

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ENGENHARIA DE ENERGIA

**ESTUDO DA ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA DO
SOFTWARE *PV*SOL* EM SISTEMAS RESIDENCIAIS DE ATÉ 4 KW CONECTADOS Á REDE
ELÉTRICA**

por

VICENTE VELOSO GALLE

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, junho de 2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

**ESTUDO DA ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA DO
SOFTWARE *PV*SOL* EM SISTEMAS RESIDENCIAIS DE ATÉ 4 kW CONECTADOS Á REDE
ELÉTRICA**

por

VICENTE VELOSO GALLE

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues
Coordenadora do Curso de Engenharia de Energia

Orientadora: Profa. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues

Banca examinadora:

| | |
|---------------------------------|----------------------|
| Eng. Augusto Rech | Elysia Energia Solar |
| Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin | DEMEC / UFRGS |
| Prof. Dr. Paulo Smith Schneider | DEMEC / UFRGS |

Porto Alegre, 03 de julho de 2019.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer à minha família, pelo suporte durante toda a minha jornada acadêmica, pelo apoio constante e pela compreensão quando tive que me ausentar. Agradeço meu pai, Carlito Luiz Galle, por me ensinar a questionar tudo, sempre, e por me ensinar que sempre há uma solução criativa a ser encontrada, pra qualquer situação. Quero agradecer minha mãe, Lorita Veloso Galle, pelos experimentos de química depois do almoço, responsáveis por incentivar minha curiosidade pela ciência. Quero agradecer a minha irmã, Cássia Veloso Galle, por sempre me questionar e me oferecer uma visão diferente do mundo, pela sua doçura, pelo seu carinho e pela sua parceria.

Quero agradecer aos 12 amigos que moram comigo, por sempre me apoiarem nesta jornada, por se preocuparem comigo, por dividirem sua vida comigo, por estarem junto, por me levantarem quando eu precisei, por me mostrar que é possível levar uma vida diferente, apesar do que o mundo quer que a gente acredite, que é possível mudar, que estamos em constante desenvolvimento, que está tudo bem errar, que ninguém é perfeito e por me ensinarem a não aceitar nada menos que tudo de bom e do melhor.

Quero agradecer à empresa Elysia Energia Solar, por confiar no meu trabalho e na minha capacidade, por terem me dado uma oportunidade de me desenvolver profissionalmente, pelo suporte que me foi fornecido e pela disponibilidade de me ajudar sempre que precisei.

GALLE, V. V. ESTUDO DA ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA DO SOFTWARE PV*SOL EM SISTEMAS RESIDENCIAIS DE ATÉ 4 kW CONECTADOS Á REDE ELÉTRICA, 2019. 23 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso tem por objetivo fazer uma simulação da geração de energia elétrica em sistemas fotovoltaicos residenciais de até 4 kW através do *software* PV*SOL a fim de compará-los com os dados reais e conferir o quão próximo da realidade está a estimativa do *software*. São escolhidas 7 residências na região da Grande Porto Alegre, com medidas de 2017 e 2018. São coletados os registros de medição da geração de energia solar e são capturadas imagens aéreas com o auxílio de um *drone*. Com as imagens, é construído um modelo tridimensional que é usado no PV*SOL para realizar as simulações, observando a geração de energia estimada para cada residência e os possíveis efeitos de sombreamento que podem vir a ocorrer. Finalmente, são comparados os valores reais de geração com os valores simulados, a fim de verificar a precisão da simulação do software PV*SOL. Foi possível observar que o software teve resultados satisfatórios, porém foram encontradas limitações quando o modelo tridimensional não é bem detalhado e quando há presença de platibandas.

PALAVRAS-CHAVE: Fotovoltaica, PV*SOL, Solar, Simulação

GALLE, V. V., STUDY OF THE PV*SOL SOFTWARE SOLAR ENERGY GENERATION ESTIMATION IN RESIDENTIAL SYSTEMS UP TO 4kW CONNECTED TO THE ELECTRICAL GRID. 2019. 23 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ABSTRACT

The aim of this work is to simulate the generation of electric energy in residential photovoltaic systems of up to 4 kW through the PV*SOL software in order to compare them with the real data and to see how close to reality is the software's estimation. 7 residences are chosen in the Greater Porto Alegre region, with measurements from 2017 and 2018. Measurement records of solar energy generation are collected and aerial images are captured with the help of a drone. With the images, a three-dimensional model is constructed, which is then used in PV*SOL to perform the simulations, observing the estimated energy generation for each residence and the possible shadowing effects that may occur. Finally, the real generation values are compared with the simulated values in order to verify the simulation accuracy of the PV * SOL software. It was possible to observe that the software had satisfactory results, although there were observed limitations with the quality of the 3D models and in the presence of parapets.

KEYWORDS: Photovoltaics, PV*SOL, Solar, Simulation

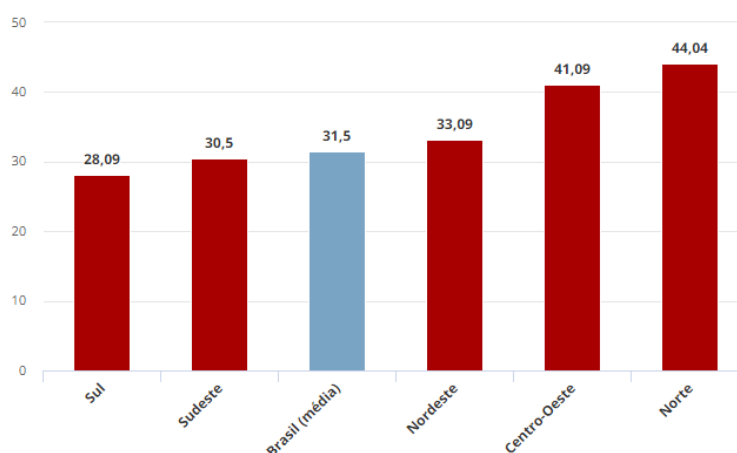
SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 2 |
| 2.1 | Módulos fotovoltaicos | 2 |
| 2.2 | Inversor CC/CA..... | 3 |
| 2.3 | Fatores de influência na geração de energia elétrica fotovoltaica | 4 |
| 2.3.1 | Posição Solar..... | 4 |
| 2.4 | Fatores que afetam o desempenho dos módulos fotovoltaicos..... | 4 |
| 2.4.1 | Irradiância Solar..... | 5 |
| 2.4.2 | Temperatura..... | 5 |
| 2.4.3 | Sombreamento..... | 6 |
| 3 | METODOLOGIA | 6 |
| 4 | DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS | 7 |
| 5 | PV*SOL | 8 |
| 6 | DADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA | 9 |
| 6.1 | Registros de geração de energia | 9 |
| 6.2 | Estimativas de geração de energia obtidas no PV*SOL..... | 9 |
| 6.2.1 | Captura de imagens dos sistemas | 9 |
| 6.2.2 | Construção do modelo tridimensional..... | 9 |
| 6.2.3 | Construção da simulação no PV*SOL..... | 11 |
| 7 | SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS..... | 11 |
| 8 | CONCLUSÃO | 14 |

