

MEC-SETEC  
INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS - *CAMPUS* FORMIGA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**PROPOSTA DE METODOLOGIA DE INSPEÇÃO PARA  
SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR  
FOTOVOLTAICOS**

Gabriel Fraga Carvalho

Orientador: Prof. Dr. Patrick Santos de Oliveira

Formiga - MG

2020

GABRIEL FRAGA CARVALHO

**PROPOSTA DE METODOLOGIA DE INSPEÇÃO PARA  
SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR  
FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* Formiga, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Patrick Santos de Oliveira

Formiga - MG

2020

Carvalho, Gabriel Fraga.

C331p Proposta de Metodologia de Inspeção para Sistemas de Geração de Energia Solar Fotovoltaicos / Gabriel Fraga Carvalho -- Formiga : IFMG, 2020.

73p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Patrick Santos de Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Formiga.

1. Energia fotovoltaica. 2. Termografia infravermelha. 3. Inspeção de sistemas fotovoltaicos. 4. Falhas em sistemas fotovoltaicos. 5. Correlação. I. Oliveira, Patrick Santos de. II. Título.

CDD 621.3

**GABRIEL FRAGA CARVALHO**

**PROPOSTA DE METODOLOGIA DE INSPEÇÃO PARA SISTEMAS DE  
GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Elétrica do Instituto Federal de Minas  
Gerais como requisito para obtenção do  
Título de Bacharel em Engenharia  
Elétrica.

Avaliado em: 19 de outubro de 2020.

Nota: 89

**BANCA EXAMINADORA**



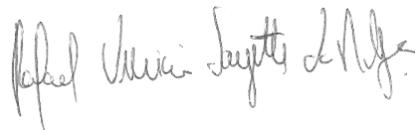
---

Prof. Dr. Patrick Santos de Oliveira



---

Prof. Dr. Gustavo Lobato Campos



---

Prof. Me. Rafael Vinicius Tayette da Nóbrega

# Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus por me dar saúde e força que tornaram possível a conclusão desta etapa na minha vida.

Aos meus pais Cláudio Roberto de Carvalho e Eliana Fraga Carvalho por todo o incentivo, empenho, dedicação e paciência sempre me apoiando em todos os momentos da minha vida.

A minha irmã Juliana Fraga de Carvalho pelo apoio e incentivo durante esta jornada.

A minha namorada Maria Cecília Fonseca pelo carinho, amor e paciência sempre me apoiando em minhas decisões e momentos difíceis.

Aos meus amigos e colegas por estarem presentes nos momentos de alegria e tristeza sempre me apoiando.

Ao meu professor, Doutor e orientador Patrick Santos de Oliveira por todo auxílio e ensinamentos durante o curso e a todos os professores que contribuíram para meu crescimento intelectual e pessoal, sempre com muito empenho e dedicação.

Ao Engenheiro Eletricista Christiano Eduardo Dutra e Silva da empresa Derivar Engenharia e Consultoria por compartilhar do seu conhecimento e contribuir diretamente para a realização deste trabalho.

Aos Técnicos de Laboratório do IFMG *Campus* Formiga, Alysson e Rodrigo pelo fornecimento dos dados do Sistema Fotovoltaico do IFMG que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

A empresa Lenz Engenharia pela sua contribuição para a realização deste trabalho.

*“Quando desistir não é uma opção, o sucesso é inevitável.”*  
*(Thomas Edison)*

# Resumo

A geração fotovoltaica é a forma de geração de energia que mais cresce na atualidade, logo, a necessidade de manutenções nestes tipos de sistemas passa a ser algo importante e cada vez mais necessário para o seu bom funcionamento. Este trabalho tem como finalidade apresentar os métodos de inspeção existentes, os tipos de falhas mais comuns e propor uma metodologia simples e prática para identificar problemas no funcionamento de sistemas fotovoltaicos, a partir da união de uma análise estatística (coeficiente de correlação) e uma inspeção de campo (termografia infravermelha), além de apresentar os resultados de sua aplicação em 4 sistemas reais, onde 3 deles apresentaram bom funcionamento e um dos sistemas apresentou funcionamento fora do ideal, apontando a necessidade de uma avaliação por termografia. Neste caso específico foram propostas soluções com base nas falhas identificadas. Ressalta-se que a avaliação técnica sugerida atende as normas internacionais vigentes.

**Palavras-chaves:** Energia Fotovoltaica, Termografia Infravermelha, Inspeção de Sistemas Fotovoltaicos

# Abstract

The Photovoltaic Power Systems is a type of energy supply that increases nowadays, therefore, the need to maintain these types of systems becomes important and increasingly necessary for its proper functioning. The aim of this work is to present the existing inspection methods, the most common types of failures and propose a simple and practical methodology to identify problems in the functioning of Photovoltaic Power Systems, by the union of a statistical analysis (correlation coefficient) and a field inspection (infrared thermography). In addition, to present the results of its application in 4 real systems, where 3 of them presented good functioning and one of the systems shown non ideal behavior, pointing the need for a thermography evaluation. In this specific case, solutions were proposed based on the identified failures. It is noteworthy that the suggested technical evaluation meets the standards international regulations.

**Key-words:** Photovoltaic Energy, Infrared Thermography, Inspection Methods

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Crescimento da energia solar FV no Brasil. . . . .	15
Figura 2 – Tipos de sistemas FV e seus equipamentos. . . . .	17
Figura 3 – Composição de um módulo FV. . . . .	19
Figura 4 – Curvas I-V. . . . .	20
Figura 5 – Circuito eletrônico básico de um inversor CC-CA. . . . .	21
Figura 6 – Associação de baterias em série e paralelo. . . . .	22
Figura 7 – Controlador de carga tipo série. . . . .	22
Figura 8 – Controlador de carga tipo paralelo ( <i>shunt</i> ). . . . .	23
Figura 9 – Módulo FV com delaminação . . . . .	24
Figura 10 – Módulo FV com trilhas de caracol. . . . .	25
Figura 11 – Rachaduras em células FV. . . . .	26
Figura 12 – Exemplo de sombreamento em sistemas FV. . . . .	27
Figura 13 – Curva I-V de um módulo com sombreamento parcial. . . . .	27
Figura 14 – Irradiância solar – célula de referência suja ( $G_{DC}$ ) e limpa ( $G_{CC}$ ). . . . .	28
Figura 15 – Exemplo de fotografia obtida por inspeção visual de um módulo FV com delaminação. . . . .	30
Figura 16 – Exemplo de fotografia obtida por inspeção visual de um módulo com vidro quebrado. . . . .	30
Figura 17 – Curva IV e os principais causadores de perdas. . . . .	34
Figura 18 – Exemplo de utilização da regressão linear simples como técnica de manutenção preventiva em sistema FV. . . . .	35
Figura 19 – Circuito equivalente: modelo de cinco parâmetros. . . . .	36
Figura 20 – Fluxograma apresentando os passos para a realização da inspeção completa de um sistema FV. . . . .	38
Figura 21 – Sistema FV instalado no IFMG - <i>Campus</i> Formiga. . . . .	43
Figura 22 – Curvas de irradiação solar do sistema FV do IFMG <i>Campus</i> Formiga. . . . .	45
Figura 23 – Energia gerada e irradiação solar SunData do sistema FV do IFMG <i>Campus</i> Formiga. . . . .	46
Figura 24 – Energia gerada e irradiação solar <i>POWER Data Access Viewer</i> do sistema FV do IFMG <i>Campus</i> Formiga. . . . .	46
Figura 25 – Sistema FV residencial 1 instalado na cidade de Formiga-MG. . . . .	48
Figura 26 – Diagrama unifilar do sistema FV residencial 1 instalado na cidade de Formiga-MG com potência nominal de 3,3 kWp parte 1. . . . .	49
Figura 27 – Diagrama unifilar do sistema FV residencial 1 instalado na cidade de Formiga-MG com potência nominal de 3,3 kWp parte 2. . . . .	49

Figura 28 – Tensão de entrada no inversor do sistema FV residencial 1 em um dia de baixa irradiação solar. . . . .	50
Figura 29 – Potência do sistema FV residencial 1 em um dia de baixa irradiação solar.	51
Figura 30 – Tensão de entrada no inversor do sistema FV residencial 1 em um dia de alta irradiação solar. . . . .	51
Figura 31 – Potência do sistema FV residencial 1 em um dia de alta irradiação solar.	52
Figura 32 – Curvas de irradiação solar do sistema FV residencial 1. . . . .	54
Figura 33 – Energia gerada e irradiação solar SunData do sistema FV residencial 1.	55
Figura 34 – Energia gerada e irradiação solar <i>POWER Data Access Viewer</i> do sistema FV residencial 1. . . . .	55
Figura 35 – Módulo com célula superaquecida com temperatura próxima de 58°C. .	57
Figura 36 – Módulo com célula superaquecida com temperatura próxima de 42°C. .	57
Figura 37 – Módulo com acúmulo de sujeira. . . . .	58
Figura 38 – Módulo com sombreamento parcial. . . . .	58
Figura 39 – Resumo das falhas detectadas com a realização da inspeção termográfica no sistema FV residencial 1. . . . .	59
Figura 40 – Curvas de irradiação solar do sistema FV residencial 2. . . . .	62
Figura 41 – Energia gerada e irradiação solar SunData do sistema FV residencial 2.	63
Figura 42 – Energia gerada e irradiação solar <i>POWER Data Access Viewer</i> do sistema FV residencial 2. . . . .	63
Figura 43 – Curvas de irradiação Solar do sistema FV residencial 3. . . . .	66
Figura 44 – Energia gerada e irradiação solar SunData do sistema FV residencial 3.	67
Figura 45 – Energia gerada e irradiação solar <i>POWER Data Access Viewer</i> do sistema FV residencial 3. . . . .	67

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Termografia de falhas comuns em sistemas FV. . . . .	32
Tabela 2 – Imagens de luminescência de falhas comuns em sistemas FV. . . . .	33
Tabela 3 – Coeficientes de correlação e sua interpretação para sistemas FV. . . . .	40
Tabela 4 – Especificações técnicas do painel solar Canadian CS6K - 260P. . . . .	42
Tabela 5 – Especificações técnicas do inversor Sunny Tripower 25 kW. . . . .	42
Tabela 6 – Dados de energia gerada pelo sistema FV do IFMG <i>Campus</i> Formiga. . . . .	43
Tabela 7 – Dados de irradiação solar SunData do sistema FV do IFMG <i>Campus</i> Formiga. . . . .	44
Tabela 8 – Dados de irradiação solar <i>POWER Data Access Viewer</i> do sistema FV do IFMG <i>Campus</i> Formiga. . . . .	44
Tabela 9 – Coeficientes de correlação do sistema FV do IFMG campus Formiga. . . . .	47
Tabela 10 – Especificações técnicas do painel solar Risen Solar 330 Wp. . . . .	48
Tabela 11 – Especificações técnicas do inversor BB SF3KTN. . . . .	48
Tabela 12 – Dados de energia gerada pelo sistema FV residencial 1 no ano de 2019. . . . .	50
Tabela 13 – Dados de irradiação solar SunData no ano de 2019 para o sistema FV residencial 1. . . . .	53
Tabela 14 – Dados de irradiação solar <i>POWER Data Access Viewer</i> 2019 no ano de 2019 para o sistema FV residencial 1. . . . .	53
Tabela 15 – Coeficientes de correlação do sistema FV residencial 1 da cidade de Formiga-MG. . . . .	56
Tabela 16 – Especificações técnicas câmera IR Flir I5. . . . .	56
Tabela 17 – Falhas observadas com a inspeção termográfica passiva no sistema FV residencial 1. . . . .	59
Tabela 18 – Especificações técnicas do painel solar Risen Solar 330 Wp. . . . .	60
Tabela 19 – Especificações técnicas do inversor RENO-4K-PLUS. . . . .	60
Tabela 20 – Dados de energia gerada pelo sistema FV residencial 2 no ano de 2019. . . . .	60
Tabela 21 – Dados de irradiação solar SunData no ano de 2019 para o sistema FV residencial 2. . . . .	61
Tabela 22 – Dados de irradiação solar <i>POWER Data Access Viewer</i> no ano de 2019 para o sistema FV residencial 2. . . . .	61
Tabela 23 – Coeficientes de correlação do sistema FV residencial 2 na cidade de Formiga-MG. . . . .	64
Tabela 24 – Especificações técnicas do painel solar Risen Solar 330 Wp. . . . .	64
Tabela 25 – Especificações técnicas do inversor RENO-4K-PLUS. . . . .	65
Tabela 26 – Dados de energia gerada pelo sistema FV residencial 3 no ano de 2019. . . . .	65
Tabela 27 – Dados de irradiação solar SunData do sistema FV residencial 3. . . . .	65

Tabela 28 – Dados de irradiação solar <i>POWER Data Access Viewer</i> 2019 do sistema FV residencial 3. . . . .	66
Tabela 29 – Coeficientes de correlação do sistema FV residencial 3 na cidade de Formiga-MG. . . . .	68

# Lista de abreviaturas e siglas

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CICE	Comissão Interna de Conservação de Energia
EVA	Acetado de vinilo e etileno
FF	<i>Fill Factor</i> (Fator de preenchimento)
FV	Fotovoltaico
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IFMG	Instituto Federal de Minas Gerais
$I_L$	Foto-corrente
$I_{mp}$	Corrente de máxima potência
$I_{OD}$	Corrente de saturação reversa do diodo
$I_{sc}$	Corrente de curto-circuito
MPP	<i>Maximum Power Point</i> (Ponto de máxima potência)
PID	<i>Potential induced degradation</i> (Degradação do potencial induzido)
$P_{max}$	Potência máxima
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i> (Modulação por largura de pulso)
$R_s$	Resistor série
$R_{sh}$	Resistor <i>shunt</i>
TE	Tarifa de Energia
$V_{mp}$	Tensão de máxima potência
$V_{oc}$	Tensão de circuito aberto

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b>	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Organização do documento</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Componentes básicos de sistemas FV</b>	<b>19</b>
2.1.1	Módulos FV	19
2.1.2	Inversor de frequência	20
2.1.3	Baterias	21
2.1.4	Controlador de carga	22
<b>2.2</b>	<b>Falhas em sistemas FV</b>	<b>23</b>
2.2.1	Descoloração	23
2.2.2	Delaminação	23
2.2.3	Quebra do vidro	24
2.2.4	Trilhas de caracol	24
2.2.5	Rachaduras celulares	24
2.2.6	Diodo de <i>bypass</i> defeituoso	26
2.2.7	Sombreamento	26
2.2.8	Degradação do potencial induzido (PID)	28
2.2.9	Acúmulo de sujeira	28
<b>2.3</b>	<b>Métodos de diagnóstico de falhas em sistemas FV</b>	<b>29</b>
2.3.1	Inspeção Visual	29
2.3.2	Inspeção termográfica	30
2.3.2.1	<i>Lock-in</i> termografia	31
2.3.2.2	Termografia por pulso	31
2.3.2.3	Termografia passiva	31
2.3.3	Inspeção por eletroluminescência ou fotoluminescência	32
2.3.4	Análise de desempenho pela curva I-V	34
2.3.5	Análise de desempenho utilizando regressão linear	34
2.3.6	Simulação de módulos FV e energia gerada utilizando o modelo de cinco parâmetros	35
<b>3</b>	<b>MÉTODO PROPOSTO</b>	<b>37</b>
<b>3.1</b>	<b>Obtenção de dados</b>	<b>39</b>
<b>3.2</b>	<b>Coeficiente de correlação</b>	<b>39</b>
<b>3.3</b>	<b>Termografia passiva</b>	<b>40</b>

<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>42</b>
<b>4.1</b>	<b>Resultados obtidos com a aplicação do método no sistema FV do IFMG - <i>Campus</i> Formiga</b>	<b>42</b>
4.1.1	Obtenção dos dados	43
4.1.2	Coeficiente de correlação	45
<b>4.2</b>	<b>Resultados obtidos com a aplicação do método no sistema FV residencial 1 na cidade de Formiga-MG</b>	<b>47</b>
4.2.1	Obtenção dos dados	50
4.2.2	Coeficiente de correlação	54
4.2.3	Inspeção termográfica	56
<b>4.3</b>	<b>Resultados obtidos com a aplicação do método no sistema FV residencial 2 na cidade de Formiga-MG</b>	<b>59</b>
4.3.1	Obtenção dos dados	60
4.3.2	Coeficiente de correlação	62
<b>4.4</b>	<b>Resultados obtidos com a aplicação do método no sistema FV residencial 3 na cidade de Formiga-MG</b>	<b>64</b>
4.4.1	Obtenção dos dados	65
4.4.2	Coeficiente de correlação	66
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>69</b>
<b>5.1</b>	<b>Trabalhos Futuros</b>	<b>69</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>71</b>

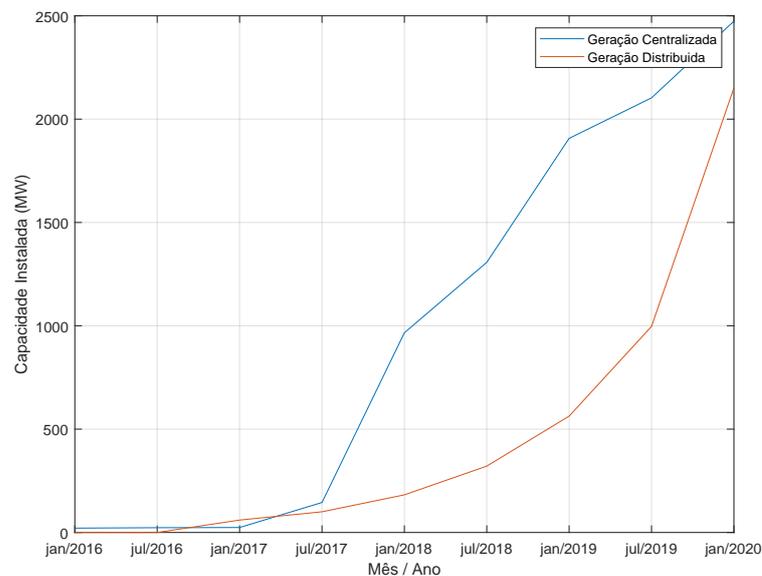
# 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a energia solar fotovoltaica (FV) é a forma de geração de energia que mais cresce no Brasil. O aumento progressivo na utilização desta fonte de energia foi proporcionado inicialmente por uma diminuição de 43 % do custo de painéis solares desde a regulamentação da resolução 482/2012 pela ANEEL e hoje a energia solar FV é a mais utilizada em sistemas de geração distribuída, onde é responsável por 98 % das conexões (ANEEL, 2019).

Em Janeiro de 2020, com o aumento da utilização da energia FV o Brasil possuía uma potência instalada de 2.474 MW em centrais geradoras e 2.151 MW em sistemas de micro e mini geração solar FV, o que representou um crescimento de 87,24 % em relação ao mesmo período do ano anterior, onde os valores eram 1.907 MW e 563 MW respectivamente (ENERGIA, 2020).

A Figura 1 apresenta a potência instalada de sistemas FV no Brasil desde janeiro de 2016 a janeiro de 2020, separados em geração centralizada que representam as grandes usinas geradoras, onde são necessárias linhas de transmissão e distribuição para se chegar ao consumidor final e geração distribuída que representam os sistemas de geração FV construídos próximos aos consumidores finais, segundo dados dos Boletins Mensais de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro do Ministério de Minas e Energia para ilustrar o crescimento da utilização desta fonte de energia (ENERGIA, 2020).

Figura 1 – Crescimento da energia solar FV no Brasil.



Fonte – Figura baseada em (ENERGIA, 2020).

Em 2019 realizou-se uma consulta pública para alteração das regras de geração distribuída, pois, os proprietários de sistemas de mini e micro geração distribuída pagavam para utilizar a rede das concessionárias uma taxa denominada custo de rede. Porém, a nova resolução prevê que sistemas instalados a partir de 2020 paguem além do custo de rede, alguns encargos, denominados como Tarifa de Energia (TE). Além disso, a nova resolução também prevê que os usuários que já possuíam sistemas de geração distribuída instalados antes da mudança tarifária continuem a pagar as tarifas da forma anterior até o ano de 2030 (ANEEL, 2019).

