

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE INFORMÁTICA**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO**

VINÍCIUS DALLA CORTE

**ANÁLISE DE PONTOS QUENTES UTILIZANDO SENSORES À FIBRA  
ÓPTICA NO MONITORAMENTO DE PAINEL FOTOVOLTAICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2017

VINÍCIUS DALLA CORTE

**ANÁLISE DE PONTOS QUENTES UTILIZANDO SENSORES À FIBRA  
ÓPTICA NO MONITORAMENTO DE PAINEL FOTOVOLTAICO**

Trabalho de Conclusão de Curso como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação, do Departamento Acadêmico de Informática da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Irineu Hattenhauer  
Coorientador: Prof. Dr. Ivo de Lourenço Júnior

PATO BRANCO

2017



## TERMO DE APROVAÇÃO

Às 13 horas e 45 minutos do dia 06 de dezembro de 2017, na sala V108, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco, reuniu-se a banca examinadora composta pelos professores Irineu Hattenhauer (orientador), Kleiton de Moraes Sousa e Cesar Augusto Portolann para avaliar o trabalho de conclusão de curso com o título **Análise de pontos quentes utilizando sensores à fibra óptica no monitoramento de painel fotovoltaico**, do aluno **Vinicius Dalla Corte**, matrícula 01376950, do curso de Engenharia de Computação. Após a apresentação o candidato foi arguido pela banca examinadora. Em seguida foi realizada a deliberação pela banca examinadora que considerou o trabalho aprovado.

---

Irineu Hattenhauer  
Orientador (UTFPR)

---

Kleiton de Moraes Sousa  
(UTFPR)

---

Cesar Augusto Portolann  
(UTFPR)

---

Profa. Beatriz Terezinha Borsoi  
Coordenador de TCC

---

Prof. Pablo Gauterio Cavalcanti  
Coordenador do Curso de  
Engenharia de Computação

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

## AGRADECIMENTOS

Certamente não tenho palavras suficientes para agradecer todas estas pessoas que contribuíram em diversos momentos para que esse trabalho se realizasse.

Agradeço especialmente ao meu professor, Ivo de Lourenço Junior, por toda sua atenção, dedicação, palavras de incentivo e que nos momentos mais difíceis sempre acreditou em mim.

Ao professor Irineu Hattenhauer, que nesta trajetória tornou-se um grande amigo, deixo aqui o meu muito obrigado por toda sua ajuda.

Agradeço à minha família, pelo incentivo e apoio incondicional.

Aos meus colegas André Biffe Di Renzo, Edson Antonio Santolin e Géremi Dranka pelo auxílio durante a realização dos experimentos.

À professora Beatriz Terezinha Borsoi pela ajuda e orientação em vários momentos.

Agradeço aos meus amigos Ekuikui dos Anjos, Gabriel Colferai, Luiz Southier, Paulo Henrique, Rodrigo Moschen e Vagner Kaefer pelo companheirismo no decorrer da universidade.

Enfim, agradeço a todos que me apoiaram em mais esta jornada.

## RESUMO

DALLA CORTE, Vinícius. Análise de pontos quentes utilizando sensores à fibra óptica no monitoramento de painel fotovoltaico. 2017.61f. Trabalho de Conclusão de Curso de bacharelado em Engenharia de Computação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

O presente trabalho apresenta uma análise do comportamento de pontos quentes utilizando sensores à fibra óptica, baseados em redes de Bragg, para o monitoramento de um painel fotovoltaico instalado em ambiente aberto. O estudo busca compreender como estes pontos quentes, que afetam negativamente o rendimento do painel, são formados e qual o seu comportamento ao longo do tempo de operação do painel. Imagens obtidas com uma câmera térmica, na face frontal do painel são utilizadas para determinação das regiões que apresentam os maiores gradientes de temperatura, e os sensores à fibra óptica foram utilizados na tentativa de mensurar os pontos de maiores temperaturas para monitorar o seu comportamento em determinados perfis de operação. A utilização desses sensores permite monitorar um número significativo de pontos de temperatura sobre a superfície frontal do painel fotovoltaico, pois devido as suas dimensões e a sua capacidade de multiplexação, os sensores podem ser organizados em série para monitorar uma grande quantidade de pontos quentes. Foi constatado temperaturas de até 70 °C quando o painel estava em operação. Através dos dados obtidos no monitoramento contínuo dos pontos quentes, constata-se pontos que superaram em até 3,0 °C outros pontos em uma mesma célula.

