

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE ENERGIA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

FILIPPE ANTUNES

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA INTEGRADO EM UMA EDIFICAÇÃO DE
ENERGIA POSITIVA COM ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA**

Araranguá, SC

2021

Filipe Antunes

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA INTEGRADO EM UMA EDIFICAÇÃO DE
ENERGIA POSITIVA COM ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Energia do Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito para a obtenção do título de Engenheiro/a de Energia.
Orientador: Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli.

Araranguá

2021

FILIPPE ANTUNES

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA INTEGRADO EM UMA EDIFICAÇÃO DE
ENERGIA POSITIVA COM ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA**

O presente Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia de Energia, foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli (Orientador)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Leonardo Elizeire Bremermann
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Dra. Letícia Toreti Scarabelot
LEnergy Energia Solar

Certificamos que essa é a versão original e final do trabalho que foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro/a de Energia.

Prof. Dr. Luciano Lopes Pfitscher
Coordenador do Curso

Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli
Orientador

Filipe Antunes
Autor

Araranguá, 10 de setembro de 2021.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, André e Vanusa, e minha namorada, Amanda, que sempre estiveram presentes, me apoiando e me orientando em todos os passos dessa jornada. Ressalto também a importância do corpo docente, em especial ao professor e orientador Dr. Giuliano Rampinelli, pelo suporte e conhecimento transmitido no decorrer deste trabalho.

Deixo os agradecimentos também a LEnergy Energia Solar, empresa parceira do Núcleo Tecnológico de Energia Elétrica NTEEL Solar da UFSC, que possibilitou este estudo através da doação e instalação dos equipamentos necessários. Da mesma forma, agradeço aos meus amigos e colegas que fizeram parte da minha trajetória até o momento.

RESUMO

A energia solar, além de ser uma fonte limpa e renovável, pode ser aproveitada de diversas formas, de acordo com a tecnologia a ser utilizada. Uma dessas finalidades é o uso de sistemas fotovoltaicos para a conversão e geração de eletricidade para a utilização nas mais diversas edificações. Atualmente, o Brasil conta com regulamentações em relação a geração distribuída, e ainda, dispõe de um amplo potencial para o desenvolvimento da tecnologia no país. Dessa forma, por consequência do avanço da energia solar, aparece a demanda por projetos de engenharia relacionados, que por sua vez, envolvem análise do recurso solar, dimensionamento dos equipamentos, definição de orientação e inclinação de módulos. Assim, o objetivo deste trabalho é modelar, simular e analisar um sistema fotovoltaico integrado em uma planta piloto bioclimática a partir de diferentes métodos de dimensionamento e bases de dados e, portanto, comparar os resultados entre simulações e dados reais, observando indicadores estatísticos entre tais valores. A planta fotovoltaica está localizada no município de Araranguá, Santa Catarina e conta com uma potência instalada de 0,99 kWp. Os dados reais foram coletados diretamente da plataforma do inversor instalado e as simulações e modelagens foram realizadas através de métodos matemáticos disponíveis na literatura, além dos *softwares*: PVsyst, System Advisor Model, RETScreen, PVGRID. Nas análises, foi possível perceber que o *software* que obteve maior semelhança com a realidade foi o RETScreen, com diferenças na faixa de 4% para a produtividade mensal e geração média diária mensal. O resultado mais destoante foi a modelagem teórico-prática que utilizou como base de dados, o Atlas Brasileiro de Energia Solar, com diferença aproximada de 22% em relação aos dados reais. Vale destacar que as bases de dados de radiação solar utilizadas em cada método e em *software* são diferentes, o que explica, em parte as diferenças.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica, Modelagem e Simulação de Sistemas Fotovoltaicos, Softwares para Sistemas Fotovoltaicos.

ABSTRACT

Solar energy, in addition to being a clean and renewable source, can be used in different ways, depending on the technology to be used. One of these technologies is the use of photovoltaic systems for the conversion and generation of electricity in the most diverse buildings. Currently, Brazil has regulations to distributed generation and has a wide potential for the development of technology in the country. Thus, due to the solar energy advancement, there is a demand for related engineering projects, which, in turn, involve the solar resource analysis, equipment dimensioning, definition of modules orientation and inclination. Furthermore, the objective of this study is to model, simulate and analyze a photovoltaic system integrated in a bioclimatic pilot plant from different sizing methods and databases and, therefore, compare the results between simulations and real data, observing statistical indicators between such values. The photovoltaic plant is located at Araranguá, Santa Catarina and has an installed capacity of 0.99 kWp. Real data were collected directly from the installed inverter platform and simulations and modeling were performed using mathematical methods available in the literature and the following softwares: PVsyst, System Advisor Model, RETScreen, PVGRID. In the analyses, it was possible to notice that the software that had the greatest similarity with reality was RETScreen, with differences in the range of 4% for monthly productivity and monthly average daily generation. The worst result was the theoretical-practical modeling that used Atlas Brasileiro de Energia Solar as a database, with a difference of 22% in relation to real data. The solar radiation databases used in each method and in software are different, which partly explains the differences.

Keywords: Photovoltaic Solar Energy, Modeling and Simulation of Photovoltaic Systems, Software for Photovoltaic Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da fonte solar no Brasil.....	12
Figura 2 – Esquema de um sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição.....	14
Figura 3 – Planta piloto bioclimática.....	17
Figura 4 – Instalações do sistema fotovoltaico em análise.....	18
Figura 5 – Tela inicial do Radasol 2.....	20
Figura 6 – Tela de definição geral do sistema fotovoltaico no PVsyst.....	21
Figura 7 – Tela inicial RETScreen.....	22
Figura 8 – Tela inicial PVGRID.....	23
Figura 9 – Comparação da geração média diária mensal entre dados reais e softwares e bases de dados.....	28
Figura 10 – Comparação da produtividade mensal entre dados reais e softwares e bases de dados.....	30
Figura 11 – Perfil da produtividade mensal entre dados reais e simulações.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações do sistema fotovoltaico em análise.....	17
Tabela 2 – Geração de energia elétrica diária obtida a partir do inversor instalado na planta.....	25
Tabela 3 – Índices de produtividade e desempenho global da literatura análise.....	26
Tabela 4 – Índices de produtividade e desempenho global a partir de software.....	26
Tabela 5 – Índices de irradiação solar média diária mensal e PR utilizados para cálculo teórico-prático.....	27
Tabela 6 – Geração média diária mensal a partir dos dados reais e simulações dos softwares e bases de dados.....	28
Tabela 7 – Produtividade mensal obtida através dos dados reais e simulações.....	29
Tabela 8 – Comparação percentual entre dados reais e softwares e bases de dados.....	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
CCST - Centro de Ciência do Sistema Terrestre
CTS – Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde
GD – Geração Distribuída
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LABREN – Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia
LABSOL – Laboratório de Energia Solar
NRCAN - Natural Resources Canada
NREL – National Renewable Energy Laboratory
NTEEL Solar - Núcleo Tecnológico de Energia Elétrica
PCHs – Pequenas Centrais Hidrelétricas
PR – Desempenho Global do Sistema
REN – Resolução Normativa
SAM – System Advisor Model
UC – Unidade Consumidora
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
 Y_F – Produtividade do Sistema Fotovoltaico
 Y_R – Produtividade de Referência

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. OBJETIVOS	11
1.1.1. Objetivo Geral.....	11
1.1.2. Objetivos Específicos	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1. RECURSO SOLAR.....	12
2.2. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	13
2.3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	14
2.4. ESTADO DA ARTE	15
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
3.1. O SISTEMA FOTOVOLTAICO EM ANÁLISE	17
3.2. INDICADORES DE DESEMPENHO	18
3.3. <i>SOFTWARE</i> RADIASOL 2	19
3.4. ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR	20
3.5. <i>SOFTWARE</i> PVSYST	21
3.6. <i>SOFTWARE</i> RETSCREEN	22
3.7. <i>SOFTWARE</i> SAM/NREL	22
3.8. <i>SOFTWARE</i> PVGRID	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
4.1. SIMULAÇÕES TEÓRICO-PRÁTICAS	26
4.2. GERAÇÃO MÉDIA DIÁRIA MENSAL.....	27
4.3. PRODUTIVIDADE MENSAL	29
5. CONCLUSÃO.....	32

1. INTRODUÇÃO

A energia solar é uma fonte limpa e renovável e pode ser aproveitada para diferentes finalidades conforme a tecnologia empregada (ABSOLAR, 2020).