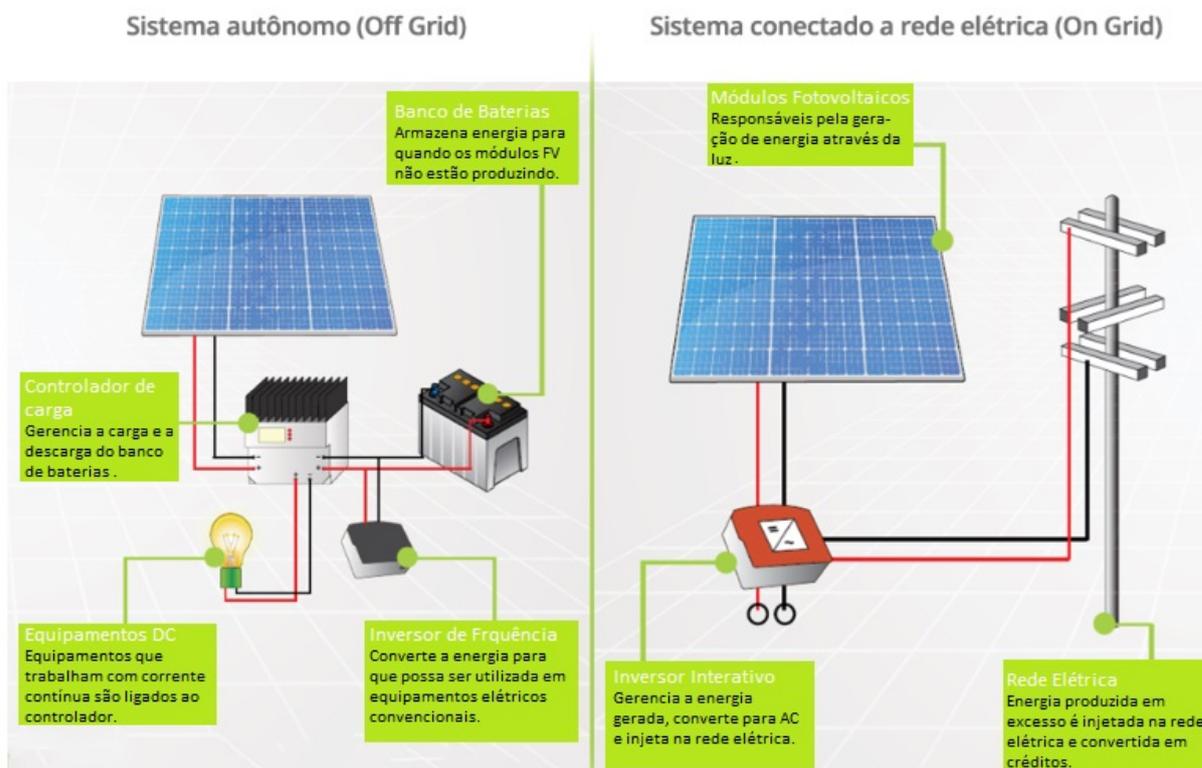
Os equipamentos utilizados em sistemas FV variam de acordo com o tipo de sistema a ser instalado. O sistema pode ser conectado a rede (*on-grid*), acoplado de forma paralela a rede. Atuar de forma isolada, sem conexão com a rede elétrica da concessionária (*off-grid*). Pode-se também utilizar um sistema híbrido, fixado em paralelo a rede e em caso de falha na rede elétrica ele passa a operar de forma isolada, o que gera maior confiabilidade no fornecimento de energia.

O sistema *on-grid* é composto por módulos FV e inversores de frequência específicos para este tipo de aplicação, a configuração *off-grid*, além da utilização de módulos FV e inversores de frequência é necessária a utilização de baterias e controladores de carga para armazenamento de energia e consumo em períodos onde não há incidência de raios solares (PINHO; GALDINO, 2014). Já o sistema híbrido é composto pelos mesmos componentes do sistema isolado, porém com um inversor de frequência específico para este tipo de aplicação, onde a energia do banco de baterias é utilizada apenas se houverem problemas na rede elétrica conectada ao inversor de frequência e ele se desconecte da mesma. A Figura 2 apresenta os sistemas *on-grid* e *off-grid* e seus equipamentos.

Os sistemas FV estão sujeitos a diversos tipos de falhas, como por exemplo: módulos FV em circuito aberto, sujeira ou degradação dos módulos, sombreamento parcial, células defeituosas, entre outros (MADUKANYA et al., 2018).

Ressalta-se que a maioria das falhas não causam a interrupção do funcionamento dos sistemas de forma imediata, desta forma, a proposta do trabalho é apresentar uma metodologia de análise de desempenho e inspeção de falhas e utilizá-la em quatro sistemas FV localizados na cidade de Formiga-MG, o primeiro localizado no Instituto federal de Minas Gerais (IFMG) *Campus* Formiga e os demais instalados em residências. Para isso, são utilizadas ferramentas matemáticas e técnicas de inspeção de sistemas FV para apontar possíveis problemas, pois, falhas nos sistemas FV além de comprometer o funcionamento do sistema, diminuem a vida útil de seus componentes.

Figura 2 – Tipos de sistemas FV e seus equipamentos.



Fonte – Figura extraída de (FONTE, 2019).

## 1.1 Justificativa

As falhas em sistemas FV não causam interrupções de forma imediata no mesmo, desta forma, perdas na energia gerada podem representar também a diminuição da vida útil do sistema FV.

Sendo assim, uma das principais causas de perda de eficiência energética é a variação de temperatura dos módulos FV, pois, quanto maior a temperatura das células FV, menor é a eficiência da conversão de energia, além disso, o sombreamento de células FV é outra grande causa de perdas energéticas e a minimização desses fatores ocasiona um melhor aproveitamento do sistema FV (DUBEY; SARVAIYA; SESHADRI, 2013).

O IFMG *Campus* Formiga possui uma Comissão Interna de Conservação de Energia (CICE), visando evitar desperdícios de energia e propor melhorias para o setor energético da instituição. Deste modo, manutenções periódicas no sistema de geração FV realizadas de forma correta podem otimizar o sistema de geração, manter o sistema operando com maior eficiência, garantir uma maior geração energética e uma melhor utilização do sistema solar FV.

Objetivando uma maior eficiência dos sistemas, um método de diagnóstico de falhas pode auxiliar na correção e detecção de falhas, baseado na energia gerada pelo sistema em função da irradiação solar incidente, além de apontar os locais e tipos de problemas

existentes.

## 1.2 Organização do documento

Esta monografia é dividida em 5 capítulos. No Capítulo 1 é apresentado uma introdução sobre a energia FV no Brasil, equipamentos e tipos de falhas de sistemas FV. No Capítulo 2 é mostrado a revisão bibliográfica sobre equipamentos, tipos de falhas e técnicas de diagnósticos de falhas em sistemas FV. No Capítulo 3 é proposto um método para diagnósticos de falhas. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do método. Por fim, no Capítulo 5 é apresentada a conclusão do trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Componentes básicos de sistemas FV

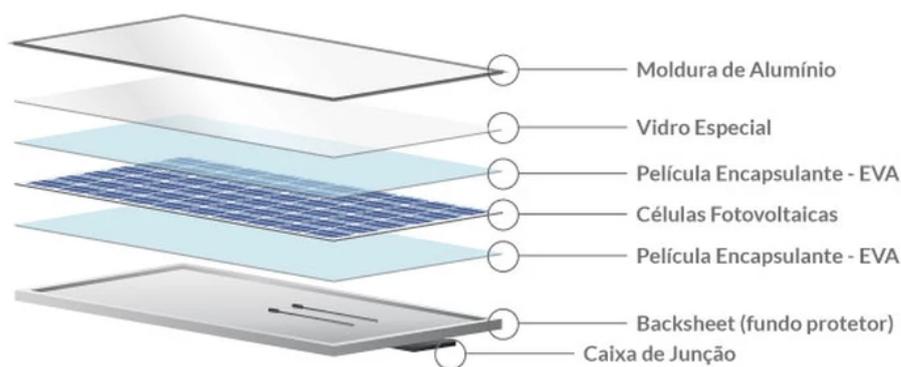
Os sistemas FV são compostos por diversos componentes. A seguir são apresentados os principais equipamentos que compõem um sistema FV.

#### 2.1.1 Módulos FV

Os módulos FV são compostos por diversas células FV que são responsáveis pela conversão da energia solar em energia elétrica por meio do efeito FV. Elas são constituídas de materiais semicondutores obtidos através da dopagem do silício, como o silício monocristalino (m-Si) e o policristalino (p-Si) ou filmes finos. Os valores de tensão e corrente gerados por uma célula são muito baixos, por esse motivo várias células são conectadas em série e paralelo para chegar aos valores de corrente e tensão de saída desejados (COOPER; JUNIOR, 2013).

O painel solar também possui uma estrutura rígida para proteção das células, cabos para realização de conexões e uma estrutura para fixação. A Figura 3 apresenta composição de um módulo FV típico (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Figura 3 – Composição de um módulo FV.

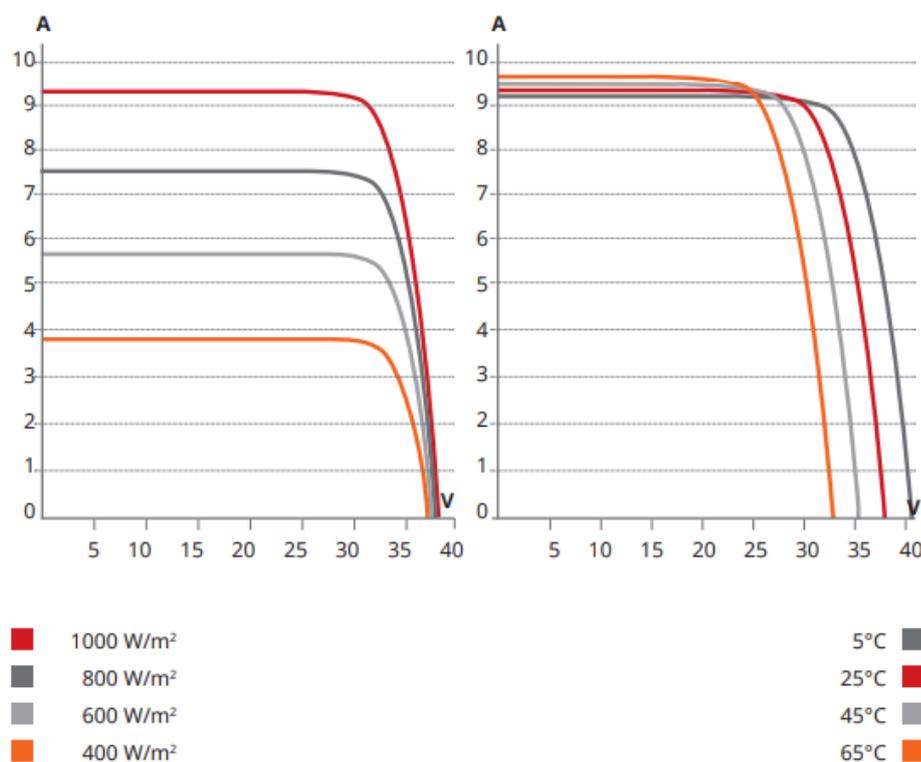


Fonte – Figura extraída de (SOLAR, 2019c).

Quando conectado a uma carga ele não se comporta como uma fonte convencional, seus valores de tensão e corrente variam de acordo com a carga, ou seja, se a carga demandar de uma alta corrente a tensão de saída do módulo será menor que a nominal de operação e vice-versa (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Além disso, os valores de tensão e

corrente geradas variam em função da irradiação incidente e temperatura de operação. A Figura 4 apresenta os valores de tensão e corrente geradas em função da temperatura e irradiação do módulo FV CS6K-270P da fabricante Canadian Solar (SOLAR, 2017).

Figura 4 – Curvas I-V.

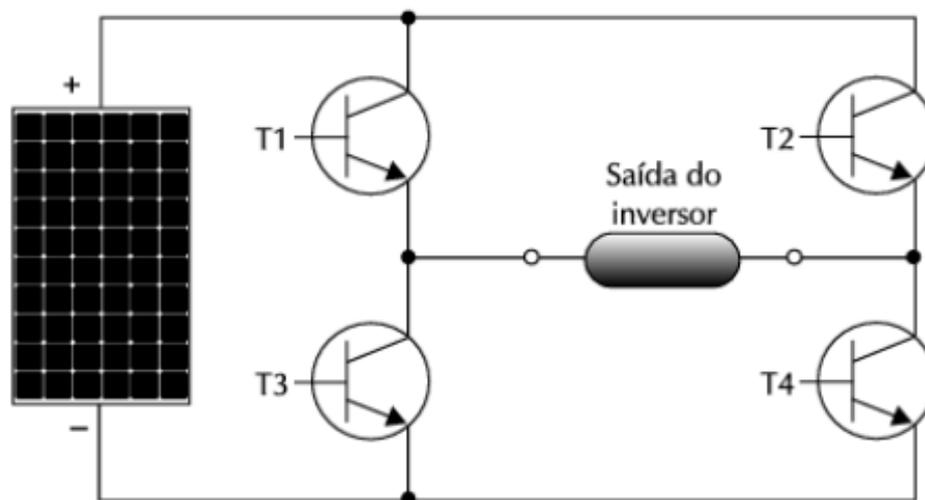


Fonte – Figura extraída de (SOLAR, 2017).

### 2.1.2 Inversor de frequência

O inversor de frequência é um dispositivo eletrônico que realiza a conversão da energia gerada pelo sistema FV em corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) para consumo em caso de sistemas isolados ou conexão a rede elétrica da concessionária. Ele realiza a conversão da energia para ondas senoidais com frequência de 50 Hz ou 60 Hz de acordo com a rede local. Quando conectados a rede de energia devem operar em sincronia com a rede elétrica, logo, utilizam a energia da rede elétrica como uma referência e em caso de falha na rede elétrica o inversor também interrompe seu funcionamento (PINHO; GALDINO, 2014). Há também o inversor interativo a rede, para garantir maior confiabilidade na disponibilidade de energia elétrica, atuando de forma paralela a rede e em caso de interrupção no fornecimento de energia operando de forma isolada, utilizado em sistemas híbridos ou em cargas de emergência que não podem ter seu fornecimento de energia interrompido (VILLALVA; GAZOLI, 2012). A Figura 5 apresenta um exemplo de circuito eletrônico básico de inversores de frequência.

Figura 5 – Circuito eletrônico básico de um inversor CC-CA.



Fonte – Figura extraída de (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

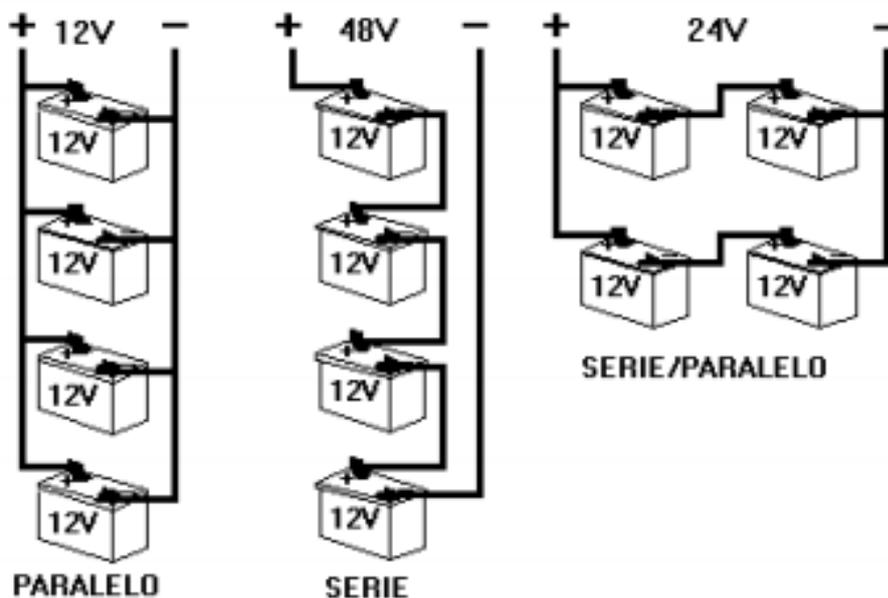
Os tipos de inversores disponíveis são, os de onda quadrada que possuem sinais de saída como ondas quadradas, os inversores de onda senoidal modificada com sinal de saída sendo uma onda semi-quadrada e também o inversor *Pulse-Width Modulation* (Modulação por largura de pulso (PWM)) que gera na sua saída uma onda senoidal (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

### 2.1.3 Baterias

As baterias são utilizadas em sistemas FV isolados para armazenamento de parte da energia gerada durante o dia, para que nos períodos onde não há geração o fornecimento não seja interrompido (PINHO; GALDINO, 2014). Elas também podem ser usadas em sistemas conectados a rede para estabilizar a tensão gerada pelos módulos FV que chega ao inversor (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Em sistemas de geração distribuída são formados bancos de baterias, com a utilização de baterias conectadas em série ou paralelo para aumentar a quantidade de energia armazenada. Os tipos de bateria mais aplicadas são as de Chumbo-ácido (Pb-ácido), Níquel-Cádmio (NiCd), Níquel-hidreto metálico (NiMH) e íon de Lítio (PINHO; GALDINO, 2014). A Figura 6 apresenta as formas de associação de baterias.

Figura 6 – Associação de baterias em série e paralelo.



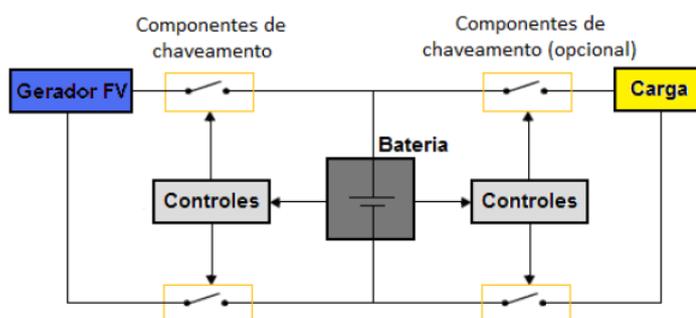
Fonte – Figura extraída de (PEREIRA, 2016).

#### 2.1.4 Controlador de carga

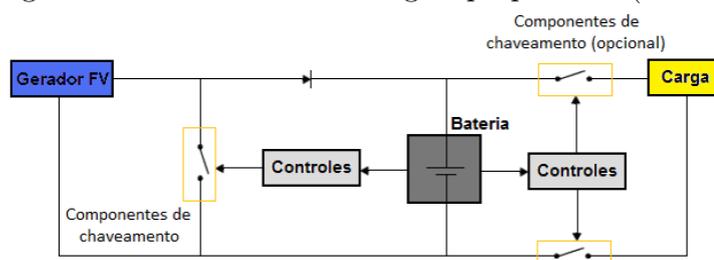
Os controladores de carga são utilizados em sistemas não conectados a rede elétrica (*off-grid*), eles possuem a função de controlar a carga das baterias do sistema, de forma que as baterias não carreguem em excesso nos períodos onde a irradiação solar é alta e evitar que nos períodos de descarga elas cheguem a se descarregar completamente aumentando sua vida útil (BRAGA, 2008).

Os controladores de carga são classificados de acordo com a forma de desconexão entre os módulos FV e a bateria, sendo assim, existem dois tipos: série e paralelo (*shunt*) (PINHO; GALDINO, 2014). As Figuras 7 e 8 apresentam os circuitos equivalentes destes dois tipos de controladores de carga.

Figura 7 – Controlador de carga tipo série.



Fonte – Figura extraída de (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 8 – Controlador de carga tipo paralelo (*shunt*).

Fonte – Figura extraída de (PINHO; GALDINO, 2014).