1 INTRODUÇÃO

Até o final de 2018, o Brasil contava com cerca de 585 MW de potência instalada na forma de energia solar fotovoltaica. Somente no ano de 2019, foram instalados cerca de 294 MW, praticamente a metade do que já havia sido instalado até agora. No Rio Grande do Sul, esse número é ainda mais expressivo, com um montante de 88 MW de potência instalados até 2019, e 54 MW instalados somente neste ano. [ANEEL, 2019] A penetração desta fonte na matriz energética, sobretudo no setor residencial, é motivada em parte pelo reajuste da fatura de energia elétrica e em parte pela diminuição do custo da tecnologia que compõe o sistema de energia solar fotovoltaica, e ambos diminuem cada vez mais o *payback* dos sistemas fotovoltaicos. A Figura 1 apresenta o aumento percentual média da tarifa de energia elétrica entre os anos de 2014 e 2017, por região. De todas as regiões, a região Sul teve o menor aumento percentual.

Figura 1 – Aumento percentual médio da tarifa de energia elétrica, entre 2014 e 2017



Fonte: ABRACE

Uma das dúvidas mais frequentes dos consumidores residenciais que querem adquirir um sistema solar fotovoltaico é sobre a quantidade de energia elétrica que será produzida pelo seu sistema. Para isso, é feita uma avaliação da situação do local de instalação do sistema, visto que a quantidade de energia elétrica produzida depende do ângulo de inclinação dos módulos e do ângulo em relação ao norte (azimute), além de depender das características dos módulos e dos inversores empregados. Uma vez que são levantados estes dados, há uma série de *softwares* que podem ser usados para fazer uma estimativa aproximada. Estes *softwares* usam dados climatológicos do local e modelos matemáticos para calcular as perdas e a geração de energia elétrica, e alguns permitem o uso de modelos tridimensionais para avaliar questões de sombreamento que podem vir a influenciar o rendimento do sistema. Para empresas de que vendem sistemas de energia solar fotovoltaica, é crucial assegurar a seus clientes a quantidade de energia mínima que será produzida antes de formalizar a venda, assim informando a possibilidade de economia na sua fatura de energia elétrica.

Neste trabalho, foi estudada a estimativa de geração do *software* PV*SOL da empresa alemã *Valentin Software*, que também produz outras ferramentas de análise, mas foca principalmente no domínio da energia solar. Para isso, foi avaliado o sistema de energia solar fotovoltaica de 7 residências na região da Grande Porto Alegre. Estes sistemas tem potência instalada de até 4kW em inversores. Foi estudado o histórico de registros de geração dos anos de 2017 e 2018.

Um diferencial deste *software* em relação aos outros no mercado é a possibilidade de trabalhar com modelos tridimensionais construídos a partir de um conjunto de fotos. Assim, foi possível capturar imagens aéreas com o auxílio de um *drone* das residências estudadas e construir um modelo que levou em consideração o entorno do local de instalação: o telhado das residências, no caso deste trabalho.

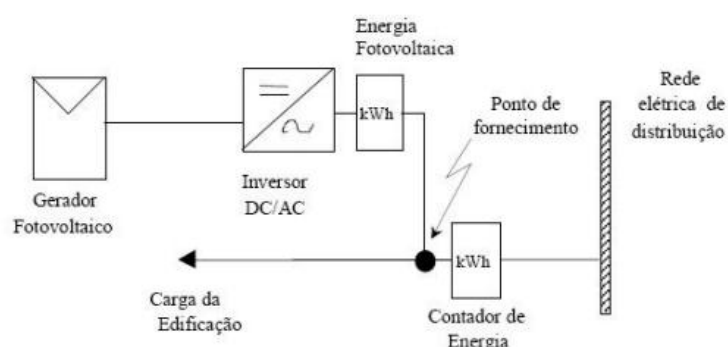
Uma vez que o modelo tridimensional foi inserido no *software* é possível montar então o sistema

solar fotovoltaico correspondente e simular a geração de energia elétrica para cada mês do ano, que pode ser verificado com os dados reais de geração obtidos em campo, para cada residência, para cada mês.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Um sistema solar fotovoltaico é composto por um conjunto de componentes que permite, essencialmente, converter a energia da luz solar em energia elétrica através do uso do efeito fotovoltaico [Zilles, 2012]. A Figura 2 representa um diagrama dos componentes que configuram um sistema fotovoltaico, neste caso conectado à rede elétrica, sem o uso de baterias para armazenamento.

Figura 2 - Diagrama de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica

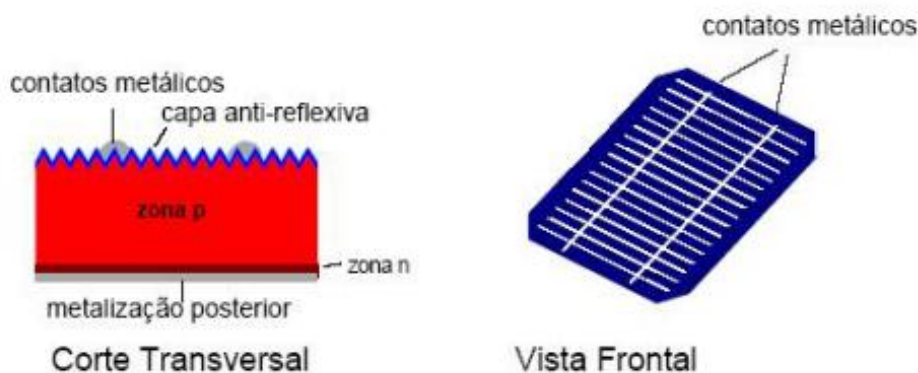


Fonte: Zilles, 2012.