Ainda de acordo com a ABSOLAR (2020), a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, uma das tecnologias para uso da energia solar é a dos sistemas fotovoltaicos. É através desses conjuntos de equipamentos que a eletricidade é gerada e convertida para ser utilizada em residências, comércios e indústrias.

A partir de abril de 2012 a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), estabeleceu, através da Resolução Normativa nº 482, as condições para acesso à micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição, além de criar um sistema de compensação correspondente (ANEEL, 2016).

Os sistemas fotovoltaicos de geração distribuída, normalmente, não necessitam da construção de espaços novos para instalação, já que podem ser aplicados sobre telhados e fachadas já existentes nas edificações. Do ponto de vista arquitetônico, as plantas solares podem servir também como elementos de sombreamento, ou substituir o telhado convencional, diminuindo o custo final das obras (PINHO; GALDINO, 2014).

Conforme Pinho e Galdino (2014), um projeto referente à energia solar envolve inclinação e orientação dos módulos, disponibilidade do recurso solar, demanda a ser atendida, dentre outros fatores. O dimensionamento desse sistema pode ser definido como o ajuste da energia recebida do Sol e a necessidade de suprir a demanda energética.

Diante dos diversos fatores que envolvem um projeto, bem como as várias alternativas de modelagem e simulação dos sistemas, é pertinente avaliar e validar a correspondência entre métodos com os dados da realidade.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é modelar, simular e analisar um sistema fotovoltaico de geração distribuída integrado em uma planta piloto bioclimática a partir de diferentes métodos de dimensionamento e bases de dados. O sistema está localizado na cidade de Araranguá, Santa Catarina, e conta com uma potência instalada de 0,99 kWp.

Neste trabalho haverá cinco seções a partir dessa parte de introdução: a revisão bibliográfica, a seção de materiais e métodos empregados, os resultados obtidos. A quinta e última parte destina-se às conclusões a respeito do estudo.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Este trabalho de conclusão de curso tem por objetivo geral modelar, simular e analisar um sistema fotovoltaico de geração distribuída integrado em uma planta piloto bioclimática a partir de diferentes métodos de dimensionamento e bases de dados.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Estudar conceitos presentes na literatura a respeito do dimensionamento de sistemas fotovoltaicos;
- Coletar e tratar dados reais do sistema fotovoltaico, comparando tais valores com bases de dados específicas e resultados obtidos através de diferentes *softwares*;
- Dimensionar o sistema fotovoltaico utilizando formulário teórico e dados de irradiação solar disponíveis em referências como o Atlas Brasileiro de Energia Solar e o *software* Radasol 2;
- Modelar, simular e analisar o sistema fotovoltaico em questão utilizando diferentes *softwares*: PVsyst, RETScreen, PVGRID e System Advisor Model (SAM).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

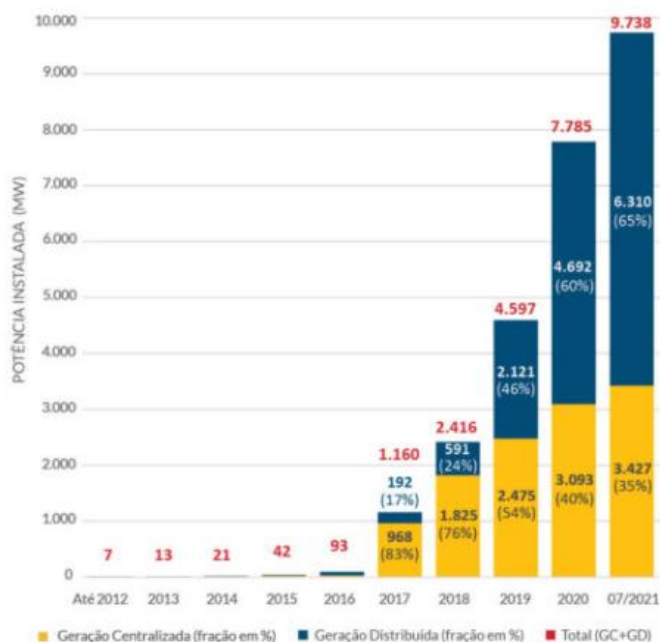
2.1. RECURSO SOLAR

A radiação solar pode ser representada como uma fonte inesgotável de energia, possuindo, conseqüentemente, um grande potencial de utilização em sistemas térmicos e elétricos, cujo Sol é a principal fonte de energia. Essa radiação é constituída de uma componente direta, proveniente da mesma direção do sol, e outra difusa, na qual a energia provém de todas as direções após sofrer um espelhamento pela superfície terrestre. Há ainda uma terceira componente, chamada de albedo, que se trata da radiação refletida pelo ambiente (PINHO; GALDINO, 2014).

Ainda segundo Pinho e Galdino (2014), o valor da irradiação, ou seja, da exposição à radiação solar, em um plano com orientação para o Equador e de inclinação semelhante à latitude, possibilita estimar a geração de energia elétrica convertida por um sistema fotovoltaico nessas condições.

Com quase 10.000 MW de potência instalada, como observado na figura 1, a energia solar possui ainda um grande potencial de crescimento no Brasil, visto que a radiação ao longo de todo o território e durante todo o ano é abundante (RAMPINELLI, 2010; ABSOLAR, 2021).

Figura 1 – Evolução da fonte solar no Brasil.



(Fonte: ABSOLAR, 2021).

2.2. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Segundo o Instituto Nacional de Eficiência Energética (2019), a geração de energia elétrica junto ou próximo do consumidor, independentemente da fonte geradora, é denominada de geração distribuída (GD). Dentre os geradores, destacam-se módulos fotovoltaicos, pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), equipamentos que utilizam resíduos como fonte de energia. Além disso, dentro do âmbito da GD, existem equipamentos de controle, medida, e eventualmente, ferramentas de controle de cargas.

No Brasil, o consumidor de energia elétrica obteve a possibilidade de gerar a sua própria eletricidade, a partir de fontes renováveis, no dia 17 de abril de 2012, quando a Resolução Normativa (REN) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 482 entrou em vigor. O texto possibilita ainda ao consumidor fornecer o excedente à rede de distribuição, aliando a consciência ambiental ao benefício econômico-financeiro. Posteriormente, com o objetivo de otimizar custos e o tempo envolvido na conexão da geração distribuída, bem como outras melhorias, a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 687, atuando como uma revisão da nº 482/2012 (ANEEL, 2015).

Segundo a ANEEL (2015), a GD é compreendida de micro e minigeração distribuída. A microgeração é definida como uma central geradora de potência instalada menor ou igual a 75 kW conectada à rede de distribuição. Já a minigeração distribuída corresponde às instalações de potências superiores a 75 kW e inferiores ou iguais a 5 MW.

Nos casos em que a geração de energia supera o consumo, a unidade consumidora (UC), na qual a central geradora está instalada, injeta a energia elétrica excedente na rede de distribuição, recebendo créditos em kWh. Contudo, nos casos de consumo superior à geração, há a compensação da diferença através da distribuidora ou pelo uso dos créditos já acumulados (PRUDENCIO, 2020).

De acordo com a ANEEL (2016), no caso dos créditos gerados, há ainda a possibilidade de utilizá-los em outras UCs, dentro da mesma área de concessão do consumidor, através de algumas modalidades da geração distribuída. São elas: Geração Compartilhada (reunião de consumidores por meio de consórcio ou cooperativa); Autoconsumo Remoto (UC em local diferente da central geradora); Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras (Caso de condomínios, seguindo algumas particularidades).