## 2.2 Falhas em sistemas FV

Sistemas FV estão sujeitos a diversos tipos de falhas, posto isto, algumas delas interferem diretamente na energia gerada. Nesta seção são apresentadas falhas comuns em sistemas FV: descoloração, delaminação, quebra do vidro, trilhas de caracol, rachaduras celulares, defeito nos diodos de *bypass*, sombreamento, degradação do potencial induzido (PID) e acúmulo de sujeira.

### 2.2.1 Descoloração

A descoloração do material de encapsulamento (EVA) ocorre de forma natural em módulos FV a uma taxa de 0,5% ao ano, porém, a descoloração está mais relacionada a beleza dos sistema que propriamente a falhas no sistema (KURTZ et al., 2014).

Sua detecção é feita através da inspeção visual e sua presença não apresenta riscos de segurança ao sistema (MADUKANYA et al., 2018). Os casos mais graves de descoloração estão relacionados a perda de coloração de apenas algumas células FV no módulo, pois, esta descoloração ocorre devido a outras falhas no sistema FV (KURTZ et al., 2014).

### 2.2.2 Delaminação

A delaminação ocorre devido a contaminação (por exemplo: limpeza realizada de forma incorreta) ou fatores ambientais. Ela é caracterizada pelo descolamento entre as camadas do vidro, película encapsulante de EVA (acetato de vinilo e etileno) e as células FV (KURTZ et al., 2014).

As principais consequências deste tipo de falha são perdas de potência devido a reflexão de parte da irradiação solar e corrosão devido a entrada de umidade (MADUKANYA et al., 2018). Sua detecção pode ser realizada através de uma inspeção visual ou métodos mais complexos como termografia utilizando Raio-X para detecção de delaminações menos visíveis (KURTZ et al., 2014). A Figura 9 apresenta um módulo FV com delaminação.

Figura 9 – Módulo FV com delaminação



Fonte – Figura extraída de (MUNOZ et al., 2011).

### 2.2.3 Quebra do vidro

A quebra do vidro pode ser causada por uma elevada tensão aplicada ao módulo FV ou pelo impacto de objetos com o mesmo, as consequências são a diminuição da energia gerada caso alguma célula FV seja danificada e corrosão devido a entrada de umidade (KURTZ et al., 2014). A detecção deste tipo de falha é realizada através da inspeção visual ou análise por imagem termográfica devido a formação de pontos quentes no sistema (MADUKANYA et al., 2018).

### 2.2.4 Trilhas de caracol

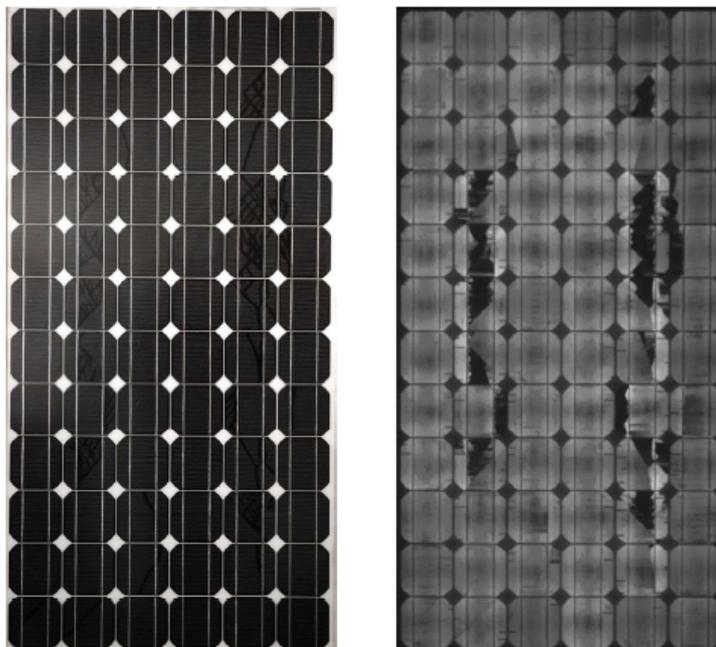
As trilhas de caracol são formadas em módulos FV devido a metalização das pastas de prata que compõem a parte frontal das placas, o que ocorre em rachaduras celulares. Elas podem ser detectadas por uma inspeção visual, porém não se sabe qual a verdadeira causa desta falha, acredita-se que a radiação ultravioleta e altas temperaturas de operação estão diretamente relacionadas ao aparecimento de trilhas de caracol (MADUKANYA et al., 2018).

Seu surgimento ocorre no período de 3 meses e 1 ano após sua instalação, porém, deve ocorrer de forma lenta. As principais consequências das trilhas de caracol são a elevação das correntes de fuga e a perda de potência nos módulos FV (KURTZ et al., 2014). A Figura 10 apresenta um módulo FV com trilhas de caracol visíveis.

### 2.2.5 Rachaduras celulares

As rachaduras celulares ocorrem devido a manipulação dos módulos FV, como transporte, instalação, assim como a tensão aplicada aos painéis após sua instalação. A

Figura 10 – Módulo FV com trilhas de caracol.

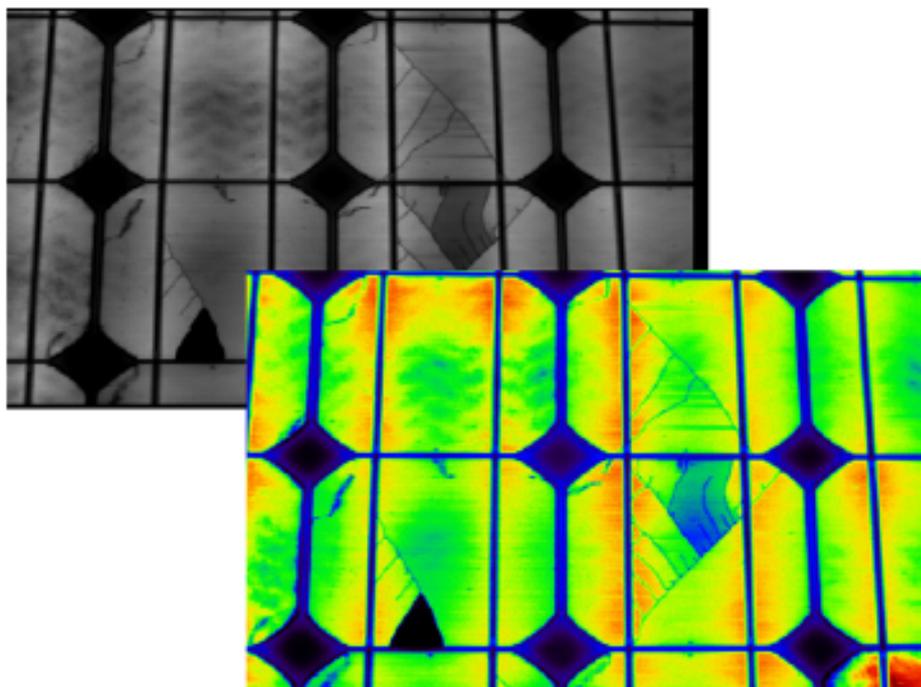


Fonte – Figura extraída de (KURTZ et al., 2014).

melhoria da tecnologia utilizada na fabricação das células FV faz com que elas fiquem cada vez mais frágeis e sujeitas a rachaduras (MUNOZ et al., 2011).

A detecção das rachaduras celulares é realizada através dos testes de eletroluminescência ou fotoluminescência, é possível observá-las visualmente caso haja uma mudança de coloração na célula (MUNOZ et al., 2011). Seus efeitos variam de acordo com a espessura da rachadura, algumas rachaduras já são esperadas após sua fabricação e não causam nenhum efeito no funcionamento da célula FV, porém, rachaduras mais largas podem fazer com que a célula não conduza corrente elétrica (KURTZ et al., 2014). A Figura 11 apresenta rachaduras celulares detectadas em módulos FV.

Figura 11 – Rachaduras em células FV.



Fonte – Figura extraída de (MUNOZ et al., 2011).

### 2.2.6 Diodo de *bypass* defeituoso

Os diodos de *bypass* possuem a função de evitar a polarização inversa de células FV em casos de sombreamento, evitar a circulação de correntes inversas e diminuir as perdas de potência. A falha destes diodos ocasionam perdas de potência mais elevadas devido a presença de sombreamento e aumento da temperatura de operação nas células FV sombreadas, o que gera pontos quentes e posteriormente queimaduras visíveis em módulos FV (KURTZ et al., 2014).

### 2.2.7 Sombreamento

O sombreamento sobre sistemas de geração de energia FV ocorre devido interrupção de parte da irradiação solar incidente no sistema causadas principalmente pela presença de obstáculos próximos. Suas consequências são a perda de potência elétrica e surgimento de pontos quentes nos módulos FV (MADUKANYA et al., 2018).

A presença de sombreamento pode ser observada pela inspeção visual ou detectada pela inspeção utilizando imagem termográfica e análise de Curva I-V (MADUKANYA et al., 2018). A Figura 12 apresenta um exemplo de sistema FV onde há sombreamento parcial das placas solares.

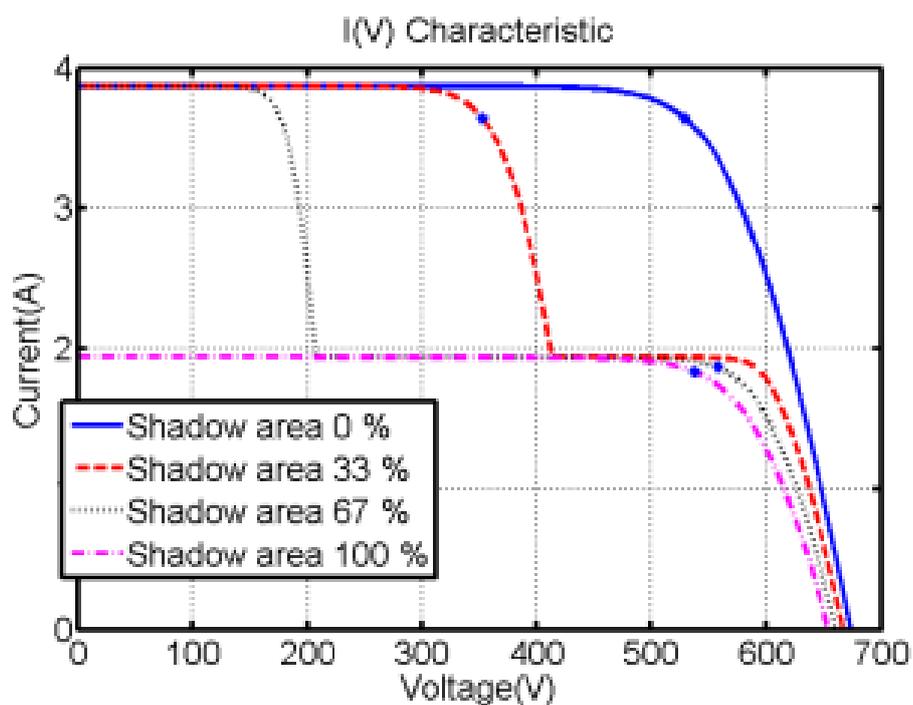
Figura 12 – Exemplo de sombreamento em sistemas FV.



Fonte – Figura extraída de (SOUZA, 2019).

Para ilustrar os efeitos desta falha sobre sistemas FV a Figura 13 apresenta as consequências do sombreamento parcial na curva I-V de um módulo Fv.

Figura 13 – Curva I-V de um módulo com sombreamento parcial.



Fonte – Figura extraída de (SPATARU; KEREKES; SERA, 2012).

### 2.2.8 Degradação do potencial induzido (PID)

A degradação do potencial induzido é uma falha descoberta recentemente em sistemas FV e ainda não é bem compreendida, ela causa uma degradação excessiva nos módulos FV e afeta sua potência de saída (TSANAKAS; HA; BUERHOP, 2016).

Segundo (KURTZ et al., 2014) o PID é uma polarização reversível que ocorre no potencial negativo nas células tipo p e no potencial positivo nas células tipo n que causa uma diminuição na tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito, afetando diretamente a curva I-V do sistema, logo, diminui a potência do módulo. Este tipo de falha é difícil de ser diagnosticada, mas pode ser detectada pela análise da Curva I-V e por termografia infravermelha (MADUKANYA et al., 2018).

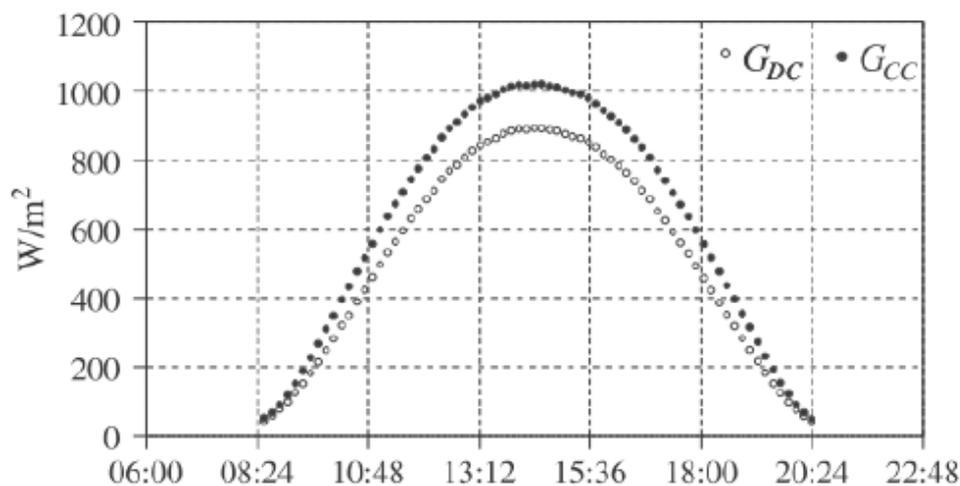
### 2.2.9 Acúmulo de sujeira

A sujeira em módulos FV é um dos principais fatores causadores de perdas, estudos apontam perdas na faixa de 3% a 6% por ano, até 20% por mês e em alguns casos 30% durante curtos períodos (HICKEL et al., 2016).

Painéis FV instalados com inclinação superior a 5° em locais com chuvas frequentes são limpos constantemente pelas chuvas, porém, quando instalados em locais com poucas chuvas e muito material particulado na atmosfera ocorre um acúmulo de poeira sobre os módulos (NASCIMENTO, 2013).

O acúmulo de sujeira uniforme (sujeira está presente em toda a superfície do módulo FV) causa atenuação da irradiação solar incidente nas células FV como pode ser observado na Figura 14, e conseqüentemente uma diminuição na energia gerada (ZORRILLA-CASANOVA et al., 2012).

Figura 14 – Irradiância solar – célula de referência suja ( $G_{DC}$ ) e limpa ( $G_{CC}$ ).



Fonte – Figura extraída de (ZORRILLA-CASANOVA et al., 2012).

A sujeira não-uniforme (sujeira está presente em parte do módulo FV) causa atenuação na irradiação incidente nas células FV apenas da área com acúmulo de sujeira, logo, os problemas ocasionados são idênticos aos de um sombreamento parcial e recomenda-se a limpeza imediata (HICKEL et al., 2016).

## 2.3 Métodos de diagnóstico de falhas em sistemas FV

Na seção anterior foram apresentados alguns tipos de falhas comuns em sistemas FV, citados alguns métodos para diagnósticos e algumas normatizações importantes para realização de inspeções em sistemas FV. Nesta seção são apresentados alguns dos métodos de diagnósticos de falhas em sistemas FV: inspeção visual, termográfica, eletroluminescência, fotoluminescência, análise de Curva I-V e regressão linear.

### 2.3.1 Inspeção Visual

A inspeção visual é realizada através da observação do sistema realizando visitas a ele, com atenção para observar todos os danos visíveis a olho nu e identificá-los. Atualmente é uma forma de inspeção realizada por humanos, porém, Drones estão sendo testados para serem utilizados nesta metodologia, aumentando a velocidade de análise de sistemas (MADUKANYA et al., 2018).

Esta técnica de inspeção permite a observação de diversas falhas como bolhas, delaminação, rachaduras nas células, sombreamento, oxidação e quebras de vidro (KURTZ et al., 2014). Os defeitos encontrados devem ser registrados por fotografias, com a utilização de uma câmera com alta resolução, uma iluminação mínima de 1000 lux e diversos ângulos diferentes para garantir que as imagens não sofram influência de reflexos, de acordo com a norma internacional IEC 61215 (MUNOZ et al., 2011). As Figuras 15 e 16 apresentam fotografias obtidas através de uma inspeção visual em sistemas FV.

Figura 15 – Exemplo de fotografia obtida por inspeção visual de um módulo FV com delaminação.



Fonte – Figura extraída de (KURTZ et al., 2014).

Figura 16 – Exemplo de fotografia obtida por inspeção visual de um módulo com vidro quebrado.



Fonte – Figura extraída de (KURTZ et al., 2014).

### 2.3.2 Inspeção termográfica

A inspeção por termografia infravermelha pode ser realizada através de três técnicas de análise: *Lock-in* termografia, termografia por pulso e termografia passiva. Porém, a última metodologia citada é mais utilizada por ser realizada com o sistema em funcionamento (MADUKANYA et al., 2018).

### 2.3.2.1 *Lock-in* termografia

A *Lock-in* termografia pode ser realizada em um ambiente escuro ou em ambiente iluminado. O que varia para os dois ambientes é a fonte de excitação, em ambientes escuros a excitação é feita a partir de uma fonte de luz e em ambientes iluminados a excitação é realizada através de uma fonte de tensão ou corrente, em ambos os casos a uma frequência de 3 Hz a 1 kHz (MADUKANYA et al., 2018).

Durante o período de excitação imagens térmicas são capturadas de forma sincronizada a frequência de oscilação, com câmeras infravermelhas no intervalo espectral de  $2 \mu\text{m}$  a  $5 \mu\text{m}$ , assim são observadas falhas em módulos FV de acordo com suas características térmicas. Com esta metodologia de ensaio pequenas variações de temperatura podem ser detectadas (KURTZ et al., 2014).

### 2.3.2.2 Termografia por pulso

A termografia por pulso é baseada no aquecimento do módulo FV com uma fonte de calor externa por um curto período de tempo, porém, com uma intensidade capaz de variar a temperatura do módulo entre 1 K a 5 K de forma homogênea (KURTZ et al., 2014).

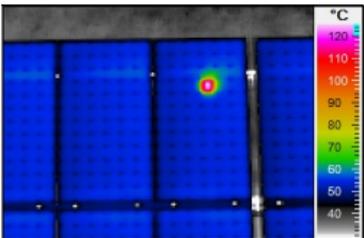
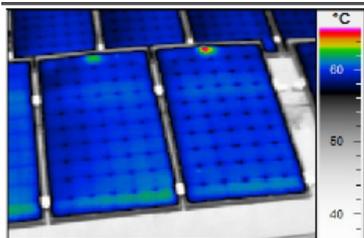
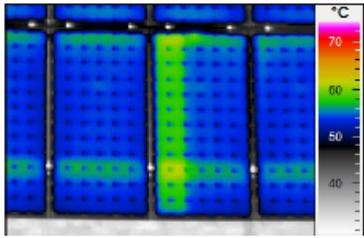
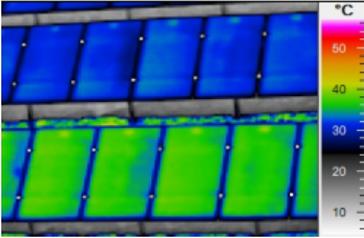
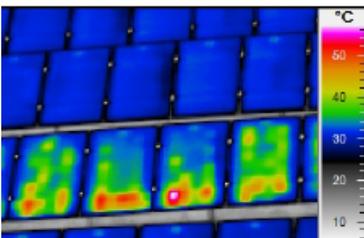
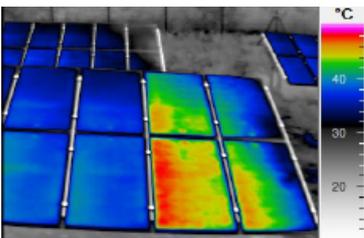
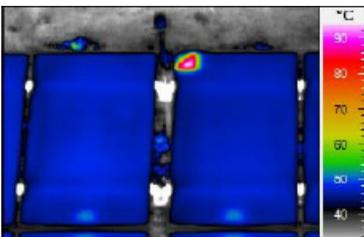
A câmera termográfica utilizada no processo deve possuir uma alta velocidade de captura para obter imagens precisas da distribuição de temperatura durante o tempo de atuação da fonte de calor externo e as imagens térmicas devem ser capturadas pela parte de trás dos módulos FV. Com a utilização deste método podem ser encontradas falhas em ligações elétricas entre células ou degradação (MADUKANYA et al., 2018).

