

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

BRUNA NEVES PRUDENCIO

**ANÁLISE E INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA DE  
INVERSOR NO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE SISTEMAS  
FOTOVOLTAICOS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA COM DISTINTOS  
FATORES DE DIMENSIONAMENTO**

Araranguá, SC

2020

Bruna Neves Prudencio

**ANÁLISE E INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA DE  
INVERSOR NO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE SISTEMAS  
FOTOVOLTAICOS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA COM DISTINTOS  
FATORES DE DIMENSIONAMENTO**

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.  
Coorientadora: Eng. Dra. Letícia Toreti Scarabelot.

Araranguá

2020

BRUNA NEVES PRUDENCIO

**ANÁLISE E INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA DE  
INVERSOR NO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE SISTEMAS  
FOTOVOLTAICOS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA COM DISTINTOS  
FATORES DE DIMENSIONAMENTO**

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

Eng. Dra. Letícia Toreti Scarabelot  
LEnergy Energia Solar

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

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

Bruna Neves Prudencio  
Autora

Araranguá, 26 de novembro de 2020.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Andres e Ronaldo e aos meus avós, Jorge e Leda, que sempre cuidaram de mim e meus irmãos e sempre nos incentivaram a estudar cada vez mais. Aos meus irmãos, Pedro e Heitor, que foram os maiores motivos para eu continuar nessa jornada e a minha irmã Núbia pelos momentos de parceria.

Ao meu namorado Mateus, pelo apoio, incentivo e por estar ao meu lado em todos os momentos durante essa trajetória.

Às amigas de graduação, Ioly e Gabriela, pelos momentos que passamos estudando e nos motivando para não desistir. Às amigas de apartamento Maria e Juliana, foi muito especial dividir a casa com vocês, obrigada pelos momentos fora da rotina e pelas conversas acolhedoras. Às amigas Isadora, Brenda e Ingrid, que mesmo distante se fizeram presentes ao longo desses anos de graduação.

Ao professor e orientador Dr. Giuliano Rampinelli, por todo o suporte e conhecimento transmitido durante a elaboração deste trabalho. A todos os professores que tive pela vida e que contribuíram com a minha formação.

A todos que de alguma forma fizeram parte da minha trajetória, o meu muito obrigada.

## RESUMO

A energia solar é uma alternativa para diversificar a matriz elétrica do Brasil, devido ao potencial solar do país, pela confiabilidade e maturidade que a tecnologia fotovoltaica apresenta atualmente, além de ser uma fonte de energia economicamente competitiva. Com a Resolução Normativa (REN) nº 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) a geração distribuída passou a ser regulamentada no país, assim, ocorreu um aumento significativo no número de instalações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Com esse aumento, é preciso conhecer os componentes desses sistemas e suas funcionalidades a fim de garantir o crescimento da tecnologia e a qualidade da energia elétrica. Em um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR) tem-se o inversor, que é responsável por fornecer energia elétrica em corrente alternada (c.a.) através de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua (c.c.) O fator de dimensionamento do inversor (FDI) é definido pela razão entre a potência do inversor e a potência do gerador fotovoltaico. Como o inversor é um equipamento eletrônico, é inevitável que durante a sua operação o mesmo aqueça, entretanto o aquecimento excessivo deve ser evitado, pois pode comprometer a vida útil do equipamento. Desta forma, este trabalho visa analisar a influência da temperatura operacional de inversor no desempenho energético de SFCRs com diferentes FDI. Analisou-se quatro SFCRs, sendo dois deles com inversores com potência igual a 3 kW e outros dois com potência de inversor de 5 kW. Comparou-se os dados de temperaturas reais medidas nos inversores com os dados obtidos por meio de simulação e modelagem matemática. A temperatura real dos inversores foi medida por meio de um sensor instalado no dissipador do inversor, enquanto, que a temperatura simulada foi determinada utilizando os dados obtidos a partir de modelagem e simulação dos sistemas fotovoltaicos por meio do *software* SAM e o modelo matemático que descreve o perfil da temperatura operacional de inversores. Com objetivo de comparar os SFCRs, considerou-se também os índices de mérito de produtividade e fator de capacidade. Analisando os sistemas com mesma potência de inversor, conclui-se que os sistemas com maiores FDI apresentaram as menores temperaturas de inversor, tanto para as temperaturas reais quanto para as temperaturas simuladas e modeladas de inversor.

**Palavras-chave:** Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, Temperatura de Inversor, Fator de Dimensionamento de Inversor.

## ABSTRACT

Solar energy is an alternative to diversify Brazil's electricity matrix, due to the country's solar potential, the reliability and maturity that photovoltaic technology currently presents, besides being an economically competitive energy source. With ANEEL's REN n° 482, distributed generation began to be regulated in the country, thus, there was a significant increase in the number of photovoltaic system installations connected to the network. With this increase, it is necessary to know the components of these systems and their functionalities in order to ensure the growth of technology and the quality of electrical energy. In an grid connected photovoltaic system (GCPS) there is the inverter, which is responsible for supplying electrical power in a.c. through an electrical power source in d.c. The design factor of the inverter is defined by the ratio between the inverter power and the photovoltaic generator power. As the inverter is an electronic equipment, it is inevitable that during its operation the same heat, however the excessive heating should be avoided, because it can compromise the life of the equipment. Thus, this work aims to analyze the influence of the inverter operating temperature on the energy performance of GCPS with different inverter sizing factor (ISF). Four GCPS were analyzed, two with inverters with power equal to 3 kW and the other two with inverter power of 5 kW. The actual temperature data measured in the inverters were compared with the data obtained through simulation and mathematical modeling. The actual temperature of the inverters was measured by means of a sensor installed in the inverter sink, while the simulated temperature was determined using the data obtained from modeling and simulation of photovoltaic systems through the SAM software and the mathematical model that describes the operational temperature profile of inverters. In order to compare the GCPS, the productivity merit indices and capacity factor were also considered. Analyzing the systems with the same inverter power, it was concluded that the systems with higher ISF presented the lowest inverter temperatures, both for the real temperatures and for the simulated and modeled temperatures of inverter.

**Palavras-chave:** Photovoltaic Systems Connected to the Grid, Inverter Temperature, Inverter Sizing Factor.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama esquemático de sistema fotovoltaico conectado à rede.....	17
Figura 2 – Sistema FV 1 localizado em Araranguá/SC.....	28
Figura 3 – Sistema FV 2 localizado em Jacinto Machado/SC.....	28
Figura 4 – Sistema FV 3 localizado em Rio Negrinho/SC.....	29
Figura 5 – Sistema FV 4 localizado em Jacinto Machado/SC.....	29
Figura 6 – Comportamento/Perfil da temperatura real medida dos inversores dos SFCRs 1 e 2.....	36
Figura 7 – Comportamento/Perfil da temperatura simulada dos inversores dos SFCRs 1 e 2.....	37
Figura 8 – Índice de produtividade mensal para os SFCRs 1 e 2.....	38
Figura 9 – Índice de fator de capacidade mensal para os SFCRs 1 e 2.....	38
Figura 10 – Comportamento/Perfil da temperatura real medida dos inversores dos SFCRs 3 e 4.....	40
Figura 11 – Comportamento/Perfil da temperatura simulada dos inversores dos SFCRs 3 e 4.....	40
Figura 12 – Índice de produtividade mensal para os SFCRs 3 e 4.....	41
Figura 13 – Índice de fator de capacidade mensal para os SFCRs 3 e 4.....	41
Figura 14 – Comportamento/Perfil da temperatura real e da temperatura simulada do inversor do SFCR 1.....	43
Figura 15 – Comportamento/Perfil da temperatura real e da temperatura simulada do inversor do SFCR 2.....	45
Figura 16 – Comportamento/Perfil da temperatura real e da temperatura simulada do inversor do SFCR 3.....	47
Figura 17 – Comportamento/Perfil da temperatura real e da temperatura simulada do inversor do SFCR 4.....	48
Figura 18 – Comparação da temperatura real, simulada e modelada do inversor do SFCR 1.....	51
Figura 19 – Comparação da temperatura real, simulada e modelada do inversor do SFCR 2.....	53
Figura 20 – Comparação da temperatura real, simulada e modelada do inversor do SFCR 3.....	55

Figura 21 – Comparação da temperatura real, simulada e modelada do inversor do SFCR 4.....	57
--	----



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo de componentes e elementos internos de inversores.....	20
Tabela 2 – Especificações dos sistemas fotovoltaicos analisados.....	27
Tabela 3 – Especificações do inversor utilizado nos SFCRs 1 e 2.....	30
Tabela 4 – Especificações do inversor utilizado nos SFCRs 3 e 4.....	30
Tabela 5 – Especificações do inversor utilizado nas simulações do SFCRs 1 e 2.....	32
Tabela 6 – Especificações do inversor utilizado nas simulações do SFCRs 3 e 4.....	32
Tabela 7 – Valores obtidos para os parâmetros de $F_{CAP}$ e $F_D$ para a determinar a temperatura simulada do inversor.....	34
Tabela 8 – Valores obtidos para os parâmetros de $F_{CAP}$ e $F_D$ para determinar a temperatura modelada do inversor.....	35
Tabela 9 – Média e desvio padrão dos indicadores de desempenho entre os SFCRs 1 e 2.....	39
Tabela 10 – Média e desvio padrão dos indicadores de desempenho entre os SFCRs 3 e 4.....	42
Tabela 11 – Valores de amplitude, mediana e máxima das temperaturas reais e simuladas do inversor para o SFCR 1.....	44
Tabela 12 – Valores de amplitude, mediana e máxima das temperaturas reais e simuladas do inversor para o SFCR 2.....	45
Tabela 13 – Valores de amplitude, mediana e máxima das temperaturas reais e simuladas do inversor para o SFCR 3.....	47
Tabela 14 – Valores de amplitude, mediana e máxima das temperaturas reais e simuladas do inversor para o SFCR 4.....	48
Tabela 15 – Média diária da temperatura real, simulada e modelada do inversor para o SFCR 1.....	52
Tabela 16 – Média diária da temperatura real, simulada e modelado inversor para o SFCR 2.....	54
Tabela 17 – Média diária da temperatura real, simulada e modelado inversor para o SFCR 3.....	56
Tabela 18 – Média diária da temperatura real, simulada e modelado inversor para o SFCR 4.....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BEN – Balanço Energético Nacional

c.a. – Corrente Alternada

c.c. – Corrente Contínua

$F_{CAP}$  – Fator de capacidade térmica do inversor

$F_D$  – Fator de dissipação do inversor

FC – Fator de Capacidade

FDI – Fator de Dimensionamento do Inversor

GD – Geração Distribuída

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

NREL – *National Renewable Energy Laboratory*

REN – Resolução Normativa

SAM – *System Advisor Model*

SFCR – Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

SPMP – Seguidor do Ponto de Máxima Potência

T – Temperatura

UCs – Unidades Consumidoras

$Y_F$  – Produtividade

# SUMÁRIO

## **1 INTRODUÇÃO**

### 1.1 OBJETIVOS

#### **1.1.1 Objetivo Geral**

#### **1.1.2 Objetivos Específicos**

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### 2.1 GERAÇÃO DISTRIBUIDA

### 2.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

### 2.3 INVERSOR

### 2.4 FATOR DE DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR

### 2.5 TEMPERATURA DE INVERSOR

### 2.6 ESTADO DA ARTE

## **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

### 3.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM MONITORAMENTO

### 3.2 INDICADORES DE DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

### 3.3 SOFTWARE SAM/NREL

### 3.4 MODELO DE TEMPERATURA DE INVERSOR

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### 4.1 ANÁLISE DE FATOR DE DIMENSIONAMENTO DE INVERSOR E A INFLUÊNCIA DE TEMPERATURA

#### **4.1.1 Sistemas Fotovoltaicos 1 e 2**

#### **4.1.2 Sistemas Fotovoltaicos 3 e 4**

### 4.2 ANÁLISE COMPARATIVA DE TEMPERATURA REAL E SIMULADA DE INVERSOR

**4.2.1 Sistemas Fotovoltaicos 1 e 2**

**4.2.2 Sistemas Fotovoltaicos 3 e 4**

**4.3 COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA DIÁRIA REAL, SIMULADA E  
MODELADA DE INVERSOR**

**4.3.1 Sistemas Fotovoltaicos 1 e 2**

**4.3.2 Sistemas Fotovoltaicos 3 e 4**

**5 CONCLUSÃO**

**6 REFERÊNCIAS**

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico está diretamente relacionado com o consumo de energia elétrica. O Brasil apresenta a maior parte da sua matriz elétrica renovável, com uso principalmente das grandes centrais hidrelétricas que representam 64,9 % da matriz segundo dados disponibilizados pelo Balanço Energético Nacional (BEN, 2020). Entretanto é necessário buscar outras fontes energéticas com objetivo de diversificar a matriz elétrica do país. Dessa forma a energia solar se apresenta uma solução viável, visto o grande potencial solar do país devido a sua localização e pela confiabilidade e maturidade da tecnologia fotovoltaica, e principalmente pela competitividade econômica dos sistemas fotovoltaicos.

Por meio REN n° 482 da ANEEL a geração distribuída (GD) passou a ser regulamentada no Brasil. A geração distribuída tem como característica a proximidade da geração de energia elétrica com as cargas, assim, os custos e as perdas com o uso do sistema de transmissão de energia elétrica são reduzidos (MACHADO, 2019). Posteriormente a normativa foi atualizada pela REN n° 687 que caracteriza sistemas de até 75 kW como de microgeração e sistemas de 75 kW a 5 MW como de minigeração distribuída. De acordo com dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2020) a potência instalada de geração distribuída no Brasil atingiu 3 GW em 2020, impulsionada principalmente pelos sistemas fotovoltaicos que representam 95,5 % da potência instalada de geração distribuída no país e em outubro de 2020 o Brasil apresentava 305.769 SFCRs.

Um SFCR é composto por um gerador fotovoltaico, associação de módulos fotovoltaicos, o inversor e a rede elétrica local (ZILLES *et al.*, 2012). Esse sistema tem como função o fornecimento de energia elétrica aos consumidores, de forma a haver um fluxo bidirecional de energia elétrica (SOUZA, 2016). Com o aumento da utilização dos SFCRs é necessário conhecer seus componentes e funcionalidades. Segundo Perin (2016) é fundamental conhecer as características operacionais dos sistemas fotovoltaicos, para a escolha dos componentes além do desenvolvimento da tecnologia e otimização dos sistemas. Os sistemas podem ser avaliados e comparados por meio de índices de mérito. De acordo com Rampinelli (2010) esses índices são dados que representam equipamentos, tecnologias ou sistemas de acordo com a sua eficiência de conversão de

energia. Para um SFCR, esses indicadores representam índices que estão relacionados à energia, eficiência, produtividade, desempenho e as perdas do sistema fotovoltaico.

Em um SFCR, entre a geração e fornecimento para a rede elétrica ou para as cargas, tem-se o inversor que é um dispositivo eletrônico que tem como função fornecer energia elétrica em corrente alternada (c.a.) por meio de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua (c.c.) (PINHO; GALDINO, 2014).

Ao realizar o dimensionamento de um SFCR é necessário escolher o módulo a ser utilizado e a quantidade do mesmo, bem como escolher o inversor. A potência de inversor deve ter potência compatível com a potência total dos módulos. A relação entre a potência do gerador fotovoltaico e a potência do inversor é conhecida como fator de dimensionamento do inversor (FDI) que é definido como a razão entre a potência do inversor e a potência do gerador (PINHO; GALDINO, 2014). Esse fator é importante por considerar as características climáticas, a radiação solar e a temperatura de cada localidade, além da tecnologia dos módulos e da curva de eficiência do inversor (MACEDO, 2006).

Atualmente adota-se a prática de subdimensionar o inversor, ou seja, selecionar um inversor com potência máxima inferior à potência nominal de pico do gerador fotovoltaico. O subdimensionamento do inversor pode fazer com que ocorra aumento na geração de energia elétrica do sistema, entretanto também pode causar redução na vida útil do inversor visto que operará por muito tempo em temperaturas elevadas (ZILLES *et al.*, 2012).

Para entender o funcionamento dos inversores é necessário ter modelos matemáticos que representam as características do mesmo (RAMPINELLI; KRENZINGER, 2008). Por se tratar de um equipamento eletrônico é inevitável que durante sua operação o inversor aqueça, entretanto, esse aquecimento é indesejável, pois provoca aumento de temperatura, o que está diretamente relacionado a redução da vida útil do equipamento.

Neste contexto, o presente trabalho visa analisar a influência da temperatura operacional de inversor no desempenho energético de SFCR com distintos fatores de dimensionamento. O trabalho utiliza como base de estudo quatro SFCRs localizados no sul de Santa Catarina, sendo que dois dos inversores são de 3 kW e os outros dois de 5 kW. Assim, serão comparados os dados reais dos sistemas com os dados obtidos através de simulação e modelagem matemática.

Este trabalho está dividido em cinco seções, além desta introdutória. A segunda seção compreende uma breve revisão bibliográfica que engloba o referencial teórico e o estado da arte, onde são apresentados os principais tópicos sobre o tema. A seção 3 apresenta a metodologia utilizada, onde são descritos os SFCRs e as equações utilizadas. A seção 4 trata dos resultados obtidos a partir do monitoramento dos quatro SFCR e das simulações realizadas. A seção 5 apresenta as conclusões do presente trabalho.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho de conclusão de curso é analisar a influência da temperatura operacional de inversor no desempenho energético de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída com distintos fatores de dimensionamento.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Estudar os fundamentos teóricos sobre inversores e fator de dimensionamento;
- Realizar a coleta e o processamento de dados dos sistemas fotovoltaicos com distintos fatores de dimensionamento de inversor;
- Modelar e analisar o comportamento da temperatura operacional de inversores a partir de dados medidos;
- Modelar e simular os sistemas fotovoltaicos utilizando o *software System Advisor Model (SAM)*;
- Estimar e analisar o comportamento da temperatura operacional de inversores a partir de dados simulados;
- Determinar e analisar índices de mérito dos diferentes sistemas fotovoltaicos monitorados e simulados;
- Analisar a influência da temperatura operacional de inversores no desempenho energético dos distintos sistemas fotovoltaicos monitorados e simulados.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A geração distribuída tem como a principal característica a proximidade da geração com as cargas, ou seja, o sistema de pequeno porte (micro e minigeração) é instalado próximo ao local de consumo de forma que a energia gerada seja consumida instantaneamente. Assim, os custos e as perdas com o uso do sistema de transmissão de energia elétrica são reduzidos (MACHADO, 2019).