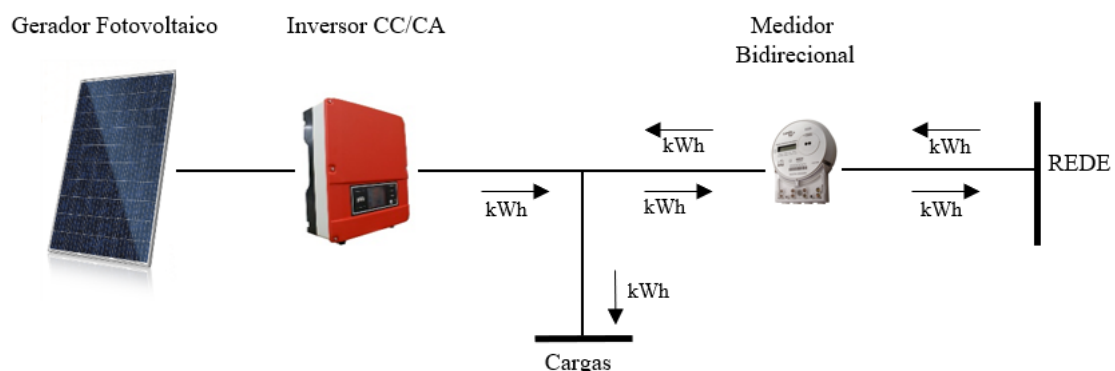
2.3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos são definidos como uma associação de módulos em que o Sol atua como a principal fonte de energia. Essas associações podem ser em série e/ou paralelo, formando um arranjo fotovoltaico, capaz de converter a energia solar em energia elétrica. A combinação de módulos é conectada a inversores, responsáveis por converter a energia gerada (em corrente contínua) em energia elétrica em corrente alternada (RAMPINELLI, 2010).

Há, em geral, duas classificações principais: sistemas isolados e sistemas conectados à rede. Independentemente da classificação, esses equipamentos podem ser utilizados a partir apenas da fonte fotovoltaica ou através da combinação de outras fontes de energia. No caso dos isolados, geralmente há a necessidade de equipamentos de armazenamento, como baterias. Sistemas conectados à rede dispensam acumuladores de energia e produzem potência para o consumo na carga ou para entregar diretamente à rede de distribuição. Entretanto, esses necessitam de um inversor fotovoltaico, bem como uma medição bidirecional, registrando consumo e geração (PINHO; GALDINO, 2014).

Dentre as vantagens em utilizar sistemas fotovoltaicos em UCs estão: menores perdas por transmissão e distribuição, rápida implementação, redução de custos operacionais e vantagens devido a característica modular dos arranjos (SCARABELOT, 2020). Na figura 2 é possível observar um esquema geral de um sistema fotovoltaico de geração distribuída:

Figura 2 – Esquema de um sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição.



(Fonte: SCARABELOT; RAMPINELLI; RAMBO, 2018).

2.4. ESTADO DA ARTE

O potencial de um sistema fotovoltaico em um lugar específico pode ser estimado conforme há a disposição dados de irradiação solar confiáveis. Entretanto, existem poucas estações meteorológicas no Brasil e assim, as formas de mitigar essa escassez de dados é utilizar métodos computacionais capazes de sintetizar dados de irradiação solar a partir de informações geográficas (PINHO; GALDINO, 2014).

Scarabelot e Rampinelli (2019), no desenvolvimento do *software* PVGrid, na linguagem Javascript, utilizam modelos matemáticos obtidos por meio de referencial teórico no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos a partir de dados de localização.

Bruna e Rampinelli (2020), apresentam o desenvolvimento da ferramenta PVGRID versão 2.0, no VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, para dimensionamento e simulação de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída e análise do sistema de compensação de energia elétrica nas modalidades de geração na própria unidade consumidora e autoconsumo remoto.

Gasparin e Krenzinger (2017) utilizam o *System Advisor Model* (SAM) para a simulação de um sistema em diferentes cidades do Brasil, variando inclinações e orientações para o arranjo fotovoltaico. No estudo foram utilizados arquivos climáticos para cada cidade. Os autores reforçam ainda a importância de dados meteorológicos confiáveis, que segundo eles, só poderiam ser obtidos com estações solarimétricas de qualidade, apesar da situação brasileira não favorável.

Rampinelli, Silva e Mello (2017) apresentam um estudo do potencial solar no sul do estado de Santa Catarina a partir de dados de estações meteorológicas e dados do *software* Radiasol, além de comparar dados entre uma ferramenta computacional disponível na literatura e o programa SWERA. Dessa forma, os autores ressaltam que o recurso solar é tratado como um importante fator quando se trata da *performance* de um sistema fotovoltaico, e pode ser determinante para a viabilidade de projetos.

Cruz et al. (2018) realizam uma análise e comparação entre quatro sistemas fotovoltaicos no estado do Tocantins a partir de diferentes inclinações e orientações. Os dados considerados no estudo foram obtidos diretamente dos inversores de cada sistema no período de um ano. Como resultados, os autores obtiveram valores de performance em localidades cujas irradiações eram elevadas, além de atingirem semelhança entre sistemas teóricos e reais.

Machado et al. (2020) simulam um sistema fotovoltaico em diferentes *softwares* com o objetivo de obtenção de dados para futuras análises, bem como atestar se a instalação corresponde ao que foi projetado. No estudo foram utilizados os programas HelioScope, PV*SOL e o PVSyst que serviram como fatores de comparação com dados reais colhidos da planta fotovoltaica.

Freitas et al. (2020) determinaram a diferença entre valores de irradiação, variação absoluta e percentual, para o plano inclinado a partir dos modelos computacionais disponíveis nos *softwares* RADIASOL e RADIASOL2. Tais valores foram comparados também com dados obtidos por um piranômetro instalado na cidade de Curitiba, capital do estado do Paraná.

Alves da Rocha (2019) analisou e comparou dados de geração de energia obtidos a partir da modelagem e simulação através do PVSyst com a produção de eletricidade real de um sistema fotovoltaico instalado na cidade de Rio Negro, Paraná. A comparação foi estabelecida por meio de gráficos os dados reais e simulados durante todo o período de um ano.

Rampinelli e Krenzinger (2009) desenvolveram um programa computacional para a simulação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, o FVConect. Os resultados obtidos através da ferramenta foram comparados com o software PVSyst, apresentando concordância. O estudo apresentou também aplicações do FVConect na análise da otimização de sistemas conectados à rede.

Brito (2015) analisou a viabilidade de projetos de captação de energia solar através do *software* PVSyst. O estudo baseou-se em uma residência hipotética na região de Patos, estado da Paraíba e, obteve como resultado um sistema capaz de gerar 41 MWh/ano e um retorno financeiro positivo ao longo de 30 anos.

Stefani (2018) apresentou um estudo de comparação sobre a eficiência do dimensionamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede teórico prático e o *software* PVSyst. A análise solarimétrica foi realizada a partir do banco de dados do SWERA, com a apresentação de perdas e o cálculo do desempenho global de um sistema.

Semelhantemente às referências anteriormente citadas, este trabalho terá por intuito modelar, simular e analisar um sistema fotovoltaico através de alguns *softwares* fotovoltaicos. Posteriormente, os resultados obtidos serão comparados com dados reais de geração de energia elétrica disponíveis na plataforma do inversor fotovoltaico, instalado no Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde da Universidade Federal de Santa Catarina.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. O SISTEMA FOTOVOLTAICO EM ANÁLISE

Este trabalho analisará um sistema fotovoltaico, de 0,99 kWp, instalado em uma planta piloto bioclimática (figura 3) localizada no Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde (CTS) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) no município de Araranguá, bairro Mato Alto, no estado de Santa Catarina. O intuito será comparar os dados reais obtidos da planta, posteriormente tratados através do programa Microsoft Excel, com os dados coletados a partir da modelagem e simulação por *softwares* para sistemas fotovoltaicos. Vale ressaltar que o período analisado corresponde de janeiro de 2021 ao mês de agosto de 2021. Na tabela 1, é possível observar a configuração do sistema, bem como as instalações físicas na figura 4:

Tabela 1 – Especificações do sistema fotovoltaico em análise.

<i>Potência do Sistema</i>	0,99 kWp
<i>Arranjo Fotovoltaico</i>	1 <i>string</i> - 3 módulos (6 m ²)
<i>Inclinação do Arranjo</i>	20°
<i>Orientação (Desvio Azimutal)</i>	Norte Geográfico (0°)
<i>Fabricante dos Módulos / Modelo</i>	BYD / 330PHK-36
<i>Potência Unitária dos Módulos</i>	330 Wp
<i>Quantidade de Inversores</i>	1
<i>Fabricante do Inversor / Modelo</i>	PHB Solar / PHB1500-NS
<i>Potência Nominal do Inversor</i>	1,5 kW

Fonte: O Autor.

Figura 3 – Planta piloto bioclimática.



Fonte: (NTEEL SOLAR, 2021).

