setembro	81,08%	64,23%	83,13%	79,04%	89,98%	80,61%
Outubro	82,22%	64,72%	93,98%	75,82%	93,65%	79,23%
Novembro	80,91%	70,23%	76,52%	62,30%	85,83%	76,32%
Dezembro	79,22%	68,56%	91,47%	76,25%	84,64%	74,52%
<b>Média</b>	<b>80,86%</b>	<b>66,94%</b>	<b>82,92%</b>	<b>77,69%</b>	<b>88,15%</b>	<b>79,63%</b>

Fonte: As autoras (2018).

Na tabela 11 são apresentados os dados calculados do fator de capacidade. Esses se mantiveram nos limites citados anteriormente (entre 13%

e 18%). Em 2014 o sistema fotovoltaico conectado ao DELT se mostrou bastante superior, com uma diferença de 2,38%. Nos anos seguintes ambos os sistemas apresentaram resultados muito parecidos com disparidade insignificante.

Tabela 11 - Comparação entre a fator de capacidade do sistema conectado ao DELT e a do sistema da ELCO (%).

Mês	2014		2015		2016	
	DELT	ELCO	DELT	ELCO	DELT	ELCO
Janeiro		15,03%	19,24%	16,59%	17,51%	15,81%
Fevereiro		16,14%	16,07%	14,13%	16,19%	14,12%
Março		11,76%	14,03%	12,75%	15,42%	14,13%
Abril		11,21%	13,21%	12,76%	13,42%	17,29%
Maio		11,19%	10,39%	11,35%	9,78%	8,34%
Junho		10,86%	10,89%	12,68%	10,63%	11,29%
Julho		11,05%	9,91%	11,29%	12,15%	13,90%
Agosto	11,20%	15,17%	14,59%	16,16%	12,67%	14,04%
Setembro	15,11%	12,40%	13,90%	14,09%	16,73%	17,93%
Outubro	18,29%	16,07%	13,26%	11,90%	13,76%	13,80%
Novembro	17,64%	15,31%	9,94%	10,78%	16,41%	16,06%
Dezembro	17,16%	14,88%	14,96%	15,84%	15,65%	14,81%
<b>Média</b>	<b>17,05%</b>	<b>14,67%</b>	<b>13,37%</b>	<b>13,36%</b>	<b>14,19%</b>	<b>14,29%</b>

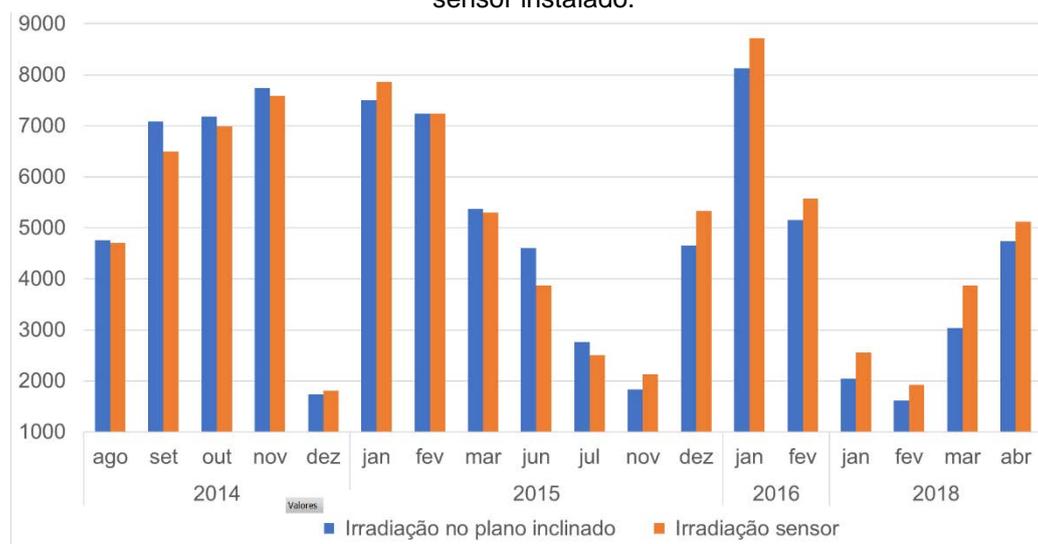
Fonte: As autoras (2018).

### 3.4.2 Comparação da irradiação do sensor e do Simepar

Através de uma varredura feita ao longo dos anos desde que o sensor de irradiação foi instalado, foi constatado que muitos meses tiveram suas medições perdidas devido a alguma falha e, portanto, esses dados não puderam ser utilizados. Alguns meses apresentaram apenas um dia de medição, o ano de 2017 por exemplo, não teve nenhuma medição e só depois da limpeza e manutenção do dia 23 de janeiro de 2018 o sensor voltou a funcionar normalmente.

Para verificar se os dados deste sensor de irradiação estão conforme os fornecidos pelo Simepar, foram comparados dados de irradiação no plano inclinado de alguns dias com os dados obtidos do sensor, que já está fazendo a medição no plano inclinado. Dessa forma, foi possível plotar o gráfico da figura 32.

Figura 32 - Comparação dos dados de irradiação no plano inclinado do SIMEPAR com a do sensor instalado.