A geração distribuída passou a ser regulamentada por meio da publicação da REN nº 482, de 17 de Abril de 2012 pela ANEEL e posteriormente foi atualizada através da REN nº 687, de 24 de Novembro de 2015 do mesmo órgão, onde apresenta alterações e aprimoramentos que ampliam possibilidades para micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, além do sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2012).

A REN nº 482 define geração distribuída como uma central geradora de energia elétrica originada de fontes renováveis de energia elétrica ou cogeração qualificada e devidamente conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (UCs). Dessa forma, é considerada microgeração distribuída quando o gerador de pequeno porte possui potência menor ou igual a 75 kW e é considerada minigeração distribuída quando a central geradora de energia elétrica possui potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para as demais fontes renováveis de energia elétrica com conexão na rede de distribuição (ANEEL, 2015).

Os sistemas de geração distribuída conectados à rede não utilizam armazenamento de energia elétrica em fontes como baterias, pois a rede elétrica de distribuição já possui a característica de acumuladora infinita, assim, é utilizado um sistema compensatório na forma de créditos (BELISKI, 2017). Quando a energia gerada for superior à consumida, a UC responsável pela geração, injeta na rede de distribuição a energia elétrica excedente, ou seja, há injeção de energia elétrica quando a geração é superior ao consumo. Quando ocorre o inverso e a UC possui consumo de energia elétrica maior que a energia gerada, existe a compensação por meio da distribuidora suprindo a diferença, onde os créditos serão utilizados, ou caso não haja créditos, o consumidor pagará a diferença. A



concessionária de energia elétrica é responsável por realizar a troca do medidor unidirecional pelo medidor bidirecional para que os créditos possam ser contabilizados de maneira correta. (CADERNOS TEMÁTICOS ANEEL, 2016; ANEEL, 2015).

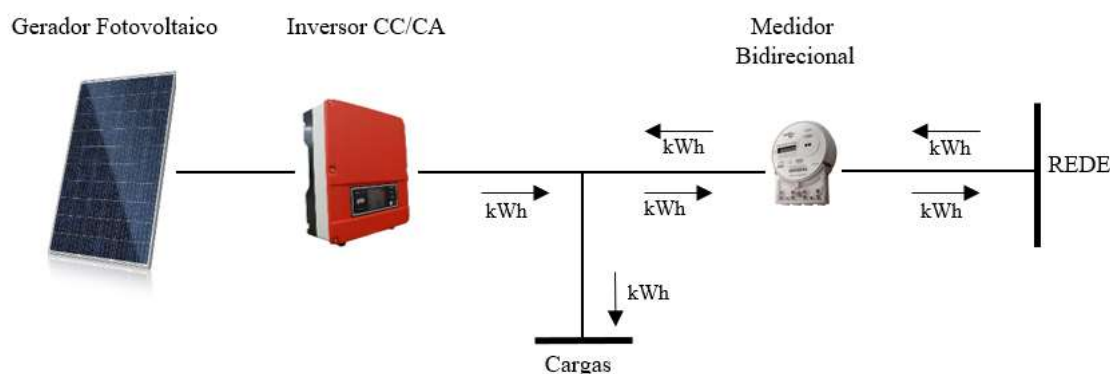
Uma possibilidade é a geração distribuída compartilhada, ou seja, empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras, na forma de consórcio ou cooperativa composto por pessoa física ou jurídica, de forma que a energia elétrica gerada seja dividida em porcentagens definidas pelos consumidores (CADERNOS TEMÁTICOS ANEEL, 2016). De acordo com Perin (2016) os sistemas fotovoltaicos se destacam na geração distribuída por terem grandes vantagens, visto que a instalação é feita dentro dos próprios centros urbanos e na maioria das vezes a geração é realizada junto aos pontos de consumo, dessa forma, a perda de energia é reduzida e o impacto ambiental local é mínimo por serem sistemas de construção limpa e operação silenciosa.

## 2.2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos utilizam o sol como fonte primária de energia. Diferente das grandes usinas geradoras onde se geram grandes quantidades de energia em uma região normalmente longe dos grandes centros consumidores, esses sistemas geralmente estão próximos de suas unidades de consumo, tratando-se assim de geração descentralizada (COSTA, 2010). Um sistema solar fotovoltaico é composto por um bloco gerador, um bloco de condicionamento de potência e, opcionalmente um bloco de armazenamento. O bloco gerador é constituído pelos módulos fotovoltaicos, estruturas de suporte e cabos, o bloco de condicionamento de potência contém os inversores fotovoltaicos e controladores de carga, e por fim o bloco de armazenamento onde fica localizado as baterias. Entretanto, esse último muitas vezes não é necessário, pois a maioria dos sistemas fotovoltaicos são conectados à rede, assim, a energia produzida que não é consumida é injetada na rede (RAMPINELLI, 2010; PINHO; GALDINO, 2014). Sistemas fotovoltaicos conectados à rede podem ser instalados nos telhados de residências, dos prédios nas regiões centrais das grandes cidades e indústrias próximas a pontos de alto consumo elétrico. De acordo com Perin (2016) novos e grandes empreendimentos podem incorporar sistemas fotovoltaicos no seu próprio prédio, assim, diminuem seu impacto local sobre a rede elétrica das comunidades onde se instalam.

Souza (2016) define os SFCRs como um sistema destinado ao fornecimento de energia elétrica a um ou mais consumidores. Essa configuração é caracterizada pelo fluxo bidirecional de energia elétrica que consiste no sistema de compensação de energia, conhecido internacionalmente como *net metering*, como pode ser visto na Figura 1 (SCARABELOT; RAMPINELLI; RAMBO, 2018). Assim, um sistema fotovoltaico conectado à rede é composto basicamente pelo gerador fotovoltaico, o inversor solar e a rede elétrica local (ZILLES *et al.*, 2012). O arranjo fotovoltaico é composto por associações de módulos fotovoltaicos e esses, por sua vez são compostos por células fotovoltaicas conectadas em arranjos para produzir tensão e corrente suficientes para a utilização prática da energia elétrica ao mesmo tempo em que promove a proteção das células (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 1 – Diagrama esquemático de sistema fotovoltaico conectado à rede.



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

Por causa da grande extensão territorial e aos elevados níveis de irradiação presentes no Brasil, os SFCRs possuem grande potencial de aplicação no país. A instalação de sistemas fotovoltaicos à rede apresenta grandes vantagens, dentre elas a possibilidade de redução da geração por meio de fontes primárias como hidrelétricas e térmicas, a redução da demanda de pico dos grandes centros de consumo, a diminuição da necessidade de construir novas usinas e linhas de transmissão, maior segurança do fornecimento de energia, aumento do nível de tensão e redução de perdas nos sistemas de distribuição e transmissão (PAIVA *et al.*, 2016).

Devido ao grande potencial da utilização em massa de sistemas fotovoltaicos e seus componentes é importante ter um conhecimento aprofundado desses sistemas. Conforme afirma Perin (2016) a compreensão do comportamento operacional, das características de desempenho, das limitações e dos fatores que afetam a eficiência de

conversão de energia é imprescindível para o planejamento de futuras implantações e para o correto dimensionamento destes sistemas. O conhecimento das características operacionais e da eficiência é uma ferramenta fundamental para a seleção dos componentes, assim como para o desenvolvimento e otimização dos sistemas fotovoltaicos para geração de energia elétrica.

### 2.3. INVERSOR

Um inversor é um dispositivo eletrônico que tem como principal função fornecer energia elétrica em corrente alternada a partir de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua (PINHO; GALDINO, 2014). De acordo com Rampinelli (2010), o inversor é um dispositivo elétrico composto por elementos passivos como indutores, capacitores e resistores e elementos ativos como tiristores e transistores, que modificam as características de tensão, corrente e frequência conforme sua topologia. O inversor fotovoltaico é um conversor de energia eletromagnética onde há conversão de corrente contínua para corrente alternada.

O inversor converte a potência em corrente contínua proveniente de baterias, células a combustível ou módulos fotovoltaicos em potência em corrente alternada que em condições normais será injetada na rede elétrica de distribuição de energia (RAMPINELLI, 2010; PINHO; GALDINO, 2014).

Os primeiros inversores para uso em sistemas fotovoltaicos eram modificações de circuitos já existentes, enquanto os circuitos mais modernos são desenvolvidos levando em consideração a complexidade e as exigências de sua aplicação específica. Assim, no transcorrer de algumas décadas, as topologias foram sendo aperfeiçoadas e os custos de fabricação reduzidos, ao mesmo tempo que as eficiências de conversão evoluíram até chegar a valores próximos a 99 % em alguns inversores para conexão à rede elétrica (PINHO; GALDINO, 2014).

Os inversores podem ser classificados conforme sua topologia e a função que exerce para cada aplicação específica. Os mais comuns são: inversores de onda quadrada, inversores de onda senoidal modificada inversores de onda senoidal pura e inversores para a conexão à rede. A eficiência do inversor é um fator crucial para viabilizar o projeto está diretamente ligado a produção de energia (BEZERA, 2010).

Para o SFCR, entre o bloco gerador e o ponto de fornecimento à rede, tem-se os inversores, que são responsáveis por fazer o processo de conversão de energia, sincronismo e injeção de energia na rede, visto que um painel solar produz energia em corrente contínua e seu nível de tensão é dependente da radiação solar (RAMPINELLI, 2010). Assim, os inversores devem ter a tensão de saída c.a. sincronizada com a tensão da rede e possuir características específicas que atendam às exigências das concessionárias de distribuição em termos de segurança e qualidade da energia injetada na rede. (PINHO; GALDINO, 2014).

Atualmente os inversores utilizados reúnem funções de controle que influenciam no funcionamento do sistema, tais como: seguidor do ponto de máxima potência (SPMP), conexão ou desconexão da rede em função das condições da mesma e da irradiância incidente sobre o arranjo, medida de energia entre outras (RAMPINELLI, 2010).

A absorção de energia solar e a conversão em energia elétrica por meio dos módulos fotovoltaicos variam constantemente, pois a intensidade da radiação solar incidente e a temperatura dos módulos variam a todo tempo. Conforme afirma Perin (2016) há diversos fatores envolvidos na conversão realizada pelo inversor que deve ser feita de forma eficiente por se tratar de uma fonte energética com baixa intensidade e de forma segura por estar operando tensões elétricas elevadas, tanto em c.c. como em c.a.

A eficiência de conversão c.c.-c.a. dos inversores pode ser determinada como a razão entre a energia c.a. entregue à rede de energia elétrica e a energia c.c. efetivamente absorvida na entrada do inversor (PERIN; PRIEB; KRENZINGER, 2016). A eficiência de conversão é um critério importante para comparação de inversores, entretanto, é difícil sua representação por um único valor fixo visto que depende de diversos fatores de operação. A eficiência é um indicador de desempenho que pode ser analisado por um período, podendo ser este tempo segundos, uma hora, um dia, um mês ou até mesmo um ano. Muitas vezes as medições experimentais ocorrem em curtos períodos obtendo a eficiência instantânea como eficiência no ponto de máxima potência ou em condições controladas e favoráveis, dessa forma, não é possível observar outros efeitos e limitações (PERIN, 2016).

Outra função de extrema importância dos inversores é a otimização da produção energética dos módulos fotovoltaicos monitorando as condições variáveis e adequando-se para extrair a máxima potência elétrica em corrente contínua e converter em corrente alternada através de dispositivo chamado de seguidor do ponto de máxima potência (HALUCHE, 2019; PERIN, 2016). Esse dispositivo realiza o controle da corrente e

tensão na entrada para que o sistema seja capaz de fazer ajustes para manter os módulos operando próximo ao seu ponto de máxima potência, que varia conforme a radiação solar incidente e com a temperatura (VIANA, 2018). A eficiência do seguidor do ponto de máxima potência ( $\eta_{SPMP}$ ) é determinada como a razão entre a energia elétrica na entrada do inversor e a energia que o inversor teria que converter se o mesmo trabalhasse idealmente no ponto de máxima potência (RAMPINELLI, 2010).

Para a seleção dos inversores há uma série de características e parâmetros operacionais a serem observados. Perin (2016) ressalta que inversores incorporam componentes de eletrônica de potência e componentes de eletrônica computacional, o que os torna dispositivos de alta complexidade. A entrada e saída do inversor devem ter características compatíveis com os arranjos fotovoltaicos e a rede elétrica da concessionária. As características de saída de tensão devem ser mais rígidas que as de entrada visto que há necessidade de ter os parâmetros de acordo com a rede da concessionária que são rigidamente padronizados quanto à tensão e frequência, quanto a qualidade mínima imposta em relação às distorções, forma de onda senoidal, proteções, anti-ilhamento, rotinas de controle e segurança. Entretanto, é esperado da entrada de energia maior flexibilidade, pois os arranjos fotovoltaicos podem ser agrupados conforme disponibilidade de módulos fotovoltaicos, dessa forma, as características de entrada são mais flexíveis (PERIN, 2016). A Tabela 1 apresenta alguns dos componentes e elementos contidos em inversores.

Tabela 1 – Resumo de componentes e elementos internos de inversores.

(continua)

<i>Componentes</i>	<i>Elementos</i>	<i>Observação</i>
<i>Eletrônicos de potência</i>	Semicondutores chaveadores	Módulo de potência
	Capacitores	
	Retificadores	
	Transformadores	Conjunto eletromagnético
	Indutores	
	Filtros c.c. e c.a.	
<i>Eletrônicos computacionais</i>	Sistema de controle e operação	Gerenciamento de segurança, Gerenciamento de energia, Seguimento de máxima potência, Gerenciamento térmico

Tabela 1 – Resumo de componentes e elementos internos de inversores.

(conclusão)

<i>Componentes</i>	<i>Elementos</i>	<i>Observação</i>
<i>Eletrônicos computacionais</i>	Interface homem-máquina, comunicação	Acionamento, alarmes
	Invólucro	Proteção, acesso facilitado
<i>Mecânicos</i>	Dissipadores de calor	Sistema de arrefecimento e gerenciamento térmico
	Ventiladores	
	Conectores elétricos	Para interligações externas
	Junções soldadas	
	Proteções, chaves, disjuntores	

Fonte: Adaptado de Perin (2016).

Muitos fabricantes do setor de energia fotovoltaica determinam que seus inversores toleram grandes sobrecargas, em alguns casos de até 50 %. Essa sobrecarga, ou seja, potência total dos módulos maior que a potência do inversor, causa um aumento na produção de energia do sistema, mas também gera um aumento de perdas no sistema, aumento da temperatura dos inversores, entre outros (HALUCHE, 2019).

A fim de realizar uma simulação detalhada de inversores é necessário implementar modelos matemáticos que representam as características do mesmo. Algumas propriedades dos inversores são informadas por seus fabricantes, contudo, o desempenho da eficiência de conversão, eficiência do seguidor do ponto de máxima potência, fator de potência, distorções harmônicas e da temperatura operacional demanda de uma modelagem matemática que deve ser obtida a partir de ensaios específicos (RAMPINELLI; KRENZINGER, 2008).

#### 2.4. FATOR DE DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR

Com o crescimento de sistemas fotovoltaicos no mundo e no Brasil, é necessário que estes sistemas sejam confiáveis e seguros. O fator de dimensionamento do inversor é um dos quesitos que influenciam na confiabilidade do sistema (HALUCHE, 2019). O FDI é definido pela relação entre a potência do arranjo e a potência do inversor e pode ser calculado por meio da Equação 1. Quando essa relação apresenta um valor baixo, o inversor pode apresentar cortes de potência e, assim, reduzir a energia gerada e os indicadores de desempenho (SCARABELOT; RAMBO; RAMPINELLI, 2018).

$$FDI = \frac{P_{NCA}}{P_{STD}} \quad (1)$$

onde:

FDI é o fator de dimensionamento de inversor.

$P_{NCA}$  é a potência nominal em corrente alternada do inversor.

$P_{STD}$  é a potência do arranjo fotovoltaico na condição padrão.

De acordo com Paiva *et al.* (2016) por meio do aumento da potência do gerador em relação à potência do inversor, pode-se reduzir o tempo de retorno do investimento em sistemas fotovoltaicos, sem haver grandes perdas para o sistema. A análise do FDI é específica para cada região, pois depende das características do clima e local quanto à radiação solar e temperatura ambiente, também deve-se considerar a tecnologia dos módulos e a curva de eficiência do inversor.

Nas informações dos inversores fotovoltaicos fornecido pelos fabricantes há um dado denominado potência máxima c.c. ou potência máxima de entrada que define a máxima potência do arranjo fotovoltaico a ser instalado na entrada do inversor, que o mesmo pode suportar. Não existe ainda um consenso entre os profissionais da área quanto a este fator (HALUCHE, 2019). De acordo com Costa (2010) o ajuste do FDI é essencial para utilizar o máximo da energia gerada com a maior eficiência possível. Caso o FDI esteja entre 0 e 1, o inversor está sobrecarregado ou com *oversizing*. Caso o FDI fique maior que 1, o inversor está subcarregado, ou seja, a potência do inversor é maior que a potência do arranjo fotovoltaico (HALUCHE, 2019). O subdimensionamento do inversor pode fazer com que haja aumento na geração do sistema, porém isso também pode causar redução na vida útil do inversor visto que operará por muito tempo em temperaturas elevadas (ZILLES *et al.*, 2012).

Quando o FDI é menor que 1, ou seja, potência máxima dos módulos é maior do que a potência do inversor, procura-se aumentar a produção de energia quando comparado com o mesmo sistema caso este tivesse FDI igual a 1. Isso ocorre devido ao alargamento da curva de produção de energia do sistema, pois há maior potência instalada de módulos e maior área de captação da radiação solar. Assim, considera-se que o sistema com FDI menor que 1 gera mais energia que o sistema com FDI igual a 1, pois o sistema atinge sua potência nominal mais cedo e permanece assim até mais tarde. Entretanto, quando há

sobrecarga do inversor pode ocorrer o fenômeno conhecido como “clipping”, que é o corte ou ceifamento de potência, realizado pelo próprio inversor a fim de evitar danos no equipamento. Isso ocorre quando a potência de saída do inversor é menor que a potência entregue pelos módulos (LUOMA; KLEISSL; MURRAY, 2012). Dessa forma, fica nítida a importância da correta análise e determinação do FDI em projetos fotovoltaicos para que seja garantida a eficiência e boa performance dos sistemas.