### 2.3.2.3 Termografia passiva

A inspeção por termografia passiva é uma técnica realizada com o sistema FV em funcionamento, onde são medidas as temperaturas de operação dos módulos FV com a utilização de uma câmera termográfica em tempo real (KURTZ et al., 2014). Este método de análise é baseado na radiação eletromagnética emitida pelos materiais, que possuem um comprimento de onda diretamente relacionada com a temperatura do material (MUNOZ et al., 2011).

As falhas podem ser observadas como pontos quentes nos módulos FV, ou seja, a distribuição não-homogênea de temperatura é um indicativo de falha e de acordo com o padrão térmico observado pode ser especificado o tipo de defeito no mesmo (MADUKANYA et al., 2018). Os padrões térmicos correspondentes a cada falha estão descritos na norma IEC 62446-3:2017 (COMMISSION, 2017). Os padrões térmicos correspondentes a falhas comuns em sistemas FV são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Termografia de falhas comuns em sistemas FV.

Termografia	Tipo de Falha	Termografia	Tipo de Falha
	Célula superaquecida		Defeito na caixa de junção
	<i>Strings</i> em circuito aberto/ Defeito no diodo <i>bypass</i>		Módulos em circuito aberto
	Módulos com curto-circuito		Polaridade dos conectores invertida/ Degradação de potencial induzido
	Módulos com sombreamento parcial		

Fonte – Figuras extraídas de (VATH, 2018).

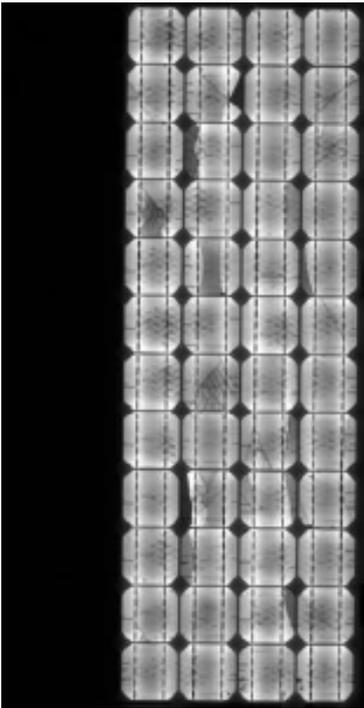
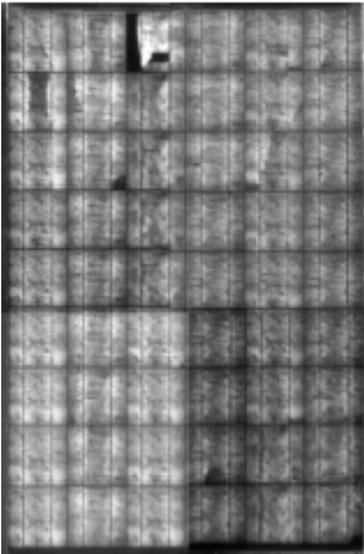
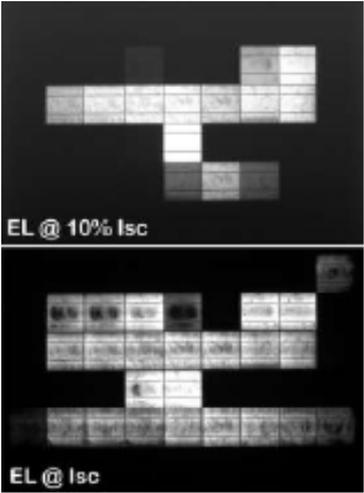
### 2.3.3 Inspeção por eletroluminescência ou fotoluminescência

A inspeção realizada por imagens de luminescência é realizada através da excitação do módulo FV. No processo de eletroluminescência a excitação é realizada a partir da alimentação do módulo com uma fonte de corrente DC e no caso da fotoluminescência o processo de excitação é realizado com a utilização de uma lanterna (MADUKANYA et al., 2018).

Em ambos os casos o processo deve ser realizado em um ambiente escuro, pois o ambiente escuro melhora a observação dos fótons emitidos pelos painéis e captados pelas imagens de luminescência. As imagens de luminescência são capturas por câmeras de alta resolução sem a utilização de filtros infravermelhos (KURTZ et al., 2014). As falhas são observadas como pontos escuros nas imagens, este método possibilita a detecção de fissuras

celulares e alguns defeitos que não podem ser observados em inspeções termográficas, devido a uma melhor resolução das imagens capturadas (MUNOZ et al., 2011). Na Tabela 2 são apresentados imagens de luminescência correspondentes a falhas comuns em módulos FV obtidos de (KURTZ et al., 2014).

Tabela 2 – Imagens de luminescência de falhas comuns em sistemas FV.

Imagem de luminescência	Tipo de Falha	Imagem de luminescência	Tipo de Falha
	<p><i>Strings</i> em circuito aberto</p>		<p>Fissuras celulares</p>
		<p>PID</p>	

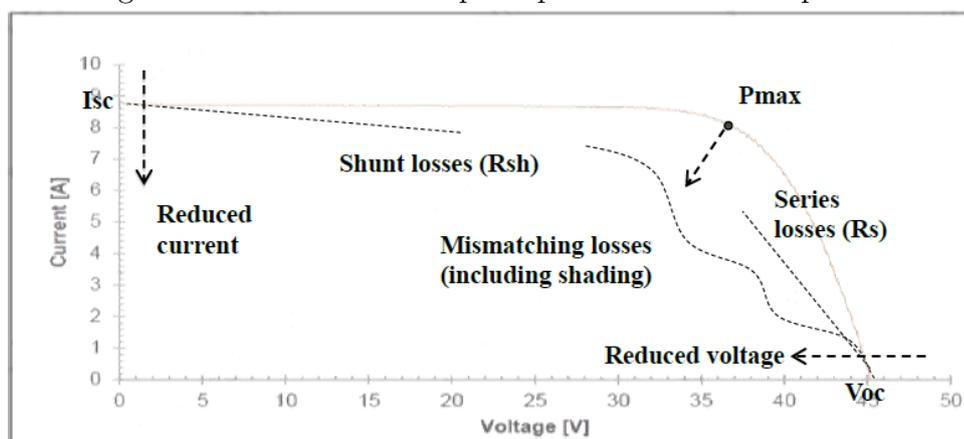
Fonte – Figuras extraídas de (KURTZ et al., 2014).

### 2.3.4 Análise de desempenho pela curva I-V

Neste método de inspeção é utilizado um equipamento capaz de traçar a curva I-V de módulos FV e uma fonte de luz (natural ou artificial). A tensão do módulo é variada de forma a serem medidos os dados necessários para que seja traçada a curva (KURTZ et al., 2014).

Com este método são monitorados os valores de tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ), fator de preenchimento da curva (FF), potência máxima ( $P_{max}$ ) e temperatura. Para relacionar os valores medidos com os dados do fabricante são realizadas correções descritas na norma IEC 60891 (MADUKANYA et al., 2018). A forma da curva IV obtida demonstra as características de geração do módulo FV e deformações indicam perdas como pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 – Curva IV e os principais causadores de perdas.



Fonte – Figura extraída de (MADUKANYA et al., 2018).

### 2.3.5 Análise de desempenho utilizando regressão linear

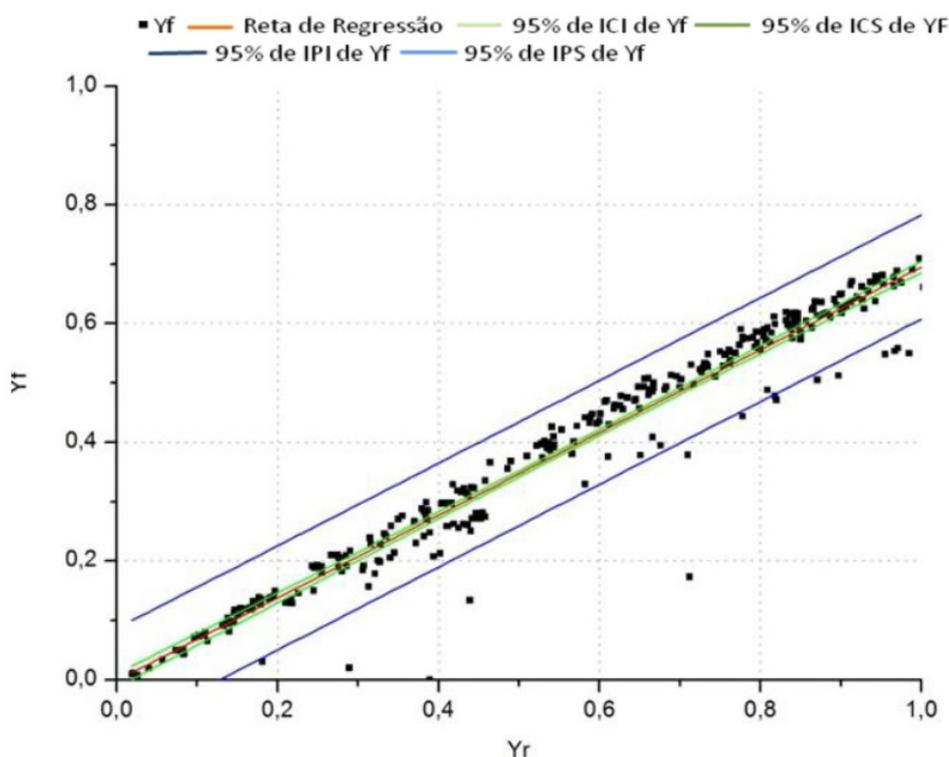
A regressão linear pode ser utilizada na composição de uma técnica de manutenção preventiva em sistemas FV, baseada em uma previsão dos dados de energia gerada em função de uma ou mais variáveis independentes do sistema (FILHO; SANTANA, 2018).

Neste caso, podem ser utilizados as técnicas estatísticas de regressão linear simples (previsão realizada baseada na variação de uma única variável independente) ou regressão linear múltipla (previsão baseada na variação de duas ou mais variáveis independentes) (HAIR et al., 2009).

A realização deste método é baseada na obtenção dos dados das variáveis dependente e independente(s), seguido da utilização do método dos mínimos quadrados para a obtenção da reta de regressão linear dos dados. Após a obtenção da reta de regressão linear são traçadas mais 4 retas, o que define intervalos de confiança e todos os valores fora destes intervalos são analisados para observação de falhas no sistema FV (FILHO; SANTANA, 2018). A Figura 18 apresenta um exemplo da utilização deste método em um

sistema FV obtido de (FILHO; SANTANA, 2018). Neste caso, pode-se observar alguns pontos fora dos intervalos de confiança, logo, eles devem ser inspecionados para que seja determinada uma possível falha no sistema ou apenas um dia de baixa irradiação solar e este dado seja descartado da análise.

Figura 18 – Exemplo de utilização da regressão linear simples como técnica de manutenção preventiva em sistema FV.



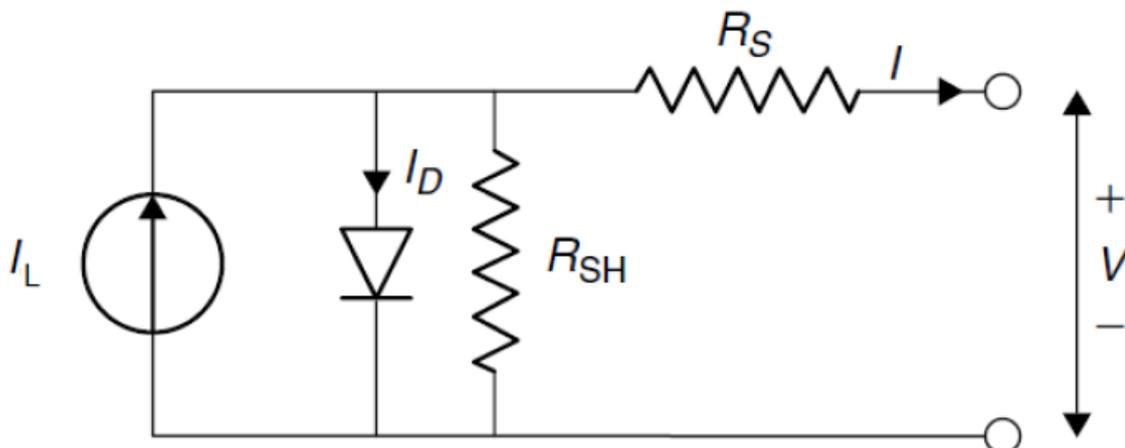
Fonte – Figura extraída de (FILHO; SANTANA, 2018).

### 2.3.6 Simulação de módulos FV e energia gerada utilizando o modelo de cinco parâmetros

O modelo de cinco parâmetros ou modelo de um diodo e dois resistores é um circuito elétrico capaz de representar o comportamento de uma célula FV. Para a simulação de módulos FV utilizando este modelo é necessária uma solução analítica deste circuito e uma das formas de resolução é com a utilização da função W de Lambert conforme apresentado em (SOARES, 2019).

O circuito elétrico equivalente é apresentado na Figura 19 e os cinco parâmetros a serem determinados são: corrente gerada na presença de luz ou foto-corrente ( $I_L$ ), corrente de saturação reversa do diodo ( $I_{0D}$ ), resistor série ( $R_s$ ) que representa as perdas por efeito Joule, resistor *shunt* ( $R_{sh}$ ) que representa as perdas internas e correntes fuga na junção P-N e fator de idealidade do Diodo ( $n$ ) (PINTO, 2016).

Figura 19 – Circuito equivalente: modelo de cinco parâmetros.



Fonte – Figura extraída de (PINTO, 2016).

A determinação dos parâmetros pode ser realizada com a utilização dos dados disponibilizados pelo fabricante do módulo FV e para tornar os valores mais próximos aos reais podem ser inseridos na análise irradiação solar incidente e temperatura de operação (CUBAS; PINDADO; MANUEL, 2014).

Após a determinação dos parâmetros do circuito é possível obter uma estimativa da energia a ser gerada pelo sistema no período determinado e compará-lo ao valor real para analisar seu desempenho (SOARES, 2019).

Esta metodologia de análise é uma excelente ferramenta para previsão da energia gerada por sistemas FV, porém a obtenção dos parâmetros não é um processo simples e por este motivo não é utilizada para análise sistemas de pequeno porte.

## 3 MÉTODO PROPOSTO

Neste capítulo é apresentado um método de análise para auxiliar no diagnóstico e manutenção de sistemas FV. Dessa forma, são utilizados os dados dos sistemas supervisórios e aquisição de dados dos inversores de frequência utilizados para a conexão dos painéis FV (DC) com a rede elétrica de baixa tensão (AC).

Os dados de geração dos inversores, como tensão, corrente e potência, são considerados conjuntamente com variáveis independentes que influenciam a potência de geração dos sistemas FV. Destacam-se:

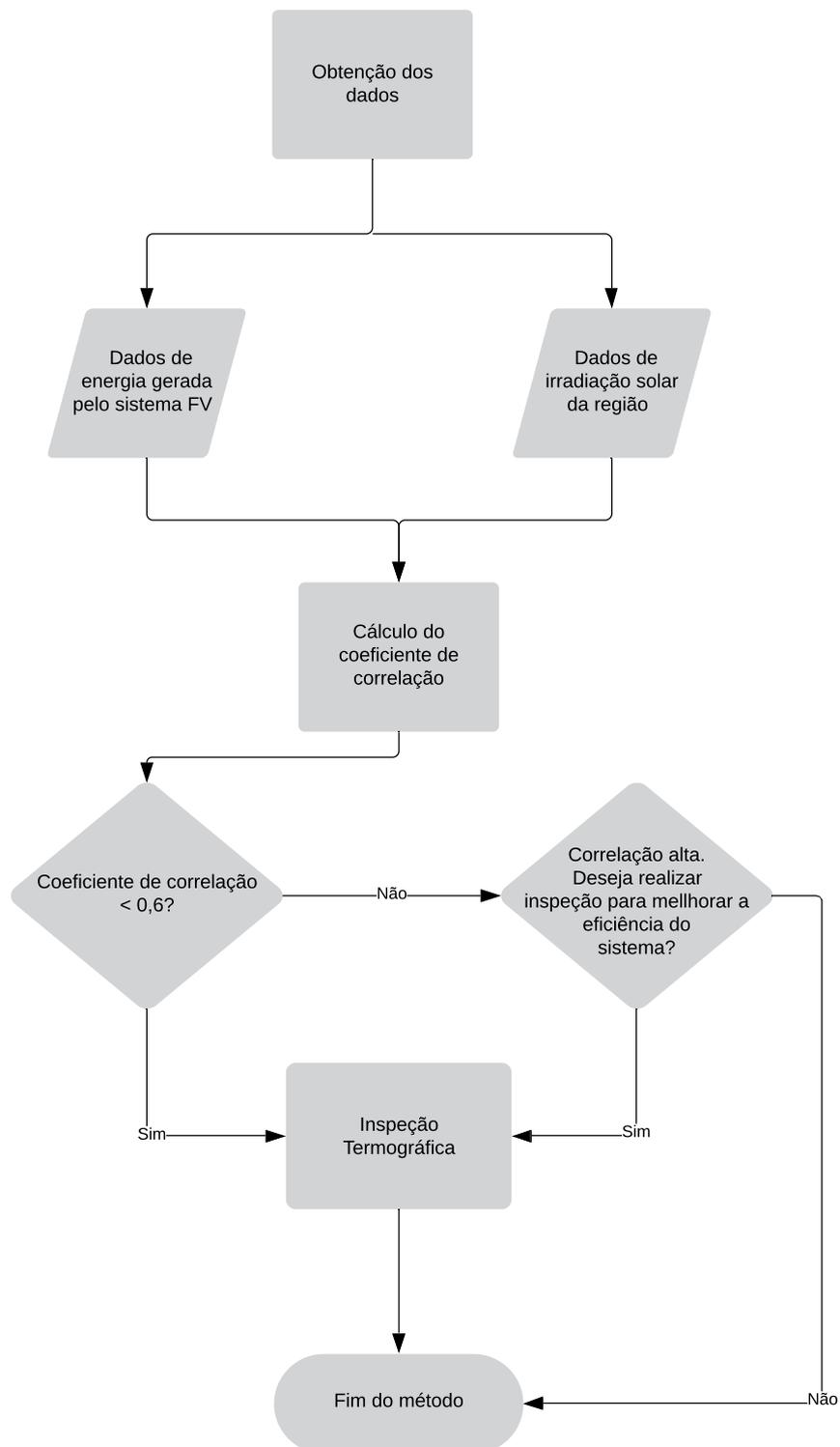
- Irradiação Solar;
- Temperatura Ambiente;
- Temperatura de Operação dos Módulos;
- Velocidade do Vento.

Ressalta-se que, como no caso do sistema FV instalado no IFMG *Campus* Formiga, as variáveis independentes consideradas no projeto da empresa executora apresentaram valores distintos dos encontrados em (CRESESB, 2019) e (NASA, 2019), que são utilizadas neste trabalho.

Antes da instalação de sistemas FV são realizadas simulações para prever a quantidade de energia a ser gerada em função das variáveis independentes da região. Com o sistema FV em funcionamento é possível relacionar os dados de energia gerada e as variáveis independentes utilizando métodos estatísticos, o que possibilita uma análise quantitativa com o objetivo de observar se a energia gerada pelo sistema condiz com o comportamento das variáveis independentes.