**Palavras-chave:** Fibras ópticas, Redes de Bragg, Painel fotovoltaico, Pontos quentes.

## ABSTRACT

DALLA CORTE, Vinícius. Hot spot analysis using optical fiber sensors for photovoltaic panels monitoring. 2017.61f. Completion of a Bachelor's Degree in Computer Engineering - Federal Technological University - Paraná. Pato Branco, 2017.

This work presents an analysis of the behavior of hot spots using optical fiber sensors based on Bragg gratings, for the monitoring of a photovoltaic panel. The main goal is to understand how these hot spots, which negatively affect the panel's performance, are formed and how is their behavior over the panel's operating time. Images obtained with a thermal camera on the front face of the panel are used to determine the regions with the highest temperature gradients, and the optical fiber sensors are used to measure the points of higher temperatures monitoring their behavior in certain operating profiles. The use of these sensors allows the monitoring of a significant number of temperature points on the front surface of the photovoltaic panel, because, due to their size and their multiplexing capacity, the sensors can be arranged in series to monitor a large number of hot spots. Temperatures up to 70 ° C were observed, when the panel was in operation. Through the data obtained in the continuous monitoring of the hot spots, points are observed that surpassed in 3.0 °C other points in the same cell.

**Keywords:** Optical fibers, Bragg gratings, Photovoltaic panel, Hot spots.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DESENVOLVIMENTO DA POTÊNCIA INSTALADA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM ESCALA GLOBAL.....	14
FIGURA 2 - COMPONENTES DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO DE SILÍCIO CRISTALINO.....	15
FIGURA 3 - VISÃO GERAL DE UM FEIXE DE LUZ QUE INCIDE EM UM CORDÃO DE FIBRA ÓPTICA E SEUS COMPONENTES.....	17
FIGURA 4 - MODELO DE UMA FBG, MODULAÇÃO LOCAL E PERIÓDICA DO ÍNDICE DE ..... 18	18
FIGURA 5 - MODELO DE ACOPLAMENTO DE UMA ESTREITA FAIXA DE COMPRIMENTOS DE ONDA EM UMA FBG. SITUA-SE NA PARTE ESQUERDA SUPERIOR O ESPECTRO TRANSMITIDO PELA FONTE ÓPTICA DE BANDA LARGA, E O ESPECTRO REFLETIDO COM O COMPRIMENTO DE ONDA RESSONANTE NA LOCALIDADE INFERIOR. À DIREITA SE APRESENTA O ESPECTRO DE TRANSMISSÃO.....	19
FIGURA 6 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....	22
FIGURA 7 - COMPARATIVO ENTRE MEDIÇÕES FEITA PELA CÂMERA IR COM O PAINEL CONECTADO COM CARGA ( $R = 1,7 \Omega$ ).....	24
FIGURA 8 - COMPARATIVO ENTRE MEDIÇÕES FEITAS PELA CÂMERA IR COM O PAINEL EM CURTO-CIRCUITO.....	25
FIGURA 9 - COMPARATIVO ENTRE MEDIÇÕES FEITAS PELA CÂMERA IR COM O PAINEL EM CURTO-CIRCUITO EM DOIS MOMENTOS.....	26
FIGURA 10 - REPRESENTAÇÃO DA FIBRA ÓPTICA APÓS A GRAVAÇÃO DA REDE DE BRAGG ....	27
FIGURA 11 - TÉCNICA DE ENCAPSULAMENTO PARA OS SENSORES FBGS .....	28
FIGURA 12 - FIBRA ÓPTICA APÓS A TÉCNICA DE ENCAPSULAMENTO SER EMPREGADA .....	29
FIGURA 13 - SISTEMA COMPLETO PARA CARACTERIZAÇÃO DE FIBRAS ÓPTICAS COM CIRCULADOR TÉRMICO.....	30
FIGURA 14 - REGRESSÃO LINEAR PARA O SENSOR 1 .....	32
FIGURA 15 - COMPRIMENTO DE ONDA DA REDE DE BRAGG REFLETIDO PELO INTERROGADOR ÓPTICO E APRESENTADO NO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS VIA SOFTWARE.....	33
FIGURA 16 - REPRESENTAÇÃO DE PARTE DA TÉCNICA DE FIXAÇÃO DO CORDÃO DE FIBRA ÓPTICA (A) E EM UM SEGUNDO MOMENTO (B) O ARRANJO DOS SENSORES NA FACE FRONTAL DO PAINEL.....	35
FIGURA 17 - SENSORES FIXADOS NA SUPERFÍCIE FRONTAL DO PAINEL FOTOVOLTAICO.....	36
FIGURA 18 - REPRESENTAÇÃO DE CORTE NA SECÇÃO TRANSVERSAL .....	36
FIGURA 19 - PAINEL FOTOVOLTAICO INSTALADO .....	38
FIGURA 20 - TEMPERATURA MEDIDA PELOS SENSORES FBGS .....	40
FIGURA 21 - TEMPERATURA MEDIDA PELOS SENSORES FBGS .....	41
FIGURA 22 - GRADIENTE DE TEMPERATURA APRESENTADO COM O USO DA CÂMERA IR.....	42
FIGURA 23 - REPRESENTAÇÃO DA FACE FRONTAL DO PAINEL .....	43
FIGURA 24 - TEMPERATURA DO PAINEL OBTIDA PELOS SENSORES FBGS.....	44
FIGURA 25 - IMAGEM TÉRMICA DA CÉLULA EM ANÁLISE COM O PAINEL CONECTADO MANUALMENTE COM CARGA .....	45
FIGURA 26 - TEMPERATURA DO PAINEL OBTIDA PELOS SENSORES FBGS.....	46
FIGURA 27 - IMAGEM TÉRMICA DA CÉLULA EM ANÁLISE COM O PAINEL EM CURTO-CIRCUITO .....	46
FIGURA 28 - REPRESENTAÇÃO DA FACE FRONTAL DO PAINEL .....	47
FIGURA 29 - MEDIÇÕES DO PAINEL OBTIDO PELA CÂMERA IR, CÉLULA C51 .....	48
FIGURA 30 - MEDIÇÕES FEITA PELA CÂMERA IR COM A CÉLULA C61 .....	49
FIGURA 31 - TEMPERATURA DO PAINEL OBTIDA PELOS SENSORES.....	50
FIGURA 32 - COMPARATIVO ENTRE MEDIÇÕES DO PAINEL OBTIDO PELA CÂMERA IR EM DOIS MOMENTOS, CÉLULA C51 .....	51
FIGURA 33 - IMAGEM OBTIDA DO PAINEL COM O USO DA CÂMERA IR, CÉLULA C61.....	51
FIGURA 34 - COMPARATIVO ENTRE MEDIÇÕES DO PAINEL OBTIDO PELA CÂMERA IR, CÉLULA C51.....	52