2.1 Módulos fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos (ou geradores fotovoltaicos, como indicado na Figura 2) são compostos por células de material semicondutor que transforma a radiação solar em energia elétrica. Um módulo é uma associação de células solares. O material semicondutor, neste caso o silício, deve ser primeiramente purificado e depois dopado com elementos como boro e fósforo, com o objetivo de configurar uma junção p-n. Resumidamente, os elétrons livres do lado “N”, provenientes do boro, fazem um salto para as lacunas do lado “P”, causadas pelo fósforo. Dessa forma, o lado “P” possuirá uma carga negativa e o lado “N” possuirá uma carga positiva. A Figura 3 faz uma representação de uma célula fotovoltaica, demonstrando as zonas “P” e “N”.

Figura 3 - Corte transversal e vista de uma célula fotovoltaica



Fonte: CRESESB, 2014

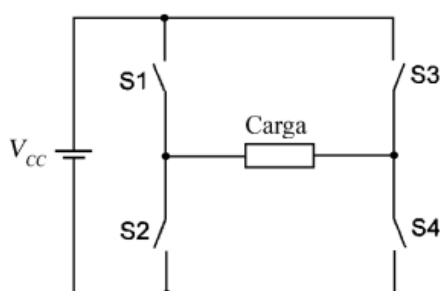
As células fotovoltaicas dos módulos utilizados neste trabalho são todas de silício policristalino, que possui um processo de fabricação menos rigoroso que as células de silício monocristalino, e por isso são mais baratas, contudo menos eficientes [CRESESB, 2014].

2.2 Inversor CC/CA

Os inversores empregados em sistemas solares fotovoltaicos tem por objetivo a conversão da energia elétrica em corrente contínua, dos módulos, para corrente alternada, para a rede elétrica. Eles também são responsáveis por controlar o sinal de saída para que este seja adequado à conexão na rede elétrica pública, controlando a frequência e os níveis de tensão. Para executar a transformação deste sinal, os inversores fazem uso de circuitos com dispositivos de chaveamento, como MOSFET ou IGBT.

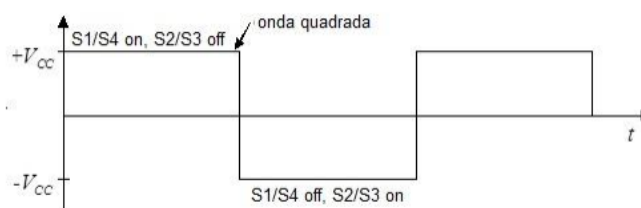
A Figura 4 descreve o esquema de um conversor de ponte completa, onde é possível alternar a polaridade da tensão empregada na carga através do chaveamento sincronizado com os pares de chaves: S1 e S4, S2 e S3. Assim, com uma fonte de corrente contínua, é possível produzir uma onda quadrada com polaridade alternada conforme o chaveamento dos pares de chaves, como demonstrado na Figura 5.

Figura 4 - Inversor de ponte completa monofásica



Fonte: CRESESB, 2014

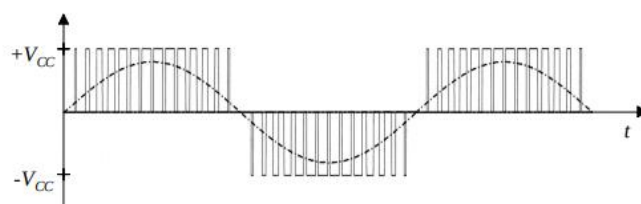
Figura 5 – Sinal de saída de um inversor de onda quadrada



Fonte: CRESESB, 2014

Das estratégias de controle de modulação empregadas em conversores de corrente contínua para corrente alternada, a mais utilizada é a PWM, ou modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation*). A estratégia é baseada no chaveamento a uma frequência constante, contudo com um ciclo de trabalho variável. A Figura 6 representa um sinal de saída de um inversor quando é aplicada a modulação PWM. Quando o valor instantâneo da senóide é baixo, o pulso é curto e vai se alargando ao passo que o valor instantâneo da senóide aumenta.

Figura 6 - Sinal de saída de um inversor com modulação PWM



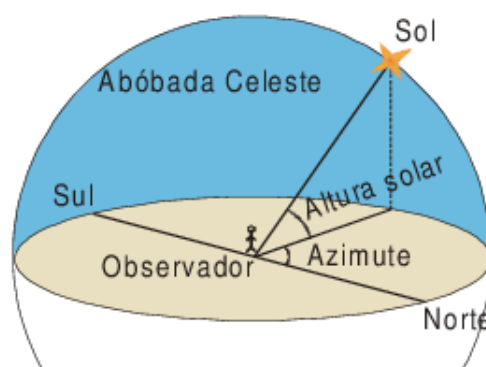
Fonte: CRESESB, 2014.

2.3 Fatores de influência na geração de energia elétrica fotovoltaica

2.3.1 Posição Solar

Há dois principais fatores que devem ser levados em conta quando se estuda a implementação de um sistema: a inclinação da superfície onde serão instalados os módulos e o azimute. A Figura 7 faz uma representação das coordenadas solares. O azimute é o ângulo formado entre a projeção da reta normal da superfície e a direção do norte geográfico. Os módulos devem estar orientados de forma a acompanhar a incidência dos raios solares durante a maior janela de tempo possível. Dependendo da escolha do posicionamento do sistema fotovoltaico, o aproveitamento da irradiação solar será menor, por capturar menos raios solares.