O método proposto consiste em três etapas para uma análise completa de desempenho do sistema FV, a primeira etapa tem como objetivo a obtenção dos dados de energia gerada e de suas variáveis independentes, a segunda etapa visa utilizar a correlação entre a energia gerada (variável dependente) e a irradiação incidente no sistema (variável independente) e o terceiro passo é realizado caso a correlação obtida na segunda etapa não apresente um valor satisfatório e consiste em uma inspeção utilizando termografia infravermelha para a detecção de falhas no sistema. A Figura 20 apresenta um fluxograma com as etapas para a realização da inspeção completa de um sistema FV.

Figura 20 – Fluxograma apresentando os passos para a realização da inspeção completa de um sistema FV.



Fonte – Próprio autor.

### 3.1 Obtenção de dados

A obtenção dos dados é a parte inicial do método, os valores de energia gerada podem ser obtidos pela conexão aos sistemas supervisórios disponíveis pelos fabricantes dos inversores de frequência, neles também podem ser obtidos dados de tensão de saída, potência em tempo real, entre outros.

Após a obtenção dos valores de energia gerada são obtidos os dados de irradiação solar por meio de *sites* gratuitos, com a utilização das informações de latitude e longitude para acesso ao banco de dados. Neste trabalho são utilizadas duas bases de dados: SunData (CRESESB, 2019) e *POWER Data Access Viewer* (NASA, 2019). O intuito de utilizar estas duas bases de dados é demonstrar a diferença na utilização de uma base de dados baseada em valores médios e uma base de dados vinculada às regiões com valores medidos por estações meteorológicas.

Em seguida, com todos os valores necessários para análise adquiridos, finaliza-se este passo e segue-se para o cálculo do coeficiente de correlação.

### 3.2 Coeficiente de correlação

A correlação é um método estatístico utilizado na obtenção de uma relação linear entre duas variáveis quantitativas. Isto é, a partir da correlação pode-se observar o nível de relação entre duas variáveis, ou seja, qual o comportamento da variável dependente na decorrência de variações na variável independente (BUSSAB; MORETIN, 2010).

O coeficiente de correlação ( $r$ ) varia entre valores de -1 a 1, onde o valor próximo de 1 é um indicativo de forte relação positiva entre as variáveis analisadas, o valor 0 um indicativo que não há nenhum tipo de relação entre as variáveis em análise e um valor próximo de -1 um indicativo de uma forte relação negativa entre as variáveis analisadas (BUSSAB; MORETIN, 2010).

O cálculo do coeficiente de correlação é realizado com a utilização da seguinte equação (BUSSAB; MORETIN, 2010).

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.1)$$

Em que:

$n$  = quantidade de amostras;

$x$  = variável independente;

$y$  = variável dependente.

Na análise de desempenho proposta no presente trabalho têm-se a energia gerada como variável dependente e a irradiação solar como variável independente. Espera-se que o coeficiente de correlação seja um valor entre 0 e 1, desta forma, valores entre 0,80 e 1 são considerados bons ou altamente correlacionados, a faixa entre 0,6 e 0,8 valores regulares e valores abaixo de 0,6 inferindo-se uma baixa correlação. Ressalta-se que os valores classificados anteriormente como bons, regulares e baixos para esta análise foram definidos de forma empírica com base em um estudo prévio a cerca de sistemas FV. A Tabela 3 apresenta os valores de coeficientes de correlação para sistemas FV.

Tabela 3 – Coeficientes de correlação e sua interpretação para sistemas FV.

Valor do coeficiente de correlação	Interpretação
$r < 0,6$	Valor baixo de correlação, sendo necessárias avaliações mais profundas no sistema para correções de falhas
$0,6 < r < 0,8$	Valor de correlação regular, a inspeção do sistema fica a critério do proprietário do mesmo
$0,8 < r < 1$	Valor de correlação bom, sendo quanto mais próximo 1, maior a eficiência do sistema

Fonte – Próprio Autor.

Baseado nas informações supracitadas, calcula-se o valor da correlação entre as variáveis obtidas na primeira etapa do método proposto e observa-se, com o auxílio da Tabela 3, se o funcionamento do sistema apresenta valores satisfatórios.

Após a análise da correlação entre a energia gerada e a irradiação solar incidente, segue-se para a terceira etapa, onde, se for o caso, é realizada uma inspeção termográfica passiva no sistema FV para detecção de falhas caso o coeficiente de correlação apresente um valor muito baixo.

### 3.3 Termografia passiva

A termografia passiva do sistema FV é utilizada para detecção de falhas no sistema que possam causar diminuições na energia gerada e conseqüentemente uma diminuição no valor do coeficiente de correlação do mesmo. A inspeção é realizada com uma câmera termográfica de mão ou um Drone equipado com uma câmera termográfica, porém, as medições devem ser realizadas em um dia com incidência de luz solar e baixa velocidade dos ventos sobre os painéis solares, conforme a norma IEC 62446-3:2017.

As falhas são identificadas devido a diferença de temperatura entre partes do módulo FV conforme apresentado na subseção 2.3.2.3. A termografia infravermelha passiva é um método de inspeção muito eficiente e rápido de ser executado, além de ser realizado

com o sistema em funcionamento sem a necessidade de qualquer interferência e ser capaz de detectar diversos tipos de falhas em sistemas FV. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nos estudos de caso realizados.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do método proposto em 4 sistemas FV.

### 4.1 Resultados obtidos com a aplicação do método no sistema FV do IFMG - *Campus Formiga*

O sistema FV instalado no IFMG - *Campus Formiga* é composto por 110 módulos do fabricante Canadian Solar, modelo CS6K - 260P, totalizando uma potência instalada de 28,60 kWp. As especificações técnicas do painel solar utilizado no sistema são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Especificações técnicas do painel solar Canadian CS6K - 260P.

Parâmetros	Valores
Potência nominal ( $P_{max}$ )	260 W
Tensão de máxima potência ( $V_{mp}$ )	30,4 V
Corrente de máxima potência ( $I_{mp}$ )	8,56 A
Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ )	37,5 V
Corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ )	9,12 A
Eficiência	16,16 %

Fonte – (SOLAR, 2016).

Além disso, o sistema possui um inversor de frequência do fabricante Sunny Tripower, modelo 25000TL-30 com potência nominal de 25 kW, cujos dados são apresentados na Tabela 5. Uma imagem do sistema FV é apresentada na Figura 21.

Tabela 5 – Especificações técnicas do inversor Sunny Tripower 25 kW.

Parâmetros	Valores
Potência nominal	25000 Wp
Tensão máx. entrada	1000 V
Tensão mínima de entrada	150 V
Corrente máxima de entrada	33 A
Numero de entradas MPPTs	2
Tensão de operação	390-800 V
Rendimento Máximo	98,3 %

Fonte – (SMA, 2016).

O sistema FV foi instalado no ano de 2016, sendo que, até o momento o sistema teve duas paralisações, a primeira causada pelo aquecimento excessivo do transformador, devido

Figura 21 – Sistema FV instalado no IFMG - *Campus* Formiga.

Fonte – Próprio autor.

ao ambiente de instalação e a segunda devido a um problema no disjuntor do sistema FV que provocou sobreaquecimento nos enrolamentos do transformador. O problema evoluiu até o próprio inversor desconectar o sistema FV da rede de distribuição. O transformador foi reparado e o disjuntor substituído.

#### 4.1.1 Obtenção dos dados

Os dados de energia gerada pelo sistema desde sua instalação foram disponibilizados pela instituição e são apresentados na Tabela 6 para os anos de 2016, 2017, 2018 e 2019.

Tabela 6 – Dados de energia gerada pelo sistema FV do IFMG *Campus* Formiga.

<b>Energia Gerada (kWh)</b>				
<b>Mês / Ano</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>
Janeiro	-	4.058,5	3.740,6	4077,8
Fevereiro	-	3.562,5	3.039,2	3.004,5
Março	-	3.695,2	3.645,1	1817,3
Abril	-	956,8	3.058,4	-
Maio	-	2.725,2	3.047,5	-
Junho	-	3.040,0	2.571,6	-
Julho	-	3.134,9	2.764,9	-
Agosto	-	3.259,1	2.986,1	-
Setembro	3.883,8	3.3361,7	3.341,1	-
Outubro	3.771,1	3.689,2	3.316,7	-
Novembro	3.447,0	3.199,5	2.777,1	-
Dezembro	4.167,1	3.464,7	3.606,3	-

Fonte – Próprio Autor.

Além dos dados de energia gerada, também foram obtidos os dados de irradiação

solar utilizando duas base de dados. A primeira base de dados utilizada foi a SunData, cujos valores são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados de irradiação solar SunData do sistema FV do IFMG *Campus* Formiga.

Mês	Irradiação Solar (kWh/m <sup>2</sup> )
Janeiro	5,63
Fevereiro	5,86
Março	4,92
Abril	4,80
Mai	4,22
Junho	4,01
Julho	4,26
Agosto	5,18
Setembro	5,33
Outubro	5,49
Novembro	5,17
Dezembro	5,63

Fonte – (CRESESB, 2019).

A base de dados de irradiação solar SunData apresenta valores médios mensais de irradiação solar para cada região baseado em estudos realizados. Porém, a segunda base de dados utilizada, *POWER Data Access Viewer*, possui em sua base de dados valores medidos diariamente com a utilização de estações meteorológicas da NASA e são apresentados nas Tabela 8 para os anos de 2016, 2017, 2018 e 2019.

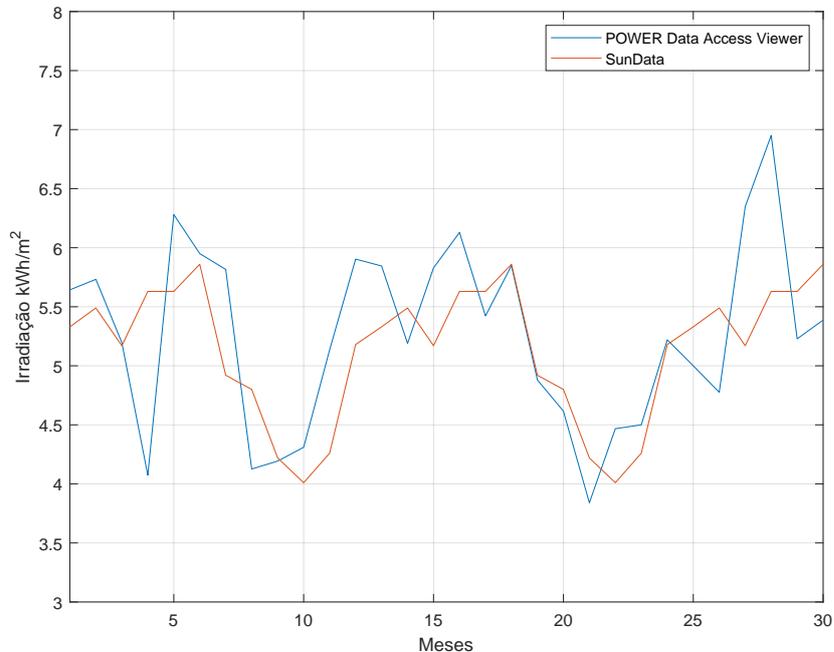
Tabela 8 – Dados de irradiação solar *POWER Data Access Viewer* do sistema FV do IFMG *Campus* Formiga.

Irradiação Solar (kWh/m <sup>2</sup> )				
Mês / Ano	2016	2017	2018	2019
Janeiro	-	6,28	6,12	6,95
Fevereiro	-	5,95	5,42	5,22
Março	-	5,81	5,84	5,38
Abril	-	4,81	4,88	-
Mai	-	4,12	4,61	-
Junho	-	4,19	3,84	-
Julho	-	4,31	4,46	-
Agosto	-	5,13	4,50	-
Setembro	5,64	5,90	5,22	-
Outubro	5,73	5,84	5,00	-
Novembro	5,19	5,19	4,77	-
Dezembro	6,07	5,82	6,34	-

Fonte – (NASA, 2019).

Para ilustrar a diferença entre os valores de irradiação solar das duas bases de dados utilizadas na análise do sistema, a Figura 22 apresenta as curvas de irradiação solar obtidas desde a instalação do sistema.

Figura 22 – Curvas de irradiação solar do sistema FV do IFMG *Campus* Formiga.

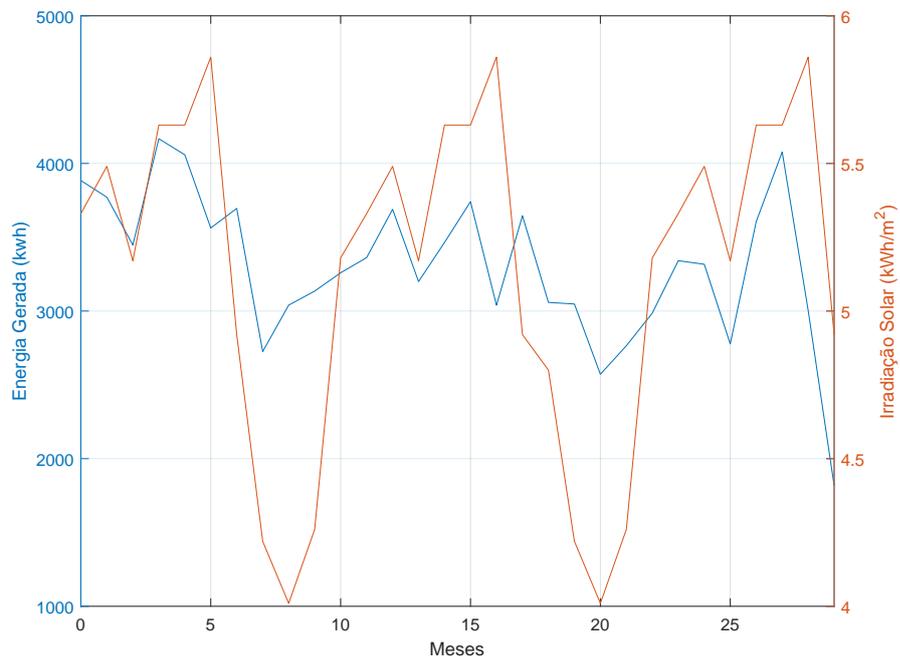


Fonte – Próprio autor.

#### 4.1.2 Coeficiente de correlação

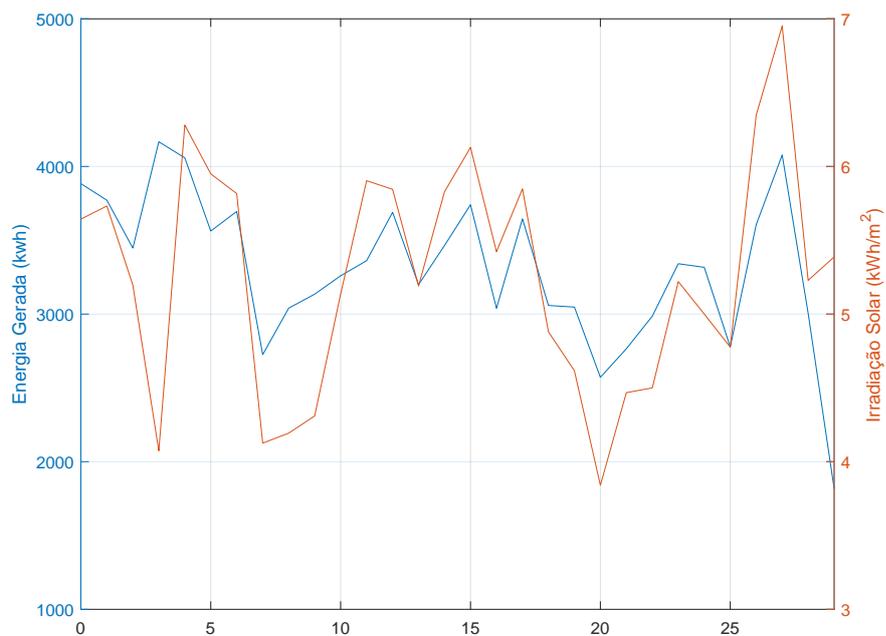
O cálculo dos coeficientes de correlação foram realizados com a utilização do *software* Matlab®, licença de propriedade do IFMG *Campus* Formiga. O *software* conta com uma função chamada “corrcoef” destinada ao cálculo deste coeficiente. Para ilustrar a relação entre a energia gerada e a irradiação solar, são apresentadas nas Figuras 23 e 24 as curvas de energia gerada e irradiação solar para observação de suas semelhanças em ambos os casos de irradiação solar nas diferentes bases de dados.

Figura 23 – Energia gerada e irradiação solar SunData do sistema FV do IFMG *Campus Formiga*.



Fonte – Próprio autor.

Figura 24 – Energia gerada e irradiação solar *POWER Data Access Viewer* do sistema FV do IFMG *Campus Formiga*.



Fonte – Próprio autor.

Os dados obtidos foram agrupados por ano para o cálculo do coeficiente de correlação.

Além disso, os dados para o mês de abril de 2017 foram desconsiderados, pois, o sistema teve seu funcionamento interrompido nesse mês devido ao aquecimento excessivo do transformador, o que ocasionou um valor de energia gerada muito baixa comparada aos demais meses e este dado iria diminuir o coeficiente de correlação de forma significativa. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Coeficientes de correlação do sistema FV do IFMG campus Formiga.

Ano	Irradiação Solar SunData	Irradiação Solar <i>POWER Data Access Viewer</i>
2016	0,88	0,96
2017	0,74	0,89
2018	0,60	0,91
2019	0,74	0,80

Fonte – Próprio autor.

Observa-se que os valores obtidos utilizando as duas bases de dados escolhidas possuem diferenças significativas, o que destaca a necessidade da utilização de uma base de dados composta por valores obtidos através de medições diárias relacionadas a região geográfica da instalação para utilização deste parâmetro como mecanismo de análise de desempenho de sistemas FV.

Os coeficientes de correlação calculados utilizando a base de dados SunData apresentados na Figura 23 descrevem um funcionamento regular do sistema FV, enquanto que os coeficientes calculados com a utilização da base de dados da Nasa apresentados na Figura 24 apontam valores indicativos de um bom funcionamento do sistema, desta forma, não é necessária a realização de inspeção termográfica passiva do sistema.

## 4.2 Resultados obtidos com a aplicação do método no sistema FV residencial 1 na cidade de Formiga-MG

O sistema FV residencial 1 analisado é localizado na cidade de Formiga-MG, sendo composto por 10 módulos de 330 Wp da fabricante Risen Solar conectados em série, totalizando uma potência de 3,3 kWp. As especificações técnicas do painel solar utilizado são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Especificações técnicas do painel solar Risen Solar 330 Wp.

Parâmetros	Valores
Potência nominal ( $P_{max}$ )	330 W
Tensão de máxima potência ( $V_{mp}$ )	38,1 V
Corrente de máxima potência ( $I_{mp}$ )	8,70 A
Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ )	46,3 V
Corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ )	9,25 A
Eficiência	17,1 %

Fonte – (LTD., 2017).

O sistema possui um inversor de frequência da fabricante BB Power, modelo SF3KTN com potência nominal de 3 kW, cujo as especificações técnicas do inversor são apresentadas na Tabela 11. Uma imagem do sistema FV é apresentada na Figura 25.

Tabela 11 – Especificações técnicas do inversor BB SF3KTN.

Parâmetros	Valores
Potência nominal	3000 Wp
Tensão máx. entrada	550 V
Tensão mínima de entrada	100 V
Corrente máxima de entrada por MPPT	15 A
Número de entradas MPPTs independentes	1
Rendimento Máximo	97,8 %

Fonte – (SOLAR, 2019a).

Figura 25 – Sistema FV residencial 1 instalado na cidade de Formiga-MG.