FIGURA 35 - TEMPERATURA OBTIDA PELO SENSOR 3 INSTALADO NO PAINEL .....	53
FIGURA 36 - IMAGEM OBTIDA DO PAINEL COM O USO DA CÂMERA IR, CÉLULA C61 .....	53
FIGURA 37 - TEMPERATURA OBTIDA PELO SENSOR 2 INSTALADO NO PAINEL .....	54



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações elétricas do painel utilizado, modelo KC85TS .....	21
Tabela 2 – Parâmetros escolhidos para a caracterização dos sensores.....	31
Tabela 3 – Valores de comprimento de onda apresentados para os cinco sensores utilizados	33
Tabela 4 – Valores de temperatura medidos pelos sensores FBGs .....	42

## LISTA DE SÍMBOLOS OU SIGLAS E ABREVIATURAS

$\lambda_B$	Comprimento de onda de Bragg, [nm].
$\xi$	Coefficiente termo-óptico.
$\Lambda$	Período espacial da rede de Bragg, [nm].
$\eta_{eff}$	Índice de refração efetivo do núcleo.
$\Delta\lambda_B$	Varição do comprimento de onda de Bragg, [nm].
$\tilde{\alpha}$	Coefficiente de expansão térmica da sílica, [ $0,55 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ].
$\Delta T$	Varição da temperatura, [ $^\circ\text{C}$ ].