Fonte: As autoras (2018).

É possível observar que um gráfico acompanha o outro, porém, existe uma discrepância considerável e com diferenças de valor inconstantes que vão de 0,06% até 25,35% ao longo das medições escolhidas. A partir dessas informações, consideramos as medições, fornecidas pelo sensor conectado ao inversor, pouco confiáveis para uso em estudos.

## 4 ANÁLISE DA EFICÁCIA DA LIMPEZA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

### 4.1 METODOLOGIA

Conforme foi apresentado na seção 2.6.5, os módulos fotovoltaicos estão constantemente expostos à poluição atmosférica, chuvas, poeira, entre outros fatores que afetam a eficiência do painel. No início da execução deste trabalho, a empresa responsável pelo projeto, instalação e manutenção do sistema foi contatada para melhor entendimento do histórico do sistema. Durante essas conversas, foi constatado que os módulos fotovoltaicos só haviam sido limpos uma vez, um ano após a instalação dos mesmos, isso é, em meados de agosto de 2015. Com isso, havia aproximadamente dois anos e meio que os módulos não passavam por qualquer tipo de manutenção. A figura 33 mostra o acúmulo de sujeira nas placas e também uma sujeira residual de maior aderência (excremento de pássaros) que afetam a geração de energia das placas.

Figura 33 - Sujeira depositada nos módulos antes da limpeza.



Fonte: As autoras (2018).

Tendo em vista este contexto, foi decidido que a empresa EGNEX seria contratada para fazer a limpeza dos painéis. A limpeza ocorreu no dia 23 de

janeiro de 2018 e foi utilizado somente água e um pano úmido, que é a recomendação dada por todos os fabricantes de módulos. Não é indicado a utilização de nenhum tipo de alvejante ou produto químico pois estes podem manchar a superfície das placas. A figura 34 mostra uma foto do momento da limpeza dos módulos. Enquanto a limpeza acontecia, foi possível visualizar claramente a quantidade de sujeira que estava depositada na superfície.

Figura 34 - Momento da limpeza dos módulos.



Fonte: As autoras (2018).

O objetivo de realizar a limpeza dos módulos é verificar se a sujeira acumulada sobre as placas, seja essa resultante de poeira, material particulado ou outros resíduos está prejudicando o funcionamento das placas, gerando assim menos energia do que o esperado. Para fazer a análise comparativa, serão utilizados os dados de irradiação solar diária no plano horizontal disponível ( $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$ ) e a energia gerada por dia ( $\text{kWh}$ ).

## 4.2 ANÁLISES E RESULTADOS

### 4.2.1 Análise da taxa de desempenho para avaliação da eficácia da limpeza

Dentre os índices de mérito explicados anteriormente, o único que tem relação com a irradiação disponível e a geração de energia é a taxa de desempenho, ou seja, é possível ponderar se a maior quantidade de energia

gerada é resultado de uma maior irradiação que incidiu sobre as placas ou se a limpeza fez com que a célula absorvesse a irradiação de forma mais eficiente.

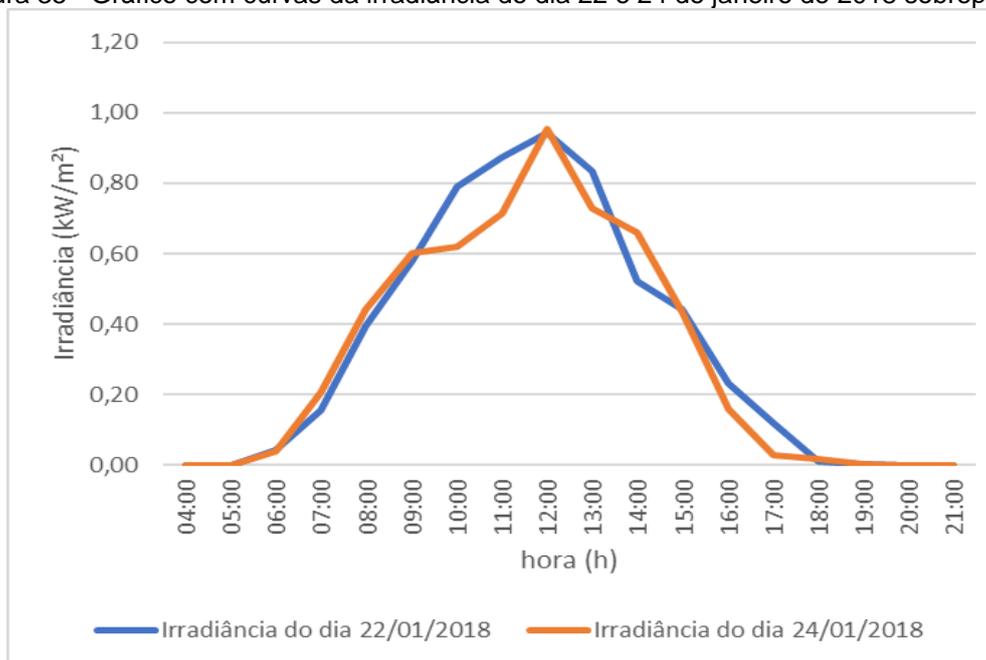
Analisando novamente os resultados apresentados na tabela 4, observa-se na média um aumento de aproximadamente 10% da taxa de desempenho de 2018, em relação à média dos anos anteriores. Desta forma, comprova-se que a limpeza gerou resultados bastante positivos na performance do sistema.