## 2.5. TEMPERATURA DE INVERSOR

A vida útil e a confiabilidade de equipamentos eletrônicos de potência são fortemente afetadas pela sua temperatura de operação. Com a utilização em massa de sistemas fotovoltaicos conectados à rede faz-se necessário o conhecimento aprofundado sobre estes sistemas quanto à segurança de operação, confiabilidade e desempenho energético. Dentre os diversos componentes destes sistemas os inversores são os componentes mais complexos, mais frágeis e mais suscetíveis a falhas. Por esta razão, nos últimos anos os inversores vêm sendo constantemente aprimorados. O conhecimento das condições de operação de inversores auxilia na definição de prioridades de melhorias no produto, sejam elas relacionadas à configuração eletrônica, à construção mecânica ou às rotinas internas de controle (ALVES, 2019; PERIN; PRIEB; KRENZINGER, 2016).

Os inversores fotovoltaicos tendem a aquecer quando estão operando, o que é indesejável, porém é característico do seu funcionamento. Este aquecimento provoca um aumento da temperatura, o que está diretamente relacionado à redução de confiabilidade de operação e redução de vida útil destes inversores. O aumento de temperatura faz com que haja aceleração nos mecanismos de falha por degradação química dos componentes, assim, os ciclos térmicos e as variações de temperatura ocasionam fadiga mecânica de soldas e componentes por causa dos esforços gerados por dilatação térmica de diferentes materiais acoplados (PERIN, 2016).

O inversor é um conversor de alta eficiência, normalmente 90 %. De acordo com Perin (2016), para um inversor de potência nominal de 10 kW com eficiência de conversão de 95 % presume-se que há perda elétrica de 5 %, ou seja, cerca de 500 W correspondem à potência responsável pelo aquecimento do inversor. O superaquecimento, no caso dos inversores, é decorrente da insuficiência de dissipação térmica para o seu arrefecimento e pode ter diversas causas, tanto internas como externas. A operação acima da potência nominal e o projeto térmico inadequado são exemplos de



causas internas. Como causas externas podem ser citadas, entre outras, a temperatura ambiente elevada e o acúmulo de pó em dissipadores de calor (ALVES, 2019; PERIN; PRIEB; KRENZINGER, 2016).

Para a proteção do equipamento, aumento da sua vida útil, maior confiabilidade, maior estabilidade e maior segurança de operação, os inversores possuem rotinas em seus algoritmos de controle com estratégias automatizadas dedicadas ao gerenciamento térmico. Estas rotinas, quando acionadas, tendem a reduzir a capacidade de conversão de potência do inversor, seja pelo acionamento de ventiladores auxiliares, seja pelo deslocamento do ponto de operação na seção de entrada do inversor, afastando-o do ponto de máxima potência. Fabricantes de inversores tratam deste assunto pela expressão em inglês *temperature derating* (ALVES, 2019; PERIN; PRIEB; KRENZINGER, 2016). No projeto do inversor deve-se considerar os materiais a serem utilizados, buscando utilizar aqueles que favoreçam a dissipação térmica. Os materiais devem ter características e propriedades eletromecânicas que gerem menos calor, como maior condutividade elétrica, menor quantidade de junções e emendas, soldas com exímio contato e em menor número, entre outros (PERIN, 2016).

## 2.6. ESTADO DA ARTE

Estudos feitos na década de 90, afirmavam que o dimensionamento deveria ser feito de forma que o gerador fotovoltaico tenha maior capacidade que o inversor, assim o sistema teria um melhor funcionamento. Esse dimensionamento poderia ser feito principalmente em regiões com pouca irradiância, visto que, o limite máximo do inversor dificilmente seria atingindo (KELLER; AFFOLTER, 1995; KIL; VAN DER WEIDEN, 1994; LOUCHE *et al.*, 1994; PEIPPO; LUND, 1994 a, b; SCHALKWIJK *et al.*, 1997).

Estudos de Burger e Ruther (2004), demonstraram que na prática dimensionar os inversores com uma potência de saída c.a. nominal por volta de 30 % menor que a potência nominal do gerador fotovoltaico pode ocasionar perdas consideráveis de energia elétrica.

Macêdo (2006) demonstra uma análise de resultados teóricos correspondentes a simulações numéricas para diversas localidades brasileiras, e experimentais, associados a sistemas conectados à rede de pequeno porte. Constatou-se que, para uma certa faixa de

valores de FDI, as produtividades anuais obtidas não têm diferença expressiva, apesar das diferentes localidades estudadas e dos diferentes tamanhos dos geradores fotovoltaicos.

Dias (2006) apresenta uma análise experimental de uma instalação fotovoltaica com objetivo de otimizar o fator de dimensionamento do inversor. Analisou-se três sistemas com diferentes valores de FDI sendo de 0,65, 0,73 e 0,86, assim, foi possível verificar que os inversores subdimensionados apresentaram desperdício de energia. Conclui-se que o sistema com menor FDI, conseguiu entregar mais energia elétrica à rede, entretanto o desperdício de energia elétrica desse sistema é maior. É importante ressaltar que essa análise é válida para inversores fabricados antes do período de estudo. Também foi realizado um estudo do comportamento térmico do inversor, analisando distintos inversores com mesmo valor de FDI. Verificou-se que quando em superaquecimento a energia elétrica entregue à rede é diferente, mesmo que o FDI seja igual.

Rampinelli e Krenzinger (2008) apresentam uma descrição de um modelo matemático para a temperatura de inversores, esse modelo necessita da determinação de dois coeficientes térmicos, um fator de capacidade térmica e um fator de dissipação térmica. A curva da temperatura do inversor simulada e a curva da temperatura do inversor medida mostraram semelhança e o modelo também previu as perdas energéticas devido ao sobreaquecimento do inversor.

Costa (2010), afirma em seu estudo que é preciso analisar as características da radiação local com objetivo de obter a melhor relação de potência entre o gerador fotovoltaico e o inversor. Baseando-se na análise das curvas de radiação local, buscou qual a melhor relação custo-benefício para obter o máximo aproveitamento energético. Ao final do estudo concluiu-se que a melhor relação entre a potência do arranjo fotovoltaico e a potência do inversor é a unitária, para locais com picos de radiação elevados.

Luoma, Kleissl e Murray (2012) realizaram um estudo sobre o dimensionamento ideal de inversor. Pode-se notar que com aumento da potência do inversor há menos perdas por corte do inversor em momento de alta irradiância, entretanto, quando a irradiância é baixa há efeito negativo na eficiência de conversão.

Chen *et al.* (2013) discute os fatores que podem afetar a estratégia de dimensionamento de inversor. São estudados os efeitos de vários fatores separadamente, que incluem as condições de irradiância, temperatura ambiente, taxas de energia elétrica, incentivos a sistemas fotovoltaicos e parâmetros do inversor, como curva de eficiência e

proteção contra sobrecarga. Conclui-se que a potência ideal de inversor depende, além dos outros parâmetros estudados, da localização do SFCR.

Perin (2016) apresenta um estudo relacionando a influência da temperatura sobre o desempenho de inversores fotovoltaicos conectados à rede. O estudo analisa diferentes modelos de técnicas de gerenciamento térmico. O trabalho também descreve um modelo preditivo da temperatura de operação do inversor em regime transiente e apresenta resultados de ensaios experimentais para definição de parâmetros térmicos característicos dos inversores.

Haluche (2019) apresenta uma comparação da *performance ratio* de diferentes sistemas fotovoltaicos e a relação com o FDI. Percebe-se que os sistemas com FDI mais próximo de 1 tiveram os melhores valores de *performance ratio*.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM MONITORAMENTO

Neste trabalho são monitorados e estudados quatro sistemas fotovoltaicos de geração distribuída localizados no sul de Santa Catarina, com objetivo de verificar a influência da temperatura operacional de inversor no desempenho energético dos sistemas com distintos fatores de dimensionamento. A Tabela 2 apresenta as informações referentes aos sistemas fotovoltaicos. Os dados dos sistemas foram extraídos da plataforma de monitoramento *wifi* de cada sistema fotovoltaico e por meio do *software Microsoft Excel* realizou-se o tratamento de dados, bem como, a elaboração dos gráficos aqui apresentados.

Tabela 2 – Especificações dos sistemas fotovoltaicos analisados.

<i>Sistema</i>	SFCR 1	SFCR 2	SFCR 3	SFCR 4
<i>Módulos</i>	10	12	12	17
<i>String</i>	1 x 10 módulos	2 x 6 módulos	2 x 6 módulos	1 x 8 módulos + 1 x 9 módulos
<i>Potência [kWp]</i>	3,25	3,96	4,02	5,61
<i>FDI</i>	0,92	0,76	1,24	0,89
<i>Inclinação</i>	20°	20°	26°	20°
<i>Azimute</i>	0°	45°	0°	0°
<i>Local</i>	Araranguá/SC	Jacinto Machado/SC	Rio Negrinho/SC	Jacinto Machado/SC
<i>Período de análise</i>	jul/2019 - jun/2020	jul/2019 - jun/2020	out/2019 - set/2020	out/2019 - set/2020

Fonte: A autora.

As Figuras 2, 3, 4 e 5 apresentam os SFCRs 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Figura 2 – SFCR 1 localizado em Araranguá/SC.



Fonte: (LEnergy Energia Solar, 2020).

Figura 3 – SFCR 2 localizado em Jacinto Machado/SC.



Fonte: (LEnergy Energia Solar, 2020).

Figura 4 – SFCR 3 localizado em Rio Negrinho/SC.



Fonte: (LEnergy Energia Solar, 2020).

Figura 5 – SFCR 4 localizado em Jacinto Machado/SC.



Fonte: (LEnergy Energia Solar, 2020).

Os inversores dos SFCR 1 e 2 têm potência nominal de 3000 W e são do fabricante PHB Solar e modelo PHB3000-NS, as especificações estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3 – Especificações do inversor utilizado nos SFCRs 1 e 2.

<i>Máxima potência fotovoltaica</i>	3900 W
<i>Potência c.a. Nominal</i>	3000 W
<i>Faixa de tensão de operação</i>	80/450 V
<i>Corrente Nominal c.c.</i>	15 A
<i>Fator de Potência</i>	unitário
<i>Eficiência</i>	97,5%
<i>Fabricante</i>	PHB SOLAR
<i>Modelo</i>	PHB3000-NS
<i>Frequência de operação</i>	57,5/62 Hz
<i>Máxima tensão de saída</i>	220 V
<i>Resfriamento</i>	Convecção Natural

Fonte: A autora.

Os SFCRs 3 e 4 têm inversores com potência nominal de 5000 W, do fabricante PHB Solar e modelo PHB5000D-NS, as especificações estão presentes na Tabela 4.

Tabela 4 – Especificações do inversor utilizado nos SFCRs 3 e 4.

<i>Máxima potência fotovoltaica</i>	6500 W
<i>Potência c.a. Nominal</i>	5000 W
<i>Faixa de tensão de operação</i>	125/550 V
<i>Corrente Nominal c.c.</i>	11 A
<i>Fator de Potência</i>	0,95 ind/cap
<i>Eficiência</i>	97,8%
<i>Fabricante</i>	PHB SOLAR
<i>Modelo</i>	PHB5000D-NS
<i>Frequência de operação</i>	57,5/62 Hz
<i>Máxima tensão de saída</i>	220 V
<i>Resfriamento</i>	Convecção Natural

Fonte: A autora.

### 3.2. INDICADORES DE DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os indicadores de desempenho são métricas ou índices que representam os equipamentos, tecnologias ou sistemas conforme a sua eficiência de conversão de energia. Em sistemas fotovoltaicos esses índices estão associados à energia, eficiência, produtividade, desempenho e perdas. Esses índices foram apresentados pela *International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programm (IEA-PVPS)*.

O fator de capacidade (FC), apresentado na Equação 2, pode ser utilizado em diferentes tipos de fontes de energia, dessa forma, pode-se realizar a comparação entre diferentes formas de conversão de energia. Sistemas fotovoltaicos tem fator de capacidade baixo devido a intermitência do recurso solar e às variações climáticas (FUSANO, 2013). O fator de capacidade é dado pela razão entre a produção de energia elétrica real e a produção teórica de energia caso o sistema operasse durante todo o período considerado em sua potência nominal na condição padrão (1000W/m<sup>2</sup> e 25°C): (RAMPINELLI, 2010).

$$FC = \frac{E_{CA}}{E_{STD}} = \frac{\int_0^{\Gamma} P_{CA}(t) \cdot dt}{\int_0^{\Gamma} P_{STD}(t) \cdot dt} \quad (2)$$

Onde FC é o fator de capacidade do sistema,  $E_{CA}$  é a energia elétrica entregue à rede,  $E_{STD}$  é a energia elétrica que seria entregue à rede se o sistema operasse 24 h por dia na potência do sistema em condição padrão,  $P_{CA}$  é a potência elétrica entregue à rede,  $P_{STD}$  é a potência do sistema na condição padrão. Os resultados apresentados de FC são em porcentagem e em base mensal.

O índice de produtividade ( $Y_F$ ) para um sistema fotovoltaico pode ser calculado por meio da Equação 3 e é definido como a razão entre a energia elétrica convertida pelo sistema e a potência nominal do mesmo em um determinado período. Este indicador pode ser definido em diferentes bases temporais como horária, diária, mensal e anual. Este índice é dado em horas de sol na condição padrão (1000 W/m<sup>2</sup>) no determinado período de estudo. (RAMPINELLI, 2010).

$$Y_F = \frac{1}{P_{STD}} \cdot \left[ \frac{1}{\Gamma} \cdot \int_0^{\Gamma} P_{CA}(t) \cdot dt \right] \quad (3)$$

### 3.3. SOFTWARE SAM/NREL

O *System Advisor Model* é um *software* disponibilizado pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) gratuitamente, sendo utilizado para calcular a energia elétrica horária de um sistema de energia renovável no período de um ano. O *software* também considera características específicas no dimensionamento, como a área necessária, sombreamento, entre outros (NREL, 2020).



Com auxílio do software, os sistemas fotovoltaicos foram modelados e simulados a fim de comparar o desempenho energético real e o desempenho energético simulado dos mesmos. Por causa da inexistência dos modelos de inversores utilizados nos sistemas reais, foram utilizados modelos semelhantes no *software* SAM. A Tabela 5 apresenta os dados do inversor escolhido para modelar e simular os SFCRs 1 e 2, enquanto a Tabela 6 apresenta os dados do inversor selecionado para modelar e simular os SFCRs 3 e 4.

Tabela 5 - Especificações do inversor utilizado nas simulações do SFCRs 1 e 2.

<i>Máxima potência fotovoltaica</i>	3125,8 W
<i>Potência c.a. Nominal</i>	3000 W
<i>Faixa de tensão de operação</i>	100/480 V
<i>Corrente Nominal c.c.</i>	8 A
<i>Eficiência</i>	95,63 %
<i>Fabricante</i>	FRONIUS
<i>Modelo</i>	IG Plus A 3.0
<i>Máxima tensão de saída</i>	240 V

Fonte: A autora.

Tabela 6 - Especificações do inversor utilizado nas simulações do SFCRs 3 e 4.

<i>Máxima potência fotovoltaica</i>	5150 W
<i>Potência c.a. Nominal</i>	5000 W
<i>Faixa de tensão de operação</i>	100/500 V
<i>Corrente Nominal c.c.</i>	12,8 A
<i>Eficiência</i>	97,32 %
<i>Fabricante</i>	Samil Power
<i>Modelo</i>	SolarRiver 5000TL-US
<i>Máxima tensão de saída</i>	240 V

Fonte: A autora.

#### 3.4. MODELO DE TEMPERATURA DE INVERSOR

Para realizar uma simulação detalhada do comportamento do inversor é preciso implementar modelos matemáticos que descrevam as características deste componente. Os fabricantes de inversores fornecem alguns parâmetros dos mesmos, no entanto, o desempenho da eficiência de conversão, eficiência do seguidor do ponto de máxima potência, fator de potência, distorção harmônica e da temperatura operacional precisam de um modelo matemático para serem descritos (RAMPINELLI; KRENZINGER; BÜHLER, 2017). Assim, esse trabalho utiliza um modelo matemático já descrito na

literatura por Rampinelli e Krenzinger (2008) para descrever o perfil da temperatura operacional de inversores.

Pressupõe-se que a energia elétrica em corrente contínua que não é convertida para energia elétrica em corrente alternada, na conversão do inversor, é convertida em energia térmica, dessa forma, ocorre o aquecimento do inversor como apresentado na Equação 4.

$$P_T = P_D + F_{CAP} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = (1 - \eta) \cdot P_{CC} \quad (4)$$

onde:

$P_T$  é a potência térmica, ou seja, energia elétrica convertida em energia térmica pelo inversor no processo de conversão de corrente contínua em corrente alternada.

$P_D$  é a potência dissipada, sendo a energia térmica dissipada pelo inversor.

$F_{CAP}$  é a capacidade térmica do inversor.

$T$  é a temperatura do inversor.

$t$  é o tempo de aquecimento.

$\eta$  é a eficiência do inversor.

$P_{CC}$  é a potência em corrente contínua convertida pelo arranjo fotovoltaico.

Por meio de uma combinação entre processos de transferência de calor por radiação e convecção, a potência dissipada, descrita conforme a Equação 5, transfere energia térmica para o ambiente.

$$P_D = (F_D \cdot (T_{INV} - T_{AMB})) \quad (5)$$

onde:

$T_{INV}$  é a temperatura do inversor.

$T_{AMB}$  é a temperatura ambiente.

$F_D$  é o fator de dissipação do inversor que depende dos coeficientes de transferência de calor por radiação e convecção e da área do dissipador.

O fator de capacidade térmica é a energia necessária para aumentar a temperatura do inversor em 1°C, enquanto o fator de dissipação é a energia que o inversor necessita dissipar para diminuir em 1°C sua temperatura (RAMPINELLI; KRENZINGER, 2008).