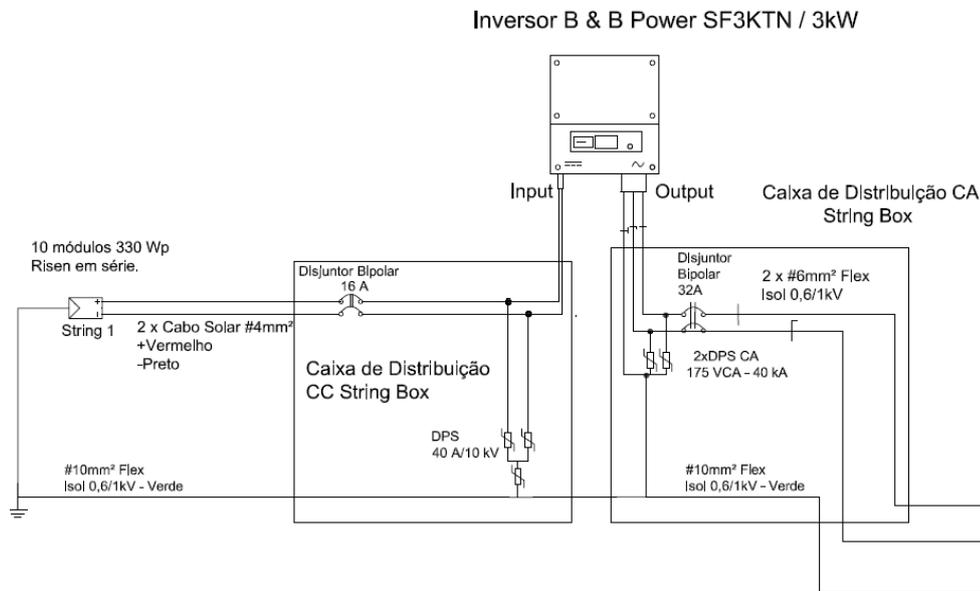


Fonte – Próprio autor.

Para complementar a descrição do sistema a ser inspecionado seu diagrama unifilar

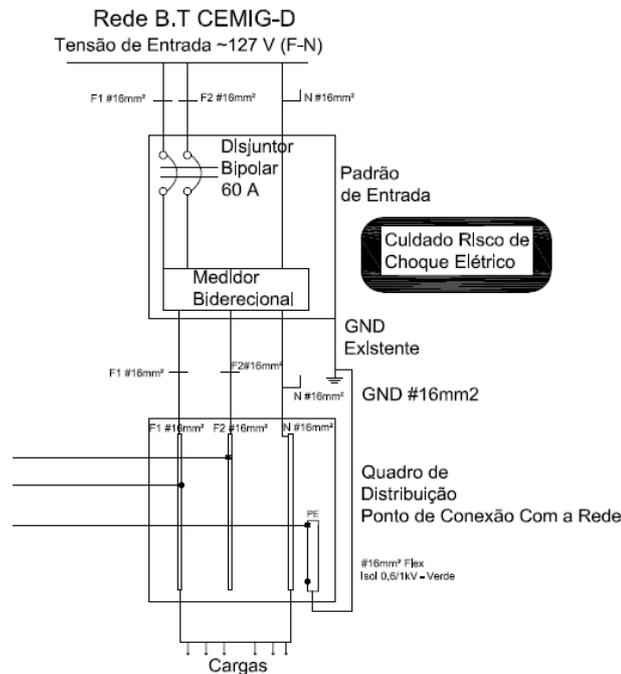
é apresentado nas Figuras 26 e 27. O sistema FV foi instalado no ano de 2019, sendo que desde sua instalação não houveram paralisações no sistema.

Figura 26 – Diagrama unifilar do sistema FV residencial 1 instalado na cidade de Formiga-MG com potência nominal de 3,3 kWp parte 1.



Fonte – Próprio autor.

Figura 27 – Diagrama unifilar do sistema FV residencial 1 instalado na cidade de Formiga-MG com potência nominal de 3,3 kWp parte 2.



Fonte – Próprio autor.

### 4.2.1 Obtenção dos dados

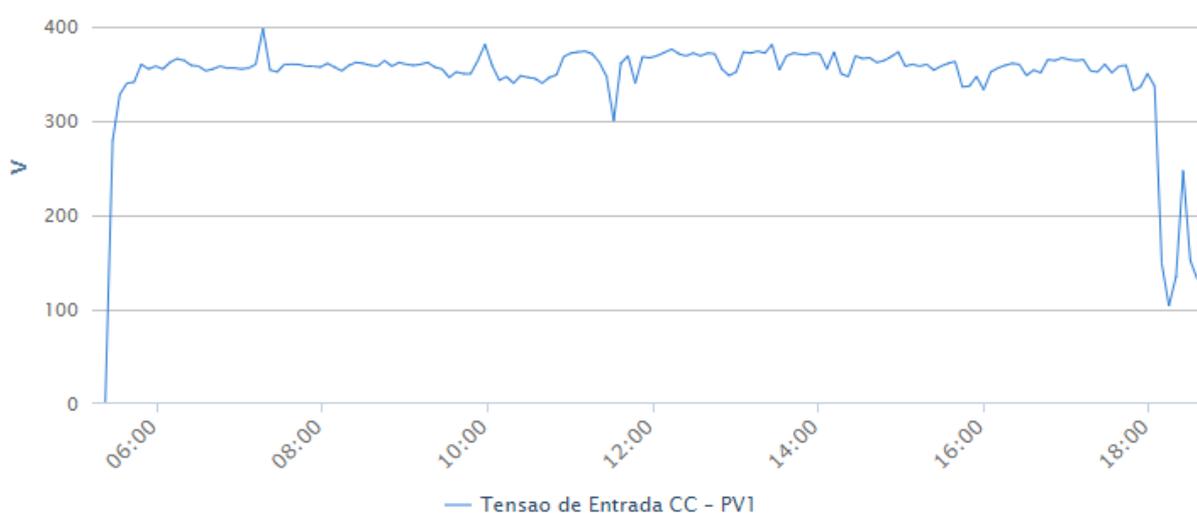
A primeira etapa na análise do sistema consiste na obtenção dos dados. Os valores de energia gerada foram adquiridos através do sistema supervisorio, cujo proprietário do sistema FV forneceu suas credenciais de acesso, além dos dados de energia gerada no ano de 2019 apresentados na Tabela 12, também pode-se observar curvas de potência e tensão de entrada na MPPT do inversor de frequência durante o dia. As Figuras 28 e 29 apresentam ambas as curvas citadas anteriormente para um dia com irradiação solar baixa e as Figuras 30 e 31 apresentam as curvas para um dia com irradiação solar alta como exemplo das características destes tipos de curvas na prática.

Tabela 12 – Dados de energia gerada pelo sistema FV residencial 1 no ano de 2019.

Mês	Energia gerada (kWh)
Fevereiro	368,8
Março	291,6
Abril	402,0
Maio	380,1
Junho	395,2
Julho	410,6
Agosto	426,5
Setembro	447,8
Outubro	472,0

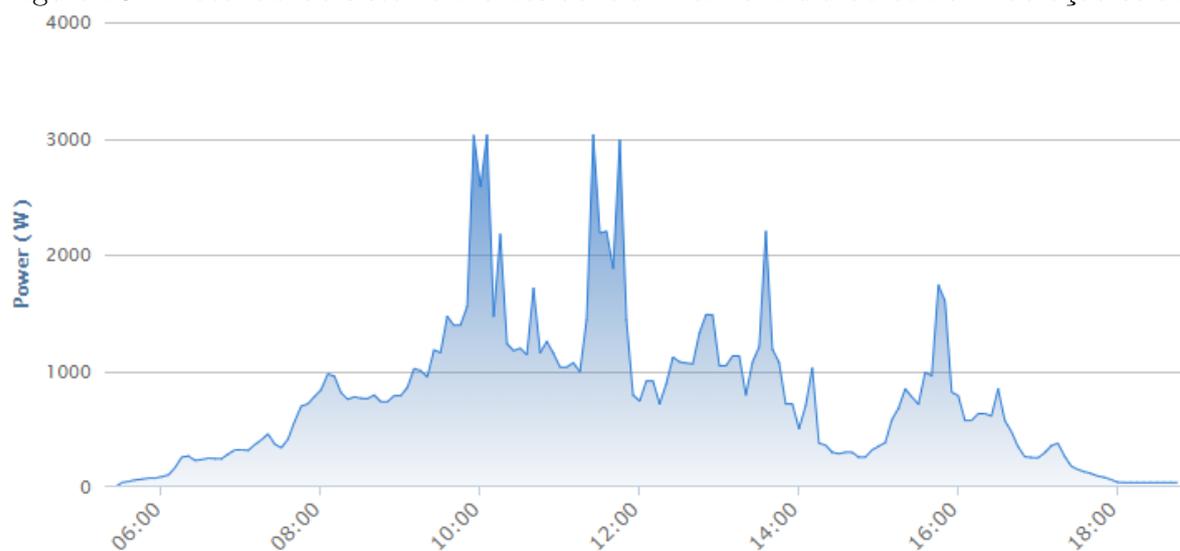
Fonte – Próprio Autor.

Figura 28 – Tensão de entrada no inversor do sistema FV residencial 1 em um dia de baixa irradiação solar.



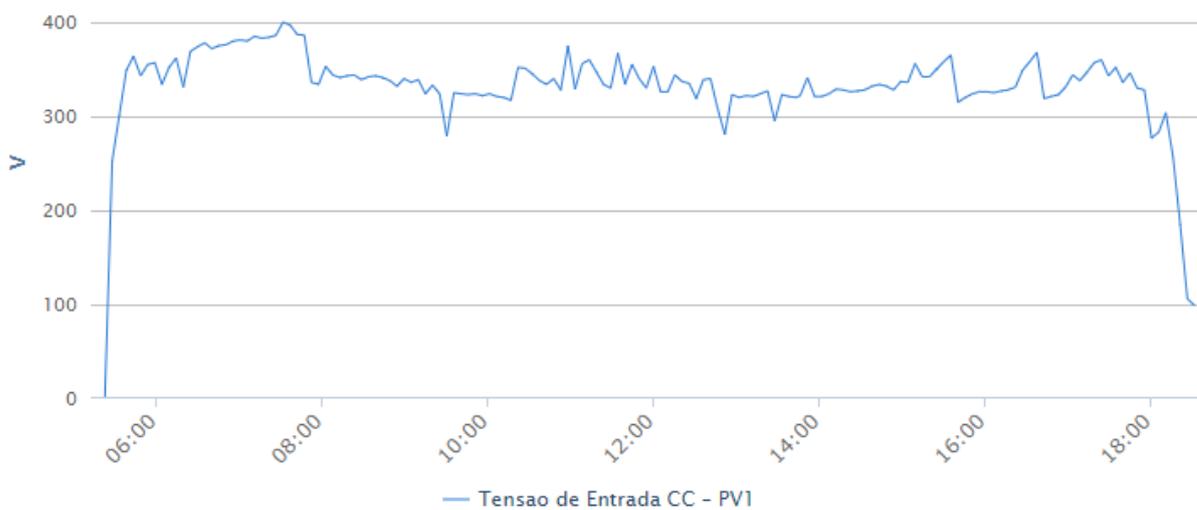
Fonte – (SOLARMAN, 2019).

Figura 29 – Potência do sistema FV residencial 1 em um dia de baixa irradiação solar.



Fonte – (SOLARMAN, 2019).

Figura 30 – Tensão de entrada no inversor do sistema FV residencial 1 em um dia de alta irradiação solar.



Fonte – (SOLARMAN, 2019).

Figura 31 – Potência do sistema FV residencial 1 em um dia de alta irradiação solar.



Fonte – (SOLARMAN, 2019).

Ao analisar as Figuras 28, 29, 30 e 31, pode-se observar como estas variáveis chegam ao inversor de frequência e oscilam durante o dia, porém, a curva de tensão varia em ambos os casos dentro de uma faixa com limites bem próximos, o que dificulta a identificação de irradiação alta ou não, já que as variações da tensão também são provenientes das características da carga conectada. Tendo como base as curvas de potência do sistema é bem simples a identificação de um dia com baixa ou alta irradiação solar, pois, as curvas possuem características distintas. Além disso, ambas as curvas em alguns momentos apresentam vales por um curto período de tempo devido a passagem de nuvens sobre o sistema FV, porém eles são mais comuns em dias de alta irradiação como pode ser observado na Figura 31.

Para a utilização da correlação também foram obtidos os dados de irradiação solar das bases de dados SunData e *POWER Data Access Viewer*, eles são apresentados nas Tabelas 13 e 14 respectivamente.

Tabela 13 – Dados de irradiação solar SunData no ano de 2019 para o sistema FV residencial 1.

Mês	Irradiação Solar (kWh/m <sup>2</sup> )
Fevereiro	5,86
Março	4,92
Abril	4,80
Mai	4,22
Junho	4,01
Julho	4,26
Agosto	5,18
Setembro	5,33
Outubro	5,49

Fonte – (CRESESB, 2019).

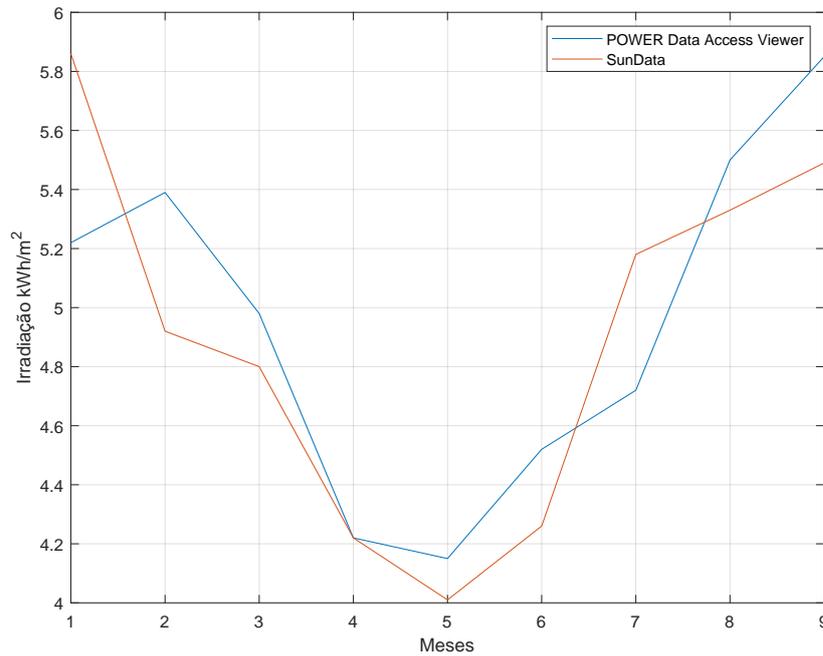
Tabela 14 – Dados de irradiação solar *POWER Data Access Viewer* 2019 no ano de 2019 para o sistema FV residencial 1.

Mês	Irradiação Solar (kWh/m <sup>2</sup> )
Fevereiro	5,22
Março	5,39
Abril	4,98
Mai	4,22
Junho	4,15
Julho	4,52
Agosto	4,72
Setembro	5,50
Outubro	5,85

Fonte – (NASA, 2019).

Para ilustrar a diferença entre os valores de irradiação solar das duas bases de dados utilizadas na análise do sistema a Figura 32 apresenta as curvas de irradiação solar obtidas desde a instalação do sistema.

Figura 32 – Curvas de irradiação solar do sistema FV residencial 1.

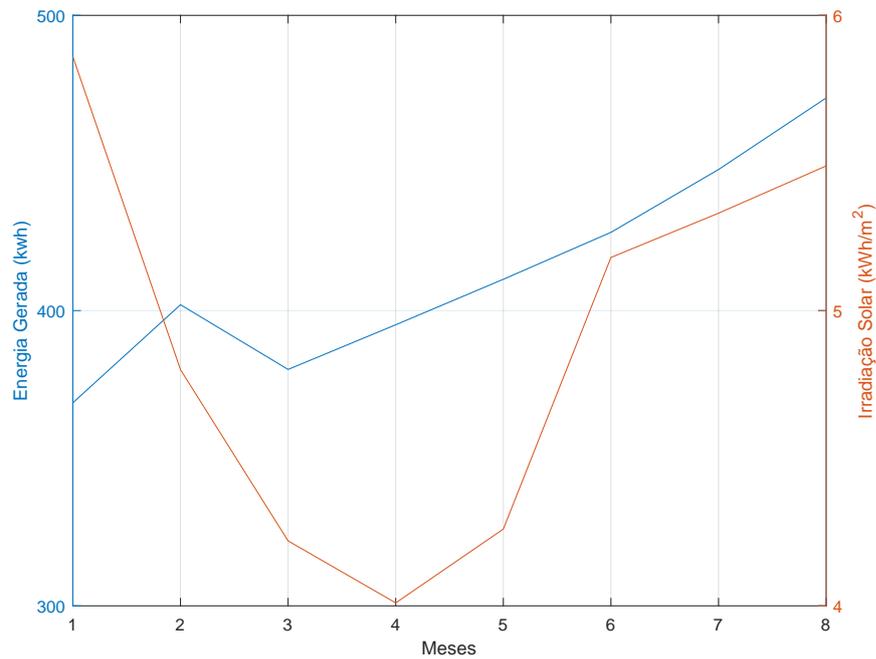


Fonte – Próprio autor.

#### 4.2.2 Coeficiente de correlação

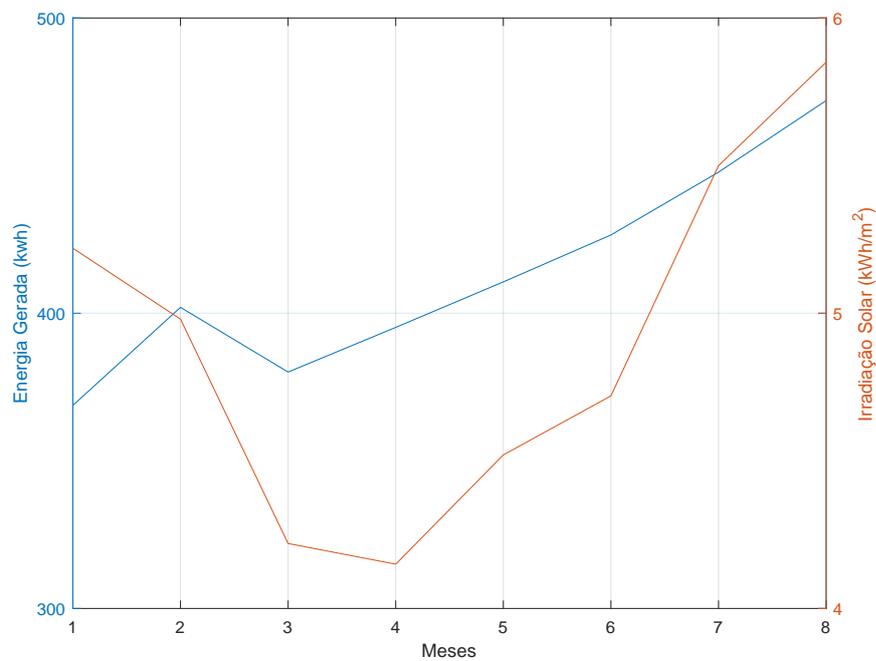
Após a obtenção dos dados de energia gerada e irradiação solar pode-se então ser calculado o coeficiente de correlação, porém, o mês de março foi desconsiderado, pois alguns dias não tiveram sua energia gerada registrada pelo sistema supervisorio e isto poderia interferir de forma significativa no valor da correlação. Para ilustrar a relação entre a energia gerada e a irradiação solar são apresentadas nas Figuras 33 e 34 as curvas de energia gerada e irradiação solar juntas para observação de suas semelhanças em ambos os casos de irradiação solar.

Figura 33 – Energia gerada e irradiação solar SunData do sistema FV residencial 1.



Fonte – Próprio autor.

Figura 34 – Energia gerada e irradiação solar *POWER Data Access Viewer* do sistema FV residencial 1.



Fonte – Próprio autor.