Em relação aos equipamentos de proteção, o conjunto conta com chave seccionadora, fusíveis e um dispositivo de proteção contra surtos, para a parte de corrente contínua, além de um disjuntor de 16 A e um segundo DPS para a parte de corrente alternada. Na figura 4, pode-se observar as instalações do sistema:

Figura 4 – Instalações do sistema fotovoltaico em análise.



Fonte: (NTEEL SOLAR, 2021).

3.2. INDICADORES DE DESEMPENHO

Os indicadores constituem as métricas capazes de caracterizar e avaliar sistemas, equipamentos e tecnologias. No caso dos sistemas fotovoltaicos, os indicadores relacionam-se de forma mais comum à energia, eficiência, produtividade e perdas (PRUDENCIO, 2020).

Como um dos principais indicadores, o índice de produtividade do sistema fotovoltaico (Y_F) será abordado neste estudo. Esse indicador pode ser definido com a razão entre a energia elétrica convertida por cada kWp instalado, conforme equação 1 (RAMPINELLI, 2010):

$$Y_F = \frac{1}{P_{STD}} \cdot \left[\frac{1}{\Gamma} \cdot \int_0^{\Gamma} P_{CA}(t) \cdot dt \right] \quad (1)$$

Do mesmo modo, utilizar-se-á a produtividade de referência (Y_R), um parâmetro que indica o valor ideal em relação à produtividade do sistema, conforme equação 2 (RAMPINELLI, 2010):

$$Y_R = \frac{H(\gamma, \beta)}{G_{STD}} \quad (2)$$

Outro fator importante utilizado será o desempenho global do sistema (PR), conforme equação 3, e este será utilizado para calcular a geração teórica do sistema, equação 4 (produto da irradiação de referência em função de inclinação e orientação, desempenho global do sistema e a potência do sistema), com base nos dados de irradiação da literatura (RAMPINELLI, 2010).

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \quad (3)$$

$$E_{FV} = \left(\frac{H(\gamma, \beta) \cdot PR}{G_{STD}} \right) \cdot P_{STD} \quad (4)$$

3.3. SOFTWARE RADIASOL 2

O Radiasol 2 é um programa que faz parte do pacote SOLARCAD, um conjunto de *softwares* destinados a projetos de sistemas de energia solar, tanto térmicos quanto fotovoltaicos. Essa aplicação foi desenvolvida pelo Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e utiliza modelos matemáticos disponíveis na literatura e desenvolvidos por integrantes do laboratório. O Radiasol 2 é utilizado por estudantes e profissionais da área, sendo capaz de fornecer dados de irradiação das diversas localidades do Brasil, em função do desvio azimutal e inclinação de módulo (UFRGS, 2021).

Através do auxílio desse programa, foi possível obter dados de irradiação solar média para a cidade de Florianópolis/SC, cidade utilizada como referência para tais dados, inclusive nos programas, visto que o desvio entre os valores da capital do estado de Santa Catarina e Araranguá são considerados pouco relevantes. No *software* foram informados dados como a localização, a orientação (Norte Geográfico) e a inclinação do arranjo (20°).

Figura 5 – Tela inicial do Radasol 2.



Fonte: O Autor.

3.4. ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR

O Atlas Brasileiro de Energia Solar é uma base de dados produzida e disponibilizada publicamente que utiliza dados de satélites coletados no decorrer de mais de 17 anos. Esse referencial é uma realização do Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), através do Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN). Dessa forma, o Atlas Brasileiro de Energia Solar é considerado de alta confiabilidade e precisão quando se trata do recurso solar estendido espacialmente por todo o território brasileiro (LABREN, 2017).

Semelhante ao *software* Radasol, a base de dados do LABREN serviu como base de dados de irradiação média para a região de Florianópolis, sul do Brasil, e tais valores, posteriormente, foram utilizados para os cálculos conforme equações anteriormente mencionadas na seção de indicadores de desempenho.

3.5. SOFTWARE PVSYST

Desenvolvido para uso de arquitetos, engenheiros e pesquisadores, o programa PVsyst é uma aplicação muito útil quando se trata de sistemas fotovoltaicos. O *software* conta com diversos módulos, como análise econômica, sombreamento, armazenamento de energia, além de ser capaz de importar dados e contar com uma base de dados ampla e confiável (PVSYST, 2021).

A entrada de dados no programa baseou-se em definir a localização, inserir o modelo do arranjo fotovoltaico (número de *strings*, número de módulos em série), modelo dos módulos e inversor, além da orientação e inclinação da planta.

Figura 6 – Tela de definição geral do sistema fotovoltaico no PVsyst.

Grid system definition, Variant VC0: "New simulation variant"

Sub-array

Sub-array name and Orientation
 Name: PV Array
 Orient.: Fixed Tilted Plane
 Tilt: 20°
 Azimuth: 0°

Pre-sizing Help
 No sizing
 Enter planned power: 0.0 kWp
 ... or available area(modules): 0 m²

Select the PV module
 Available Now: [v] Filter: All PV modules [v]
 BYD [v] 330 Wp 32V Si-poly BYD-330-PHK-36 Since 2020 Datasheets 2020 [v] [Open]
 Use optimizer
 Sizing voltages : Vmpp (60°C) 32.8 V
 Voc (-10°C) 49.8 V

Select the inverter
 Available Now: [v] Output voltage: 230 V Mono 50Hz [50 Hz] [60 Hz]
 Goodwe [v] 1.5 kW 80 - 450 V TL 50/60 Hz GW1500-NS Since 2011 [v] [Open]
 Nb. of inverters: 1 [v] Operating voltage: 80-450 V Global Inverter's power: 1.5 kWac
 Input maximum voltage: 500 V

Design the array

Number of modules and strings
 Mod. in series: 3 [v] [between 3 and 10]
 Nb. strings: 1 [v]
 Overload loss: 0.0 %
 Pnom ratio: 0.66 [Show sizing]
 Nb. modules: 3 Area: 6 m²

Operating conditions
 Vmpp (60°C): 98 V
 Vmpp (20°C): 115 V
 Voc (-10°C): 150 V

Plane irradiance: 1000 W/m²
 Impp (STC): 8.8 A
 Isc (STC): 9.2 A
 Isc (at STC): 9.2 A

The inverter power is slightly oversized.
 Max. in data
 STC
 Max. operating power (at 1000 W/m² and 50°C): 0.9 kW
 Array nom. Power (STC): 1.0 kWp

Fonte: O Autor.

3.6. SOFTWARE RETSCREEN

O RETScreen é um *software*, destinado ao gerenciamento de energia limpa relacionado à eficiência energética, projetos de energia renovável e cogeração. O programa é de realização da divisão de recursos naturais do Canadá, *Natural Resources Canada* (NRCAN), e permite medir e analisar o desempenho de instalações de forma a possibilitar oportunidades de melhorias do ponto de vista energético (NRCAN, 2021).

A modelagem no *software* RETScreen é relativamente simples, visto que se necessita informar dados de localização, orientação do arranjo e potência de equipamentos, como módulos e inversores. O modelo dos equipamentos não é relevante para os resultados.

Figura 7 – Tela inicial RETScreen.

Fonte: O Autor.

3.7. SOFTWARE SAM/NREL

O *software System Advisor Model* (SAM) é um programa gratuito, desenvolvido e disponibilizado para *download* pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). Essa aplicação tem por objetivo modelar diferentes tipos de sistemas de energia renovável e é destinada ao público envolvido nessa indústria e/ou nesse mercado, como engenheiros, analistas e pesquisadores (NREL, 2018).

A modelagem e o dimensionamento do sistema no SAM assemelham-se ao PVsyst, e há a necessidade de informar modelos de equipamentos, juntamente com dados de localização, orientação e inclinação do arranjo fotovoltaico.