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	10
1.2 OBJETIVOS .....	11
1.3 JUSTIFICATIVA .....	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	14
2.2 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS .....	15
2.3 FIBRAS ÓPTICAS .....	16
2.4 CONCEITOS BÁSICOS DE REDES DE BRAGG .....	17
2.5 REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓPTICAS .....	18
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1 ANÁLISE TÉRMICA DE SUPERFÍCIE COM CÂMERA TERMOGRÁFICA .....	23
3.2 TÉCNICA DE ENCAPSULAMENTO DOS SENSORES FBGs .....	26
3.3 MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS .....	29
3.4 ARRANJO E FIXAÇÃO DOS SENSORES NO MÓDULO FOTOVOLTAICO .....	34
4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	38
4.1 EXPERIMENTO 1 – MONITORAMENTO E OBSERVAÇÃO DA FIXAÇÃO DOS SENSORES NO MÓDULO FOTOVOLTAICO .....	39
4.2 EXPERIMENTO 2 – ANÁLISE DE PONTOS QUENTES DA CÉLULA DE MAIOR AQUECIMENTO COM SENSORES FBGs E CÂMERA TÉRMICA.....	43
4.3 EXPERIMENTO 3 – ANÁLISE DE PONTOS QUENTES EM CÉLULAS ESPECÍFICAS COM SENSORES FBGs E CÂMERA TÉRMICA .....	47
5 CONCLUSÃO.....	55
REFERÊNCIAS .....	57

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A utilização das energias renováveis vem crescendo cada vez mais nos últimos anos pela redução de custos que envolvem essas tecnologias e ao suporte de políticas governamentais. Dessa maneira, é possível reduzir a utilização de recursos fósseis (dentre eles o petróleo, carvão mineral e gás natural) e conseqüentemente a emissão de gases nocivos que causam impactos negativos à atmosfera também decresce. Debates acerca de possíveis soluções para reduzir o progressivo consumo de fontes de energia não renováveis estão cada vez mais presentes no cotidiano das pessoas (WITTMANN, 2014).

Entre as fontes renováveis, a energia solar fotovoltaica é uma das mais abundantes em toda a superfície terrestre e é inesgotável na escala de tempo humano. Por essa razão é uma das alternativas mais promissoras para a composição de uma nova matriz energética mundial e seu aproveitamento tem se consolidado em países como Alemanha, China e Itália onde esse tipo de energia já é utilizado em larga escala e com êxito (VERMA; MIDTGARD; SATRE, 2011).

A energia solar tem um grande potencial energético a ser explorado, principalmente se tomarmos como base países tropicais como o Brasil, onde parte dele (região nordeste e região central) apresenta uma das maiores taxas de irradiação solar do mundo (TORRES, 2012). Em contrapartida, ainda faltam incentivos financeiros para que esta tecnologia seja expandida e cada vez mais aperfeiçoada. É esperado que até 2040 essa seja a fonte renovável de energia mais importante e significativa para o planeta (BRITO et al., 2011).

Os painéis fotovoltaicos utilizam-se da energia solar para realizar a conversão direta da energia eletromagnética (luz) em energia elétrica. Um módulo fotovoltaico é constituído por uma série de células solares que captam a luz do sol, e o desempenho individual de cada célula afeta o desempenho integral do painel (ALVARENGA, 2017).

Os sistemas fotovoltaicos são classificados em autônomos e interligados à rede elétrica. Os sistemas autônomos geram eletricidade independente de outras formas de energia (seja por corrente contínua, corrente alternada ou que fornecem ambas as correntes). Já os sistemas interligados a rede funcionam atuando como uma fonte de energia adicional ao sistema elétrica ao qual está conectado, uma vez que não utilizam armazenamento de energia (MIRANDA, 2013).

A partir de pesquisas nessa área foi possível aumentar o rendimento dos painéis fotovoltaicos permitindo que essa tecnologia seja utilizada em escala crescente, além de resolver diversos problemas relacionados ao acesso à energia elétrica. Uma das pesquisas nesta área, para aumentar o rendimento do painel fotovoltaico, é o estudo sobre a identificação de pontos quentes e o seu comportamento em painéis solares.

Pontos quentes são denominados como pontos com temperatura elevada em regiões específicas das células que compõem um painel fotovoltaico. Normalmente apresentam formato circular, com apenas alguns milímetros de diâmetro (normalmente entre 0,5 e 5,0 mm) e tem como principais causas trincas ou microfissuras em células, que resultam no aumento da resistência à passagem da corrente fotogerada pela região afetada, provocando superaquecimento nesse ponto (SOLHEIM et al., 2013) e consequentemente afetando negativamente o rendimento do painel.