Figura 7 - Ilustração do ângulo solar e do azimute



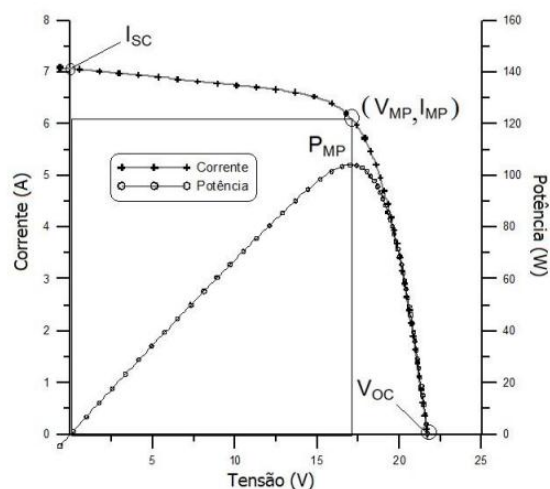
Fonte: M ROCHA, 2003.

2.4 Fatores que afetam o desempenho dos módulos fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos tem como característica principal sua potência de pico (W_p – *Watt peak*). Entretanto, o desempenho de um módulo fotovoltaico pode ser melhor descrito pela sua curva característica de corrente versus tensão, a curva I-V, exemplificada na Figura 8 para um módulo com potência nominal de 100 Wp. Esta curva permite conhecer as condições de operação de corrente e tensão de cada módulo, assim como a potência gerada para cada ponto da curva, com a curva da potência em função da tensão.

Na figura 8, é possível identificar um ponto de máxima potência (P_{MP}), que ocorre com um valor específico de corrente e tensão, denominados de I_{MP} e V_{MP} . O ponto de máxima potência corresponde ao produto de I_{MP} e V_{MP} . Na figura 8, também é importante apontar os pontos V_{OC} e I_{SC} , que são os pontos de tensão de circuito aberto (*Open-Circuit*), quando os terminais do módulo estão desconectados, e o ponto de circuito aberto (*Short-Circuit*). Estes cinco parâmetros descrevem o comportamento de um módulo solar fotovoltaico sob as condições padrões de operação (STC), com irradiação solar de 1000 W/m^2 e temperatura de célula de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Figura 8 - Curva característica I-V de um módulo com potência nominal de 100Wp

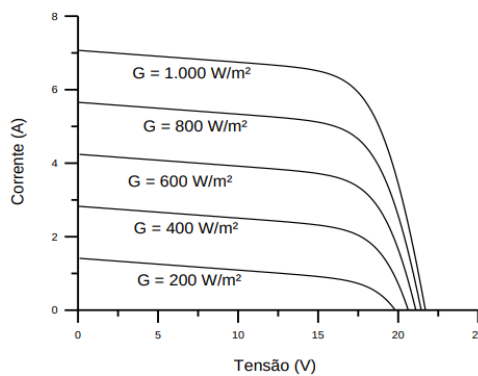


Fonte: CRESESB, 2014.

2.4.1 Irradiância Solar

A irradiância solar é a unidade de potência por unidade de área recebida na forma de radiação eletromagnética do Sol. Na figura 9 é possível observar um aumento diretamente proporcional na corrente de curto-circuito do módulo com o aumento da irradiância solar. A tensão de circuito aberto, contudo, não sofre grandes alterações. Assim, também é possível observar o deslocamento do ponto de potência máxima, que diminui conforme a irradiância solar diminui.

Figura 9 - Efeito da variação da irradiância solar (G) na curva característica I-V de um módulo fotovoltaico

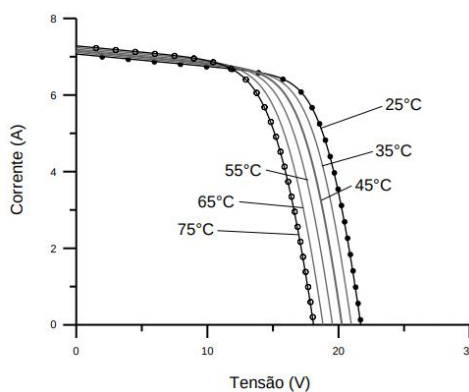


Fonte: CRESESB, 2014

2.4.2 Temperatura

Na figura 10 é possível observar que há uma queda de tensão quando um módulo opera em temperaturas elevadas, e há um aumento da corrente de curto-circuito, contudo este aumento é mínimo. Desta forma, há uma diminuição da potência máxima conforme a temperatura de operação aumenta.

Figura 10 - Efeito da variação de temperatura na curva característica I-V de um módulo fotovoltaico



Fonte: CRESESB, 2014.

2.4.3 Sombreamento

No item 2.4.1. observou-se uma queda na corrente de um módulo causado pela queda na irradiância solar a qual ele é exposto. A diminuição da irradiância solar pode ser originada por um efeito de sombreamento, seja de algum objeto próximo, como uma antena ou mesmo uma árvore, uma nuvem que bloqueie a luz solar ou até mesmo pela deposição de sujeira na superfície do módulo. Se o módulo estiver conectado em série com outros módulos, configurando um arranjo, todos os outros módulos serão afetados pela queda de corrente daquele módulo, causando assim uma queda na potência desenvolvida por aquele arranjo. Este efeito chama-se *mismatch*, que é o descasamento dos módulos, onde a eficiência global do módulo ou mesmo do arranjo é limitada pela eficiência das células afetadas. Os módulos que não são afetados pelo sombreamento têm sua corrente limitada, contudo a parcela de potência gerada que não é entregue ao conjunto é dissipada no módulo afetado pelo sombreamento. Isso é conhecido como efeito *hotspot*, ou “ponto-quente”, que pode causar o rompimento do vidro causado pelo aquecimento de uma célula fotovoltaica.

3 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é verificar a estimativa de geração de energia elétrica do software PV*SOL em sistemas fotovoltaicos residenciais conectados à rede. Esta estimativa será comparada às medições reais dos sistemas correspondentes, desta forma será possível elaborar um contrato de garantia de produção, afirmando que o sistema vendido produzirá no mínimo 97% da energia estimada pelo software.