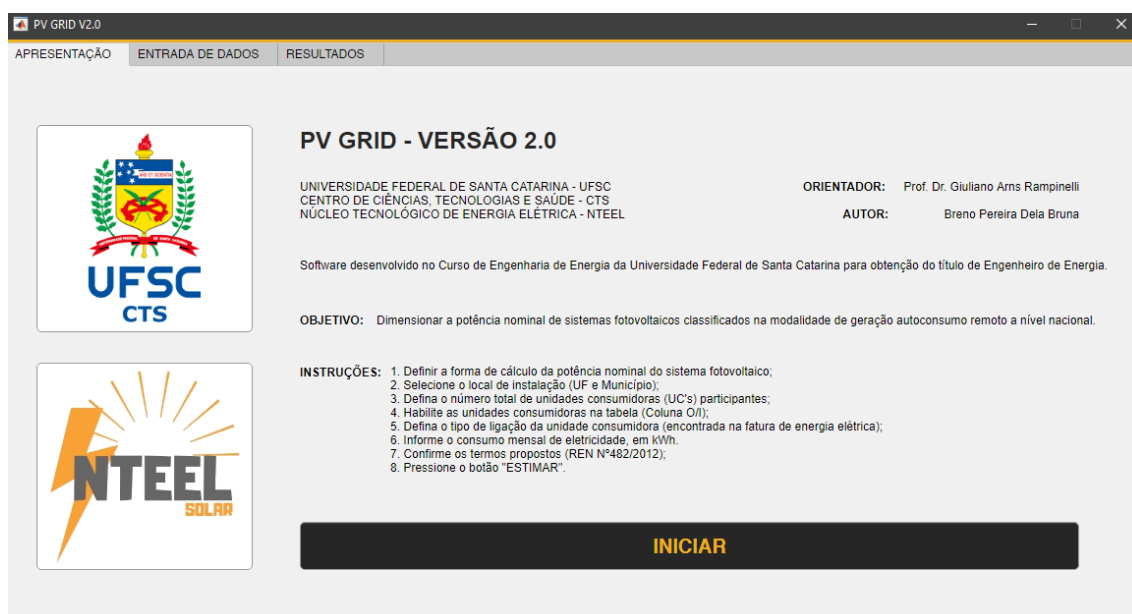
3.8. SOFTWARE PVGRID

O PVGRID é um *software* de simulação, análise e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída. A ferramenta foi disponibilizada para *download* pelo Núcleo Tecnológico de Energia Elétrica – Solar (NTEEL Solar), responsável por seu desenvolvimento (NTEEL Solar, 2021).

O programa, modelado através da plataforma App Design do MatLAB 2018^a, é destinado à utilização de dimensionamentos voltados às unidades consumidoras atendidas em baixa tensão, nas modalidades de geração junto à carga e autoconsumo remoto (BRUNA, 2019).

Diferentemente dos demais programas já mencionados, a simulação no PVGRID foi baseada exclusivamente na localização e a potência do sistema, únicos parâmetros requisitados para a obtenção dos resultados.

Figura 8 – Tela inicial PVGRID.



Fonte: O Autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados reais, obtidos do inversor fotovoltaico instalado na planta piloto bioclimática, utilizados neste trabalho para análises e comparações, compreendem os meses de janeiro a agosto (total de 8 meses). Dessa forma, apesar das simulações realizadas a partir dos *softwares* resultarem em dados referentes a todos os meses do ano, as comparações serão realizadas conforme os meses acima mencionados.

Para fins de entendimento geral, os dados foram recolhidos ao início de cada mês da plataforma de monitoramento do inversor fotovoltaico. Os valores que representam a geração de energia elétrica pelo sistema, são registrados em uma planilha computacional com o intervalo de tempo de cinco minutos, compreendendo o período de um dia completo. Através dos dados planilhados, obtém-se a energia diária gerada somando-os e representando-os na forma de unidade de energia: kWh.

Na tabela 2, é possível observar os dados, após tratamento conforme acima mencionado, divididos por dia e mês, de janeiro a agosto. Na tabela 2, é possível visualizar dois tipos de ausência de dados: "--" e células em cinza. As células em cinza representam dias não existentes no mês correspondente. No outro caso, tratam-se de dados não coletados ou dados que foram descartados devido a problemas no sistema de monitoramento do inversor instalado.

Vale ressaltar que no período do dia 23 de fevereiro a 24 de março o sistema ficou em manutenção. O motivo foi particularmente a instalação dos equipamentos de medição necessários por parte da concessionária de energia responsável pela rede de distribuição na qual a planta fotovoltaica foi instalada.

Por fim, para os meses em que houveram faltas de dados, a geração de energia elétrica média diária mensal e a produtividade mensal, representadas nas tabelas 6 e 8 respectivamente, foram estimadas considerando o período disponível no mês em questão. A estimativa baseou-se em identificar a geração média nos dias registrados e projetar a mesma média para os dias com faltas, obtendo-se o total de energia elétrica gerada no mês, além da média diária.

Tabela 2 – Geração de energia elétrica diária obtida a partir do inversor instalado na planta.

<i>Dia do Mês</i>	<i>Geração de energia elétrica [kWh/dia]</i>							
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>
1	6,20	6,06	--	4,95	5,30	4,63	4,37	4,21
2	6,46	5,58	--	4,63	4,92	3,97	4,82	1,85
3	6,62	4,88	--	5,48	4,90	4,55	4,58	5,03
4	6,68	3,70	--	5,86	3,47	4,41	3,68	3,51
5	3,38	6,82	--	5,64	0,21	4,33	4,48	1,70
6	5,23	6,71	--	5,38	0,42	0,69	3,44	3,41
7	5,06	6,51	--	5,49	5,26	0,77	4,29	3,13
8	6,21	5,92	--	5,88	5,22	1,85	3,77	4,79
9	6,34	5,32	--	5,37	5,18	0,29	4,01	4,37
10	5,84	5,97	--	4,73	4,48	0,45	4,19	0,39
11	6,57	5,83	--	4,75	1,04	4,60	4,28	4,50
12	5,34	2,72	--	5,20	4,56	4,77	3,00	3,63
13	2,45	4,65	--	4,59	5,19	4,66	3,33	1,99
14	2,31	4,10	--	4,73	3,89	4,68	2,80	1,61
15	4,71	6,32	--	5,36	4,81	3,15	0,19	4,06
16	6,38	6,45	--	4,75	--	3,66	4,66	0,95
17	3,55	6,31	--	1,04	--	1,99	4,43	3,77
18	2,86	5,95	--	5,49	4,91	1,43	5,25	0,34
19	2,70	6,35	--	3,42	4,83	0,23	5,12	4,48
20	1,29	6,38	--	3,25	1,65	2,41	4,71	4,12
21	1,09	6,31	--	0,73	0,90	1,92	4,59	3,34
22	2,93	6,02	--	5,21	4,55	1,34	4,79	4,40
23	2,20	--	--	5,11	5,34	2,20	4,44	0,87
24	3,59	--	--	5,38	5,27	0,59	4,48	1,03
25	2,66	--	3,09	3,01	4,90	4,69	4,36	0,98
26	5,01	--	4,42	5,79	4,91	1,68	3,60	1,43
27	3,76	--	2,17	5,39	4,75	0,18	1,19	3,41
28	2,79	--	2,11	5,59	0,67	0,34	5,33	5,46
29	4,59		2,52	4,00	2,57	5,06	5,40	3,92
30	3,20		4,28	5,61	4,79	2,98	5,26	4,07
31	5,67		5,13		4,84		4,77	5,46
<i>Média</i>	4,31	5,67	3,39	4,73	4,06	2,62	4,12	3,10
<i>Desvio Padrão</i>	1,73	1,05	1,22	1,52	1,73	1,78	1,13	1,57

Fonte: O Autor.

4.1. SIMULAÇÕES TEÓRICO-PRÁTICAS

Para fins de nomenclatura, estipulou-se às simulações com base no *software* Radiasol 2 e a base de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar a referência de teórico-práticas. Diferentemente das simulações nos programas fotovoltaicos, nesse caso, utilizou-se apenas dos dados de irradiação solar coletados das duas fontes para estimativas de geração de energia elétrica dos meses que compreendem esse estudo.

Conforme a equação 4, da seção de indicadores de desempenho, além da irradiação solar necessita-se do desempenho global do sistema para cálculo da geração teórica. Dessa forma, o PR foi obtido através da média entre valores disponíveis na literatura, tabela 3, e resultados consultados em um dos *softwares*, o SAM (tabela 4).

Tabela 3 – Índices de produtividade e desempenho global da literatura.

<i>Mês</i>	Y_f	Y_r	PR
<i>Jan</i>	140,1	178,2	0,79
<i>Fev</i>	121,2	155,2	0,78
<i>Mar</i>	141,2	178,8	0,79
<i>Abr</i>	119,2	148,4	0,8
<i>Mai</i>	111,4	136,0	0,82
<i>Jun</i>	97,9	117,9	0,83
<i>Julho</i>	93,5	113,4	0,82
<i>Ago</i>	114,6	138,9	0,82

Fonte: Adaptado de MELLO (2016).