Combinando as Equações 4 e 5, obtém-se o modelo matemático para a temperatura operacional do inversor apresentado na Equação 6.

$$T_2 = T_1 + \left( \left( \frac{1-\eta}{F_{CAP}} \right) \cdot P_{CC} \cdot \Delta t \right) - \left( \left( \frac{F_D}{F_{CAP}} \right) \cdot (T_{INV} - T_{AMB}) \cdot \Delta t \right) \quad (6)$$

onde:

$T_2$  é a temperatura do inversor em um instante de tempo  $t_2$ .

$T_1$  é a temperatura do inversor em um instante de tempo  $t_1$ .

$\Delta t$  é o intervalo de tempo entre os instantes  $t_1$  e  $t_2$ .

Com auxílio do *software Scilab* obteve-se os valores de  $F_{CAP}$  e  $F_D$  por meio de processo iterativo, utilizando a Equação 6. Utilizou-se os dados obtidos das simulações dos sistemas para preencher a equação e assim fazer a iteração e posteriormente determinar a temperatura simulada do inversor. Sendo os dados obtidos por meio da simulação com o *software SAM* os valores de potência, temperatura ambiente e eficiência do inversor. O intervalo de tempo foi de 3600 s, pois o *software SAM*, fornece os dados em intervalos de tempo horário.

Ressalta-se a importância dessa análise e da utilização do modelo matemático para a determinação da temperatura, visto que *softwares* de simulação de sistemas fotovoltaicos não apresentam um modelo para o comportamento e perfil da temperatura de inversor. Os valores obtidos para os parâmetros  $F_{CAP}$  e  $F_D$  usados para determinar a temperatura simulada do inversor estão presentes na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores obtidos para os parâmetros de  $F_{CAP}$  e  $F_D$  para a determinar a temperatura simulada do inversor.

<i>Sistema</i>	$F_{CAP} [J/^{\circ}C]$	$F_D [W/^{\circ}C]$
1	34722,22	3,551205
2	35322,22	2,871782
3	35322,22	2,871782
4	35322,22	2,871782

Fonte: A autora.

Também determinou-se uma temperatura modelada de inversor, utilizando a Equação 6, porém usando os dados reais de potência e eficiência do inversor, o intervalo de tempo foi o mesmo utilizado anteriormente e a temperatura ambiente também foi utilizada a mesma fornecida pelo *software* SAM. Por estar usando os parâmetros reais de potência e eficiência do inversor houve diferença nos valores obtidos para os fatores  $F_{CAP}$  e  $F_D$ , apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores obtidos para os parâmetros de  $F_{CAP}$  e  $F_D$  para determinar a temperatura modelada do inversor.

<i>Sistema</i>	$F_{CAP} [J/°C]$	$F_D [W/°C]$
<i>1</i>	13793,10	1,922759
<i>2</i>	13793,10	1,624771
<i>3</i>	24752,48	3,041667
<i>4</i>	24752,48	3,041667

Fonte: A autora.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. ANÁLISE DE FATOR DE DIMENSIONAMENTO DE INVERSOR E A INFLUÊNCIA DE TEMPERATURA

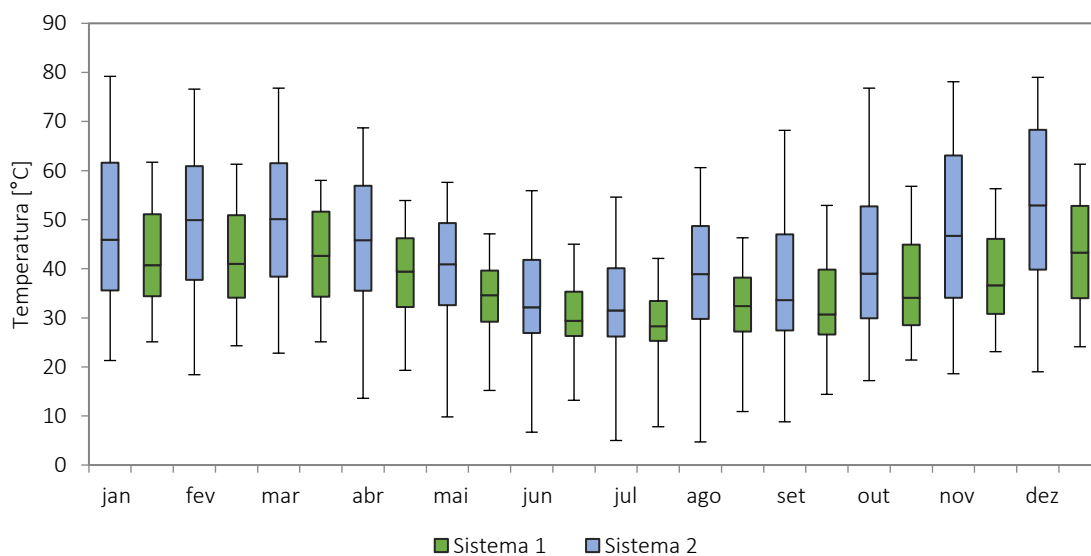
Com objetivo de analisar a influência do FDI na temperatura dos inversores dos sistemas fotovoltaicos, esses foram comparados através de *box plot*. Para melhor análise dos dados desconsiderou-se as temperaturas correspondentes as potências menores que 100 W e as temperaturas inferiores a 0 °C. A fim de comparação entre os sistemas também foi considerado os índices de mérito de produtividade e fator de capacidade.

A temperatura real dos inversores foi medida a partir de um sensor instalado no dissipador do inversor enquanto, que a temperatura simulada foi determinada utilizando o modelo matemático que descreve o perfil da temperatura operacional de inversores e usando os dados obtidos a partir da modelagem e simulação dos sistemas fotovoltaicos.

#### 4.1.1. Sistemas Fotovoltaicos 1 e 2

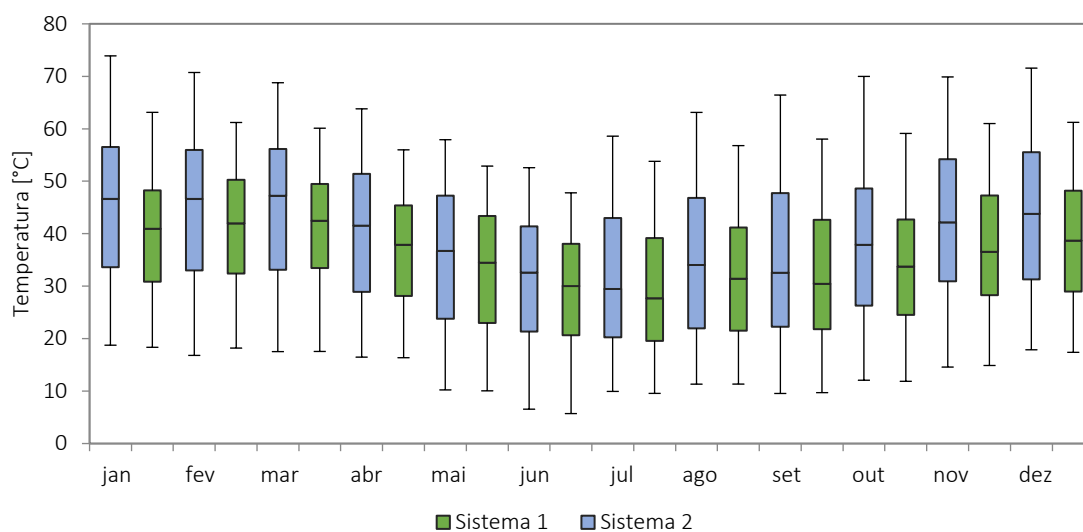
A Figura 6 apresenta o *box plot* da temperatura medida dos inversores dos SFCRs 1 e 2 enquanto, que a Figura 7 apresenta o *box plot* da temperatura obtida a partir das simulações dos mesmos sistemas.

Figura 6 – Comportamento/Perfil da temperatura real medida dos inversores dos SFCRs 1 e 2.



Fonte: A autora.

Figura 7 – Comportamento/Perfil da temperatura simulada dos inversores dos SFCRs 1 e 2.



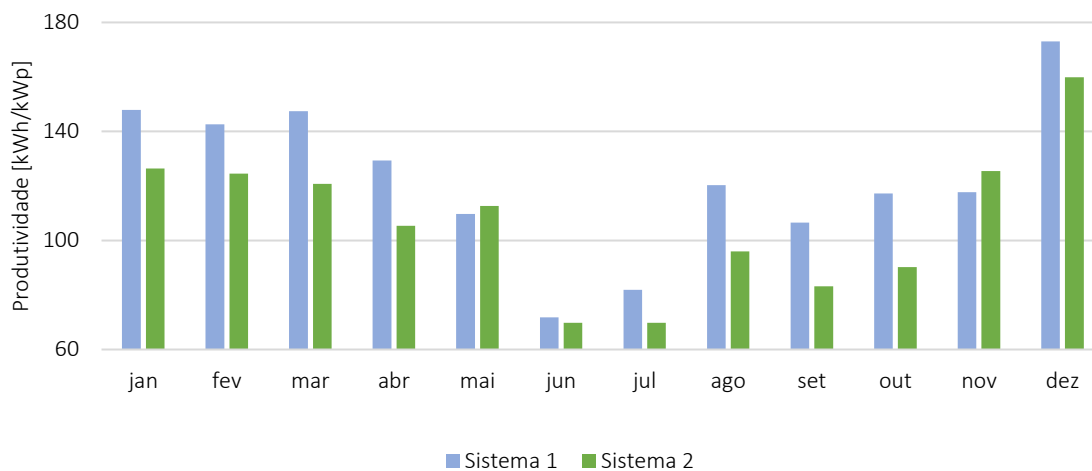
Fonte: A autora.

Analisando as Figuras 6 e 7, percebe-se que os valores de temperatura real do inversor apresentam maior diferença entre os sistemas quando analisado um mesmo mês do que as temperaturas simuladas do inversor. Os gradientes de temperatura do inversor do SFCR 1, que apresenta FDI maior, apresentam menores amplitudes e, também, menores valores de temperatura máxima em relação ao comportamento da temperatura do inversor do SFCR 2, que tem FDI menor. Este comportamento verifica-se tanto para a distribuição real quanto para a distribuição simulada da temperatura do inversor.

A maior amplitude de temperatura real do inversor ocorre no mês de setembro para o SFCR 1, apresentando variação entre o menor e maior valor de 38,5 °C. Para o SFCR 2 a maior amplitude de temperatura real do inversor ocorre no mês de dezembro com 60,0 °C. A menor amplitude de temperatura real do inversor ocorre no mês de junho para o SFCR 1 e no mês de maio para o SFCR 2 apresentando variações de 31,8 °C e 47,8 °C, respectivamente. Para os dados simulados a maior amplitude de temperatura do inversor ocorre no mês de setembro para o SFCR 1 e no mês de outubro para o SFCR 2, com o valor de 48,3 °C e de 57,9 °C, respectivamente. A menor amplitude de temperatura simulada de inversor ocorreu no mês de abril para o SFCR 1 e no mês de junho para o SFCR 2, com valores de 39,6 °C e 46,0 °C, respectivamente.

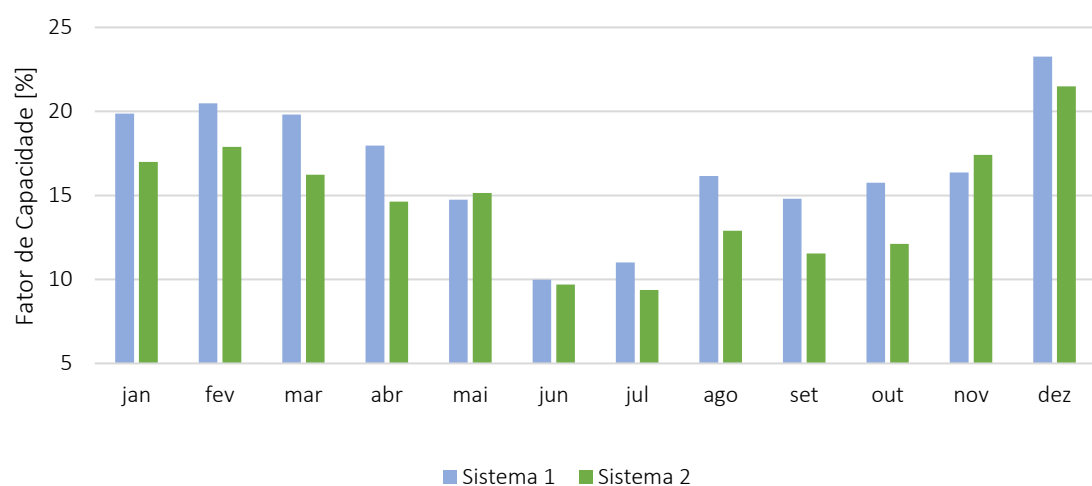
A Figura 8 e a Figura 9 apresentam a produtividade e o fator de capacidade mensais, respectivamente, para os SFCRs 1 e 2. Estes indicadores foram determinados com os dados obtidos a partir do monitoramento real dos sistemas fotovoltaicos.

Figura 8 – Índice de produtividade mensal para os SFCRs 1 e 2.



Fonte: A autora.

Figura 9 – Índice de fator de capacidade mensal para os SFCRs 1 e 2.



Fonte: A autora.

Nota-se que os valores de produtividade e de fator de capacidade para o SFCR 1 são maiores quando comparados ao SFCR 2 ao longo do período analisado. Esse comportamento pode ter relação direta com o dimensionamento dos sistemas, visto que, o SFCR 1 apresenta FDI igual 0,92, ou seja, maior do que o FDI do SFCR 2 que tem FDI igual a 0,76. Analisando as Figuras 8 e 9 percebe-se que os maiores valores de ambos os índices se encontram no mês de dezembro para os dois sistemas, enquanto, que os menores índices são apresentados no mês de junho para o SFCR 1 e no mês de julho para

o SFCR 2. A Tabela 9 apresenta a média mensal para os indicadores de desempenho, fator de capacidade e produtividade dos SFCRs 1 e 2.

Tabela 9 – Média e desvio padrão dos indicadores de desempenho entre os SFCRs 1 e 2.

	<i>FC [%]</i>			<i>Produtividade [kWh/KWp]</i>		
	<i>SFCR 1</i>	<i>SFCR 2</i>	$\sigma$	<i>SFCR 1</i>	<i>SFCR 2</i>	$\sigma$
<i>Jan</i>	19,88	16,99	2,04	147,91	126,41	15,20
<i>Fev</i>	20,49	17,89	1,84	142,62	124,55	12,78
<i>Mar</i>	19,81	16,23	2,54	147,42	120,73	18,87
<i>Abr</i>	17,96	14,63	2,35	129,29	105,35	16,93
<i>Mai</i>	14,75	15,14	0,27	109,75	112,65	2,05
<i>Jun</i>	9,97	9,69	0,20	71,82	69,78	1,44
<i>Jul</i>	11,00	9,37	1,15	81,88	69,75	8,58
<i>Ago</i>	16,16	12,89	2,31	120,25	95,93	17,19
<i>Set</i>	14,80	11,55	2,30	106,55	83,16	16,54
<i>Out</i>	15,75	12,12	2,57	117,20	90,21	19,09
<i>Nov</i>	16,36	17,42	0,75	117,77	125,42	5,41
<i>Dez</i>	23,26	21,49	1,25	173,02	159,88	9,29
<i>Média</i>	16,68	14,62	1,63	122,12	106,99	11,95

Fonte: A autora.

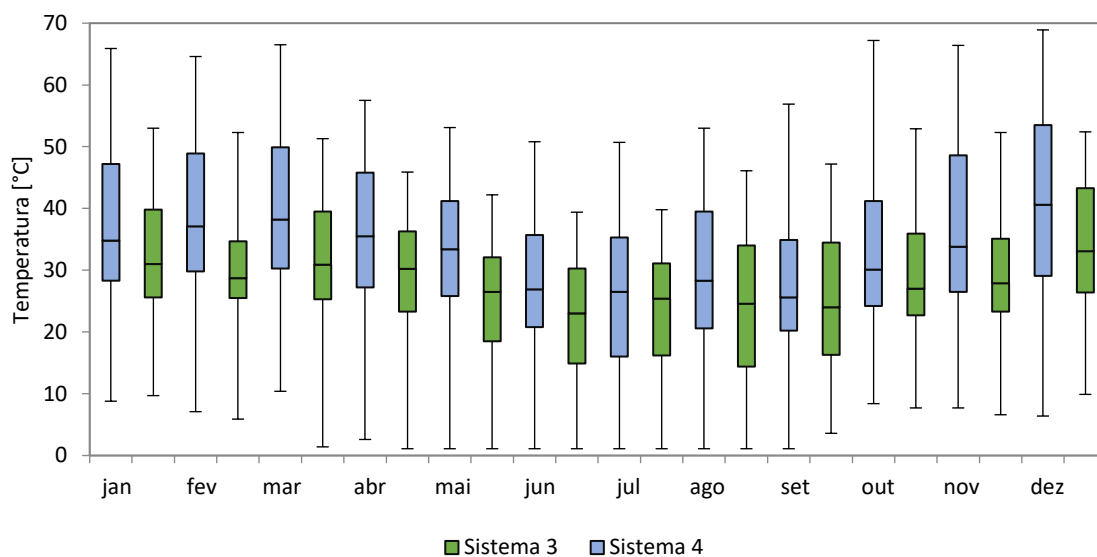
Analisando a Tabela 9 nota-se que os valores de fator de capacidade e produtividade apresentam maior diferença entre os SFCRs no mês de outubro com valor de 2,57 % e 19,09 kWh/kWp para o desvio padrão dos índices. O menor desvio padrão entre os índices é apresentado no mês de julho, com valor 0,20 % para o FC e 1,44 kWh/kWp para a produtividade.

#### 4.1.2. Sistemas Fotovoltaicos 3 e 4

A Figura 10 e a Figura 11 apresentam o *box plot* das temperaturas de inversor dos SFCRs 3 e 4, respectivamente. A Figura 10 apresenta as temperaturas reais de inversor, enquanto, que a Figura 11 apresenta as temperaturas simuladas de inversor.