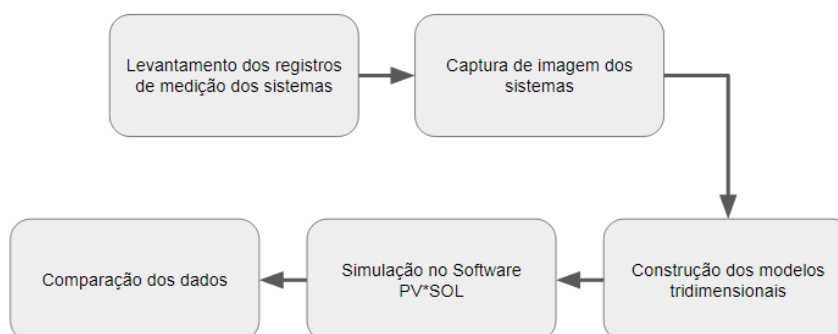
4 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho se dividiu em três partes: coleta de dados, simulação dos sistemas e comparação dos dados.

Primeiramente foram coletados os registros de medição de cada sistema, para cada mês do ano. Num segundo momento, foram capturadas imagens aéreas de cada sistema, a fim de construir um modelo tridimensional. Este modelo tridimensional foi então inserido no software, onde foi possível simular o sistema fotovoltaico instalado naquela residência. A simulação levou em conta o sistema instalado, a média histórica dos dados meteorológicos e as características do modelo tridimensional, como o ângulo azimutal, a inclinação dos módulos e a localização geográfica do modelo. Como as amostras estudadas são relativamente próximas, as diferenças de latitude e longitude são mínimas.

Uma vez que o sistema foi simulado no software e as estimativas de geração de energia foram obtidas, foi possível comparar as estimativas do software com os registros de medição de cada residência. Para este trabalho, considerou-se aceitável uma estimativa com margem de erro de 3% do que foi registrado em campo, ou seja, a estimativa deve estar entre 97% e 103% do que foi registrado em campo.

Figura 11 - Diagrama da metodologia empregada neste estudo

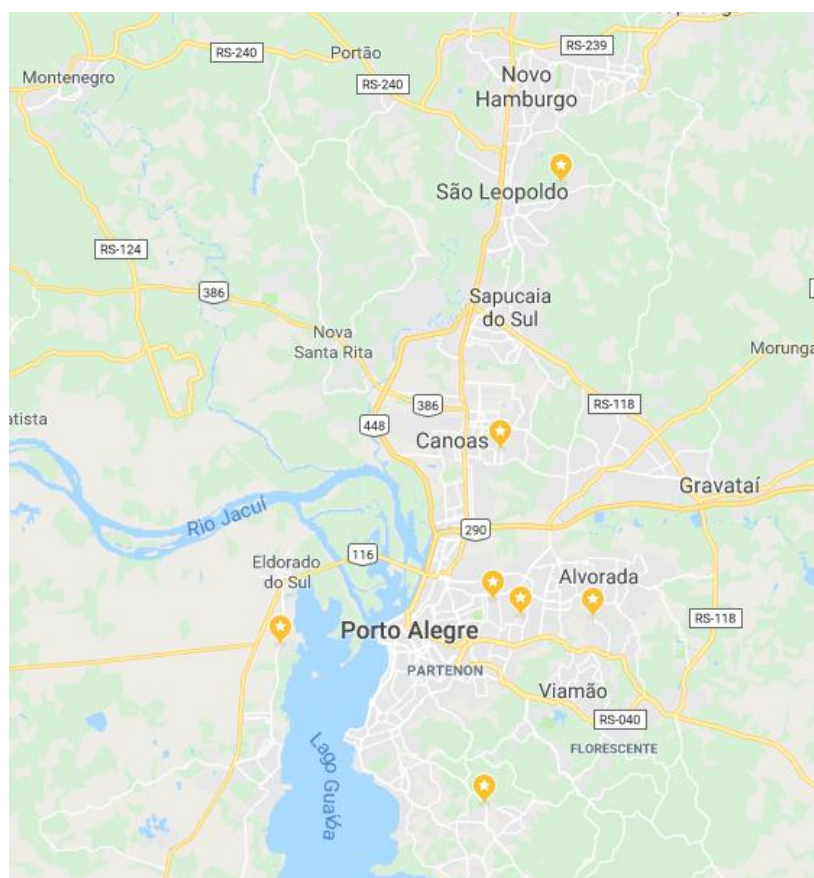


Fonte: Elaborado pelo autor

5 DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS

Foram selecionadas 7 residências com sistemas fotovoltaicos de até 4 kW de potência de inversor. Estes sistemas se encontram relativamente próximos, todos na região da Grande Porto Alegre, e entraram em funcionamento em 2016 e 2017. A Figura 12 mostra a localização dos sistemas estudados neste trabalho, e a Tabela 1 descreve as características de cada sistema.

Figura 12 - Localização dos sistemas estudados



Fonte: Google Maps

Tabela 1 - Descrição dos sistemas fotovoltaicos estudados

| Sistema | Cidade | Número de Módulos | Potência dos Módulos (Wp) | Potência total (kWp) | Potência do inversor (kW) |
|---------|--------------|-------------------|---------------------------|----------------------|---------------------------|
| 1 | Eldorado | 11 | 280 | 3,08 | 2,5 |
| 2 | Porto Alegre | 12 | 265 | 3,18 | 2,5 |
| 3 | Porto Alegre | 16 | 265 | 4,24 | 4 |
| 4 | Canoas | 9 | 265 | 2,39 | 3 |
| 5 | Alvorada | 10 | 315 | 3,15 | 3 |
| 6 | São Leopoldo | 6 | 265 | 1,59 | 3 |
| 7 | Porto Alegre | 12 | 280 | 3,36 | 2,5 |

Fonte: Elaborado pelo autor

Os módulos instalados nos sistemas são de silício policristalino, e todos os sistemas estão organizados em arranjos em série. O sistema número 3 possui duas séries de 8 módulos, visto que seu inversor possui 2 entradas para conexão de série de módulos. Todos os sistemas estão instalados nos telhados das residências.

Os inversores utilizados nestes sistemas são monofásicos, com tensão de conexão de 220V e frequência de 60 Hz, logo todas as residências devem ter uma ligação bifásica ou trifásica com a rede, visto que a tensão de fase dos sistemas é de 127V.

A Tabela 2 apresenta as coordenadas solares dos sistemas estudados. Praticamente todos os sistemas possuem uma orientação azimutal que favorece o norte, menos o sistema número 5, que tem uma orientação que favorece o leste.