Tabela 4 – Índices de produtividade e desempenho global a partir de *software*.

<i>Mês</i>	Y_f	Y_r	PR
<i>Jan</i>	141,86	182,86	0,78
<i>Fev</i>	121,00	157,19	0,77
<i>Mar</i>	138,50	177,85	0,78
<i>Abr</i>	114,73	145,05	0,79
<i>Mai</i>	105,04	130,74	0,80
<i>Jun</i>	91,54	112,59	0,81
<i>Julho</i>	88,25	108,96	0,81
<i>Ago</i>	109,67	135,27	0,81

Fonte: O Autor.

Na tabela 5 encontram-se os resultados referentes ao desempenho global médio obtido para cada mês, juntamente com os dados de irradiação solar coletados do *software* Radasol 2 e do Atlas Brasileiro de Energia Solar. Tais valores, juntamente com a potência de pico do sistema servirão para estimar a geração e a produtividade teórica do sistema, conforme as tabelas representadas posteriormente (tabela 6 e 7 respectivamente).

Tabela 5 – Índices de irradiação solar média diária mensal e PR utilizados para cálculo teórico-prático.

<i>Mês</i>	<i>Irradiação Solar [kWh/m²/dia]</i>		<i>PR Médio</i>
	<i>Radasol 2</i>	<i>LABREN</i>	
<i>Jan</i>	5,96	5,90	0,78
<i>Fev</i>	5,59	5,47	0,77
<i>Mar</i>	4,92	4,67	0,78
<i>Abr</i>	4,07	3,86	0,80
<i>Mai</i>	3,27	3,02	0,81
<i>Jun</i>	2,83	2,46	0,82
<i>Julho</i>	2,90	2,70	0,81
<i>Ago</i>	3,56	3,40	0,82

Fonte: O Autor.

4.2. GERAÇÃO MÉDIA DIÁRIA MENSAL

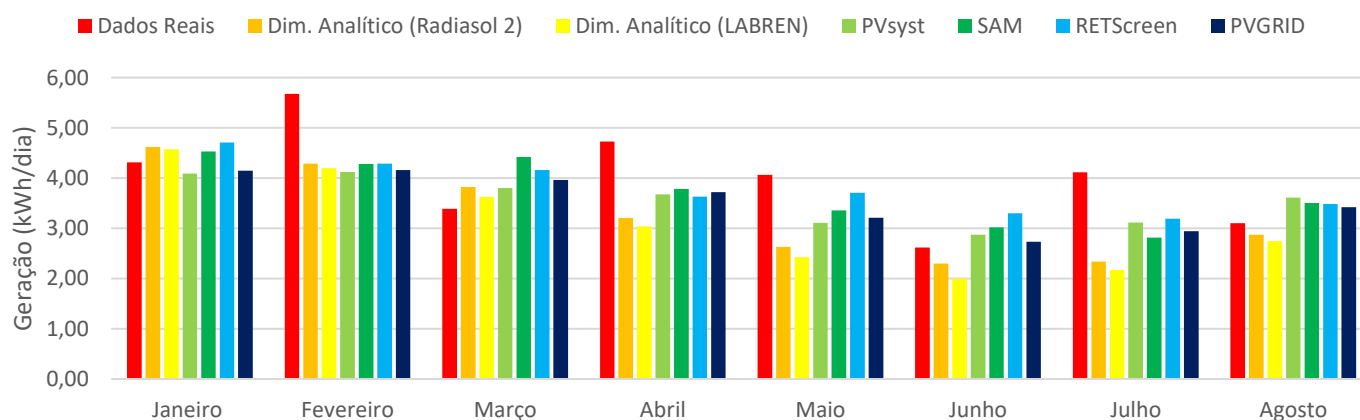
A tabela 6, bem como a figura 9, representam a geração média diária mensal dos meses de janeiro a agosto. É importante ressaltar que os dados utilizados do Radasol 2 e do LABREN são dados de radiação solar. Dessa forma, através dos números obtidos dessas bases de dados, estimou-se a geração média diária mensal utilizando equações do método analítico, mais especificamente descritas na seção de indicadores de desempenho. Os demais dados foram extraídos diretamente dos *softwares* após modelagem e simulação do sistema estudado.

Vale salientar que os dados estimados nos programas fotovoltaicos resultaram em valores para cada mês de um ano completo. Entretanto, como forma de condensar os resultados conforme a disponibilidade dos dados reais, os números dos meses de setembro a dezembro foram omitidos.

Tabela 6 – Geração média diária mensal a partir dos dados reais e simulações dos *softwares* e bases de dados.

Mês	Geração Média Diária Mensal [kWh/dia]						
	Dados Reais	Radiasol 2	LABREN	PVsyst	SAM	RETScreen	PVGRID
Jan	4,31	4,62	4,57	4,09	4,53	4,71	4,15
Fev	5,67	4,29	4,20	4,12	4,28	4,29	4,16
Mar	3,39	3,82	3,62	3,80	4,42	4,16	3,96
Abr	4,73	3,21	3,04	3,67	3,79	3,63	3,72
Mai	4,06	2,63	2,43	3,11	3,35	3,71	3,21
Jun	2,62	2,30	2,00	2,87	3,02	3,30	2,73
Julho	4,12	2,34	2,17	3,12	2,82	3,19	2,94
Ago	3,10	2,87	2,75	3,61	3,50	3,48	3,42
Média	4,00	3,26	3,10	3,55	3,71	3,81	3,54
Desvio Padrão	0,97	0,89	0,95	0,47	0,65	0,53	0,55

Fonte: O Autor.

Figura 9 – Comparação da geração média diária mensal entre dados reais e *softwares* e bases de dados.

Fonte: O Autor.

Analisando a tabela 6 e a figura 9, percebe-se que no intervalo, a média diária mensal de geração real foi máxima no mês de fevereiro, cerca de 5,67 kWh/dia, e mínima no mês de junho, com 2,62 kWh/dia. Em relação às simulações com os *softwares* e bases de dados, o valor máximo foi atingido em janeiro, através da modelagem com a ferramenta RETScreen: 4,71 kWh/dia. A menor média, cerca de 2 kWh/dia em junho, foi obtida com uma modelagem teórico-prática, onde os dados de irradiação solar utilizados, eram provenientes do Atlas Brasileiro de Energia Solar.

Em relação à média dos 8 meses, realizando uma análise percentual, a simulação mais próxima da realidade é apresentada pelo *software* RETScreen, cerca de 5% abaixo do valor obtido através dos dados reais. Vale ressaltar que a modelagem por meio desse programa resultou na maior geração média entre as simulações, aproximadamente 3,81 kWh/dia contra 4 kWh/dia para os números retirados do inversor. Já a simulação que mais destoou foi a partir da base de dados do LABREN, cerca de 23% menor, nos termos de média gerada, em relação aos resultados reais.

4.3. PRODUTIVIDADE MENSAL

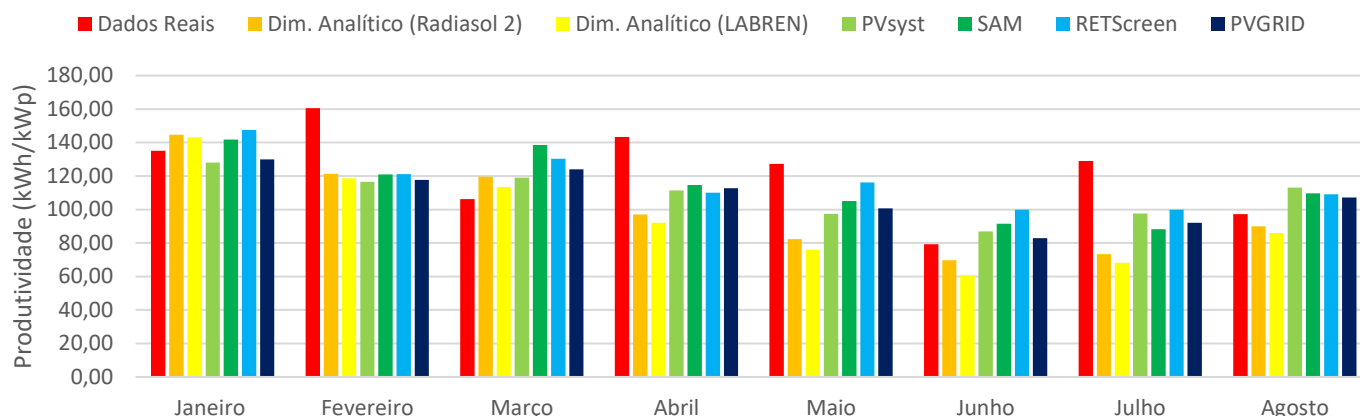
A produtividade mensal obtida no estudo pode ser observada em números e graficamente na tabela 7 e figura 10 respectivamente. Semelhantemente à geração média diária mensal, as colunas referentes a Radasol 2 e LABREN correspondem aos resultados teórico-práticos enquanto as demais aos *softwares*.