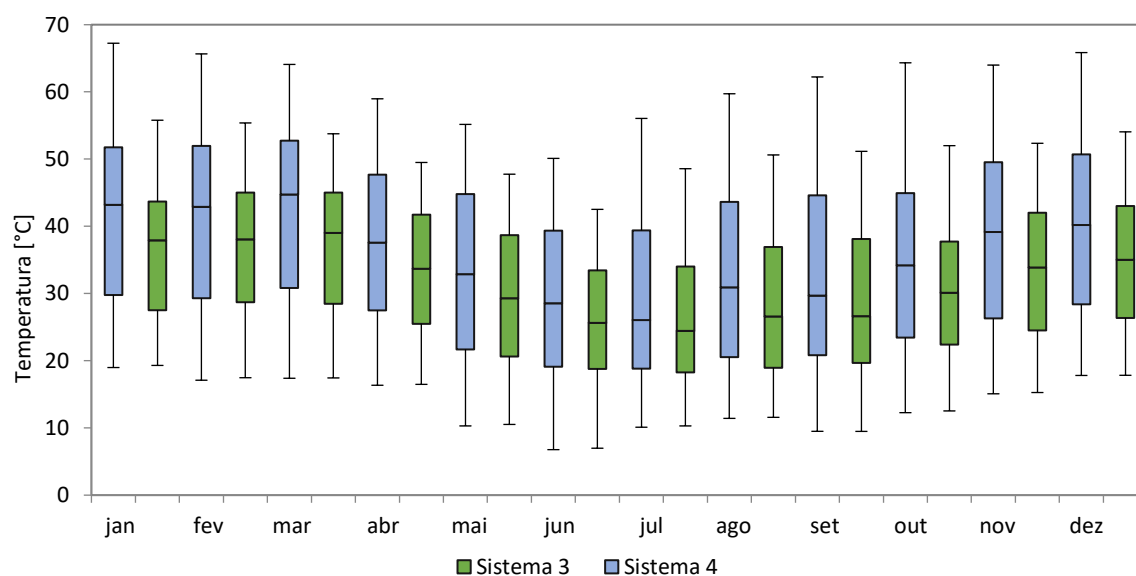


Figura 10 – Comportamento/Perfil da temperatura real medida dos inversores dos SFCRs 3 e 4.



Fonte: A autora.

Figura 11 – Comportamento/Perfil da temperatura simulada dos inversores dos SFCRs 3 e 4.



Fonte: A autora.

Tanto para a temperatura real quanto para a temperatura simulada do inversor os gradientes de temperatura do inversor do SFCR 4, que apresenta FDI menor, apresentam maiores amplitudes e, também, maiores valores de temperatura máxima em relação ao comportamento da temperatura do inversor do SFCR 3, que tem FDI maior.

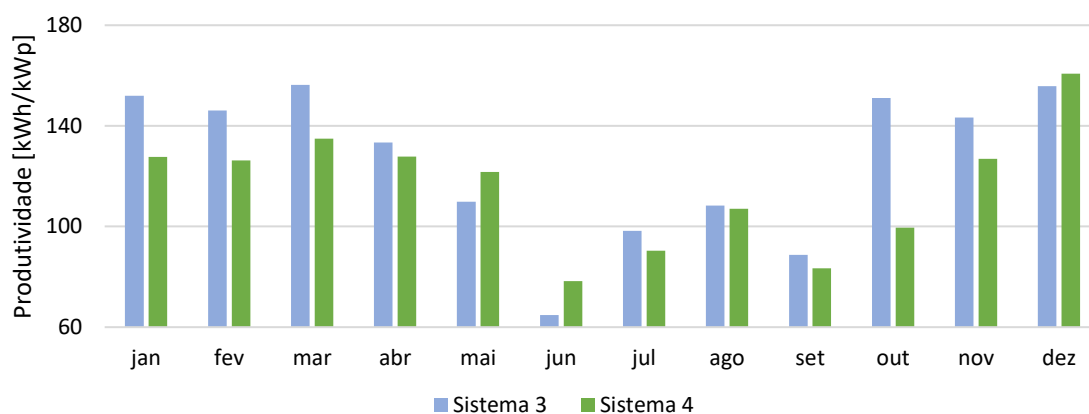
A menor amplitude de temperatura real do inversor ocorre no mês de junho para o SFCR 3 e no mês de julho para o SFCR 4 apresentando variações de 38,3 °C e 49,6 °C,

respectivamente. A maior amplitude de temperatura real do inversor ocorre no mês de março e de dezembro para os SFCRs 3 e 4, respectivamente, com valores de 49,9 °C e 62,5 °C.

Para os dados simulados a menor amplitude de temperatura do inversor ocorre no mês de abril tanto para o SFCR 3 quanto para o SFCR 4 com valor de 33,0 °C e de 42,6 °C, respectivamente. A maior amplitude de temperatura simulada de inversor ocorreu no mês de setembro para ambos os sistemas, para o SFCR 3 o valor foi de 41,7 °C e para o SFCR 4 foi de 52,7 °C.

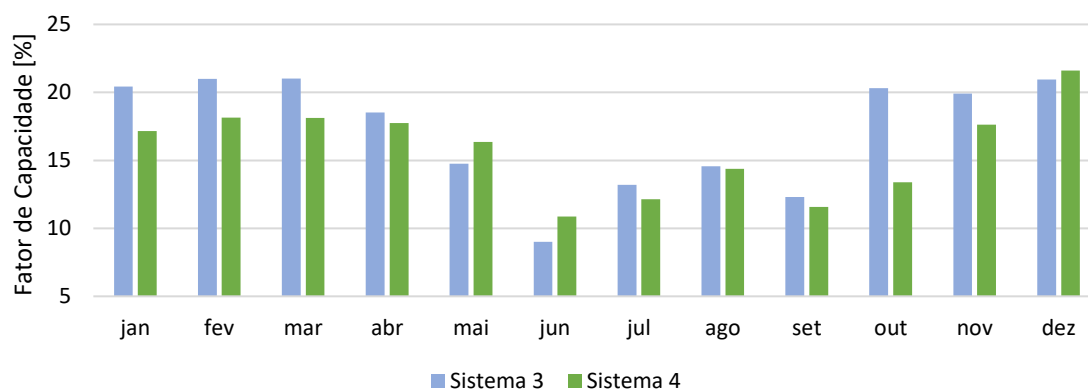
A Figura 12 e a Figura 13 apresentam a produtividade e o fator de capacidade mensais, respectivamente, para os SFCRs 3 e 4.

Figura 12 – Índice de produtividade mensal para os SFCRs 3 e 4.



Fonte: A autora.

Figura 13 – Índice de fator de capacidade mensal para os SFCRs 3 e 4.



Fonte: A autora.

Por meio das Figuras 12 e 13 percebe-se que os valores de produtividade e de fator de capacidade para o SFCR 3, que tem FDI igual a 1,24, são maiores quando comparados ao SFCR 4, que tem FDI igual a 0,89, ao longo do período analisado. Os maiores valores de ambos os índices para o SFCR 3 se encontram no mês de março, enquanto, que para o SFCR 4 os maiores valores estão presentes no mês de dezembro. Os menores valores dos dois indicadores estão no mês junho para ambos os sistemas. A Tabela 10 apresenta a média mensal para os indicadores de desempenho, fator de capacidade e produtividade dos SFCRs 1 e 2.

Tabela 10 – Média e desvio padrão dos indicadores de desempenho entre os SFCRs 3 e 4.

	<i>FC [%]</i>			<i>Produtividade [kWh/KWp]</i>		
	<i>SFCR 3</i>	<i>SFCR 4</i>	$\sigma$	<i>SFCR 3</i>	<i>SFCR 4</i>	$\sigma$
<i>Jan</i>	20,43	17,17	2,30	151,97	127,72	17,15
<i>Fev</i>	21,00	18,14	2,02	146,14	126,25	14,07
<i>Mar</i>	21,01	18,13	2,04	156,32	134,86	15,18
<i>Abr</i>	18,53	17,75	0,55	133,38	127,81	3,94
<i>Mai</i>	14,76	16,35	1,13	109,83	121,67	8,38
<i>Jun</i>	9,01	10,88	1,32	64,88	78,33	9,52
<i>Jul</i>	13,20	12,15	0,75	98,23	90,37	5,56
<i>Ago</i>	14,56	14,39	0,12	108,36	107,05	0,93
<i>Set</i>	12,32	11,58	0,52	88,68	83,35	3,77
<i>Out</i>	20,31	13,38	4,90	151,07	99,53	36,44
<i>Nov</i>	19,90	17,63	1,60	143,28	126,94	11,55
<i>Dez</i>	20,94	21,60	0,47	155,77	160,72	3,50
<i>Média</i>	17,16	15,76	1,48	125,66	115,38	10,83

Fonte: A autora.

Nota-se por meio da Tabela 10 que os valores de fator de capacidade e produtividade apresentam menor diferença entre os SFCRs no mês de agosto com valor de 0,12 % e 0,93 kWh/kWp para o desvio padrão dos índices. O maior desvio padrão entre os índices ocorre no mês de outubro, com valor de 4,90 % para o FC e 36,44 kWh/kWp para a produtividade.

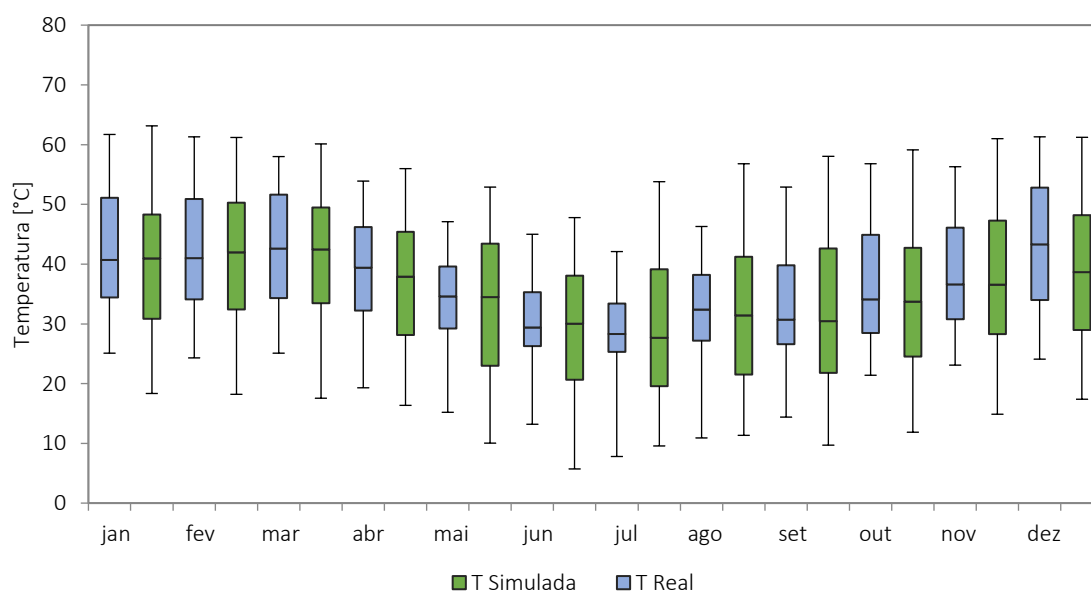
## 4.2. ANÁLISE COMPARATIVA DE TEMPERATURA REAL E SIMULADA DE INVERSOR

Por meio do monitoramento dos sistemas fotovoltaicos foi possível obter os dados reais dos sistemas e a temperatura do inversor, entretanto, para a temperatura simulada utilizou-se um modelo matemático disponível na literatura e por meio de processo iterativo obteve-se valores de ajuste para obter um perfil de temperatura simulada. Assim, esta seção apresenta uma comparação entre as temperaturas medidas no inversor e a temperatura obtida com o modelo matemático apresentado na Equação 6.

### 4.2.1. Sistemas Fotovoltaicos 1 e 2

A Figura 14 apresenta uma comparação entre o comportamento/perfil da temperatura real e da temperatura obtida com os dados da simulação para o inversor do SFCR 1. A Tabela 11 apresenta uma comparação entre os dados obtidos por monitoramento, ou seja, os dados de temperatura real e a temperatura simulada, apresentando uma comparação entre a amplitude de temperatura, a mediana e as temperaturas máximas do SFCR 1.

Figura 14 – Comportamento/Perfil da temperatura real e da temperatura simulada do inversor do SFCR 1.



Fonte: A autora.

Tabela 11 – Valores de amplitude, mediana e máxima das temperaturas reais e simuladas do inversor para o SFCR 1.

	<i>Amplitude</i>			<i>Mediana</i>			<i>Máxima</i>		
	T <sub>real</sub> [°C]	T <sub>simulada</sub> [°C]	$\sigma$ [°C]	T <sub>real</sub> [°C]	T <sub>simulada</sub> [°C]	$\sigma$ [°C]	T <sub>real</sub> [°C]	T <sub>simulada</sub> [°C]	$\sigma$ [°C]
<i>Jan</i>	36,6	44,8	5,8	40,7	40,9	0,2	61,7	63,1	1,0
<i>Fev</i>	37,0	43,0	4,2	41,0	42,0	0,7	61,3	61,2	0,1
<i>Mar</i>	32,9	42,6	6,8	42,6	42,5	0,1	58,0	60,1	1,5
<i>Abr</i>	34,6	39,6	3,5	39,4	37,9	1,1	53,9	56,0	1,5
<i>Mai</i>	31,9	42,9	7,7	34,6	34,5	0,1	47,1	52,9	4,1
<i>Jun</i>	31,8	42,1	7,3	29,4	30,0	0,5	45,0	47,8	2,0
<i>Jul</i>	34,3	44,2	7,0	28,3	27,7	0,4	42,1	53,8	8,3
<i>Ago</i>	35,4	45,5	7,1	32,4	31,4	0,7	46,3	56,8	7,4
<i>Set</i>	38,5	48,3	7,0	30,7	30,5	0,2	52,9	58,0	3,6
<i>Out</i>	35,4	47,3	8,4	34,1	33,7	0,3	56,8	59,1	1,6
<i>Nov</i>	33,2	46,1	9,1	36,6	36,6	0,0	56,3	61,0	3,3
<i>Dez</i>	37,2	43,8	4,7	43,3	38,7	3,3	61,3	61,2	0,1
<i>Média</i>	34,9	44,2	6,6	36,1	35,5	0,6	53,6	57,6	2,9

Fonte: A autora.

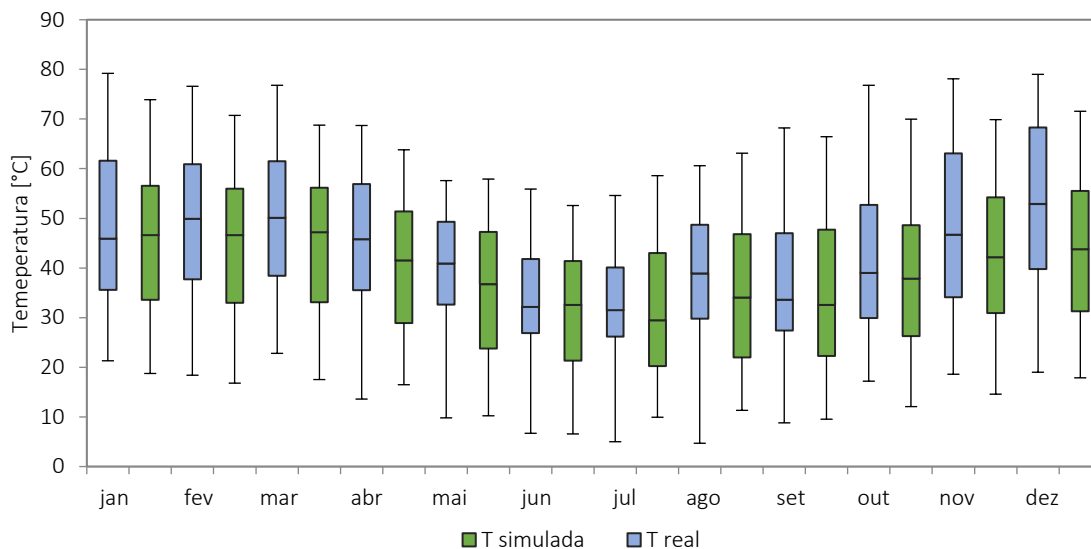
Entre os parâmetros analisados na Tabela 11 a amplitude apresentou maior diferença entre os dados reais e simulados e a mediana teve valores mais próximos. O SFCR 1 apresentou média de amplitude de temperatura real de inversor de 34,9 °C e média de amplitude de temperatura simulada de inversor de 44,2 °C. A média anual de temperatura máxima real do inversor é de 53,6 °C e 57,6 °C para a média das temperaturas máximas simuladas do inversor. A média das medianas foi de 36,1 °C para as temperaturas reais do inversor e 35,5 °C para a temperatura simulada.

O maior desvio padrão de amplitude para a temperatura real e simulada do inversor ocorreu no mês de novembro com valor de 9,1 °C, enquanto menor desvio padrão ocorreu no mês de abril com valor de 3,5 °C. Para a mediana da temperatura real e simulada de inversor o maior desvio padrão ocorre no mês de dezembro com valor de 3,3 °C e o menor desvio padrão ocorreu no mês de novembro, onde as temperaturas apresentaram o mesmo valor. O maior desvio padrão para a temperatura máxima real e simulada do inversor ocorre no mês de julho com valor de 8,3 °C e o menor desvio padrão ocorre nos meses de fevereiro e dezembro com valor de 0,1 °C.

A Figura 15 mostra uma comparação entre o comportamento/perfil da temperatura real e da temperatura obtida com os dados da simulação para o inversor do SFCR 2. A

Tabela 12 apresenta uma comparação entre os dados de amplitude, mediana e máximas para as temperaturas reais e simuladas.

Figura 15 – Comportamento/Perfil da temperatura real e da temperatura simulada do inversor do SFCR 2.



Fonte: A autora.

Tabela 12 – Valores de amplitude, mediana e máxima das temperaturas reais e simuladas do inversor para o SFCR 2.