Tabela 2 - Coordenadas solares dos sistemas estudados

| Sistema | Inclinação dos módulos | Orientação Azimutal |
|---------|------------------------|---------------------|
| 1 | 16 ° | 348° |
| 2 | 14 ° | 355 ° |
| 3 | 31 ° | 1 ° |
| 4 | 24 ° | 8 ° |
| 5 | 19 ° | 292 ° |
| 6 | 7 ° | 11 ° |
| 7 | 18 ° | 24 ° |

Fonte: Elaborado pelo autor

6 PV*SOL

O *software* PV*SOL é uma ferramenta de simulação de sistemas fotovoltaicos, elaborado pela empresa *Valentin Software*, baseada na Alemanha. Ele permite o uso de modelos tridimensionais criados pelo usuário, para realizar simulações de sombreamento e estimativas da geração de energia em sistemas fotovoltaicos, contando com uma extensa base de dados de módulos fotovoltaicos e inversores utilizados no mercado.

Para construir as simulações de geração de energia elétrica, o *software* usa um banco de dados meteorológicos, com uma série histórica de 1981 até 2010, com registros de temperatura média, umidade relativa, radiação global horizontal e velocidade do vento. Com estas entradas e considerando o sombreamento a partir do modelo tridimensional, o *software* é capaz de estimar a geração de energia elétrica de sistemas fotovoltaicos.

7 DADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

7.1 Registros de geração de energia

Os dados de geração de energia elétrica dos sistemas solares fotovoltaicos são registrados com o uso de *dataloggers*, que podem vir em duas formas:

- Integrados aos inversores;
- Externos, como o *Solarview*, que é conectando entre o inversor e o medidor de energia;

Estes *dataloggers* tem conexão com a internet e permitem ao cliente fazer o acompanhamento da geração de energia do seu sistema a qualquer instante, assim como dados de temperatura, tensão e corrente elétrica.

7.2 Estimativas de geração de energia obtidas no PV*SOL

7.2.1 Captura de imagens dos sistemas

Para construir um modelo tridimensional das residências e realizar uma simulação, utilizou-se um *drone* para capturar as imagens do sistema. O modelo de *drone* empregado foi o *Phantom 3 Professional*, da marca DJI, representado na Figura 13. O *drone* possui uma câmera com resolução de 4000 pixels, além de ser equipado com um estabilizador *Gimbal*. É importante que as imagens utilizadas na construção do modelo sejam de qualidade elevada, o que possibilitará um modelo tridimensional com maior precisão, visto que é necessário avaliar os obstáculos que podem contribuir aos efeitos de sombreamento no entorno do local de instalação.

Figura 13 - Drone Phantom 3 Professional



Fonte: DJI, 2019

7.2.2 Construção do modelo tridimensional

Foram capturadas cerca de 70 imagens de cada residência. Há uma série de *softwares* no mercado para a construção de modelos tridimensionais. Neste trabalho, foi utilizado o *ReCap* da *Autodesk* que foi responsável pelo processamento das imagens e pela construção do modelo tridimensional. Durante a execução deste trabalho, observou-se que é necessário fazer dois voos circulares para captura de imagens para a construção de um modelo tridimensional satisfatório: o primeiro, a uma altura maior e com uma inclinação da câmera mais acentuada, e o segundo mais próximo do telhado, com uma inclinação menor entre a câmera e o telhado. Assim, é possível capturar melhor os detalhes do telhado e representar os obstáculos com uma definição melhor.

A Figura 14 demonstra a construção de um modelo tridimensional, onde são feitas duas capturas de imagens de ângulos diferentes, para exemplificar o método. As imagens obtidas com o auxílio do *drone* são geolocalizadas, ou seja, cada imagem é acompanhada dos registros de latitude e longitude de

onde elas foram capturadas, que possibilita ao PV*SOL reconhecer a trajetória solar que acompanha aquele modelo tridimensional.

Figura 14 - Exemplo de captura de imagens



Fonte: AutoDesk, 2019

Na Figura 15 é possível observar uma das imagens aéreas obtidas com o *drone* e na Figura 16 o modelo tridimensional que foi construído com o conjunto de fotos daquele sistema. Como o *software* PV*SOL possui uma limitação do tamanho do modelo que pode ser inserido para a simulação, foi necessário recortar parte do modelo e favorecer os obstáculos que poderiam vir a causar sombreamento, como o telhado da residência localizada ao lado. No caso específico do sistema da figura 15, o ângulo azimutal do telhado favorece o Norte, logo o telhado da frente poderia vir a causar sombra sob o sistema, afetando sua produção de energia elétrica.

Figura 15 - Imagem aérea capturada com o drone para um dos sistemas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 166 - Modelo tridimensional obtido para um dos sistemas



Fonte: Elaborado pelo autor.

7.2.3 Construção da simulação no PV*SOL

Uma vez que foram construídos os modelos tridimensionais dos sistemas, foi possível simulá-los no PV*SOL, conforme as especificações da tabela 1. O *software* possui um banco de dados de módulos e inversores e conta com os dados técnicos de cada um, dessa forma foi possível simular o mesmo sistema que foi instalado na residência.

Primeiramente, foi necessário posicionar os módulos no telhado, conectar os arranjos e depois conectá-los a um inversor. Então, realizou-se a simulação, que simula a trajetória do sol para cada dia do ano, levando em conta as variações meteorológicas e os efeitos de sombreamento que possam vir a ocorrer.

Os registros de medição do sistema 5 foram do ano de 2017, contudo no mês de junho deste ano este sistema teve mais 2 módulos fotovoltaicos instalados, passando de 8 módulos para 10. Desta forma, foi necessário fazer 2 simulações para este sistema, uma com 8 módulos e outra com 10. Para construir a série de dados de estimativas de geração deste sistema, dividiu-se um período de janeiro até maio, com a geração relativa a 8 módulos, e depois um período de junho até dezembro, com a geração relativa a 10 módulos.