#### 4.2.2 Análise comparativa entre o dia precedente e posterior à limpeza

A limpeza ocorreu no dia 23 de janeiro de 2018, então, foram analisados os dias 22 e 24 para verificar essa diferença imediata da geração de energia elétrica.

O dia 22 teve uma irradiação média de 5,94 kWh/(m<sup>2</sup>.dia), enquanto o dia 24 teve uma irradiação média de 5,60 kWh/(m<sup>2</sup>.dia), ou seja, no dia anterior à limpeza, a média de irradiação foi maior. A figura 35 mostra as curvas sobrepostas com os dados de irradiação ao longo do dia.

Figura 35 - Gráfico com curvas da irradiação do dia 22 e 24 de janeiro de 2018 sobrepostas.

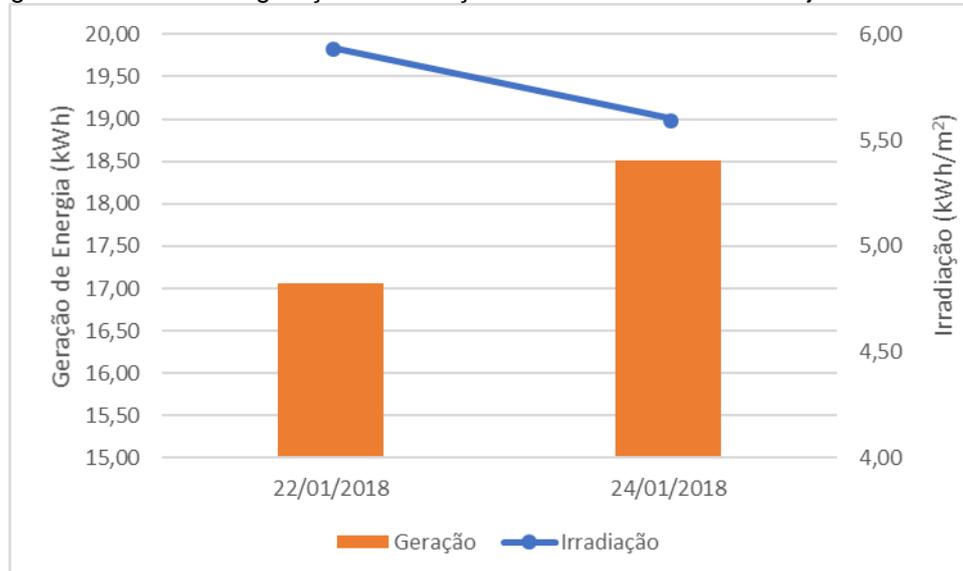


Fonte: As autoras (2018).

As curvas de geração nos dias analisados são mostradas na figura 37. No dia posterior à limpeza, o total de energia gerada foi 8,52% superior em relação ao dia anterior à mesma, mesmo com a média de irradiação sendo 5,97%

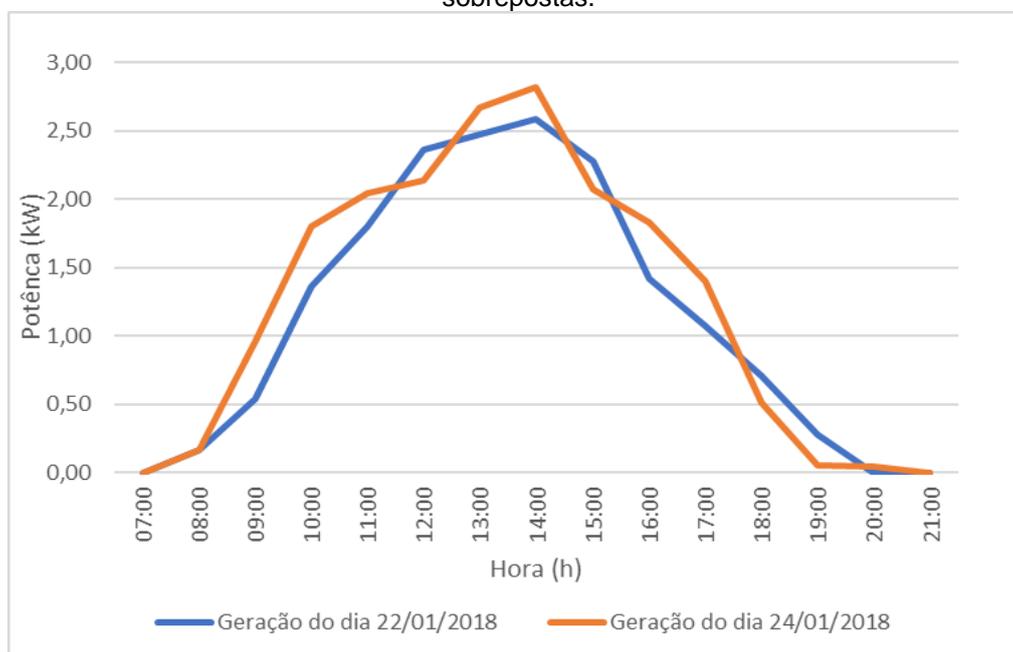
inferior. O gráfico mostrando o total de energia gerada e a irradiação disponível no dia estão apresentados na figura 36.