Vale destacar que, por se tratar de um sistema fotovoltaico de aproximadamente 1 kWp, a produtividade mensal é muito semelhante à geração total de energia para cada mês, visto que esse indicador representa a energia convertida por kWp, conforme equação 1 da seção de indicadores de desempenho.

Tabela 7 – Produtividade mensal obtida através dos dados reais e simulações.

<i>Mês</i>	<i>Produtividade Mensal do Sistema [kWh/kWp]</i>						
	<i>Dados Reais</i>	<i>Radasol 2</i>	<i>LABREN</i>	<i>PVsyst</i>	<i>SAM</i>	<i>RETScreen</i>	<i>PVGRID</i>
<i>Jan</i>	135,01	144,65	143,21	128,08	141,86	147,47	129,95
<i>Fev</i>	160,49	121,29	118,66	116,57	121,00	121,21	117,65
<i>Mar</i>	106,15	119,63	113,48	118,99	138,50	130,30	124,00
<i>Abr</i>	143,24	97,13	92,12	111,31	114,73	110,10	112,71
<i>Mai</i>	127,18	82,28	75,99	97,37	105,04	116,16	100,62
<i>Jun</i>	79,29	69,75	60,65	86,97	91,54	100,00	82,83
<i>Julho</i>	128,88	73,26	68,08	97,58	88,25	100,00	92,16
<i>Ago</i>	97,21	89,99	85,97	113,13	109,67	109,09	107,11
<i>Média</i>	122,18	99,75	94,77	108,75	113,82	116,79	108,38
<i>Total</i>	977,45	797,97	758,17	870,00	910,59	934,34	867,02
<i>Desvio Padrão</i>	26,37	26,41	28,24	13,60	19,61	16,09	16,00

Fonte: O Autor.

Figura 10 – Comparação da produtividade mensal entre dados reais e *softwares* e bases de dados.

Fonte: O Autor.

De forma semelhante à geração média diária mensal, o mês que mais se destacou em relação à produtividade mensal foi o mês de fevereiro, com um resultado de 160,49 kWh/kWp. O mês com o menor número de produtividade foi o mês de junho, cerca de 79,3 kWh/kWp. Os resultados das simulações para os valores máximo e mínimo, foram também correspondentes ao RETScreen e Atlas Brasileiro de Energia Solar respectivamente (máximo de 147,47 kWh/kWp e mínimo de 60,65 kWh/kWp).

A tabela 8, por sua vez, representa a comparação percentual entre os dados coletados a partir do inversor da planta fotovoltaica e as simulações a partir dos programas e bases de dados.

Tabela 8 – Comparação percentual entre dados reais e *softwares* e bases de dados.

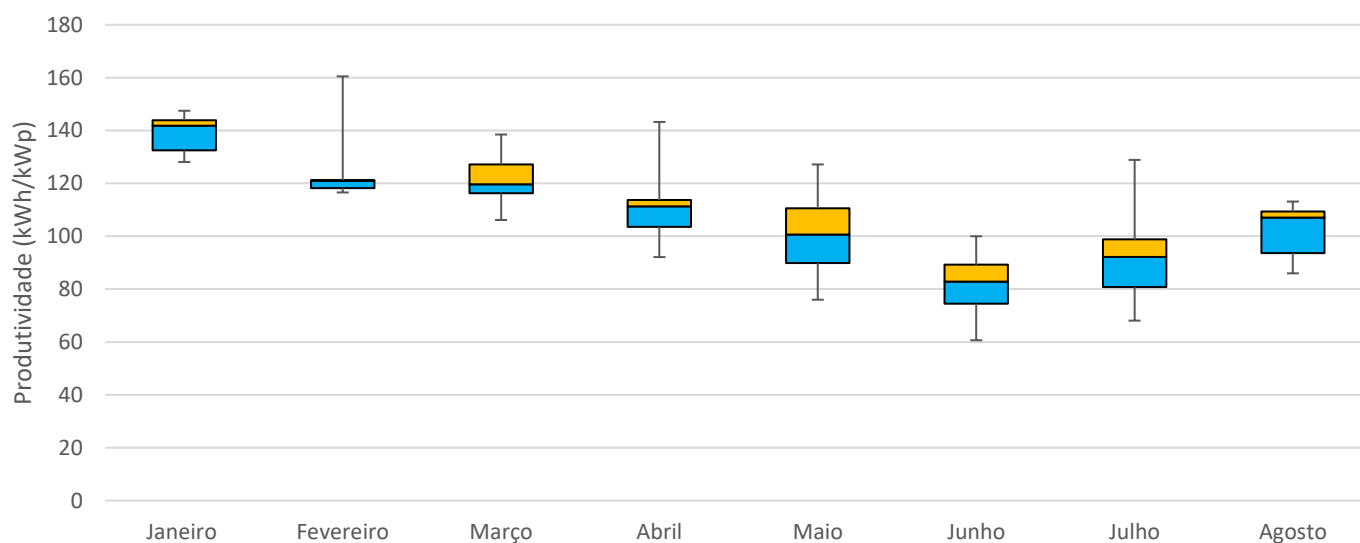
Mês	Dados Reais	Radiasol 2	LABREN	PVsyst	SAM	RETScreen	PVGRID
Jan	135,01	7%	6%	-5%	5%	9%	-4%
Fev	160,49	-24%	-26%	-27%	-25%	-24%	-27%
Mar	106,15	13%	7%	12%	30%	23%	17%
Abr	143,24	-32%	-36%	-22%	-20%	-23%	-21%
Mai	127,18	-35%	-40%	-23%	-17%	-9%	-21%
Jun	79,29	-12%	-24%	10%	15%	26%	4%
Julho	128,88	-43%	-47%	-24%	-32%	-22%	-28%
Ago	97,21	-7%	-12%	16%	13%	12%	10%
Total	977,45	-18%	-22%	-11%	-7%	-4%	-11%

Fonte: O Autor.

A partir da tabela 8, pode-se perceber que o *software* que mais se aproximou da realidade pontualmente foi o PVGRID, no qual, para os meses de janeiro e junho, resultou em uma diferença percentual de apenas 4% para os dados reais. A maior diferença foi obtida através da simulação teórico-prática com a base do LABREN, em julho, cerca de 47% menor que a realidade. Na média, de forma semelhante à geração diária mensal, a simulação que se destaca é a feita a partir do RETScreen, com uma média de 4% de diferença quando avaliado o período completo do estudo. O pior resultado foi obtido a partir dos dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar, uma produtividade 22% menor que a realidade aproximadamente.

Por fim, na figura 11, é possível verificar o perfil de produtividade mensal, destacando a flutuação dos resultados entre os dados medidos a partir da plataforma de monitoramento do inversor do sistema fotovoltaico e as modelagens e simulações através das ferramentas computacionais e bases de dados.

Figura 11 – Perfil da produtividade média mensal entre dados reais e simulações.



Fonte: O Autor.

Analisando o *box plot* da figura 11, observa-se a maior variação entre o ponto máximo e mínimo no mês de julho: 128,88 e 68,08 kWh/kWp respectivamente (representando uma diferença de aproximadamente 89%). Já a menor variação ficou por conta do mês de janeiro: cerca de 15% entre o resultado máximo (147,47 kWh/kWp) e o mínimo (128,08 kWh/kWp).

5. CONCLUSÃO

Este estudo apresentou a modelagem, simulação e análise de um sistema fotovoltaico instalado em uma planta piloto bioclimática a partir de diferentes métodos de dimensionamento e bases de dados. Avaliou-se a geração de energia elétrica real do sistema de 0,99 kWp ao longo de oito meses, através dos dados obtidos do sistema de monitoramento do inversor, e comparou tais valores com simulações a partir de programas e modelagens teórico-práticas.