Assim, é de extrema importância conhecer e analisar o comportamento dos pontos quentes que ocorrem em uma célula. Esses pontos possuem características e comportamentos muito particulares, pois dependem de muitos fatores que são relatados na literatura, tais como: tipo de operação do painel, forma de construção da célula, sombreamento da célula, entre outros que ainda estão sendo pesquisados (ANJOS, 2016).

Este superaquecimento que ocorre individualmente em cada célula afeta também o rendimento do painel solar como um todo, e sempre que possível deve ser evitado. Desta maneira, saber como e porquê ocorrem estas anomalias elétricas contribui de maneira significativa em possíveis estudos nesta área, pois uma das formas de avaliar a perda de eficiência nas células é com a utilização de sensores à fibra óptica.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é apresentar a utilização dos sensores à fibra óptica baseados em redes de Bragg no monitoramento contínuo em um painel solar, verificando sua capacidade em medir pontos quentes nas células de um painel. Também será utilizada uma câmera térmica para confrontar os valores de temperatura e para o auxílio da inspeção destes pontos específicos, analisando o comportamento dos mesmos através das variações de temperaturas por um longo período de tempo.

O alcance do objetivo geral passa pelos seguintes itens:

- Determinar os gradientes de temperatura e de possíveis pontos quentes em um painel solar em ambiente aberto, por meio de uma câmera térmica.

- Utilizar uma técnica de encapsulamento dos sensores FBGs (*Fibers Bragg Gratings*).
- Determinar um arranjo para a disposição dos sensores na face frontal do painel.
- Verificar o desempenho dos sensores FBGs com encapsulamento no monitoramento de degradações das células (em específico pontos quentes), por meio da temperatura média do painel nestes locais e análise das características e seu comportamento.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

As fibras ópticas são amplamente utilizadas nos dias de hoje como meio de transmissão de dados pela alta velocidade e baixas perdas de informações, de modo que elas vêm ganhando cada vez mais espaço no cenário atual brasileiro.

Porém, a partir de suas características, a fibra óptica permite também seu uso como instrumento de medição, possibilitando o monitoramento de grandezas físicas e químicas ao longo do tempo, em pontos específicos nos quais outras tecnologias atualmente não são tão bem empregadas pois não são utilizados os sensores tradicionais sobre o painel.

Portanto, a utilização destes sensores para medidas de temperatura torna-se viável, pois a fibra óptica, devido às suas pequenas dimensões, poderá ser utilizada sobre o painel fotovoltaico, não ocasionando sombra sobre as células e conseqüentemente não interferindo no processo de operação do painel. Outra vantagem destes sensores é sua capacidade de multiplexação (permitindo várias redes de Bragg serem gravadas ao longo da mesma fibra óptica) tornando assim possível mensurar uma grande quantidade de pontos sobre a área do painel.

Em painéis fotovoltaicos, é indesejável que se trabalhe a um nível de corrente que exceda a capacidade de curto circuito de uma única célula ou do grupo de células do módulo (RUTHER, 2004), pois as células afetadas são forçadas a uma polarização inversa, dissipando energia que pode causar sobreaquecimento, prejudicando seu desempenho e a possibilidade de danificar completamente o painel. Defeitos em células em um painel têm suas origens em diversas causas, seja por células quebradas (envolvendo trincas ou fissuras), pontos quentes ou contatos rompidos.

Sabendo que pontos quentes apresentam dimensões reduzidas (geralmente na ordem de milímetros, ocasionalmente em centímetros), analisou-se neste trabalho por meio da utilização de sensores FBGs a capacidade destes em medir a temperatura em tais pontos

específicos, pelo fato destes sensores também apresentarem um comprimento típico na ordem de alguns milímetros.