Figura 36 - Gráfico da geração e irradiação total dos dias 22 e 24 de janeiro de 2018.



Fonte: As autoras (2018).

Figura 37- Gráfico com curvas da geração de energia do dia 22 e 24 de janeiro de 2018 sobrepostas.



Fonte: As autoras (2018).

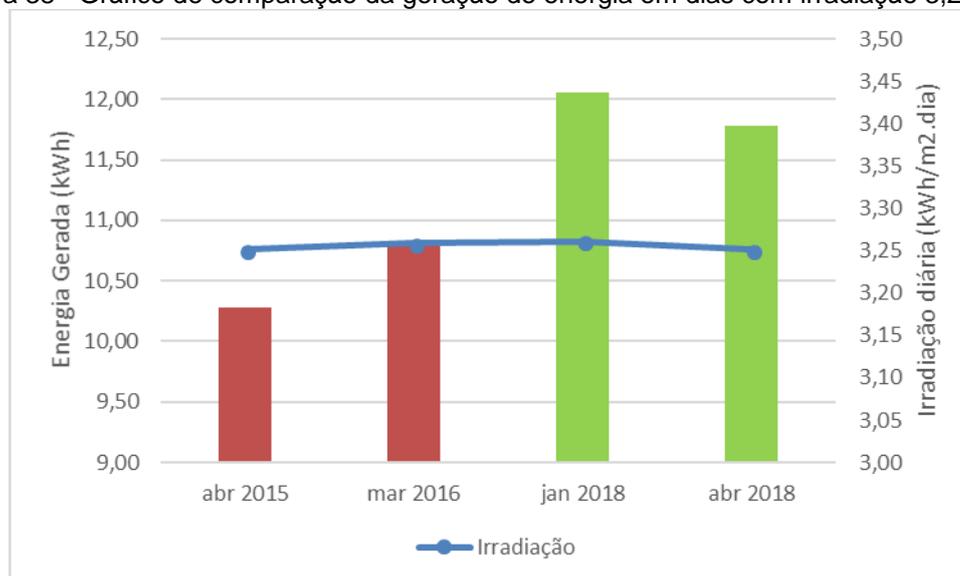
Além disso, o pico de geração no dia posterior à limpeza atingiu 2,82 kWh, valor 9,21% superior ao dia anterior à mesma.

#### 4.2.3 Análise comparativa entre dias com irradiações médias semelhantes para análise da eficácia da limpeza

Para fazer a análise da diferença da quantidade de energia gerada antes e após a limpeza, foram selecionados dias em que a irradiação diária disponível foi similar e foram comparadas a quantidade de energia gerada durante esses dias. É importante salientar que devido à variação que ocorre da posição do Sol durante as diferentes estações do ano, foram escolhidas datas de um período com no máximo 4 meses de diferença entre si para que não haja influência significativa nas análises.

Para fazer a análise da limpeza feita em janeiro de 2018, foram selecionados os meses de janeiro a abril de 2015 a 2018. A primeira análise apresentada no gráfico da figura 38 mostra na linha azul a irradiação disponível nos dias escolhidos, aproximadamente 3,20 kWh, e nas barras a energia gerada nesses respectivos dias. As barras em verde mostram os dias após a limpeza e as vermelhas são anteriores a limpeza.

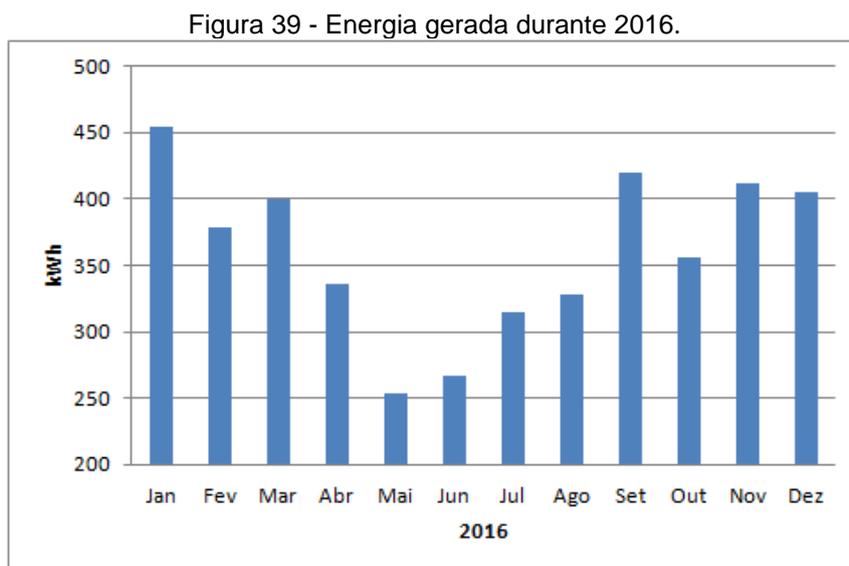
Figura 38 - Gráfico de comparação da geração de energia em dias com irradiação 3,20 kWh.



Fonte: As autoras (2018).