	<i>Amplitude</i>			<i>Mediana</i>			<i>Máxima</i>		
	$T_{real}$ [°C]	$T_{simulada}$ [°C]	$\sigma$ [°C]	$T_{real}$ [°C]	$T_{simulada}$ [°C]	$\sigma$ [°C]	$T_{real}$ [°C]	$T_{simulada}$ [°C]	$\sigma$ [°C]
<i>Jan</i>	57,9	55,1	1,9	45,9	46,6	0,5	79,2	73,9	3,8
<i>Fev</i>	58,2	53,9	3,0	49,9	46,6	2,3	76,6	70,7	4,1
<i>Mar</i>	54,0	51,2	1,9	50,1	47,2	2,0	76,8	68,8	5,7
<i>Abr</i>	55,1	47,3	5,5	45,8	41,5	3,0	68,7	63,8	3,5
<i>Mai</i>	47,8	47,7	0,1	40,9	36,7	3,0	57,6	57,9	0,2
<i>Jun</i>	49,2	46,0	2,2	32,2	32,6	0,3	55,9	52,6	2,3
<i>Jul</i>	49,6	48,7	0,7	31,5	29,5	1,4	54,6	58,6	2,8
<i>Ago</i>	55,9	51,8	2,9	38,9	34,0	3,4	60,6	63,1	1,8
<i>Set</i>	59,4	56,9	1,8	33,6	32,5	0,7	68,2	66,4	1,2
<i>Out</i>	59,6	57,9	1,2	39,0	37,9	0,8	76,8	70,0	4,8
<i>Nov</i>	59,5	55,3	3,0	46,7	42,2	3,2	78,1	69,9	5,8
<i>Dez</i>	60,0	53,7	4,5	52,9	43,8	6,4	79,0	71,6	5,3
<i>Média</i>	55,5	52,1	2,4	42,3	39,3	2,3	69,3	65,6	3,4

Fonte: A autora.

Conforme dados apresentados na Tabela 12, a temperatura máxima do inversor apresentou maior diferença entre os dados reais e simulados, enquanto a mediana mostrou valores mais próximos. O SFCR 2 apresentou média de amplitude de temperatura real de inversor de 55,5 °C e média de temperatura simulada de inversor de 52,1 °C. A média anual para as temperaturas máximas reais de inversor é de 69,3 °C e de 65,6 °C para a média das temperaturas máximas simuladas de inversor, enquanto, a média das medianas foi de 42,3 °C para as temperaturas reais de inversor e de 39,3 °C para a temperatura simulada de inversor.

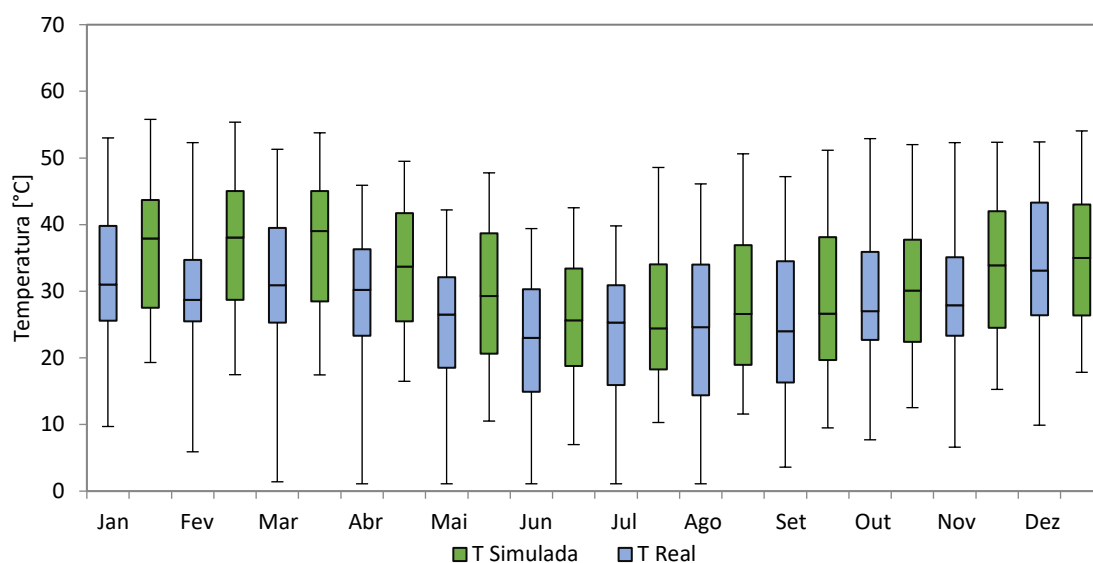
Para a amplitude da temperatura real e simulada do inversor, o maior desvio ocorreu no mês de dezembro com valor de 4,5 °C, enquanto menor desvio padrão ocorreu no mês de maio com valor de 0,1 °C. Para a mediana da temperatura real e simulada de inversor o maior e o menor desvio padrão ocorreram nos meses de dezembro e junho, respectivamente com valores de 6,4 °C e 0,3 °C. O maior e menor valor de desvio padrão para a temperatura máxima real e simulada do inversor ocorreram nos meses de novembro e maio, com valores de 5,8 °C e 0,2 °C, respectivamente.

Analisando as Figuras 14 e 15 nota-se que a temperatura simulada do inversor, para os dois sistemas, apresenta pouca variação ao longo do ano, enquanto a temperatura real do inversor varia mais de acordo com a estação do ano. O SFCR 1 apresenta de forma geral temperaturas simuladas maiores que as temperaturas reais, enquanto o oposto ocorre no SFCR 2, as temperaturas reais são de maneira geral maiores que as simuladas.

#### **4.2.2. Sistemas Fotovoltaicos 3 e 4**

A Figura 16 apresenta um comparativo entre o comportamento/perfil da temperatura real e da temperatura obtida com os dados da simulação para o inversor do SFCR 3. A Tabela 13 apresenta uma comparação entre os dados de temperatura real e temperatura simulada do inversor também do SFCR 3, comparando os dados de amplitude, mediana e máximas.

Figura 16 – Comportamento/Perfil da temperatura real e da temperatura simulada do inversor do SFCR 3.



Fonte: A autora.

Tabela 13 – Valores de amplitude, mediana e máxima das temperaturas reais e simuladas do inversor para o SFCR 3.

	<i>Amplitude</i>			<i>Mediana</i>			<i>Máxima</i>		
	$T_{\text{real}}$ [°C]	$T_{\text{simulada}}$ [°C]	$\sigma$ [°C]	$T_{\text{real}}$ [°C]	$T_{\text{simulada}}$ [°C]	$\sigma$ [°C]	$T_{\text{real}}$ [°C]	$T_{\text{simulada}}$ [°C]	$\sigma$ [°C]
<i>Jan</i>	43,3	36,5	4,8	31,0	37,9	4,9	53,0	55,8	2,0
<i>Fev</i>	46,4	37,9	6,0	28,7	38,0	6,6	52,3	55,4	2,2
<i>Mar</i>	49,9	36,3	9,6	30,9	39,0	5,7	51,3	53,8	1,7
<i>Abr</i>	44,8	33,0	8,3	30,2	33,7	2,5	45,9	49,5	2,5
<i>Mai</i>	41,1	37,2	2,7	26,5	29,3	2,0	42,2	47,8	3,9
<i>Jun</i>	38,3	35,5	2,0	23,0	25,6	1,9	39,4	42,5	2,2
<i>Jul</i>	38,7	38,3	0,3	25,3	24,4	0,6	39,8	48,6	6,2
<i>Ago</i>	45,0	39,0	4,2	24,6	26,6	1,4	46,1	50,6	3,2
<i>Set</i>	43,6	41,7	1,4	24,0	26,6	1,8	47,2	51,2	2,8
<i>Out</i>	45,2	39,5	4,0	27,0	30,1	2,2	52,9	52,0	0,6
<i>Nov</i>	45,7	37,1	6,1	27,9	33,9	4,2	52,3	52,4	0,0
<i>Dez</i>	42,5	36,2	4,4	33,1	35,0	1,4	52,4	54,1	1,2
<i>Média</i>	43,7	37,4	4,5	27,7	31,7	2,9	47,9	51,1	2,4

Fonte: A autora.

Analisando a Tabela 13 a amplitude apresentou maior diferença entre os dados reais e simulados e as máximas tiveram os valores mais próximos. O SFCR 3 apresentou média de amplitude de temperatura real de inversor de 43,7 °C e média de amplitude de temperatura simulada de inversor de 37,4 °C. A média das medianas para a temperatura

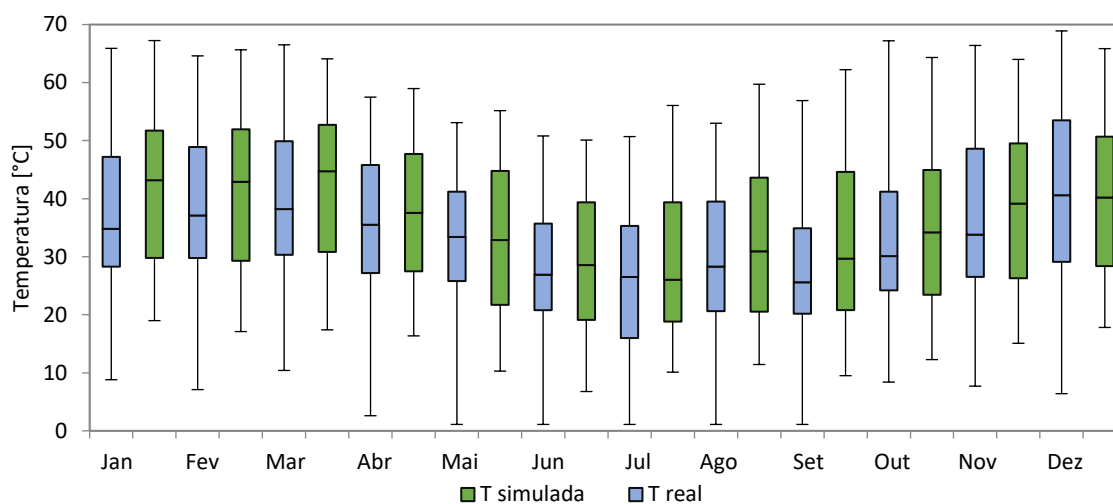


real e simulada o inversor foi de 27,7 °C e 31,7 °C respectivamente. Para as máximas a média foi de 47,9 °C para a temperatura real e 51,1 °C para a temperatura simulada de inversor.

A amplitude apresentou o maior desvio padrão no mês de março com valor de 9,6 °C e o menor no mês de julho com valor de 0,3 °C. A mediana apresentou maior desvio padrão no mês de fevereiro com valor de 6,6 °C, enquanto, que o menor desvio padrão ocorreu no mês de julho com valor de 0,6 °C. Para a temperatura máxima o maior e o menor desvio padrão ocorreram nos meses de julho e novembro, com valores de 6,2 °C e 0,0 °C, respectivamente.

A Figura 17 mostra uma comparação entre o comportamento/perfil da temperatura real e da temperatura obtida com os dados da simulação para o inversor do SFCR 4 e a Tabela 14 apresenta uma comparação ente os dados de amplitude, mediana e máximas para as temperaturas reais e simuladas para o mesmo sistema.

Figura 17 – Comportamento/Perfil da temperatura real e da temperatura simulada do inversor do SFCR 4.



Fonte: A autora.

Tabela 14 – Valores de amplitude, mediana e máxima das temperaturas reais e simuladas do inversor para o SFCR 4.

(continua)

	<i>Amplitude</i>			<i>Mediana</i>			<i>Máxima</i>		
	T <sub>real</sub> [°C]	T <sub>simulada</sub> [°C]	$\sigma$ [°C]	T <sub>real</sub> [°C]	T <sub>simulada</sub> [°C]	$\sigma$ [°C]	T <sub>real</sub> [°C]	T <sub>simulada</sub> [°C]	$\sigma$ [°C]
<i>Jan</i>	57,1	48,3	6,3	34,8	43,2	5,9	65,9	67,2	0,9
<i>Fev</i>	57,5	48,5	6,3	37,1	42,9	4,1	64,6	65,7	0,7

Tabela 14 – Valores de amplitude, mediana e máxima das temperaturas reais e simuladas do inversor para o SFCR 4.

(conclusão)

	<i>Amplitude</i>			<i>Mediana</i>			<i>Máxima</i>		
	T <sub>real</sub> [°C]	T <sub>simulada</sub> [°C]	$\sigma$ [°C]	T <sub>real</sub> [°C]	T <sub>simulada</sub> [°C]	$\sigma$ [°C]	T <sub>real</sub> [°C]	T <sub>simulada</sub> [°C]	$\sigma$ [°C]
<i>Mar</i>	56,1	46,7	6,7	38,2	44,7	4,6	66,5	64,1	1,7
<i>Abr</i>	54,9	42,6	8,7	35,5	37,6	1,5	57,5	59,0	1,0
<i>Mai</i>	52,0	44,9	5,0	33,4	32,9	0,4	53,1	55,2	1,5
<i>Jun</i>	49,7	43,3	4,5	26,9	28,6	1,2	50,8	50,1	0,5
<i>Jul</i>	49,6	45,9	2,6	26,5	26,0	0,3	50,7	56,1	3,8
<i>Ago</i>	51,9	48,3	2,5	28,3	30,9	1,9	53,0	59,7	4,8
<i>Set</i>	55,8	52,7	2,2	25,6	29,7	2,9	56,9	62,2	3,8
<i>Out</i>	58,8	52,1	4,8	30,1	34,2	2,9	67,2	64,3	2,0
<i>Nov</i>	58,7	48,9	6,9	33,8	39,2	3,8	66,4	64,0	1,7
<i>Dez</i>	62,5	48,0	10,2	40,6	40,2	0,3	68,9	65,9	2,2
<i>Média</i>	55,4	47,5	5,6	32,6	35,8	2,5	60,1	61,1	2,0

Fonte: A autora.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 14, para o SFCR 4 a amplitude apresentou maior diferença entre os dados reais e simulados, enquanto a máxima mostrou valores mais próximos. A amplitude de temperatura real de inversor apresentou média 55,4 °C e média de temperatura simulada de inversor foi de 47,5 °C. Para a mediana a média de temperatura real de inversor é de 32,6 °C, e a média de temperatura simulada de inversor é de 35,8 °C. Para as temperaturas máximas a média de temperatura real apresentou valor de 60,1 °C enquanto, que a média para a temperatura simulada de inversor apresentou valor de 61,1 °C.

A amplitude apresentou maior desvio no mês de dezembro com valor de 10,2 °C, enquanto, que o menor desvio padrão ocorreu no mês de setembro com valor de 2,2 °C. Para a mediana da temperatura real e simulada de inversor o maior desvio padrão ocorreu no mês de janeiro com valor de 5,9 °C e o menor desvio padrão ocorreu nos meses de julho e dezembro com valor de 0,3 °C. O maior e menor valor de desvio padrão para a temperatura máxima do inversor ocorrem nos meses de agosto e junho, com valores de 4,8 °C e 0,5 °C, respectivamente.

Analisando as Figuras 16 e 17 percebe-se que os SFCRs 3 e 4 apresentam, de forma geral, a temperatura simulada do inversor maior do que a temperatura real do inversor. Para os dois sistemas nota-se que as temperaturas máximas reais e simuladas

ficam com valores próximos na maioria dos meses tendo média de desvio padrão de 2,4 °C e 2,0 °C para os SFCRs 3 e 4, respectivamente.

#### 4.3. COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA DIÁRIA REAL, SIMULADA E MODELADA DE INVERSOR

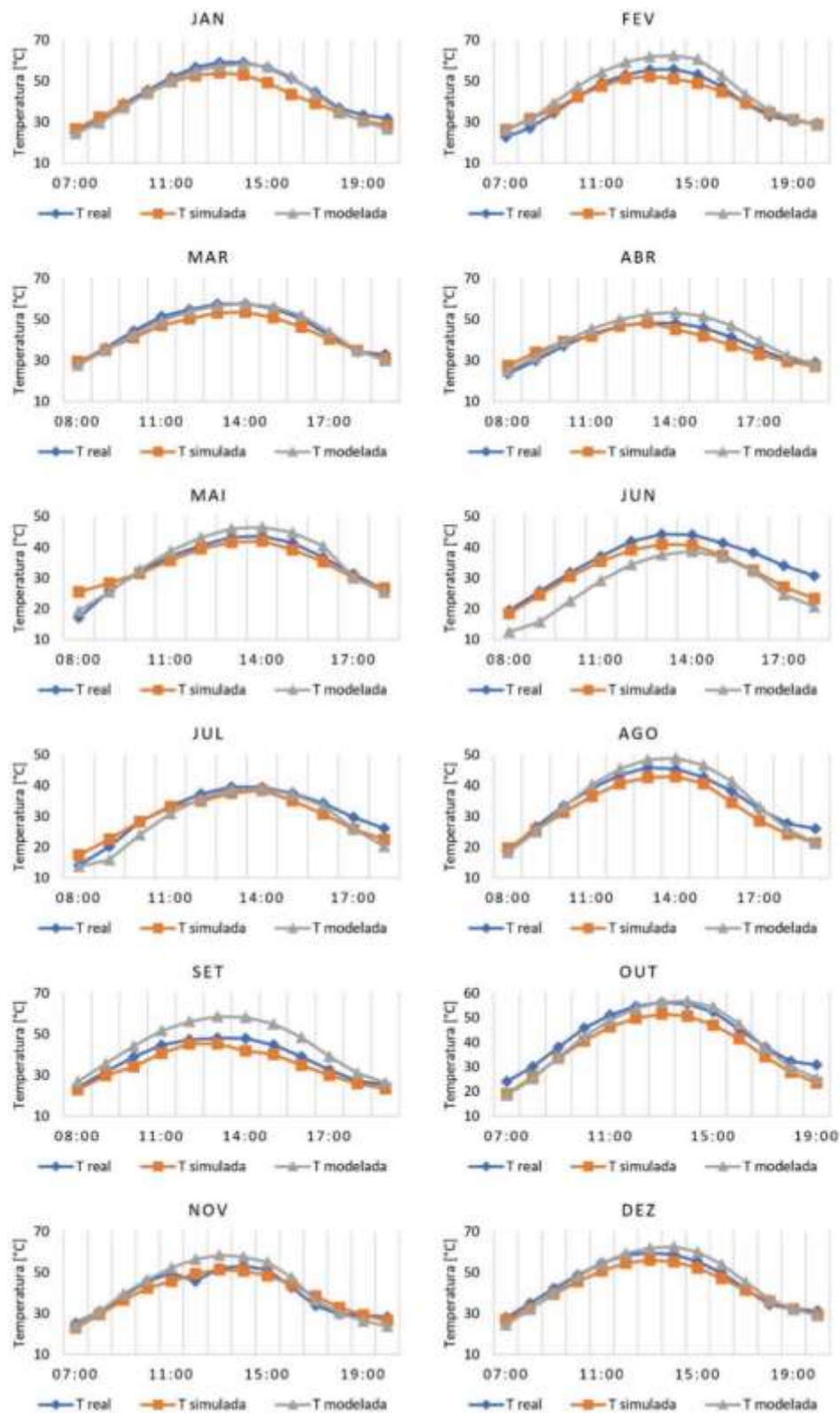
Com objetivo de verificar o perfil diário da temperatura de inversor realizou-se uma comparação entre a temperatura real, simulada e modelada de inversor. A temperatura real se refere à temperatura medida no inversor, a temperatura do inversor simulada é a temperatura obtida por meio dos dados apenas de simulação em *software* inseridos no modelo matemático descrito na Equação 6, e a temperatura do inversor modelada é a temperatura obtida inserindo dados reais na Equação 6 para obter a curva de temperatura. Como o *software* SAM fornece os dados em base horária, para essa comparação foram utilizados apenas os dados reais também em base horária, ou seja, foi utilizada a temperatura equivalente ao mesmo horário fornecido pelo *software* SAM. É importante destacar que o *software* SAM não apresenta um modelo matemático para estimar o comportamento/perfil da temperatura de inversor.