Os valores de correlação encontrados com a utilização do *software* Matlab® são apresentados na Tabela 15. Os valores obtidos para o coeficiente de correlação mostram

que para ambas as bases de dados o sistema não apresentou uma correlação positiva forte com a variável independente irradiação solar, o resultado baixo pode indicar que as outras variáveis independentes podem estar influenciando na energia gerada pelo sistema de forma significativa ou até mesmo a presença de falhas no sistema, neste caso, há a necessidade de uma inspeção mais aprofundada no sistema FV. Então, após a análise dos resultados obtidos de correlação é apresentada a realização de uma inspeção no sistema por termografia passiva.

Tabela 15 – Coeficientes de correlação do sistema FV residencial 1 da cidade de Formiga-MG.

Ano	Irradiação Solar SunData	Irradiação Solar <i>POWER Data Access Viewer</i>
2019	0,31	0,65

Fonte – Próprio autor.

### 4.2.3 Inspeção termográfica

Para detecção de falhas no sistema FV realizou-se uma inspeção termográfica com a utilização de uma câmera termográfica de mão modelo Flir I5, cujas especificações são apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Especificações técnicas câmera IR Flir I5.

Parâmetros	Especificações da câmera
Monitor	LCD 2,8"
Distância de focagem mínima	0,6 m
Sensibilidade Térmica	< 0,1 °C
Frequência das imagens	9 Hz
Intervalo espectral	7,5-13 $\mu\text{m}$
Amplitudes de temperatura	0 °C a 250 °C
Precisão	$\pm 2$ °C $\pm 2$ % de leitura

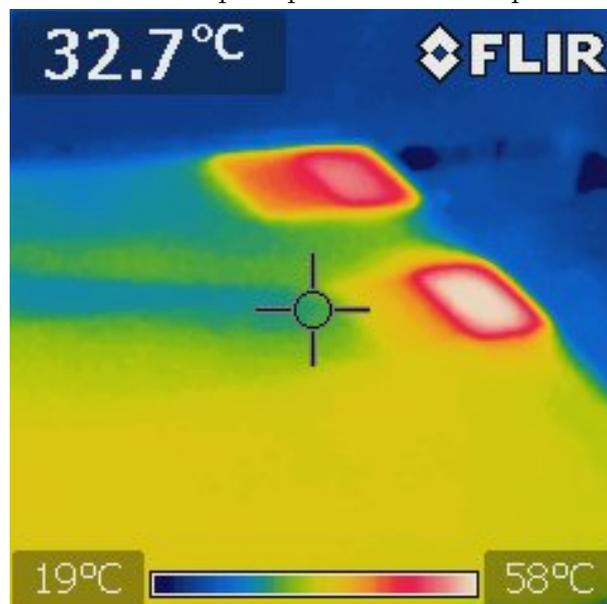
Fonte – (FLIR, 2017).

As medições foram realizadas em um dia ensolarado, havendo incidência de raios solares no sistema e ventos de baixa velocidade.

Algumas falhas foram encontradas com a aplicação do método, o primeiro problema observado foram 2 módulos com células superaquecidas, a Figura 35 apresenta a imagem térmica do primeiro módulo onde a temperatura na célula foi próxima de 58 °C. Já no segundo módulo com o problema de célula superaquecida a temperatura da célula estava próxima de 42 °C, sendo sua imagem térmica apresentada na Figura 36. Segundo (VATH, 2018), na ocasião em que células superaquecidas são observadas em um sistema

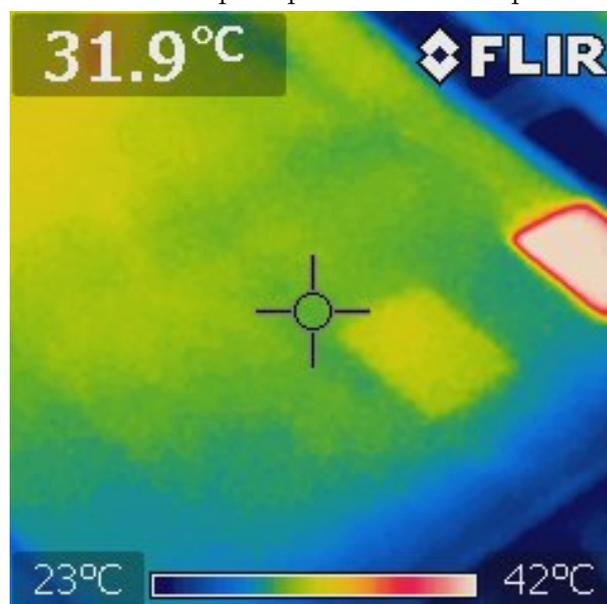
FV recomenda-se a substituição do módulo onde foi encontrada a falha para aumento da eficiência do sistema.

Figura 35 – Módulo com célula superaquecida com temperatura próxima de 58°C.



Fonte – Próprio autor.

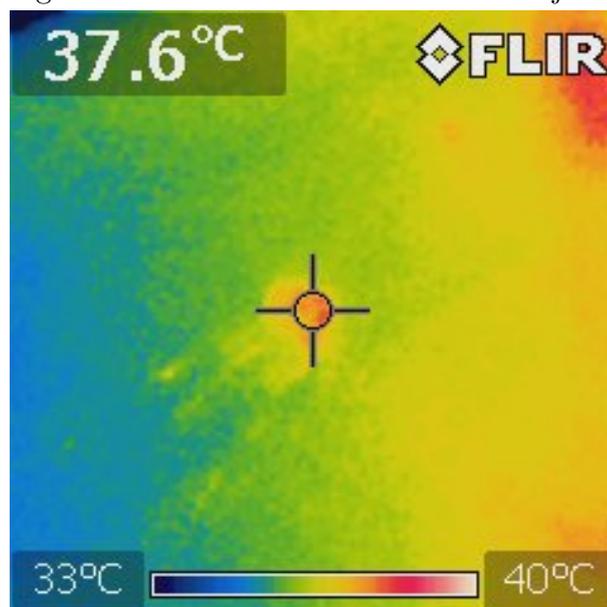
Figura 36 – Módulo com célula superaquecida com temperatura próxima de 42°C.



Fonte – Próprio autor.

O segundo problema observado foi uma sujeira no módulo, onde a temperatura medida no local foi de 37,6 °C, sendo neste caso apenas a limpeza do módulo necessária para aumento da eficiência do painel. A imagem térmica do problema é apresentada na Figura 37.

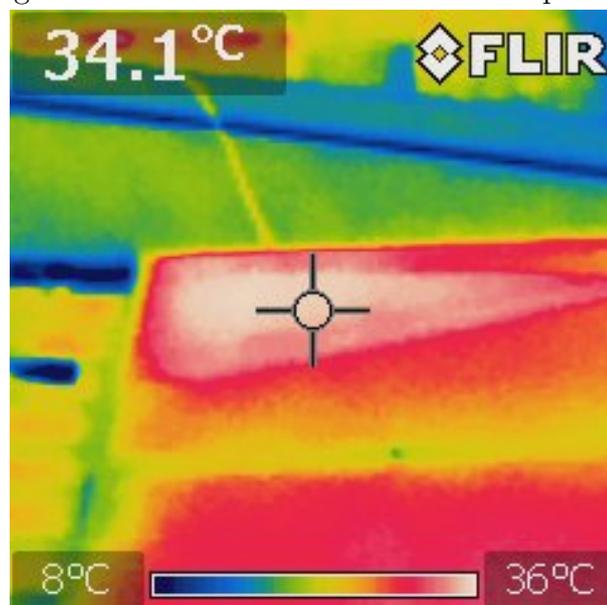
Figura 37 – Módulo com acúmulo de sujeira.



Fonte – Próprio autor.

O terceiro problema observado com a inspeção termográfica passiva foi um sombreamento parcial causado pelo muro de laje da residência, que fica localizado próximo ao sistema FV. A imagem térmica do sombreamento parcial no sistema é apresentada na Figura 38.

Figura 38 – Módulo com sombreamento parcial.



Fonte – Próprio autor.

Concluída a inspeção termográfica passiva, os problemas encontrados são listados na Tabela 17.

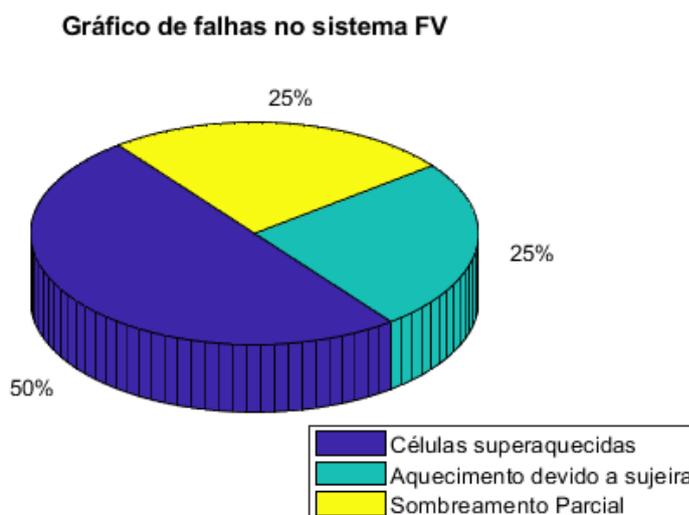
Tabela 17 – Falhas observadas com a inspeção termográfica passiva no sistema FV residencial 1.

Descrição da falha	Quantidade
Células superaquecidas	2
Acúmulo de sujeira	1
Sombreamento Parcial	1

Fonte – Próprio autor.

Ao analisar os resultados da inspeção pode-se concluir que células superaquecidas representaram 50% dos erros encontrados no sistema, aquecimento causado por sujeira 25% e módulos com sombreamento parcial 25%. O gráfico com o resumo das falhas detectadas é apresentado na Figura 39.

Figura 39 – Resumo das falhas detectadas com a realização da inspeção termográfica no sistema FV residencial 1.



Fonte – Próprio autor.

### 4.3 Resultados obtidos com a aplicação do método no sistema FV residencial 2 na cidade de Formiga-MG

O sistema FV residencial 2 é localizado na cidade de Formiga-MG, é composto por 12 módulos de 330 Wp da fabricante Risen Solar conectados em série, totalizando uma potência de 3,96 kWp. As especificações técnicas do painel solar utilizado são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Especificações técnicas do painel solar Risen Solar 330 Wp.

Parâmetros	Valores
Potência nominal ( $P_{max}$ )	330 W
Tensão de máxima potência ( $V_{mp}$ )	38,1 V
Corrente de máxima potência ( $I_{mp}$ )	8,70 A
Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ )	46,3 V
Corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ )	9,25 A
Eficiência	17,1 %

Fonte – (LTD., 2017).

O sistema possui um inversor de frequência da fabricante Renovigi, RENO-4K-PLUS com potência nominal de 4 kW, cujo as especificações técnicas do inversor são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Especificações técnicas do inversor RENO-4K-PLUS.

Parâmetros	Valore
Potência nominal	4000 Wp
Tensão máx. entrada	600 V
Tensão mínima de entrada	120 V
Corrente máxima de entrada por MPPT	18,2 A
Numero de entradas MPPTs	2
Rendimento Máximo	98,1 %

Fonte – (SOLAR, 2019b)

O sistema FV foi instalado no ano de 2019 e desde sua instalação não houveram paralisações no sistema.

### 4.3.1 Obtenção dos dados

A primeira etapa da análise consiste na obtenção dos dados. Os valores de energia gerada foram adquiridos através do sistema supervisorio, fornecidos pela empresa responsável pela instalação do sistema. Os dados de energia gerada no ano de 2019 são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Dados de energia gerada pelo sistema FV residencial 2 no ano de 2019.

Mês	Energia gerada (kWh)
Maio	374,5
Junho	421,0
Julho	472,3
Agosto	510,3
Setembro	536,2
Outubro	602,7

Fonte – Próprio Autor.

Para a utilização da correlação também foram obtidos os dados de irradiação solar utilizando as bases de dados SunData e *POWER Data Access Viewer* que são apresentados nas Tabelas 21 e 22 respectivamente.

Tabela 21 – Dados de irradiação solar SunData no ano de 2019 para o sistema FV residencial 2.

Mês	Irradiação Solar (kWh/m <sup>2</sup> )
Maio	4,22
Junho	4,01
Julho	4,26
Agosto	5,18
Setembro	5,33
Outubro	5,49

Fonte – (CRESESB, 2019).

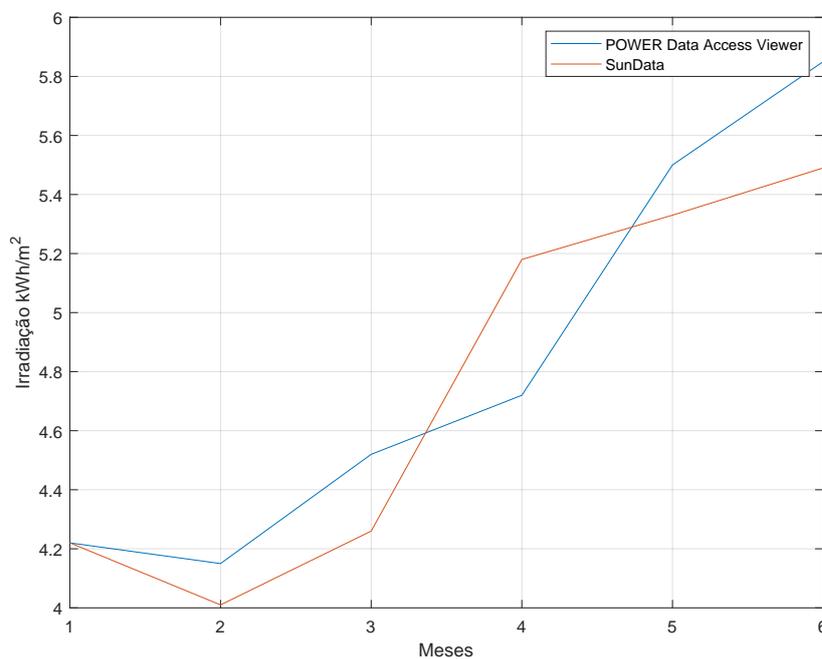
Tabela 22 – Dados de irradiação solar *POWER Data Access Viewer* no ano de 2019 para o sistema FV residencial 2.

Mês	Irradiação Solar (kWh/m <sup>2</sup> )
Maio	4,22
Junho	4,15
Julho	4,52
Agosto	4,72
Setembro	5,50
Outubro	5,85

Fonte – (NASA, 2019).

Como forma de ilustrar a diferença entre os valores obtidos utilizando as duas bases de dados, a Figura 40 apresenta as duas curvas de irradiação solar obtidas.

Figura 40 – Curvas de irradiação solar do sistema FV residencial 2.

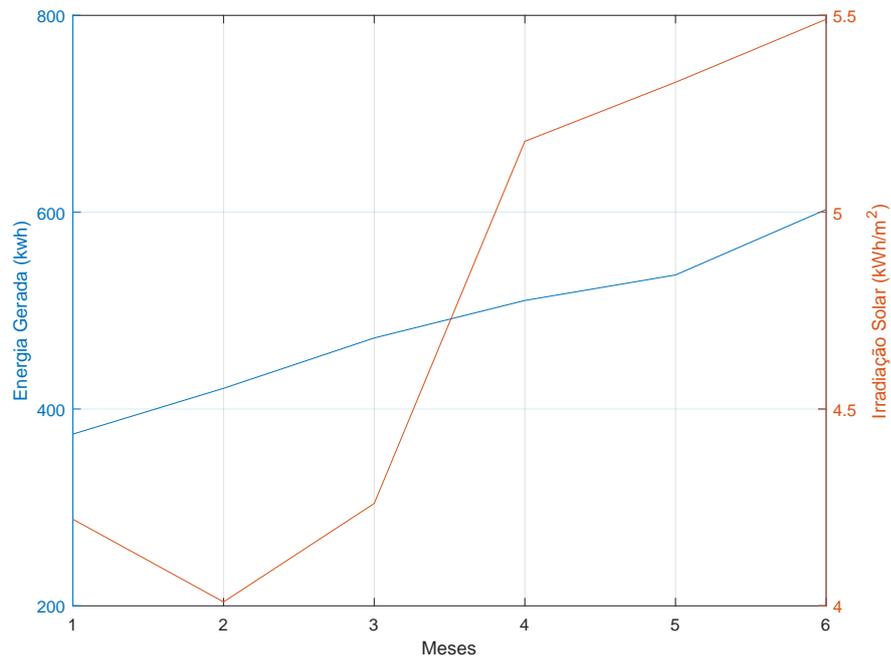


Fonte – Próprio autor.

### 4.3.2 Coeficiente de correlação

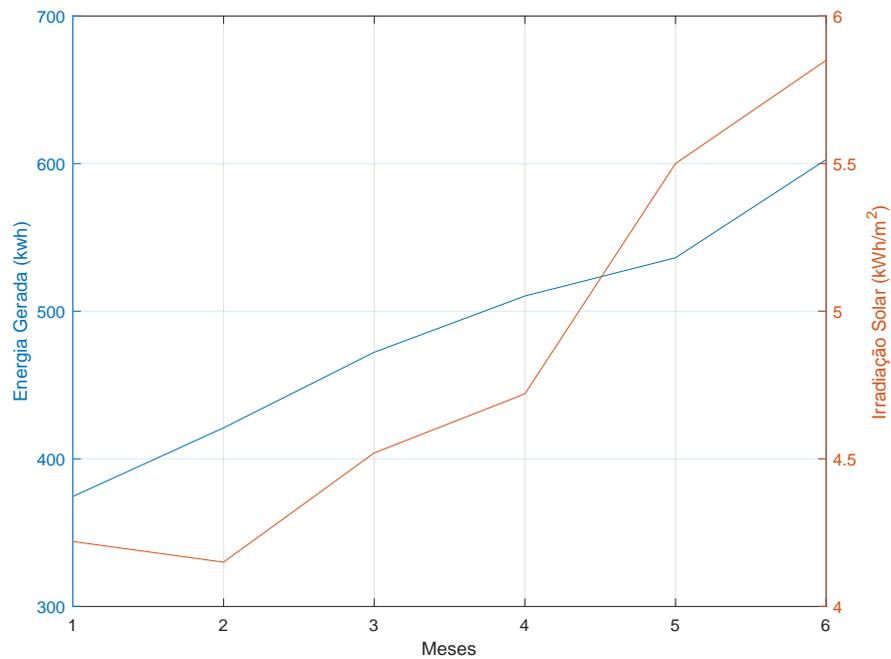
Após a obtenção dos dados pode-se então calcular o coeficiente de correlação entre as variáveis para análise de desempenho do sistema. Como forma de ilustrar a relação entre a energia gerada e a irradiação solar incidente no sistema, as Figuras 41 e 42 apresentam a energia gerada e a irradiação solar na mesma Figura para ambos os casos, SunData e *POWER Data Access Viewer*, respectivamente.

Figura 41 – Energia gerada e irradiação solar SunData do sistema FV residencial 2.



Fonte – Próprio autor.

Figura 42 – Energia gerada e irradiação solar *POWER Data Access Viewer* do sistema FV residencial 2.



Fonte – Próprio autor.

Os valores de correlação obtidos com a utilização do *software* Matlab<sup>®</sup> são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Coeficientes de correlação do sistema FV residencial 2 na cidade de Formiga-MG.

Ano	Irradiação Solar SunData	Irradiação Solar <i>POWER Data Access Viewer</i>
2019	0,89	0,93

Fonte – Próprio autor.

Os dados da Tabela 23 mostram uma correlação positiva forte para as ambas as bases de dados, logo, o sistema aparenta apresentar poucas falhas que não interferiram no seu funcionamento durante os meses analisados pelo método proposto neste trabalho não havendo a necessidade da realização de uma inspeção termográfica no sistema.

#### 4.4 Resultados obtidos com a aplicação do método no sistema FV residencial 3 na cidade de Formiga-MG

O sistema FV residencial 3 é localizado na cidade de Formiga-MG e é composto por 12 módulos de 270 Wp da fabricante Risen Solar conectados em série, com uma potência de 3,24 kWp. As especificações técnicas do painel solar utilizado são apresentadas na Tabela 24. O sistema possui um inversor de frequência do fabricante Renovigi, RENO-4K-PLUS com potência nominal de 4 kW, cujo as especificações técnicas do inversor são apresentadas na Tabela 25. O sistema FV foi instalado no ano de 2019 e desde sua instalação não houveram paralisações.