Ao compararmos a energia gerada em janeiro de 2018, após a limpeza, com abril de 2015 e março de 2016 encontra-se respectivamente um aumento de 15% e 10%. É perceptível também que no mês de abril de 2018, houve uma redução de 3% com relação à geração de janeiro, considerando a mesma irradiação diária disponível. Isso pode ser interpretado de duas maneiras

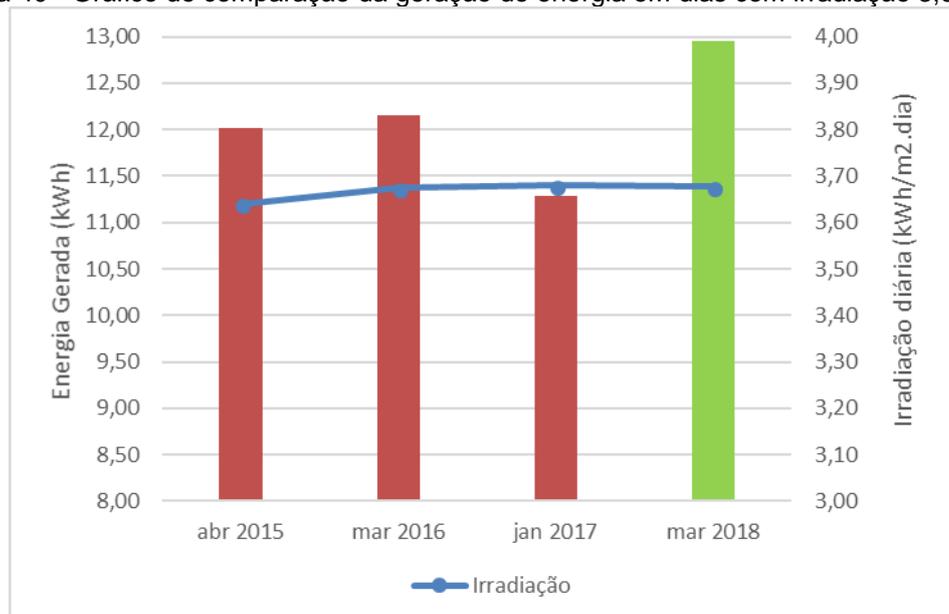
diferentes: a primeira hipótese é que a placa já estava voltando a acumular sujeira e isso já estava prejudicando a geração. Porém, a redução também pode ser devido à posição do Sol, já que o aproveitamento do Sol de acordo com sua posição é menor quanto mais próximo dos meses de inverno. A figura 39 mostra a curva de potência do ano de 2016, onde é possível ver com clareza o efeito da redução da geração de energia nos meses de inverno.



Fonte: As autoras (2018).

A segunda análise que será apresentada é relacionada aos dias com irradiação diária de 3,60 kWh. A figura 40 mostra o gráfico com irradiação e geração de energia gerada da mesma forma como foi apresentada a situação anterior. Neste caso, a geração de energia após a limpeza foi aproximadamente 7% maior, quando comparada com os anos de 2015 e 2016 e chega a aproximadamente 15% quando comparado com 2017. Nessa análise, pode-se dizer que a geração em janeiro de 2017 foi menor pois a placa estava mais suja do que em abril de 2015 (8 meses após a instalação do sistema) e do que em março de 2016 (7 meses após a limpeza supostamente feita em agosto de 2015).

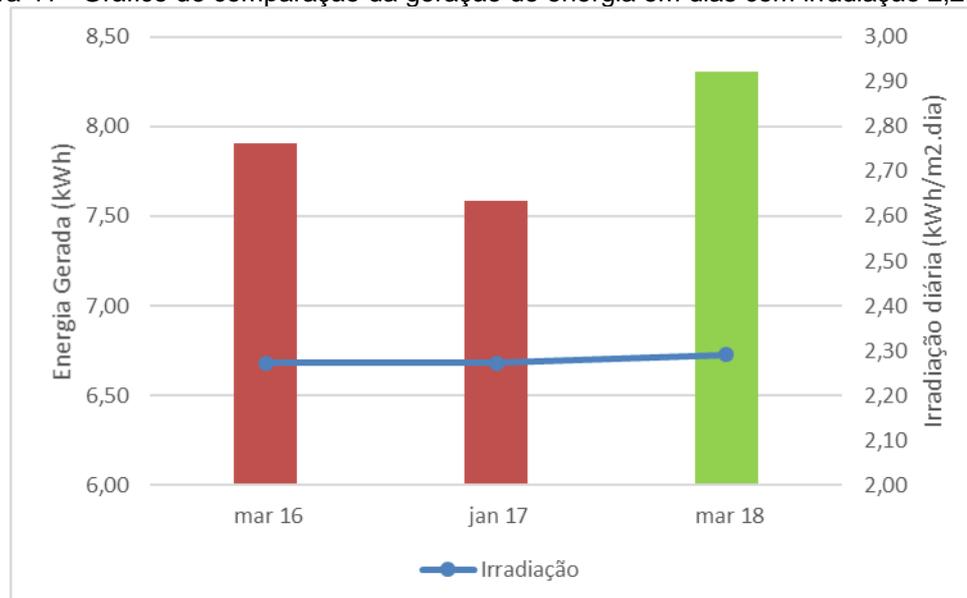
Figura 40 - Gráfico de comparação da geração de energia em dias com irradiação 3,60 kWh.