Para a temperatura real de inversor, foi escolhido um dia do mês com base no perfil da potência c.a. registrada, ou seja, um dia com boas condições de irradiação, onde não houve cortes na produção do sistema. Para a temperatura simulada de inversor foi selecionado um dia em que a temperatura do inversor tivesse um comportamento semelhante à temperatura real para uma melhor análise. Enquanto, que para a temperatura modelada do inversor foi escolhido o mesmo dia da temperatura real de inversor, visto que os dados inseridos na Equação 6 para obter essa temperatura foram os dados reais.

##### 4.3.1. Sistemas Fotovoltaicos 1 e 2

A Figura 18 e a Figura 19 apresentam uma comparação entre os perfis da temperatura real, da temperatura simulada e da temperatura modelada, dos inversores dos SFCRs 1 e 2, respectivamente, para um dia do mês.

Figura 18 – Comparação da temperatura real, simulada e modelada do inversor do SFCR 1.



Fonte: A autora.

Com os dados obitos para a construção dos gráficos presentes na Figura 18, realizou o cálculo da média diária e os dados foram copilados na Tabela 15.

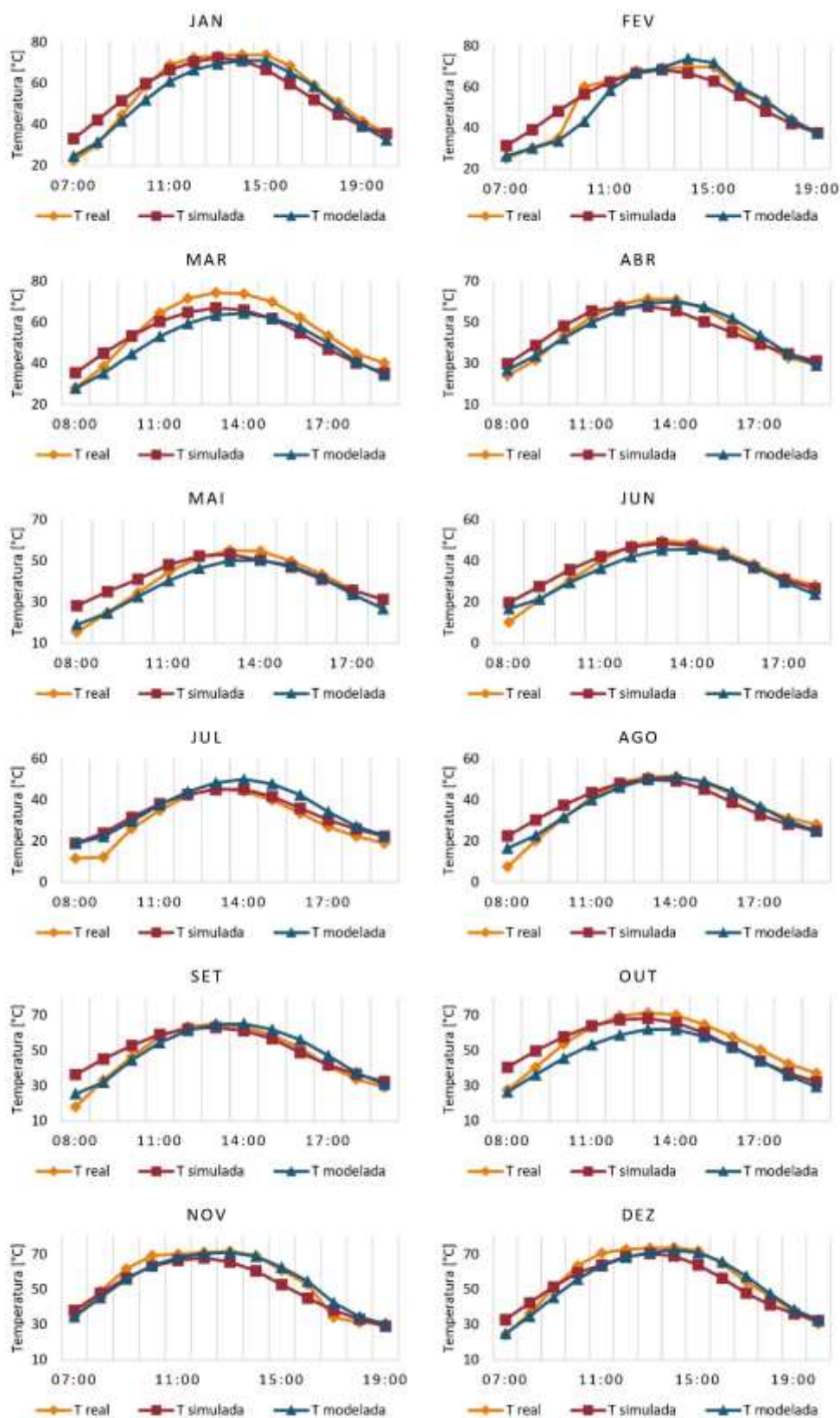
Tabela 15 – Média diária da temperatura real, simulada e modelada do inversor para o SFCR 1.

	$T_{real} [^{\circ}C]$	$T_{simulada} [^{\circ}C]$	$T_{modelada} [^{\circ}C]$	$\sigma [^{\circ}C]$
<i>Jan</i>	44,6	41,2	43,1	1,7
<i>Fev</i>	41,0	40,5	45,5	2,7
<i>Mar</i>	45,5	42,8	45,0	1,4
<i>Abr</i>	38,3	37,6	41,3	2,0
<i>Mai</i>	34,2	34,2	35,8	0,9
<i>Jun</i>	35,4	31,9	27,8	3,8
<i>Jul</i>	30,9	29,7	28,6	1,1
<i>Ago</i>	35,0	32,4	35,7	1,7
<i>Set</i>	37,6	34,5	44,3	5,0
<i>Out</i>	42,7	37,8	40,9	2,4
<i>Nov</i>	39,7	39,1	41,8	1,4
<i>Dez</i>	45,0	42,7	45,7	1,5
<i>Média</i>	39,1	37,1	39,6	2,1

Fonte: A autora.

Percebe-se que para a maioria dos meses do SFCR 1, a temperatura modelada é a maior em boa parte do dia, apresentando média anual de 39,6 °C, a temperatura simulada é a menor com média anual de 37,1 °C e a temperatura real fica entre as duas com valor de média anual de 39,1 °C. O mês de setembro apresenta maior desvio padrão com valor de 5,0 °C, devido principalmente a diferença entre a temperatura simulada e modelada de inversor, com uma diferença de praticamente 10 °C. O menor desvio padrão ocorre no mês de maio, com valor de 0,9 °C.

Figura 19 – Comparação da temperatura real, simulada e modelada do inversor do SFCR 2.



Fonte: A autora.

Por meio dos dados utilizados na construção dos gráficos apresentados na Figura 19, realizou-se o cálculo da média diária das temperaturas de inversor e os dados estão presentes na Tabela 16.

Tabela 16 – Média diária da temperatura real, simulada e modelada de inversor para o SFCCR 2.

	$T_{real} [^{\circ}C]$	$T_{simulada} [^{\circ}C]$	$T_{modelada} [^{\circ}C]$	$\sigma [^{\circ}C]$
<i>Jan</i>	55,4	54,7	52,4	1,5
<i>Fev</i>	52,5	52,7	51,4	0,7
<i>Mar</i>	56,2	52,5	49,4	3,4
<i>Abr</i>	45,1	45,3	45,4	0,2
<i>Mai</i>	40,2	42,2	37,7	2,3
<i>Jun</i>	35,6	36,9	33,9	1,5
<i>Jul</i>	29,9	33,5	35,4	2,8
<i>Ago</i>	36,5	37,6	36,9	0,5
<i>Set</i>	46,8	49,7	48,4	1,5
<i>Out</i>	54,1	53,3	47,0	3,9
<i>Nov</i>	54,3	51,1	54,0	1,8
<i>Dez</i>	55,1	52,6	53,5	1,3
<i>Média</i>	46,8	46,8	45,4	1,8

Fonte: A autora.

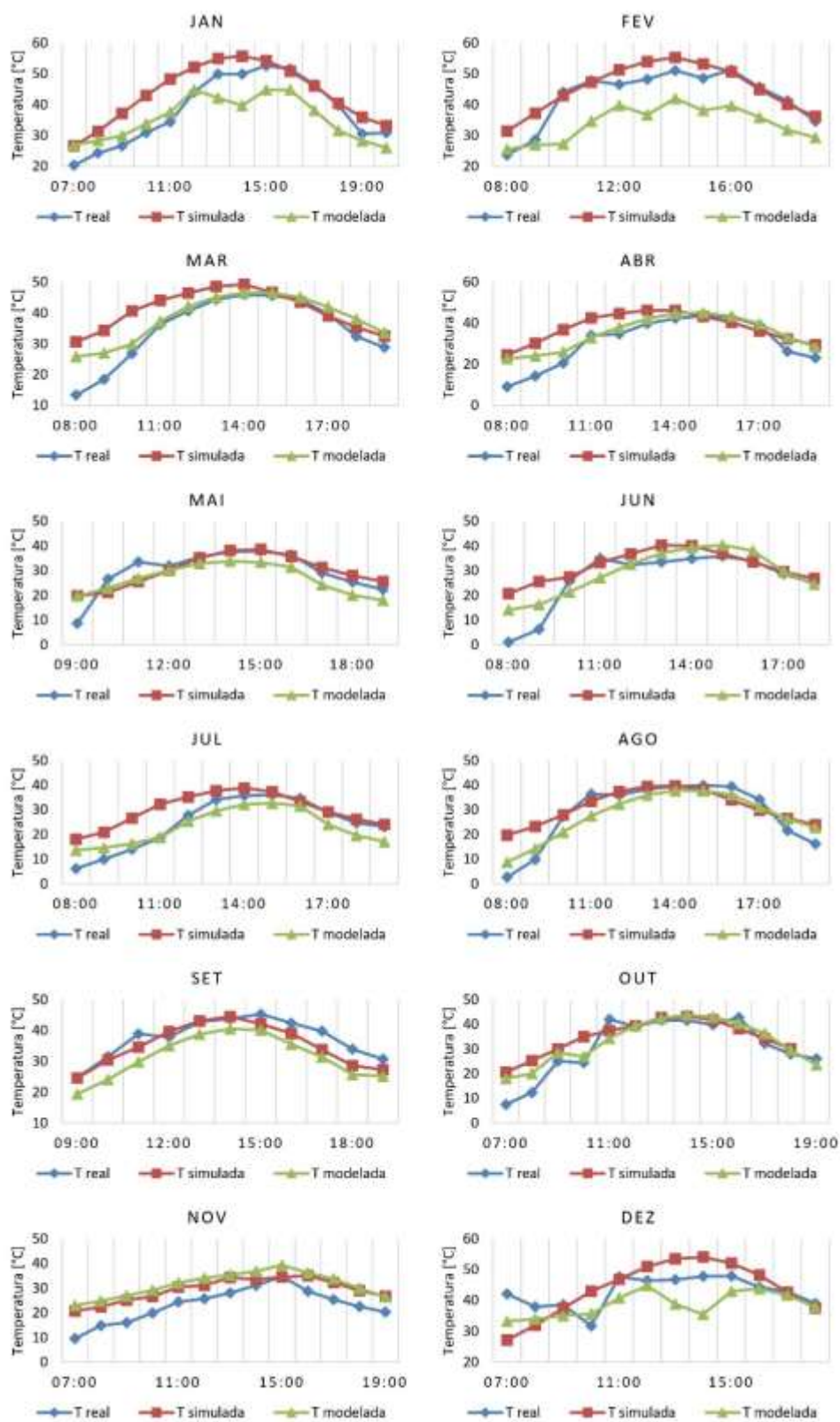
Para o SFCCR 2 as temperaturas, de maneira geral, ficaram próximas se sobrepondo nos gráficos. A temperatura real e a temperatura simulada de inversor apresentaram a mesma média anual com valor de 46,8 °C e a temperatura modelada de inversor apresenta média anual de 45,4 °C. O maior desvio padrão ocorre no mês de outubro com valor de 3,9 °C, enquanto o menor ocorre no mês de abril com valor de 0,2 °C.

O SFCCR 1 apresentou menores médias de temperatura em comparação com o SFCCR 2 e demonstrou uma diferença um pouco maior entre as temperaturas, apresentando valor de desvio padrão médio de 2,1 °C enquanto, que o SFCCR 2 apresentou valor de desvio padrão médio de 1,8 °C.

#### 4.3.2. Sistemas Fotovoltaicos 3 e 4

A Figura 20 e Figura 21 apresentam uma comparação entre os perfis da temperatura real, da temperatura simulada e da temperatura modelada, dos inversores dos SFCCRs 3 e 4, respectivamente, para um dia do mês.

Figura 20 – Comparação da temperatura real, simulada e modelada do inversor do SFCR 3.



Fonte: A autora.



Com os dados obitos para a construção dos gráficos presentes na Figura 20, realizou-se o cálculo da média diária e os dados foram copilados na Tabela 17.

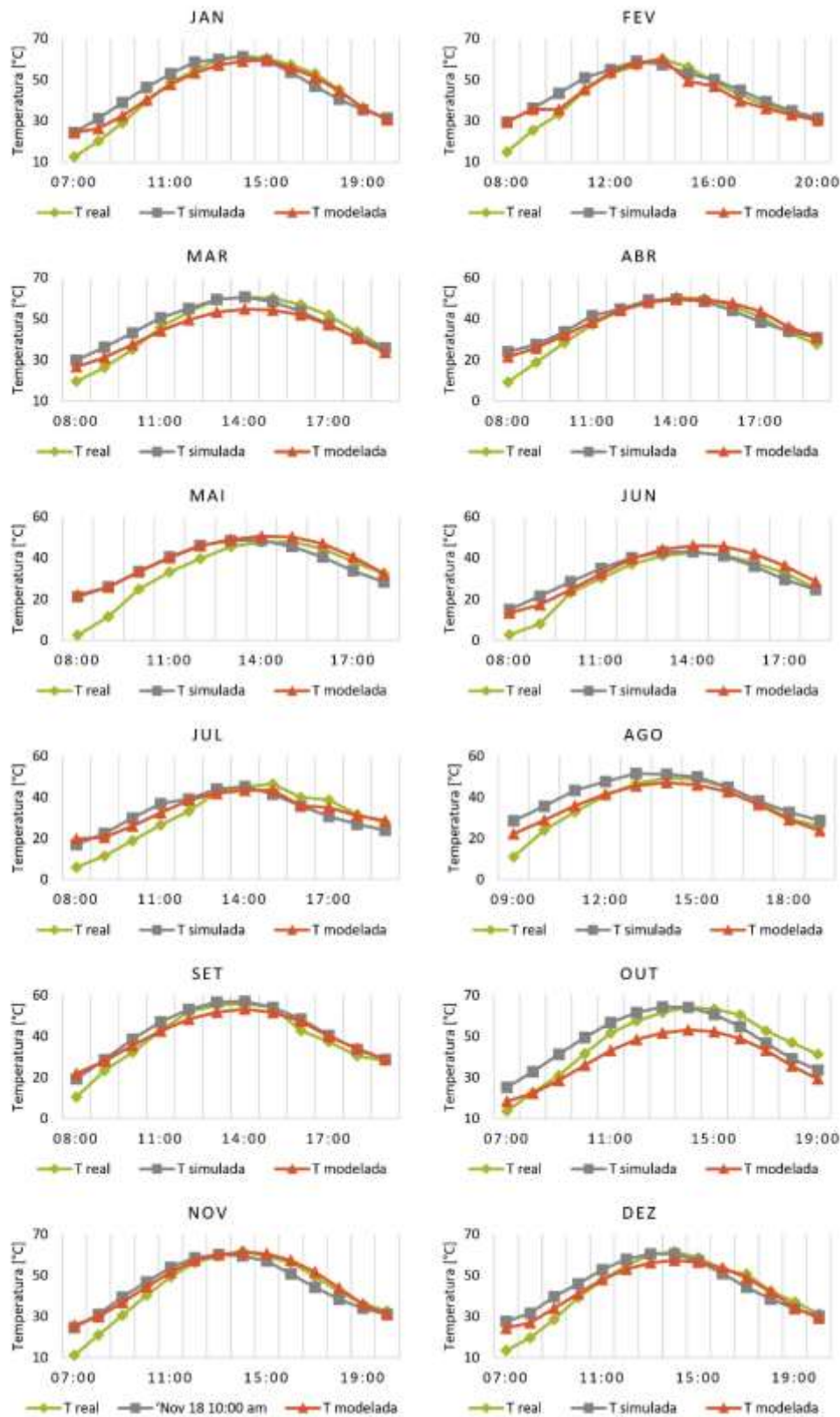
Tabela 17 – Média diária da temperatura real, simulada e modelado inversor para o SF3R 3.