8 SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para fins de comparação, utilizou-se um fator K (equação 8.1) de comparação que é a razão entre os dados de geração registrados e a geração estimada pelo PV*SOL, para cada mês do ano. Também se observou a razão entre o total anual da geração registrada e o total anual da geração estimada através do fator N (equação 8.2). A Tabela 7 apresenta os resultados do fator K para cada sistema, para cada mês do ano. A Tabela 8 apresenta os resultados do fator N, para cada sistema.

$$K_{i,mês} = \frac{\text{Geração mensal registrada do sistema } i \left(\frac{kWh}{mês} \right)}{\text{Geração mensal estimada do sistema } i \left(\frac{kWh}{mês} \right)} \quad (8.1)$$

$$N_i = \frac{\text{Geração anual registrada do sistema } i \text{ (kWh)}}{\text{Geração anual estimada do sistema } i \text{ (kWh)}} \quad (8.2)$$

Tabela 3 - Fator K de comparação, razão entre a geração mensal registrada e estimada do sistema

| Sistema | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 1,04 | 1,23 | 1,00 | 0,98 | 0,83 | 0,81 | 0,72 | 1,02 | 0,93 | 0,99 | 0,97 | 1,05 |
| 2 | 1,05 | 1,07 | 1,09 | 1,02 | 0,84 | 1,09 | 1,36 | 1,12 | 0,93 | 0,92 | 0,95 | 0,96 |
| 3 | 1,10 | 1,09 | 1,06 | 0,97 | 0,76 | 0,96 | 1,23 | 1,06 | 0,86 | 0,99 | 0,97 | 1,01 |
| 4 | 1,00 | 1,17 | 1,00 | 1,03 | 0,92 | 0,71 | 0,71 | 1,04 | 0,94 | 0,94 | 0,99 | 1,07 |
| 5 | 1,06 | 1,03 | 1,06 | 1,09 | 1,00 | 0,96 | 1,19 | 1,05 | 0,88 | 0,93 | 0,95 | 0,99 |
| 6 | 0,89 | 1,13 | 1,05 | 1,10 | 0,97 | 0,95 | 0,86 | 1,15 | 1,14 | 0,94 | 0,93 | 0,97 |
| 7 | 0,94 | 1,09 | 0,97 | 0,99 | 0,92 | 0,88 | 0,76 | 1,03 | 0,96 | 0,95 | 0,97 | 1,01 |

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4 - Fator N de comparação, razão entre a geração total anual registrada e a estimada do sistema

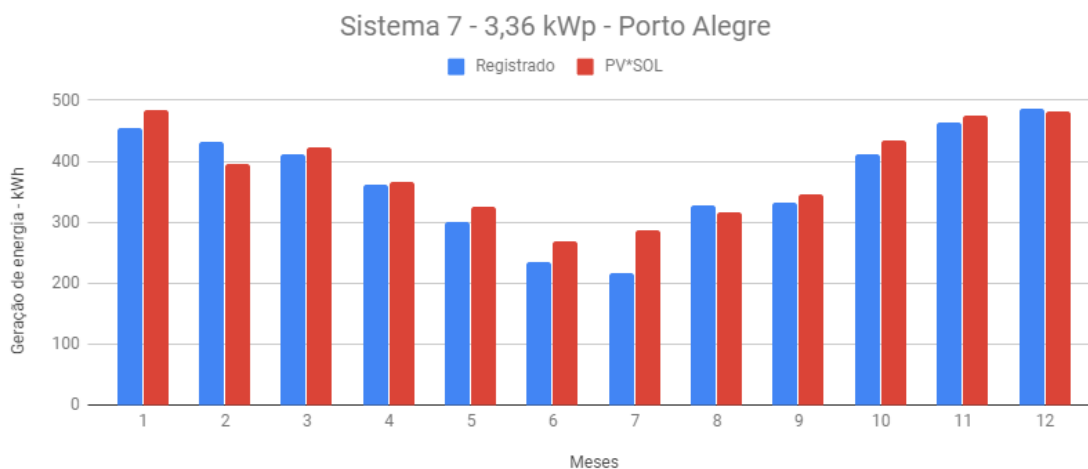
| Sistema | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|
| Fator N | 0,98 | 1,02 | 1,00 | 0,98 | 1,00 | 0,99 | 0,96 |

Fonte: Elaborado pelo autor

Naturalmente, quanto mais próximo de 1, mais próxima da realidade foi a simulação. Para valores maiores que 1, compreende-se que o PV*SOL subestimou a capacidade de geração do sistema, e assim teve uma estimativa pessimista, que é algo positivo quando se executa uma simulação deste tipo. Para valores menores que 1, compreende-se que o PV*SOL superestimou a capacidade de geração do sistema, tendo uma estimativa otimista, que é algo a ser evitado neste tipo de simulação.

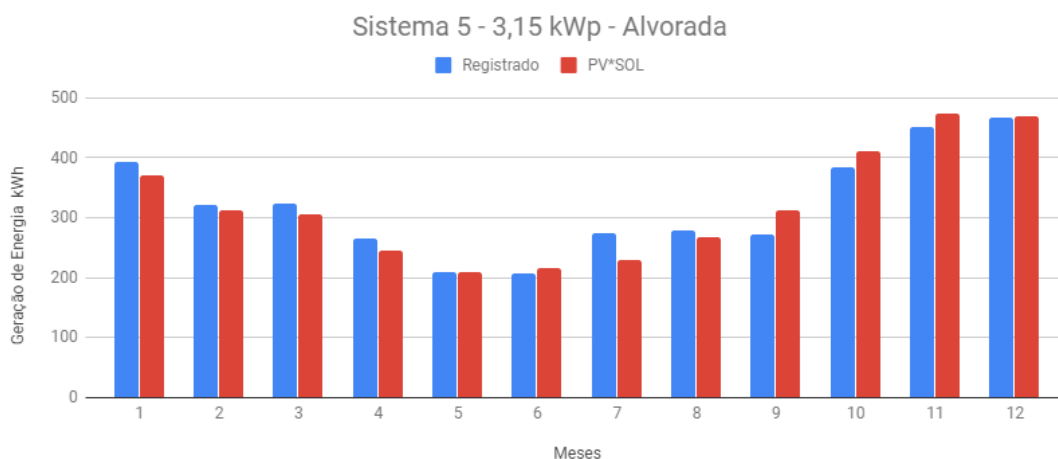
Neste trabalho, estamos interessados nos valores entre 0,97 e 1,03, uma vez que se estipulou que este seria o limite aceitável para as simulações deste trabalho. A Figura 17 mostra os dados de geração mensal de energia do sistema de número 7, que apresentou o pior fator N entre as amostras, com grandes distorções, principalmente nos meses de maio, junho e julho. A Figura 18 mostra os dados de geração mensal de energia do sistema de número 5, que apresentou o melhor fator N entre as amostras. É possível observar algumas distorções nos meses, em alguns meses a estimativa é otimista, como no mês de maio, e em outros meses é pessimista, como no mês de julho. Desta forma, há um equilíbrio que faz com que o fator N, que relaciona a estimativa de geração anual e a geração anual real, seja igual a 1.