Fonte: As autoras (2018).

A análise comparativa que será apresentada a seguir, na figura 41, mostra os dados de dias que tiveram irradiação aproximada de 2,20 kWh. Este é mais um caso que demonstra que o período que os módulos não foram limpos foram prejudiciais à geração de energia. Em março de 2016, havia 7 meses que a limpeza tinha acontecido e é possível ver uma diferença de mais de 5% em comparação a março de 2018, quando a limpeza tinha ocorrido em menos de 60 dias. Essa diferença é ainda mais discrepante quando comparada à geração em janeiro de 2017, aproximadamente 9% a menos de geração.

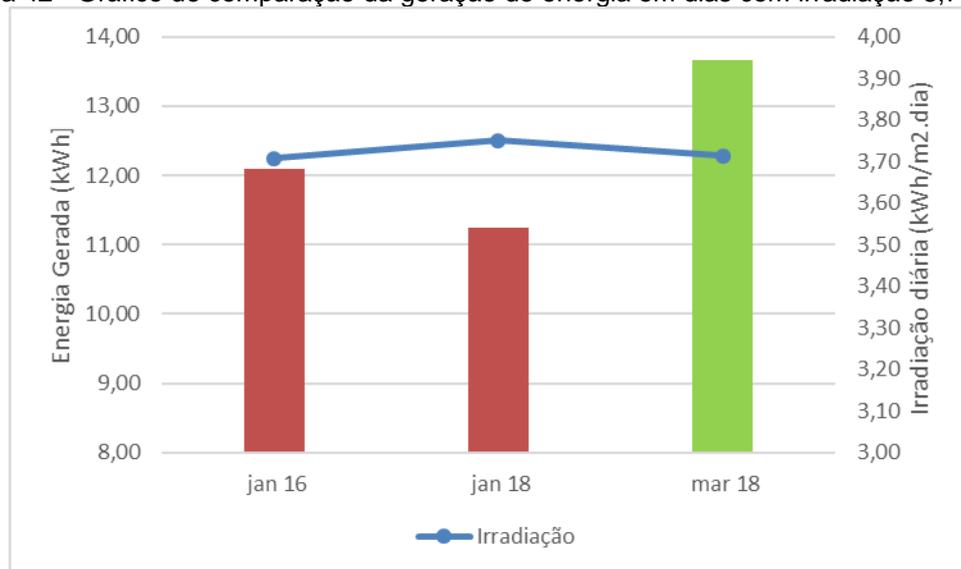
Figura 41 - Gráfico de comparação da geração de energia em dias com irradiação 2,20 kWh.



Fonte: As autoras (2018).

A próxima análise, apresentada da mesma forma que as anteriores na figura 42, mostra os dados comparativos com irradiação diária de 3,70 kWh. Esta comparação mostra um comportamento similar ao apresentado com dias de irradiação de 2,20 kWh. A diferença encontrada aqui é de aproximadamente 21% de aumento da geração de energia um mês e meio após a limpeza, quando comparado com dados de janeiro antes da limpeza. A diferença de geração de energia é menor quando comparados os dados de março de 2018 com janeiro de 2016, aproximadamente 13%. Com isso, mais uma vez subentende-se que aproximadamente 6 meses após a limpeza, as placas já não estavam mais suficientemente limpas para gerar a energia esperada e a situação se agrava ainda mais quando se olha para a energia gerada em janeiro antes da limpeza. É possível perceber que depois de um certo tempo, a geração diminui, mas a redução não é proporcional ao tempo sem limpeza.

Figura 42 - Gráfico de comparação da geração de energia em dias com irradiação 3,70 kWh.



Fonte: As autoras (2018).

## 5 CONCLUSÃO

A matriz energética brasileira, hoje predominantemente hídrica, vem ano a ano diversificando cada vez mais as fontes de geração de energia elétrica e principalmente, aumentando a parcela de fontes alternativas de geração, consideradas energias renováveis. Essa diversificação se dá através de incentivos à redução da emissão de gases poluentes, à um melhor aproveitamento dos recursos gerando menos impactos ambientais e também à incentivos ligados a geração de energia distribuída. Dentre as soluções de GD disponíveis no mercado, a geração de energia solar fotovoltaica vem se mostrando como uma das mais viáveis, fato que pode ser verificado com o aumento significativo das instalações de SFCR nos últimos anos.

O constante crescimento do número de instalações de geração distribuída utilizando a tecnologia de geração de energia através de placas fotovoltaicas traz a necessidade de compreender a eficiência dos sistemas já instalados, a fim de verificar se estão se comportando conforme o esperado no projeto, bem como a manutenção necessária para que o investimento seja aproveitado da melhor maneira possível.

O presente trabalho de conclusão de curso, teve como objetivo coletar os dados do sistema fotovoltaico conectado ao DELT, bem como dados solarimétricos que também eram necessários, para então possibilitar a realização de uma análise do aproveitamento e eficiência do sistema através da metodologia de índices de mérito. Adicionalmente, através da limpeza dos módulos fotovoltaicos, foi possível realizar a comparação da eficiência da geração antes e após a limpeza, demonstrando assim a importância de realizar a manutenção periódica das placas fotovoltaicas.