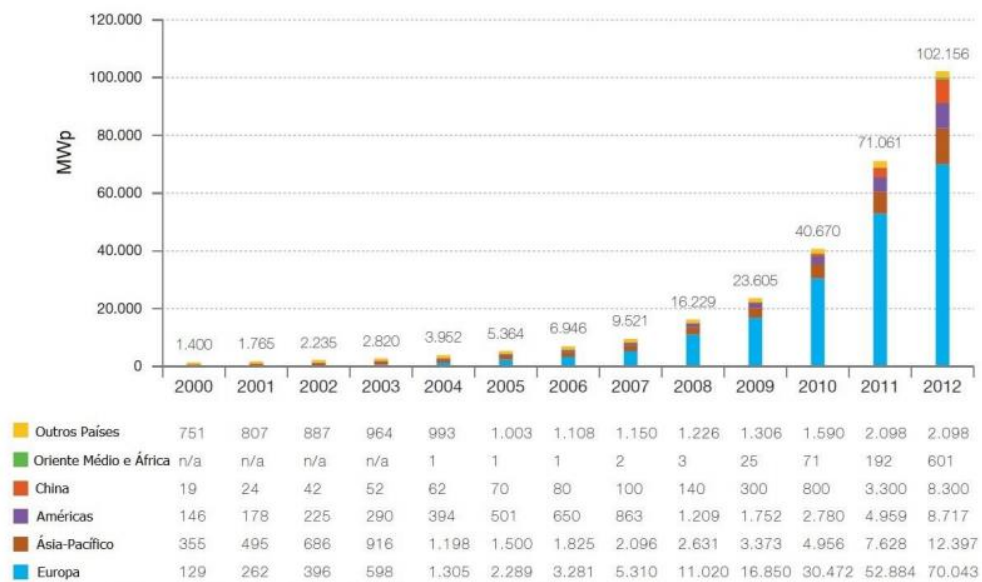
## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

No ano de 1839 Edmond Becquerel observou que a partir da absorção de luz uma célula eletroquímica apresentava uma ddp (diferença de potencial) em seus terminais, dando início ao que se chamou na época de efeito fotovoltaico (RUTHER, 2004).

Com a chegada da crise do petróleo no ano de 1973, novas energias alternativas foram exploradas, para suprir uma eventual dependência dos combustíveis fósseis, surgindo então um grande interesse em aplicações para a energia solar fotovoltaica. Porém, mesmo com esta matéria prima abundante, a geração de energia elétrica só é explorada em grande escala em países como Alemanha, China e Itália, apresentado na Figura 1, uma vez que grandes incentivos fiscais favoreceram o crescimento dos sistemas fotovoltaicos.

Além do aumento significativo de sistemas fotovoltaicos na Europa, observa-se que a China está em crescente evolução também com esta tecnologia. Os preços baixos de módulos fotovoltaicos aliados aos incentivos de programas governamentais favorecem o uso dessa energia, tornando o país um grande exportador de células e módulos fotovoltaicos (PINHO E GALDINO, 2014).



**Figura 1 - Desenvolvimento da potência instalada em sistemas fotovoltaicos em escala global**  
**Fonte: Pinho e Galdino (2014, p.56).**

O principal empecilho por parte da indústria para a difusão em grande escala dos sistemas fotovoltaicos está no custo das células. No ano de 2013 o preço do módulo fotovoltaico de silício cristalino (c-Si) girava em torno de 2,28 R\$/Wp na Europa, de 2,09



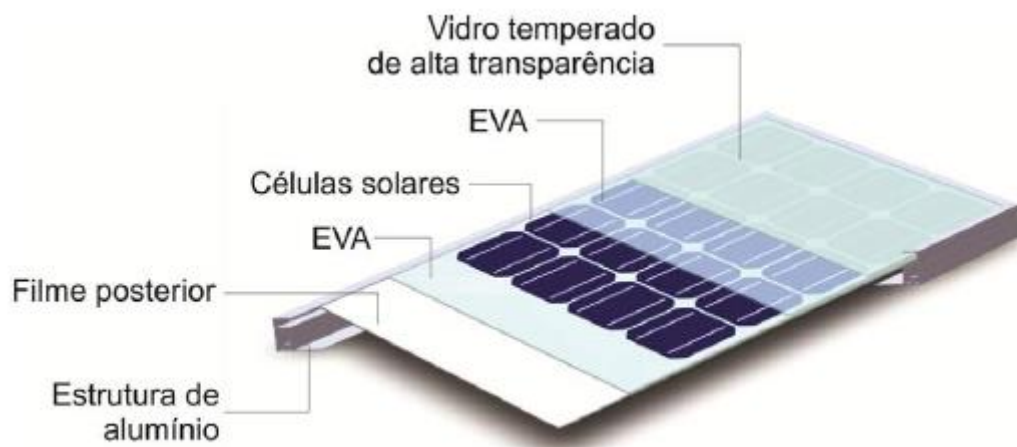
R\$/Wp nos Estados Unidos da América e por volta de 3 R\$/Wp no Brasil (PINHO E GALDINO, 2014).