No decorrer do estudo foi possível conhecer aspectos teóricos dos sistemas fotovoltaicos e da geração distribuída no Brasil, bem como associar os conceitos da literatura com a prática quando se trata da irradiação e do recurso solar em uma localidade específica do globo.

Pode-se dizer que as modelagens teóricas-práticas foram realizadas com sucesso através das bases de dados da ferramenta Radasol 2 e do LABREN. Da mesma forma, às simulações e resultados obtidos através do PVsyst, SAM, RETScreen e PVGRID foram definidos e cooperaram para o desenvolvimento da experiência técnica do autor diante dessas ferramentas carregadas de particularidades e possibilidades.

A comparação a partir da geração média diária mensal e produtividade mensal, após coleta e uma série de tratamentos de dados através do programa Microsoft Excel, possibilitou a verificação das discrepâncias e proximidades entre a realidade e as simulações via *softwares* fotovoltaicos.

É importante destacar que cada ferramenta utiliza bases de dados de radiação solar próprias, diferindo da radiação solar que efetivamente ocorreu durante o estudo, e que está diretamente relacionada com a geração real. Tal diferença entre bases de dados de radiação solar é o que denota as divergências de estimativa de cada modelo e programa. Além disso, é importante destacar a estimativa da geração de energia elétrica nos meses de fevereiro, março e maio, que foram meses que apresentaram lacunas no monitoramento. Do mesmo modo, o mês de julho destaca-se como atípico, visto que a irradiação solar registrada neste mês foi superior à média histórica.

No geral, o *software* que se destacou, na média, pela semelhança com a realidade foi o RETScreen, com diferenças na faixa de 4% para a produtividade mensal e geração média diária mensal. A modelagem teórico-prática de pior resultado foi a que utilizou com base de dados o Atlas Brasileiro de Energia Solar, ficando na casa de 22% de diferença para a realidade.

Apesar do RETScreen apresentar uma maior proximidade com os dados da realidade, isso não é um indicativo de excelência em relação às demais ferramentas, visto que o período avaliado corresponde a um pequeno intervalo de tempo, avaliado isoladamente. Da mesma forma, a maior discrepância observada, no caso os valores obtidos através dos dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar, não denotam má qualidade, visto que estes números são o resultado de um amplo e histórico estudo a nível nacional por parte do LABREN.

Do ponto de vista técnico, bem como em relação às projeções econômicas frequentemente associadas aos investimentos em energia solar, tais divergências serão minimizadas com o tempo, visto que a geração de energia elétrica real seguirá, no longo prazo, a irradiação solar histórica utilizada pelos *softwares* e bases de dados analisados. No geral, todas as ferramentas são de excelência para a estimativa de geração de energia elétrica de sistemas fotovoltaicos.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. **Energia Solar é Limpa? Entenda seu Conceito e Tecnologias**. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solar-e-limpa-entenda-seu-conceito-e-tecnologias/>>. Acesso em: 12 jul. 2021.

ABSOLAR. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 13 ago. 2021.

ALVES DA ROCHA, Bruno Francisco. **Análise da produção de energia gerada de um sistema fotovoltaico em Rio Negro em comparação com os valores de energia simulados pelo software PVsyst**. 2019. 105 f. Monografia de Especialização em Energias Renováveis - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

ANEEL. **Geração Distribuída**. Disponível em: < <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida/>>. Acesso em: 3 jul. 2021.

ANEEL. **Micro e Minigeração Distribuída – Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/>>. Acesso em: 3 jul. 2021.

ARNS RAMPINELLI, G.; SILVA, J. E.; MELLO, A. D.. **ANÁLISE DO RECURSO SOLAR DA REGIÃO SUL DE SANTA CATARINA A PARTIR DE DISTINTAS REDES DE DADOS METEOROLÓGICOS**. Revista Brasileira de Energia Renováveis, v. 6, p. 165-183, 2017.

BRITO, Kal-El Basílio. **Estudo de Caso de um Projeto de Unidade de Captação de Energia Fotovoltaica Empregando o Software PVsyst**. 2015. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

BRUNA, Breno Pereira Dela. **Desenvolvimento de Software para Simulação e Análise de Compensação de Energia Elétrica a partir de Sistemas Fotovoltaicos de Geração Distribuída - PVGRID 2.0**. 2019. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2019.

BRUNA, B. P. D.; RAMPINELLI, G. A.. **Desenvolvimento de Software de Dimensionamento e Simulação de Sistemas Fotovoltaicos e Análise de Compensação de Energia Elétrica – PVGRID 2.0**. In: VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2020, Fortaleza. Anais do VIII CBENS, 2020.

CRUZ, A. D. DA et al. **Análise de Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede no Estado do Tocantins sob Diferentes Orientações**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS 2018, p. 2 10, 2018.

FREITAS, D. V.; SOUZA, M. B.; TONOLO, E. A.; JUNIOR, J. U.; TIEPOLO, G. M.. **Comparação entre Valores de Irradiação no Plano Inclinado na Latitude Medida e Calculada a Partir dos Softwares RADIASOL e RADIASOL2**. In: VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2020, Fortaleza. Anais do VIII CBENS, 2020.

GASPARIN, F. P.; KRENZINGER, A. **Desempenho de um Sistema Fotovoltaico em Dez Cidades Brasileiras com Diferentes Orientações do Pannel**. Revista Brasileira de Energia Solar, v. 8, n. 1, p. 10 17, 2017.

INEE. **O que é Geração Distribuída**. Disponível em: <http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp/>. Acesso em: 3 jul. 2021.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p.

MACHADO, G. M. V.; SILVA, J. L. S.; MOREIRA, H. S.; VARGAS, T. N.; PRYM, G. C. S.; VILLALVA, M. G.. **Estudo de Caso de um Sistema Fotovoltaico Instalado no Campus da Unicamp em Diferentes Softwares de Simulação**. In: VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2020, Fortaleza. Anais do VIII CBENS, 2020.

MELLO, Arthur Durigon. **Análise de Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede a partir da Determinação de Índices de Mérito**. 2016. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2016.

NRCAN. **RETScreen**. Disponível em: <<https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>>. Acesso em: 30 Jun. 2021.

NREL. National Renewable Energy Laboratory. **What is SAM?** Disponível em: <<https://sam.nrel.gov/>>. Acesso em: 27 jun. 2021.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, v. 1, p. 47-499, 2014.

PRUDENCIO, Bruna Neves. **Análise e Influência da Distribuição de Temperatura de Inversor no Desempenho Energético de Sistemas Fotovoltaicos de Geração Distribuída com Distintos Fatores de Dimensionamento**. 2020. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2020.

PVSYST. **Features**. Disponível em: <<https://www.pvsyst.com/features/>>. Acesso em: 30 jun. 2021.

RAMPINELLI, G. A.; KRENZINGER, A.. **Descrição de um Programa Computacional de Simulação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica de Distribuição**. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, v. 13, p. 04.21-04.28, 2009.

RAMPINELLI, Giuliano Arns. **Estudo De Características Elétricas E Térmicas De Inversores Para Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede**. 2010. 285 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SCARABELOT, L. T.; RAMPINELLI, GIULIANO A.. **Desenvolvimento de Software de Dimensionamento e Análise do Sistema de Compensação de Geração Distribuída em Unidades Prossumidoras**. Brazilian Journals of Business, v. 1, p. 1237-1251, 2019.

SCARABELOT, Letícia Toretí. **Influência do fator de dimensionamento de inversor no desempenho termoenergético de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída**. 2020. 152 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

SOLAR, Nteel. **Software PVGRID**. Disponível em: <<https://nteelsolar.ufsc.br/software/>>. Acesso em: 30 jun. 2021.

SOLAR, Nteel. **Equipamentos e Instrumentos**. Disponível em: <<https://nteelsolar.ufsc.br/equipamentos-e-instrumentos/>>. Acesso em: 4 ago. 2021.

STEFANI, Flávio Silveira. **Comparação entre o dimensionamento prático de um sistema fotovoltaico conectado à rede e um *software* de dimensionamento de sistema fotovoltaico**. 2018. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

UFRGS. Laboratório de Energia Solar - LABSOL. **Desenvolvimento de Softwares - SOLARCAD**. Disponível em: <<http://www.solar.ufrgs.br/#softwares>>. Acesso em: 28 jun. 2021.