Os índices de mérito, foram calculados mensalmente para o período de agosto de 2014, quando ocorreu a instalação do sistema, até abril de 2018. Considerando os resultados obtidos e as comparações que foram realizadas com dados de outros trabalhos, pode-se dizer que o sistema está operando de maneira eficiente, pois os resultados obtidos do sistema do DELT são muito semelhantes ou até maiores em comparação com os outros dois sistemas e também se mostraram constantes ano após ano, não caracterizando assim um sistema degradado.

A análise da eficácia da limpeza dos módulos trouxe resultados bastante positivos, já que a taxa de desempenho do sistema apresentou resultados melhores com relação aos resultados antes da limpeza e além disso, todos os dias com irradiação diária semelhante analisados, mostraram maior geração de energia nos dias após a limpeza do que comparado com antes a limpeza. As análises foram realizadas com relação à limpeza realizada em janeiro de 2018, a qual era conhecida a data efetiva em que havia ocorrido. Como a empresa responsável pelo projeto e instalação do sistema informou que, uma limpeza havia sido realizada aproximadamente um ano após a instalação do sistema, a mesma análise realizada para os dados com relação a janeiro de 2018 foi feita para o período de um ano após a instalação do sistema, porém, diferentemente da análise feita em 2018, não foi possível evidenciar que a limpeza ocorreu, utilizando a mesma metodologia de comparação de geração com dias de irradiação semelhante.

A análise realizada para verificação dos dados obtidos pelo sensor de irradiância instalado junto ao sistema, demonstrou que existe uma discrepância significativa com relação aos dados obtidos pelo Simepar. Essa diferença chegou a até 25% e por isso, o sensor não foi considerado confiável para fins de estudos acadêmicos, além de não haver frequência de alimentação do banco de dados, fazendo com que diversas informações fossem perdidas.

A realização deste trabalho foi bastante positiva pois mostrou que o sistema está se comportando conforme o esperado e ainda pôde-se verificar que a limpeza periódica das placas é de grande importância para garantir a máxima eficiência do sistema. Além do mais, segue como sugestão para trabalhos futuros, a inclusão da temperatura nas análises da eficácia da limpeza, para que seja verificado como esse fator influencia os resultados.

## REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Atlas da Energia Elétrica**. 2ª edição, 2005. 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: 23 mar. 2018.

ALMEIDA, E.; ROSA, A. C.; DIAS, F. C. L. S.; BRAZ, K. T. M.; LANA, L. T. C.; SANTO, O. C. E.; SACRAMENTO, T. C. B. **Energia Solar Fotovoltaica: Revisão Bibliográfica**. Universidade FUMEC, Departamento de Engenharia Bioenergética, Belo Horizonte - MG, 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 10899 - Energia Solar Fotovoltaica - Terminologia**. Rio de Janeiro - RJ, 2013.

BENEDITO, R. D. 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 - SP, 2009.

BIZZARRI, F.; BRAMBILLA, A.; GRUOSSO, G.; GARDANINI, G. S.; SANGIOVANNI-VINCENTELLI, A.; GAJANI, G. S.; **Modeling and Estimating Yield and Efficiency of Photovoltaic Solar Parks**. University of California, Department of Electrical Engineering and Computer Science, California, 2013.

BOSH. **Instalation and Safety Manual for the c-Si M60(S) NA 30117 and NA 42117 Families of Crystalline Photovoltaic Modules**. 2011. Disponível em <[http://www.bosch-solarenergy.de/media/bosch\\_se\\_serviceorganisation/kundendienst/north\\_america/crystalline\\_solar\\_modules/Bosch\\_Solar\\_Module\\_NA30117\\_NA42117\\_V11\\_29052013.pdf](http://www.bosch-solarenergy.de/media/bosch_se_serviceorganisation/kundendienst/north_america/crystalline_solar_modules/Bosch_Solar_Module_NA30117_NA42117_V11_29052013.pdf)> Acesso em: 15 mar. 2018.

BRAGA, R. P. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamento e Aplicações**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2008.

Centro de Estudos em Economia da Energia, dos Transportes e do Ambiente (CEEETA). **Tecnologias de Micro-Geração e Sistemas Periféricos**. Lisboa, 2001.

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL); Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro - RJ, 2014.

Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB). **Energia Solar Princípios e Aplicações**, 2006.

CHIONCEL, C. P; KOHAKE, D; AUGUSTINOV, L; CHIONCEL, P; TIRIAN, G. **Yield Factors of a Photovoltaic Plant**. University of Timisoara, Faculty of Engineering Hunedoara, Romania, 2010.

Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). **Alternativas Energéticas: uma visão Cemig**. Belo Horizonte - MG, 2012.

DUARTE, M.; BRANDÃO, L.; CARDOSO, V.; SANTOS, W. **Eficiência das Placas Fotovoltaicas Relacionado a Limpeza**. Universidade de Patos de Minas (UNIPAM). Patos de Minas – MG, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Síntese do Relatório Final do Balanço Energético Nacional 2017**. Ministério de Minas e Energia – MME, Brasília – DF, 2018.