## 2.2 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Em qualquer sistema solar fotovoltaico o módulo solar caracteriza-se pela célula básica do sistema gerador. As células podem ser associadas em série e/ou paralelo (dependendo da tensão, corrente e potência desejados) decorrentes do tipo de aplicação necessária, para formar o módulo fotovoltaico (RUTHER, 2004).

Em relação à produção e às principais tecnologias utilizadas para a fabricação dos módulos fotovoltaicos, destaca-se o silício, material semicondutor, considerado abundante na Terra (mais de 25% da crosta terrestre é constituída deste material [HAMMOND, 1992]) e é 100 vezes menos tóxico que outros elementos utilizados para a construção das células solares, favorecendo seu uso (SHAH, 1992).

A Figura 2 apresenta os componentes de um módulo fotovoltaico de silício, tecnologia melhor empregada atualmente e que apresenta, segundo Maycock (2003), a maior escala de produção a nível comercial até o ano de 2002.



**Figura 2 - Componentes de um módulo fotovoltaico de silício cristalino**  
 Fonte: Pinho e Galdino (2014, p.56).

Segundo (Ruther, 2004) o rendimento de um gerador fotovoltaico apresenta desempenho ótimo quando iluminado homoganeamente. Porém, uma sombra sobre uma dessas células afeta o sistema como um todo de modo que a célula sobre a qual incidir a menor quantidade de radiação solar é que irá definir a corrente (por consequência a potência)

de operação de todo os elementos a ela conectado em série (considerando que a maioria dos módulos fotovoltaicos utilizam-se de células conectadas em série).

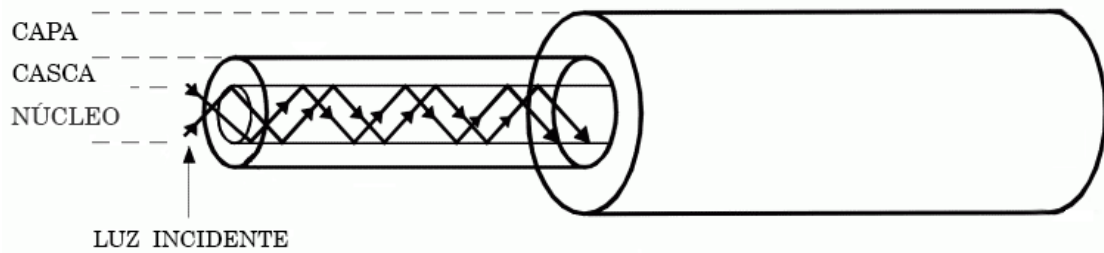
Para a determinação da potência nominal que um módulo é capaz de produzir, informação muito utilizada comercialmente, torna-se necessário realizar testes de ensaios conforme padrões estabelecidos pela STC (Condições de Teste Padrão). Nesse caso, para painéis cristalinos terrestres emprega-se a norma 60904 da IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional) padronizando o valor de variáveis como temperatura da célula, intensidade de radiação solar e massa de ar (SANTOLIN, 2016). Sabendo que a eficiência gerada pelos painéis solares é mensurada em condições de laboratório, torna-se possível a comparação entre os diferentes modelos de painéis utilizados por parte da indústria, que trabalham com energia solar.

Depois de instalado, diferentes parâmetros associados afetam direta ou indiretamente o rendimento do conjunto de módulos fotovoltaicos. O fator principal é a localização geográfica em que se encontram os módulos, uma vez que a radiação solar incidente sobre o módulo é dependente desta orientação. Da mesma forma, há alguns elementos críticos que podem comprometer significativamente o desempenho gerado por este tipo de energia, como: sombreamento parcial, aquecimento excessivo da célula, resistência dos condutores e até mesmo o estado de limpeza do painel (RUTHER, 2004).

Outro fator a ser considerado é de que em um painel fotovoltaico novo ou pouco utilizado, as células normalmente possuem características semelhantes em relação à conversão energética, ao aquecimento e ao resfriamento (TRINURUK et al., 2009, FUENTES et al., 2007). Com o passar do tempo, a eficiência inicialmente considerada uniforme entre as células sofre redução acentuada devido a influência dos ciclos de temperatura, deteriorando gradativamente as conexões, terminais, trilhas e as próprias células (HERRMANN, 2010).

## 2.3 FIBRAS ÓPTICAS

As fibras ópticas convencionais são guias de ondas formadas por materiais dielétricos e sua seção transversal apresenta um núcleo cilíndrico de sílica envolvido por uma casca, também de sílica, porém com índice de refração menor do que a do núcleo. Esta diferença no índice de refração entre as partes permite que a luz possa ser direcionada ao longo da fibra, conforme a lei da reflexão interna total, como exemplificado na Figura 1.