Figura 17 – Dados de geração mensal de energia do sistema número 7, que apresentou um fator N de 0,96



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 18 – Dados de geração mensal de energia do sistema número 5, que apresentou um fator N de 1,00



Fonte: Elaborado pelo autor

Da tabela 7, podemos observar que há uma grande distorção no mês de maio, onde todas as simulações foram mais otimistas do que a realidade. Também é possível observar que, no geral, o mês de julho teve uma estimativa muito pessimista para quase todos os sistemas, menos os sistemas número 1 e número 7. Desta forma, observou-se um equilíbrio no fator N, que leva em conta a geração anual dos sistemas, onde a geração pessimista de julho compensou a geração otimista de maio.

Nos sistemas, foi possível observar que o sistema de número 7 obteve um fator N abaixo do limite de corte. Para o sistema de número 7, ilustrado na Figura 19, foram observados dois obstáculos, uma chaminé, que causava sombreamento nas manhãs de verão e uma antena, posicionada em frente ao sistema, que causa sombreamento em algumas tardes do inverno. A chaminé foi bem modelada na construção do modelo tridimensional, contudo a antena não foi bem detalhada, por conter seções de aço de pequena espessura. Logo, o efeito deste sombreamento não foi considerado em sua plenitude pelo *software*, e dessa forma as estimativas de geração do PV*SOL foram maiores do que os registros de produção de energia.

Durante as simulações, observou-se também que o *software* possui uma limitação quando se trabalha com telhados que possuem uma platibanda, como foi o caso do sistema 6. Nos telhados com platibanda, há zonas onde o cálculo de sombreamento é distorcido, com perdas muito maiores que causam uma

estimativa muito menor do que foi registrado. Uma nota foi enviada aos desenvolvedores do *software*, que reconheceram que esta era uma limitação real, e como alternativa sugeriram que as platibandas fossem removidas no modelo tridimensional. Para ultrapassar este obstáculo, no modelo tridimensional, os módulos fotovoltaicos foram elevados em 25 centímetros de sua posição real, e dessa forma a distorção do cálculo de sombreamento foi evitada. Quando os módulos eram posicionados na superfície do telhado, foi observado um fator N de 1,16, que indica que a geração estimada foi significativamente inferior a geração real, ou seja, o cálculo de perdas foi superestimado. Quando os módulos eram elevados em 25 cm, foi observado um fator N de 1,00, que indica que a geração estimada foi próxima à realidade.

Figura 19 - Obstáculos que causam sombreamento no sistema de número 7



Fonte: Elaborado pelo autor

9 CONCLUSÃO

No estudo realizado, comparou-se a estimativa de geração de energia elétrica em sistemas fotovoltaicos pelo *software* PV*SOL com aos registros de medição obtidos em sistemas residenciais de até 4 kW.

Primeiramente, foram obtidos os registros reais de medição da geração de energia para cada uma das 7 residências, todas localizadas na região da Grande Porto Alegre. Paralelamente, foram capturadas imagens aéreas com o auxílio de um *drone* para a construção de um modelo tridimensional que pudesse ser utilizado no *software* PV*SOL. Uma vez que estes modelos foram feitos, foi possível simular o desempenho da geração nos sistemas solares fotovoltaicos destas residências. Finalmente, foi feita uma comparação entre os valores estimados e os valores reais de geração de energia elétrica.

Com os dados obtidos, foi possível que o *software* tem duas limitações importantes: a qualidade do modelo tridimensional e a presença de platibandas. A qualidade da estimativa de geração depende da qualidade do modelo tridimensional, e isso é ainda mais importante quando há obstáculos que fazem sombra no arranjo fotovoltaico. Se estes obstáculos não forem bem modelados, como foi observado no sistema 7, as estimativas de geração não levarão em conta os efeitos de sombreamento daquele obstáculo, e assim não será possível afirmar com segurança a geração de energia daquele sistema.

Outra limitação foi a presença de platibandas no entorno do telhado, que criam zonas de distorção no cálculo do sombreamento, com perdas que diminuem significativamente a estimativa de geração em relação a geração medida, ou seja, que superestimam as perdas. Neste caso, como observado no sistema 6,

é necessário elevar os módulos e assim a estimativa da geração evitará as distorções causadas por uma falha no *software*.

O estudo presente fez uso de uma amostragem relativamente pequena, com apenas 7 amostras. Para um estudo mais elaborado sobre a real assertividade do *software*, seria interessante aumentar o tamanho da amostragem, considerando sistemas mais variados. Dessa forma, será possível fazer uma investigação mais profunda do desempenho do *software*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Informações Técnicas**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>> Acesso em: 03 maio 2019.

G1. Conta de luz acumula alta média de 31,5% entre 2014 e 2017. Seção: Economia. 2018. Disponível em < <https://g1.globo.com/economia/noticia/conta-de-luz-acumula-alta-media-de-315-entre-2014-e-2017-diz-estudo.ghtml>>

ZILLES, R *et al.* **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. Oficina de Textos, 3ª edição, 2012.

ROCHA, M. **Validação da sombra projetada através de ferramentas CAD: uma contribuição metodológica**. Em: 16º Simpósio Nacional de Geometria Descritiva e Desenho Técnico, 2003, Santa Cruz – RS. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/294088316_Validacao_da_sombra_projetada_atraves_de_ferramentas_CAD_uma_contribuicao_metodologica>

CRESEB. **Manual de Engenharia Fotovoltaica**, 2014. Disponível em: < www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>

INMET. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Acesso em 22 de abril de 2019. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>

NASA. **Langley Research Center – POWER Project Data**. Acesso em 22 de abril de 2019. Disponível em: < <https://power.larc.nasa.gov/>>