FERRANTE, M. **Seleção dos Materiais de Construção Mecânica: Estratégias e Metodologia Básica**. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos – SP, 2000.

FUSANO, R. H. **Análise Dos Índices De Mérito Do Sistema Fotovoltaico Conectado À Rede Do Escritório Verde Da Ufpr**. Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2013.

HICKEL, Bernardo Meyer et al. **Análise da Influência do Acúmulo de Sujeira Sobre Diferentes Tecnologias de Módulos FV: Revisão e Medições de Campo**. Departamento de Engenharia Civil - UFSC, Florianópolis – SC, 2016.

Instituto de Tecnologia do Paraná (TECPAR). **Curitiba apresenta boas condições para energia solar**. Curitiba, 2017. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/curitiba-apresenta-boas-condicoes-para-energia-solar.html>> Acesso em: 21 mar. 2018.

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro). **Tabela de Eficiência Energética – Sistema de Energia Fotovoltaica – Módulos**. 2017. Disponível em: <[http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/tabela\\_fotovoltaico\\_modulo.pdf](http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/tabela_fotovoltaico_modulo.pdf)> Acesso em: 17 mai. 2018.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2.ed. São José dos Campos - SP, 2017.

International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programm (IEA-PVPS). **Analytical Monitoring of Grid-connected Photovoltaic Systems**. 2014.

LIMA, J.J. **Radiação Solar - Aspectos Físicos e Químicos**. - Faculdade de Coimbra, Coimbra, 1992.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. **Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão**. Rio de Janeiro - RJ, 2014.

MACHADO, K. S. V.; CORREA, N. **Análise do Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede elétrica em Curitiba**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba - PR, 2015.

MORI, V.; SANTOS, R. L. C.; SOBRAL, L. G. S. **Metalurgia do silício: processos de obtenção e impactos ambientais**. 1a. ed., CETEM/MCT. Rio de Janeiro - RJ, 2007.

ODAKE, F. T. K.; **Determinação de Índices de Mérito de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede e Instalado na COPEL, com Validação Através de Dados Meteorológicos.** Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Elétrica, Curitiba - PR, 2017.

PEREIRA, F. **Guia de Manutenção de Instalações Fotovoltaicas.** 2012.

PORTAL SOLAR. **Tipos de painel solar fotovoltaico.** Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>> Acesso em: 21 mar. 2018.

PORTAL SOLAR. **Painel Solar no Inverno – Produção Aumenta em Temperaturas Baixas.** Disponível em: < <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/painel-solar/painel-solar-no-inverno---producao-aumenta-em-temperaturas-baixas.html>> Acesso em: 21 mai. 2018.

RAMOS, C. M. – **Procedimentos para caracterização e qualificação de módulos fotovoltaicos.** Dissertação do programa de interunidades de pós-graduação em energia da Universidade de São Paulo - SP, 2006.

RESENDE, N. - **Paraná é mais ‘solar’ do que se pensava, aponta mapa.** Metro Jornal de Curitiba. Curitiba - PR, 2017. Disponível em: <<http://paranaportal.uol.com.br/cidades/parana-e-mais-solar-do-que-se-pensava-aponta-mapa/>> Acesso em: 21 mar. 2018.

REVISTA CIENTÍFICA FAESA - **Influência da Poluição Atmosférica Sobre o Desempenho de Módulos Fotovoltaicos em Vitória, ES.** Vitória - ES, 2013.

ROSA, D. J. M. - **Caracterização da Radiação Solar: O Caso da Cidade Universitária/USP e a Iha do Cardoso/Cananéia.** Dissertação de mestrado - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo - PIPGE/USP, São Paulo – SP, 2003.

SEVERINO, M.; OLIVEIRA, M. **Fontes e Tecnologias de Geração Distribuída para Atendimento a Comunidades Isoladas.** Palmas - TO, 2010.

SINHA, P.; HAYES, W.; LITTMANN, B.; NGAN, L.; ZNAIDI, R. **Environmental variables affecting solar photovoltaic energy generation in Morocco.** Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2014.

TEKHOUSE. **Energia Solar Fotovoltaica.** Disponível em: <<http://www.tekhouse.com.br/?item=energia-solar-fotovoltaica&go=produto&categoriaID=27&subcategoriaID=93&itemID=139>> Acesso em: 13 mar. 2018.

TONIN, F. S. **Caracterização de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, na cidade de Curitiba.** Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba - PR, 2017.

TORRES, R. C. **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais.** Dissertação de mestrado -

Escola de Energia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2012.

URBANETZ JUNIOR, J.; CASAGRANDE JUNIOR, E.; TIEPOLO, G. M. **Acompanhamento do desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica do escritório verde da UTFPR.** IX Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Curitiba – PR, 2014.

VERA, L. H.; KRENZINGER, A. **Análise do Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos Através de Índice de Mérito.** Avances em Energias Renovables y Medio Ambiente Vol.15, 2011.

VILLALVA, M.; GRADELLA, M.; GAZOLI, J. **Energia Solar Fotovoltaica Conceitos e Aplicações.** São Paulo – SP, 2012. Disponível em: <<https://docslide.com.br/download/link/ed81-fasc-energias-renovaveis-cap9>> Acesso em 17 mar. 2018.