Tabela 24 – Especificações técnicas do painel solar Risen Solar 330 Wp.

Parâmetros	Valores
Potência nominal ( $P_{max}$ )	270 W
Tensão de máxima potência ( $V_{mp}$ )	34,6 V
Corrente de máxima potência ( $I_{mp}$ )	7,81 A
Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ )	43,3 V
Corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ )	8,68 A
Eficiência	17,1 %

Fonte – (LTD., 2017).

Tabela 25 – Especificações técnicas do inversor RENO-4K-PLUS.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
Potência nominal	4000 W <sub>p</sub>
Tensão máx. entrada	600 V
Tensão mínima de entrada	120 V
Corrente máxima de entrada por MPPT	18,2 A
Numero de entradas MPPTs	2
Rendimento Máximo	98,1 %

Fonte – (SOLAR, 2019b)

#### 4.4.1 Obtenção dos dados

A primeira etapa na análise dos sistema consiste na obtenção dos dados, os dados de energia gerada foram adquiridos através do sistema supervisorio, fornecidos pela empresa responsável pela instalação do sistema. Os dados de energia gerada no ano de 2019 são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Dados de energia gerada pelo sistema FV residencial 3 no ano de 2019.

<b>Mês</b>	<b>Energia gerada (kWh)</b>
Abril	370,8
Maio	369,1
Junho	372,6
Julho	384,4
Agosto	402,3
Setembro	429,6
Outubro	496,6

Fonte – Próprio Autor.

Para a utilização do método e cálculo da correlação também foram obtidos os dados de irradiação solar das bases de dados SunData e *POWER Data Access Viewer*, conforme apresentado nas Tabelas 27 e 28 respectivamente.

Tabela 27 – Dados de irradiação solar SunData do sistema FV residencial 3.

<b>Mês</b>	<b>Irradiação Solar (kWh/m<sup>2</sup>)</b>
Abril	4,80
Maio	4,22
Junho	4,01
Julho	4,26
Agosto	5,18
Setembro	5,33
Outubro	5,49

Fonte – (CRESESB, 2019).

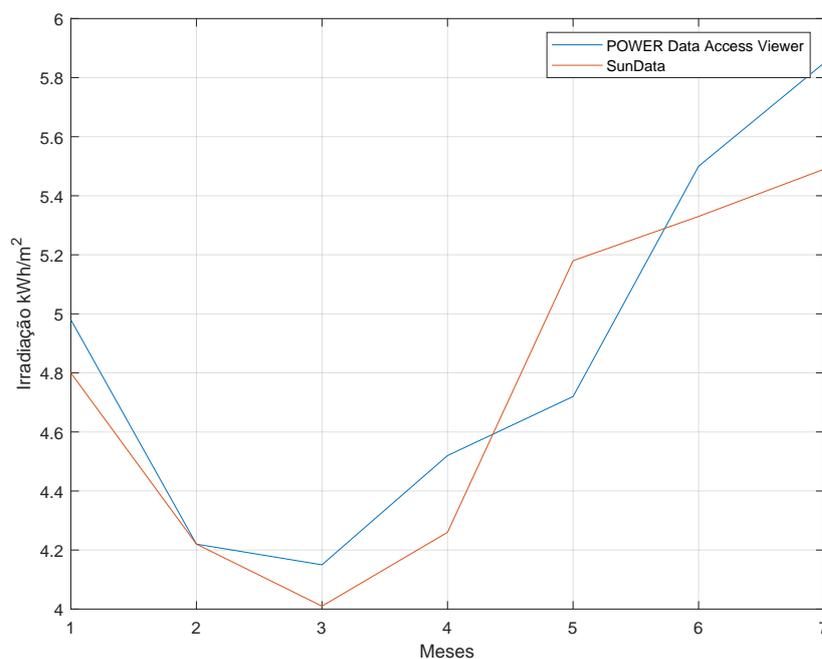
Tabela 28 – Dados de irradiação solar *POWER Data Access Viewer* 2019 do sistema FV residencial 3.

Mês	Irradiação Solar (kWh/m <sup>2</sup> )
Abril	4,98
Mai	4,22
Junho	4,15
Julho	4,52
Agosto	4,72
Setembro	5,50
Outubro	5,85

Fonte – (NASA, 2019).

Para ilustrar a diferença entre os dados obtidos com a utilização das duas bases de dados, a Figura 43 apresenta as duas curvas de irradiação solar obtidas.

Figura 43 – Curvas de irradiação Solar do sistema FV residencial 3.

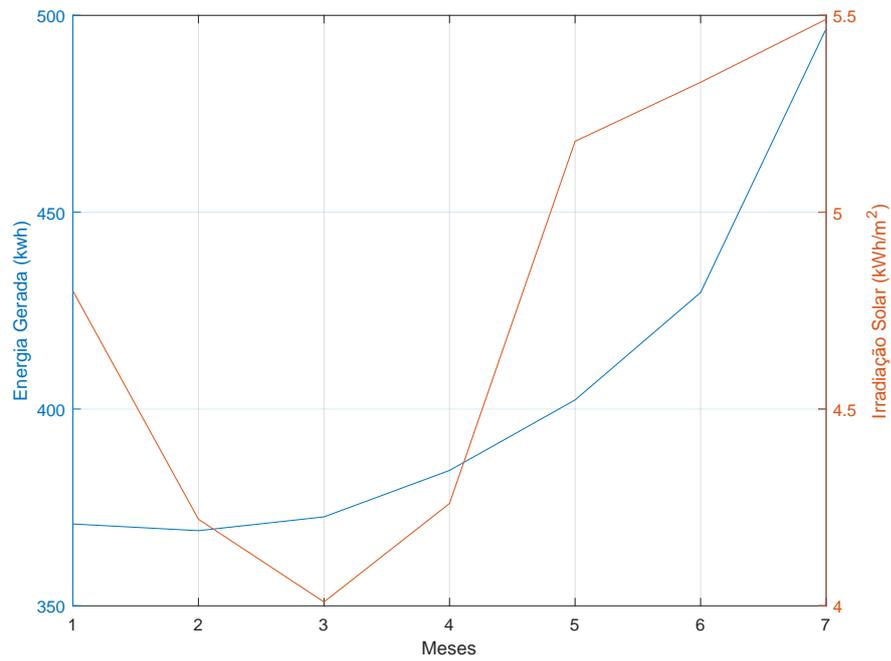


Fonte – Próprio autor.

#### 4.4.2 Coeficiente de correlação

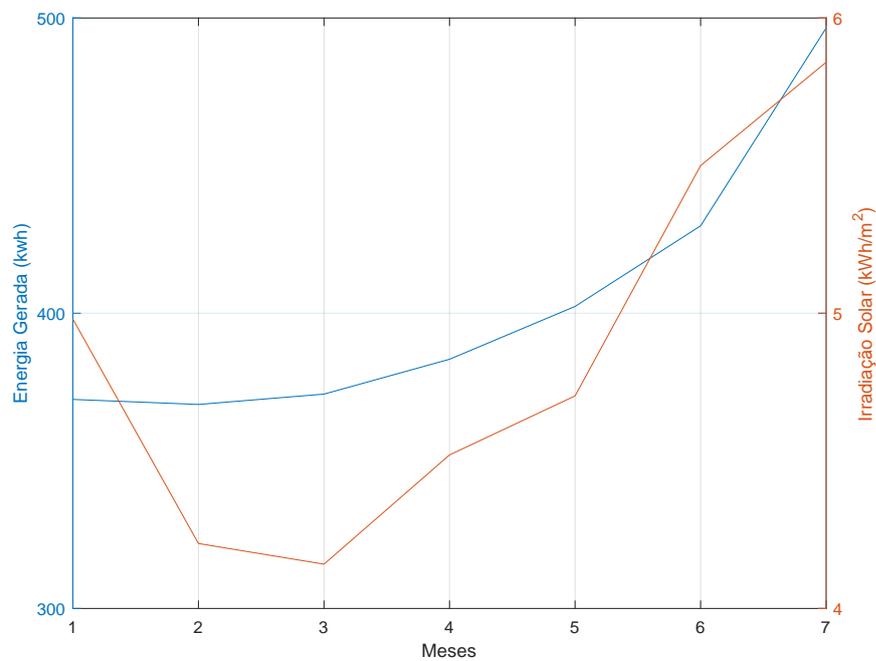
Após a obtenção dos dados é calculado o coeficiente de correlação entre as variáveis para análise de desempenho do sistema e como forma de ilustrar a relação entre a energia gerada e a irradiação solar incidente no sistema, as Figuras 44 e 45 apresentam a energia gerada e a irradiação solar na mesma Figura para ambos os casos, SunData e *POWER Data Access Viewer*, respectivamente.

Figura 44 – Energia gerada e irradiação solar SunData do sistema FV residencial 3.



Fonte – Próprio autor.

Figura 45 – Energia gerada e irradiação solar *POWER Data Access Viewer* do sistema FV residencial 3.



Fonte – Próprio autor.

Os valores de correlação obtidos com a utilização do *software* Matlab<sup>®</sup> são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Coeficientes de correlação do sistema FV residencial 3 na cidade de Formiga-MG.

<b>Ano</b>	<b>Irradiação Solar SunData</b>	<b>Irradiação Solar <i>POWER Data Access Viewer</i></b>
2019	0,79	0,87

Fonte – Próprio autor.

Os dados da Tabela 29 mostram uma correlação positiva regular bem próxima da faixa de valores considerados bons para a base de dados do SunData e uma correlação positiva forte para a base de dados *POWER Data Access Viewer*, logo, o sistema não apresenta indícios de falhas que comprometam seu funcionamento nos meses analisados pelo método proposto neste trabalho, não havendo a necessidade da realização de uma inspeção termográfica no sistema.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho realizou-se uma análise das principais falhas de sistemas FV e os métodos de diagnóstico para detecção destes problemas, de forma que o objetivo principal foi propor uma metodologia simples para auxiliar na detecção de problemas com sistemas FV e, conseqüentemente, possibilitar a inspeção e solução das falhas encontradas.

O método de correlação consiste em uma comparação entre a energia gerada e a curva de irradiação solar da região onde foi instalado o sistema FV, de forma simples se comparado a vários métodos existentes, como o conhecimento necessário para a modelagem e simulação de sistemas FV como o modelo de quatro ou cinco parâmetros, método de detecção de falhas utilizando a derivada segunda e mínimos quadrados e a análise espectral da potência utilizando a transformada de Fourier e o teorema de amostragem.

Foram analisados 4 sistemas FV reais na cidade de Formiga, sendo 3 deles instalações residenciais e 1 deles o sistema instalado em um dos prédios do IFMG *Campus* Formiga. Em 3 dos casos analisados o valor observado da correlação não indicou nenhum tipo de mau funcionamento do sistema, no entanto, em um dos casos a correlação encontrada se mostrou abaixo de um patamar razoável, definido empiricamente neste trabalho. Fato este que de acordo com a metodologia proposta indica inspeção *in loco* do sistema FV.

Neste caso, no sistema FV residencial composto por 10 módulos, foi realizada uma inspeção termográfica conforme Norma IEC 62446-3:2017 de forma manual com uma câmera termográfica de mão modelo Flir I5. Foram encontradas as seguintes falhas: células superaquecidas, acúmulo de sujeira e sombreamento parcial.

Desta forma, a metodologia proposta foi aplicada em sistemas reais, onde foram encontrados e sanados problemas resultando em ganhos de energia gerada no sistema analisado, atestando em campo a factibilidade da metodologia proposta. O método da correlação, descrito no presente trabalho, pode ser aplicado por empresas que realizam a venda e instalação destes sistemas, exigindo baixo conhecimento da modelagem física do sistema analisado considerando-se ainda que os dados necessários estão disponíveis *on-line* de forma gratuita e também são fornecidos pelos *softwares* dos inversores de frequência.

### 5.1 Trabalhos Futuros

Com o desenvolvimento do presente trabalho pode-se sugerir as seguintes possibilidades para trabalhos futuros:

- A implementação da metodologia proposta de forma automatizada, com a obtenção

dos dados de forma dinâmica;

- A inclusão de mais variáveis independentes (temperatura, velocidade dos ventos, etc) na análise de desempenho do sistema;
- A utilização de outras metodologias de inspeção de sistemas FV para detecção das falhas.

## Referências

- ANEEL. *Revisão das regras de geração distribuída entra em consulta pública*. 2019. Disponível em: <[https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset\\_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/revisao-das-regras-de-geracao-distribuida-entra-em-consulta-publica/656877](https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/revisao-das-regras-de-geracao-distribuida-entra-em-consulta-publica/656877)>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.
- BRAGA, R. P. *ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: CONCEITOS E APLICAÇÕES*. Monografia (TCC) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Citado na página 22.
- BUSSAB, W. de O.; MORETIN, P. A. *Estatística Básica*. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2010. Citado na página 39.
- COMMISSION, I. E. *Photovoltaic (PV) systems - Requirements for testing, documentation and maintenance - Part 3: Photovoltaic modules and plants - Outdoor infrared thermography*. 3. ed. Geneva, 2017. Citado na página 31.
- COOPER, E.; JUNIOR, W. M. M. *Aplicação de Painéis Solares Fotovoltaicos como fonte geradora complementar de energia Elétrica em residências*. Monografia (TCC) — Universidade Federal do Paraná, 2013. Citado na página 19.
- CRESESB. *Potencial Solar - SunData v 3.0*. 2019. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Citado 6 vezes nas páginas 37, 39, 44, 53, 61 e 65.
- CUBAS, J.; PINDADO, S.; MANUEL, C. de. Explicit expressions for solar panel equivalent circuit parameters based on analytical formulation and the lambert w-function. *Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio (ETSIAE)*, Março 2014. Citado na página 36.
- DUBEY, S.; SARVAIYA, J. N.; SESHADRI, B. Temperature dependent photovoltaic (pv) efficiency and its effect on pv production in the world – a review. *ELSEVIER*, 2013. Citado na página 17.
- ENERGIA, M. D. M. E. *BOLETIM MENSAL DE MONITORAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO*. [S.l.], 2020. Citado na página 15.
- FILHO, J. B. de M.; SANTANA, A. de Albuquerque Gomes de. Manutenção preventiva e detectiva em plantas fotovoltaicas aplicando a técnica de regressão linear simples. *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - Gramados*, p. 10, Abril 2018. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.
- FLIR. *Manual do utilizador*. T559591. [S.l.], 2017. Citado na página 56.
- FONTE, S. *ON-GRID X OFF-GRID*. 2019. Disponível em: <<http://solarfonte.com.br/blog/grid-x-grid>>. Acesso em: Setembro de 2019. Citado na página 17.
- HAIR, J. F. et al. *ANÁLISE MULTIVARIADA DE DADOS*. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. Citado na página 34.

- HICKEL, B. M. et al. Análise da influência do acúmulo de sujeira sobre diferentes tecnologias de módulos fv: Revisão e medições de campo. *VI Congresso Brasileiro de Energia Solar*, Abril 2016. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- KURTZ, S. et al. *Performance and Reliability of Photovoltaic Systems*. [S.l.]: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME, 2014. Citado 11 vezes nas páginas 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33 e 34.
- LTD., R. E. C. *HIGH PERFORMANCE POLYCRYSTALLINE MODULE RSM72-6-320P-340P/4BB*. [S.l.], 2017. Citado 3 vezes nas páginas 48, 60 e 64.
- MADUKANYA, U. E. et al. *Fault Inspection by aerial infrared Thermography in a PV plant after a Meteorological Tsunami*. 2018. Citado 10 vezes nas páginas 16, 23, 24, 26, 28, 29, 30, 31, 32 e 34.
- MUNOZ, M. A. et al. Early degradation of silicon pv modules and guaranty conditions. *Elsieve Ltd.*, 2011. Citado 6 vezes nas páginas 24, 25, 26, 29, 31 e 33.
- NASA. *POWER Data Acess Viewer*. 2019. Disponível em: <<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>>. Citado 6 vezes nas páginas 37, 39, 44, 53, 61 e 66.
- NASCIMENTO, L. R. D. *A AVALIAÇÃO DE LONGO PRAZO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO À EDIFICAÇÃO URBANA E CONECTADO À REDE ELÉTRICA PÚBLICA*. Monografia (TCC) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Dezembro 2013. Citado na página 28.
- PEREIRA, T. Q. *DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO REMOTO MICROCONTROLADO PARA ANÁLISE DA PERFORMANCE DE BANCOS DE BATERIAS*. Monografia (TCC) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA-CAMPUS ARARANGUÁ, 2016. Citado na página 22.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. *Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos*. 1. ed. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014. Citado 5 vezes nas páginas 16, 20, 21, 22 e 23.
- PINTO, C. S. B. S. *Validação Experimental do Modelo Cinco Parâmetros e Um Díodo de Painéis Fotovoltaicos*. Dissertação (Mestrado) — Técnico Lisboa, Maio 2016. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- SMA. *Sunny Tripower 15000TL / 20000TL / 25000TL*. [S.l.], 2016. Citado na página 42.
- SOARES, G. M. *MODELAGEM ANALÍTICA E SIMULAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO O MODELO DE CINCO PARÂMETROS*. Monografia (TCC) — INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS – CAMPUS FORMIGA, Junho 2019. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- SOLAR, C. *PV Module Product Datasheet V5.4C1EN*. [S.l.], 2016. Citado na página 42.
- SOLAR, C. *Canadian Solar Datasheet - CS6K-P EN*. Av. Nações Unidas 11857, 14º andar CEP 04578-908, São Paulo, Brasil, 2017. Citado na página 20.
- SOLAR, M. C. *Inversor Grid-Tie 3,0Kw sem WI-FI B&B Power - SF3000TL*. 2019. Disponível em: <<https://www.minhacasasolar.com.br/produto/inversor-grid-tie-3-0kw-sem-wi-fi-beb-power-sf3000tl-79013>>. Citado na página 48.

SOLAR, R. E. *Inversor On-Grid RENO-4K-PLUS*. [S.l.], 2019. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 65.

SOLAR, S. *5 Informações importantes sobre como funciona a Energia Solar Fotovoltaica*. 2019. Disponível em: <<https://www.sakasolar.com/feed-de-posts/5-informa%C3%A7%C3%B5es-importantes-sobre-como-funciona-a-energia-solar-fotovoltaica>>. Acesso em: Setembro de 2019. Citado na página 19.

SOLARMAN. *SolarMan: Monitored Analyzed Networked*. 2019. Disponível em: <<http://solarmanpv.com/>>. Citado 3 vezes nas páginas 50, 51 e 52.

SOUZA, J. P. de. *Módulos Fotovoltaicos - Perdas por Mismatch em Sistemas Fotovoltaicos*. 2019. Disponível em: <<http://www.ecorienergiasolar.com.br/artigo/modulos-fotovoltaicos---perdas-por-mismatch-em-sistemas-fotovoltaicos>>. Acesso em: Setembro de 2019. Citado na página 27.

SPATARU, S. V.; KERKES, T.; SERA, D. Teaching photovoltaic array modelling and characterization using a graphical user interface and a flash solar simulator. *Department of Energy Technology Aalborg University*, Janeiro 2012. Citado na página 27.

TSANAKAS, J. A.; HA, L.; BUERHOP, C. Faults and infrared thermographic diagnosis in operation c-si photovoltaic modules: A review of research and future challenges. *ELSEVIER*, Abril 2016. Citado na página 28.

VATH. *VATH-Guideline: Electrical Infrared Inspections - Low Voltage*. [S.l.], 2018. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 56.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. *ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: CONCEITOS E APLICAÇÕES*. 2. ed. São Paulo: Érica, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 21.

ZORRILLA-CASANOVA, J. et al. Losses produced by soiling in the incoming radiation to photovoltaic modules. *Wiley Online Library*, Fevereiro 2012. Citado na página 28.