	$T_{real} [^{\circ}C]$	$T_{simulada} [^{\circ}C]$	$T_{modelada} [^{\circ}C]$	$\sigma [^{\circ}C]$
<i>Jan</i>	38,1	43,6	35,6	4,1
<i>Fev</i>	42,7	45,4	34,0	5,9
<i>Mar</i>	34,8	41,0	38,3	3,1
<i>Abr</i>	30,9	37,8	35,1	3,5
<i>Mai</i>	29,6	29,9	26,7	1,8
<i>Jun</i>	26,6	31,9	29,1	2,7
<i>Jul</i>	24,5	30,0	23,0	3,7
<i>Ago</i>	28,5	31,1	27,7	1,8
<i>Set</i>	37,4	35,2	31,4	3,0
<i>Out</i>	31,0	34,2	32,8	1,6
<i>Nov</i>	23,1	29,3	31,3	4,3
<i>Dez</i>	42,7	43,8	38,7	2,7
<i>Média</i>	32,5	36,1	32,0	3,2

Fonte: A autora.

Para a maioria dos meses do SF3R 3, a temperatura simulada é a maior com média anual de 36,1 °C e a temperatura modelada é a menor em boa parte dos meses, apresentando média anual de 32,0 °C. O mês de fevereiro apresenta maior o desvio padrão com valor de 5,9 °C e o menor desvio padrão ocorre no mês de outubro, com valor de 1,6 °C.

Figura 21 – Comparação da temperatura real, simulada e modelada do inversor do SFCR 4.



Fonte: A autora.

Por meio dos dados utilizados na construção dos gráficos apresentados na Figura 21, realizou-se o cálculo da média diária das temperaturas de os dados estão presentes na Tabela 18.

Tabela 18 – Média diária da temperatura real, simulada e modelada inversor para o SFCR 4.

	$T_{real} [^{\circ}C]$	$T_{simulada} [^{\circ}C]$	$T_{modelada} [^{\circ}C]$	$\sigma [^{\circ}C]$
<i>Jan</i>	43,5	45,8	44,3	1,2
<i>Fev</i>	41,4	45,1	42,6	1,9
<i>Mar</i>	45,8	47,6	43,8	1,9
<i>Abr</i>	36,3	38,9	39,0	1,5
<i>Mai</i>	33,5	37,5	39,7	3,2
<i>Jun</i>	29,3	32,5	33,6	2,3
<i>Jul</i>	30,6	32,7	33,0	1,3
<i>Ago</i>	35,6	41,1	36,3	3,0
<i>Set</i>	38,7	42,1	40,2	1,7
<i>Out</i>	46,7	48,4	39,2	4,9
<i>Nov</i>	43,2	44,9	46,2	1,5
<i>Dez</i>	42,7	45,0	43,2	1,2
<i>Média</i>	38,9	41,8	40,1	2,1

Fonte: A autora.

Para o SFCR 4 a temperatura simulada é a maior com média de 41,8 °C, enquanto, que a temperatura real é a menor com média de 38,9 °C. O maior desvio padrão ocorre no mês de outubro com valor de 4,9 °C, enquanto o menor ocorre nos meses de janeiro e dezembro com valor de 1,2 °C.

O SFCR 4 apresentou maiores médias de temperatura em comparação com o SFCR 3 e demonstrou uma diferença um pouco menor entre as temperaturas, apresentando valor de desvio padrão médio de 2,1 °C enquanto, que o SFCR 3 apresentou valor de desvio padrão médio de 3,2 °C.

De forma geral, as temperaturas apresentam comportamento semelhante, e médias de temperatura real, simulada e modelada próximas, o que demonstra que o modelo matemático utilizado descreve de forma eficiente o comportamento térmico do inversor.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a análise e influência da distribuição de temperatura de inversor no desempenho energético de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída com distintos fatores de dimensionamento. Avaliou-se quatro sistemas fotovoltaicos, sendo os SFCRs 1 e 2 com potência de inversor de 3 kW e os SFCRs 3 e 4 com potência de inversor de 5 kW, todos os sistemas possuem diferentes FDI.

Para comparação de temperatura de inversor dos sistemas foi analisada a temperatura real medida no inversor e a temperatura simulada de inversor. A temperatura real dos inversores foi medida por meio de um sensor instalado no dissipador do inversor enquanto, que a temperatura simulada foi determinada utilizando os dados obtidos a partir da modelagem e simulação dos sistemas fotovoltaicos por meio do *software* SAM e o modelo matemático que descreve o perfil da temperatura operacional de inversores. As temperaturas diárias de inversor foram analisadas fazendo um comparativo do perfil da temperatura real, simulada e modelada do inversor ao longo de um ano. Com objetivo de comparar os SFCRs considerou-se também os índices de mérito de produtividade e fator de capacidade.

Ao comparar os SFCRs 1 e 2 nota-se que o SFCR 1 apresenta amplitudes menores de temperatura tanto para os dados reais como para a temperatura simulada de inversor. Analisando o fator de capacidade e a produtividade dos sistemas, percebe-se que o SFCR 1 apresenta as maiores médias anuais dos índices com valor de 16,68 % para o FC e 122,12 kWh/kWp para a produtividade. O SFCR 2 apresenta média anual de fator de capacidade de 14,62 % e produtividade de 106,99 kWh/kWp. A média do desvio padrão para o FC entre os sistemas foi de 1,63 % e para a produtividade foi de 11,95 kWh/kWp.

Analisando o comportamento/perfil da temperatura real e simulada dos SFCRs 3 e 4, percebe-se que o SFCR 4 apresenta maiores amplitudes de temperatura em ambos os casos. Para os índices de fator de capacidade e a produtividade o SFCR 3 apresenta as maiores médias anuais com valor de 17,16 % para o fator de capacidade e 125,66 kWh/kWp para a produtividade. O SFCR 4 apresenta médias anuais de FC e produtividade de 15,76 % e 115,38 kWh/kWp, respectivamente. A média do desvio padrão entre os sistemas apresentou valores de 1,48 % para o FC e 10,83 kWh/kWp para a produtividade.

Por meio do monitoramento dos sistemas e com os dados obtidos com o *software* SAM que foram inseridos na Equação 6, obteve-se a temperatura simulada de inversor,

sendo possível comparar os dados de temperatura real e simulada de inversor de um mesmo SFCR.

O SFCR 1 apresentou temperaturas simuladas de inversor maiores, enquanto o SFCR 2 apresentou temperaturas reais de inversor maiores. Para a temperatura real a média anual de amplitude, mediana e máxima do SFCR1 foi de 34,9 °C, 36,1 °C e 53,6 °C, respectivamente, para os mesmos parâmetros avaliados na temperatura simulada os valores médios anuais foram de 44,2 °C, 35,5 °C e 57,6 °C. A maior diferença entre a temperatura real e simulada é na amplitude com desvio padrão médio de 6,6 °C e a menor é na mediana com desvio padrão médio de 2,9 °C. Para o SFCR 2 a temperatura simulada apresentou média anual de amplitude de 52,1 °C, para a mediana de 39,3 °C e para a máxima de 65,6 °C. Para os valores de temperatura real a média anual de amplitude, mediana e máxima foi de 55,5 °C, 42,3 °C e 69,3 °C, respectivamente. A menor diferença entre a temperatura real e simulada é na mediana com desvio padrão médio de 2,3 °C e a maior é na máxima com desvio padrão médio de 3,4 °C.

Para os SFCRs 3 e 4 as temperaturas simuladas de inversor são maiores do que as temperaturas reais. Para o SFCR 3 a temperatura real apresentou média anual de amplitude de 43,7 °C, para a mediana de 27,7 °C e para a máxima de 47,9 °C. Para os valores de temperatura simulada a média anual de amplitude, mediana e máxima foi de 37,4 °C, 31,7 °C e 51,1 °C, respectivamente. A menor diferença entre a temperatura real e simulada é na máxima com desvio padrão médio de 2,4 °C e a maior é na amplitude com desvio padrão médio de 4,5 °C. O SFCR 4 apresentou para a temperatura real de inversor média anual de amplitude de 55,4 °C, de mediana de 32,6 °C e de máxima de 60,1 °C, respectivamente, para os mesmos parâmetros avaliados na temperatura simulada os valores médios anuais foram de 47,5 °C, 35,8 °C e 61,1 °C. A maior diferença entre a temperatura real e simulada é na amplitude com desvio padrão médio de 5,6 °C e a menor é na máxima com desvio padrão médio de 2,0 °C.

Ao analisar os dados de temperatura real e simulada de inversor para os quatro sistemas, fica evidente que o modelo matemático adotado para definir a temperatura simulada é eficiente, pois comparando os dados reais medidos com os dados obtidos por meio de simulação e modelagem, os valores apresentados demonstram pouca diferença, principalmente nos parâmetros de mediana e máximas, com média anual de desvio padrão de 0,6 °C a 3,4 °C.

Analisando o perfil diário das temperaturas os SFCRs apresentaram, de forma geral, um comportamento diário e anual semelhante, com a maiores temperaturas nos

meses de verão e as menores nos meses de inverno. O SFCR 1 apresentou temperaturas máximas em torno de 50 °C a 70 °C nos dias analisados, enquanto, que o SFCR 2 apresentou máxima em torno de 60 °C a 80 °C. A média da temperatura diária real, simulada e modelada foi de 39,1 °C, 37,1 °C e 39,6 °C, respectivamente para o SFCR 1 e média de desvio padrão entre as temperaturas de 2,1 °C. Para o SFCR 2 a média da temperatura diária real foi de 46,8 °C, para a simulada foi de 46,8 °C e para a modelada foi de 45,4 °C com média de desvio padrão de 1,8 °C.

As temperaturas máximas do SFCR 3 foram em torno de 50 °C a 60 °C nos dias analisados, enquanto, que o SFCR 4 apresentou máxima em torno de 60 °C a 70 °C. Para o SFCR 3 a média da temperatura diária real foi de 32,5 °C, para a simulada foi de 36,1 °C e para a modelada foi de 32,0 °C com média de desvio padrão de 3,2 °C. Para o SFCR 4 a média da temperatura diária real, simulada e modelada foi de 38,9 °C, 41,8 °C e 40,1 °C, respectivamente e a média de desvio padrão entre as temperaturas foi de 2,1 °C.

Ao final da análise pode-se verificar que os SFCRs 1 e 3, cujo FDI é igual a 0,92 e 1,24, respectivamente, apresentaram menores temperaturas quando avaliado os dados reais, como quando avaliado os dados simulados e também analisando o comportamento da temperatura de inversor ao longo dia. Os SFCRs 2 e 4, cujo FDI é igual a 0,76 e 0,89, respectivamente apresentam maiores temperaturas de inversor. O SFCR 2 que apresenta o menor FDI dos sistemas avaliados apresenta as maiores médias de temperaturas máximas enquanto o SFCR 3 que tem o maior FDI em relação aos demais apresenta as menores médias para o mesmo parâmetro.

Assim, conclui-se a evidência do impacto direto do dimensionamento do inversor em seu aquecimento e demonstra que sendo maior o valor de FDI, menores são as temperaturas apresentadas pelos inversores. O subdimensionamento de inversores é uma prática atual no mercado, mas é necessário estar atento a algumas questões, pois o aquecimento excessivo do inversor e de seus componentes pode prejudicar seu funcionamento e até mesmo reduzir sua vida útil.

## REFERÊNCIAS

ABSOLAR. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Energia solar fotovoltaica no Brasil**. 2020. Disponível em: <<http://absolar.org.br/infografico-absolar.html>>. Acesso em: 22 out. 2020.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa 482 de 17 de Abril de 2012**. 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2020.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa 687 de 24 de Novembro de 2015**. 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2020.

BELISKI, Leticia Mara. **Análise Da Qualidade De Energia Elétrica De Sistemas Fotovoltaicos De Geração Distribuída Em Unidades Prossumidoras Residenciais**. 2017. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2017.

BEN. Balanço Energético Nacional. 2020. <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019\\_Final.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019_Final.pdf)>. Acesso em: 22 out. 2020.

BEZERA, Luiz Daniel S. **Conversor cc-ca Para Aplicação Em Sistemas Autônomos De Energia Elétrica**. 2010. Trabalho de pós-graduação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará.

BURGER, Bruno; RÜTHER, Ricardo. **Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature**. Solar Energy, v. 80, n. 1, p. 32-45, 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X05003099>>. Acesso em: 24 ago. 2020.

CADERNOS TEMÁTICOS ANEEL. **Micro e Minigeração Distribuída – Sistema de Compensação de Energia Elétrica. 2016.** Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14913578/Caderno+tematico+Micro+e+Minigera%C3%A7%C3%A3o+Distribuida+-+2+edicao/716e8bb2-83b8-48e9-b4c8-a66d7f655161>>. Acesso em: 25 ago. 2020.

CHEN, Song et al. Determining the optimum grid-connected photovoltaic inverter size. **Solar Energy**, v. 87, p. 96-116, 2013.

COSTA, Higor José Serafim da. **Avaliação Do Fator De Dimensionamento Do Inversor Em Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede.** 2010. 74 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará Centro de Tecnologia, Fortaleza, 2010.

DIAS, João Batista. **Instalação Fotovoltaica Conectada à Rede: Estudo Experimental para a Otimização do Fator de Dimensionamento.** 2006. 175 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre.

FUSANO, Renato Hideo. **Análise dos índices de mérito do sistema fotovoltaico conectado à rede do escritório verde da UTFPR.** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

HALUCHE, João Vinicius Piqueras. **Análise do Impacto do Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI) em Sistemas Fotovoltaicos.** 2019. 49 f. Monografia (Especialização em Energia Renováveis) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

IEA-PVPS. **Analysis Of Photovoltaic Systems.** St. Ursen: Report Iea-pvps T2-01: 2000, 2000. 233 p.

IEA-PVPS. **Analytical Monitoring of Grid-connected Photovoltaic Systems.** St. Ursen: Report Iea-pvps T13-03:2014, 2014. 90 p.



KELLER, L.; AFFOLTER, P. **Optimizing the panel area of a photovoltaic system in relation to the static inverters - Practical Results**. Solar Energy, v.55, n.1, p.1–7, 1995.

Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0038092X9500032M>>. Acesso em: 24 ago. 2020.

KIL, A. J.; VAN DER WEIDEN, T. C. J. **Performance of modular grid connected PV systems with undersized inverters in Portugal and the Netherlands**. In: Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion-WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC). IEEE, 1994. p. 1028-1031. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/520136>>. Acesso em: 25 ago. 2020.

LOUCHE, A. et al. **Global approach for an optimal grid connected PV system sizing**. In: Proceedings of the 12th European photovoltaic solar energy conference. 1994. p. 1638-41.

LUOMA, Jennifer; KLEISSL, Jan; MURRAY, Keenan. **Optimal inverter sizing considering cloud enhancement**. Solar energy, v. 86, n. 1, p. 421-429, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X11003793>>. Acesso em: 25 ago. 2020.

MACEDO, Wilson Negrão. **Análise do fator de dimensionamento do inversor (FDI) aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR)**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MACHADO, Andriele Bratti et al. **Análise Temporal e Espacial de Indicadores de Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos de Geração Distribuída em Operação no Sul de Santa Catarina**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Catarina, 15 jun. 2019.

NREL. National Renewable Energy Laboratory. **PV VIDEOS**. Disponível em: <<https://sam.nrel.gov/photovoltaic/pv-videos.html>>. Acesso em: 27 ago. 2020.

PAIVA, G. M.; PIMENTEL, S. P.; MARRA, E.G.; ALVARENGA, B. P. **Análise Do Fator De Dimensionamento Do Inversor Para Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede Com Uso De Medições Climáticas Locais Em Goiás**. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS 2016, 2016. Disponível em: <<http://www.abens.org.br/CBENS2016/anais/anais/index.htm>>. Acesso em: 24 ago. 2020.

PEIPPO, K.; LUND, P. D. **Optimal sizing of grid-connected PV-systems for different climates and array orientations: a simulation study**. Solar Energy Materials and Solar Cells, v.35, p.445–451, 1994a. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0927024894901724>>. Acesso em: 23 ago. 2020.

PEIPPO, K.; LUND, P. D. **Optimal sizing of solar array and inverter in grid connected photovoltaic systems**. Solar Energy Materials and Solar Cells, v.32, p.95–114, 1994b. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0927024894902593>>. Acesso em: 23 ago. 2020.

PERIN, Aryston Luiz. **Análise Da Influência De Diferentes Estratégias De Arrefecimento No Desempenho E Durabilidade De Inversores De Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede**. 2016. 146 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

PERIN, Aryston Luiz; PRIEB, César Wilhelm Massen; KREZNINGER, Arno. **Montagem de bancada para ensaios elétricos e térmicos de inversores fotovoltaicos conectados à rede**. In: XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente (ASADES) (La Plata, 2016). 2016. Disponível em: <<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/67095>>. Acesso em: 25 ago. 2020.

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

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.

RAMPINELLI, Giuliano Arns; KRENZINGER, Arno. **Descrição de um modelo matemático para a temperatura operacional de inversores para conexão à rede elétrica**. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, v. 12, 2008. Disponível em: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/94457>. Acesso em 25 ago. 2020.

RAMPINELLI, G. A.; KRENZINGER, A.; BÜHLER, A. J. Methodology for Analysis of Thermal Behavior of Inverters for Photovoltaic Systems. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 139, n. 2, 2017. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/solarenergyengineering/article-abstract/139/2/025501/392607>>. Acesso em: 28 ago. 2020.

SCARABELOT, Letícia T.; RAMBO, Carlos R.; RAMPINELLI, Giuliano A. **A relative power-based adaptive hybrid model for DC/AC average inverter efficiency of photovoltaics systems**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 92, p. 470-477, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032118303137>>. Acesso em: 25 ago. 2020.

SCARABELOT, Letícia Toret; RAMPINELLI, Giuliano Arns; RAMBO, Carlos Renato. **Avaliação do Sistema de Compensação de Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos em Unidades Prosumidoras Residenciais**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS 2018, 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/193>>.

SCHALKWIJK, M. V. et al. **Undersizing of inverters: modeling and monitoring results of 15 PV/Inverter units in Portugal and Netherlands**. In: Proceedings of 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona. 1997. p. 2229-2232.

SOUZA, Arthur Costa de. **Análise Dos Impactos Da Geração Distribuída Por Fonte Solar Fotovoltaica Na Qualidade Da Energia Elétrica**. 2016. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

VIANA, Sandro Nascimento. **Análise Do Fator De Dimensionamento De Inversores Em Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede De Distribuição**. 2018. 52 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2018.

ZILLES, Roberto et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. Oficina de Textos, 2016.