**Figura 3 - Visão geral de um feixe de luz que incide em um cordão de fibra óptica e seus componentes**  
**Fonte: Autoria Própria.**

Há também uma segunda camada, conhecida como revestimento ou capa, com a função de proteger a fibra, isolando o núcleo e a casca do exterior, provendo resistência mecânica à fibra óptica (YIN et al., 2008 apud SANTOLIN, 2016).

#### 2.4 CONCEITOS BÁSICOS DE REDES DE BRAGG

Com o desenvolvimento e aperfeiçoamento da tecnologia das fibras ópticas, permitiu-se que, além de ser empregadas como meio de transmissão, por meio de suas características, seja possível utilizá-las também como sensores de temperatura. Estes sensores aparecem hoje em inúmeras aplicações na engenharia, devido aos estudos na década de 60, nas áreas de otimização de lasers e fabricação de fibras ópticas com altas taxas de transmissão (GRATTAN; SUM, 2000).

Na década seguinte, através da descoberta da fotossensibilidade nas fibras ópticas, houve grande avanço científico para aplicações reais no campo do sensoriamento óptico. A partir de pesquisas nesta área, surgiram as primeiras redes de difração (redes de Bragg), que possuem a capacidade de reflexão do núcleo de uma fibra óptica dopada com um elemento químico (OTHONOS, 1997).

As principais razões para o uso dos sensores FBGs são (GOMES, 2011):

- Tamanho e peso reduzidos: são menores do que os sensores convencionais, podendo atuar em locais onde se permite que apenas sensores de pequenas dimensões atuem. Propriedade esta que possibilita que os sensores sejam inseridos na frente de um painel solar sem que ocorra sombreamento sobre as células do módulo.
- Capacidade de multiplexação: particularidade que permite que vários sensores sejam gravados em série em um único cordão de fibra óptica.
- Imunidade à interferência eletromagnética: as fibras ópticas são feitas de

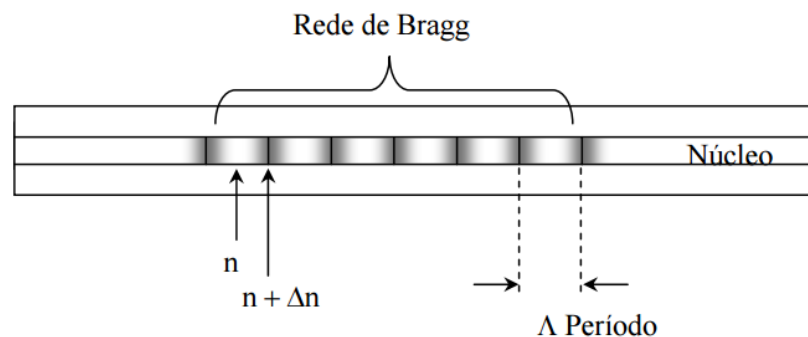
materiais dielétricos (vidro ou plástico normalmente), conhecidos também como isolantes elétricos, tornando-se imunes à interferências eletromagnéticas, descargas elétricas e pulsos eletromagnéticos.

- Alta sensibilidade: característica que permite à rede uma alta sensibilidade e precisão na medição de parâmetros (temperatura, deformação mecânica, pressão, dentre outros) em um ou mais pontos.
- Linearidade de resposta: a rede de Bragg apresenta uma resposta linear entre o deslocamento de onda e a faixa de temperatura em que foi calibrado.
- Segurança: permite o monitoramento com sensores em ambiente hostis, potencialmente perigosos à saúde humana (ambientes com gases corrosivos mas inertes à sílica), nos quais outras técnicas/meios de transmissão poderiam causar danos aos equipamentos de medição.

Por apresentar estas qualidades, vantagens sobre os sensores eletromecânicos convencionais, a utilização dos sensores FBG's tem sido observada em muitas situações, para uma variedade de aplicações por meio de diferentes técnicas, principalmente para a medida de parâmetros físicos e elétricos, como: temperatura, pressão, nível de líquido, aceleração, umidade, corrente, etc (RASHLEIGH, 1980; GOLNABI, 2004 apud CARVALHO, 2010).

## 2.5 REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓPTICAS

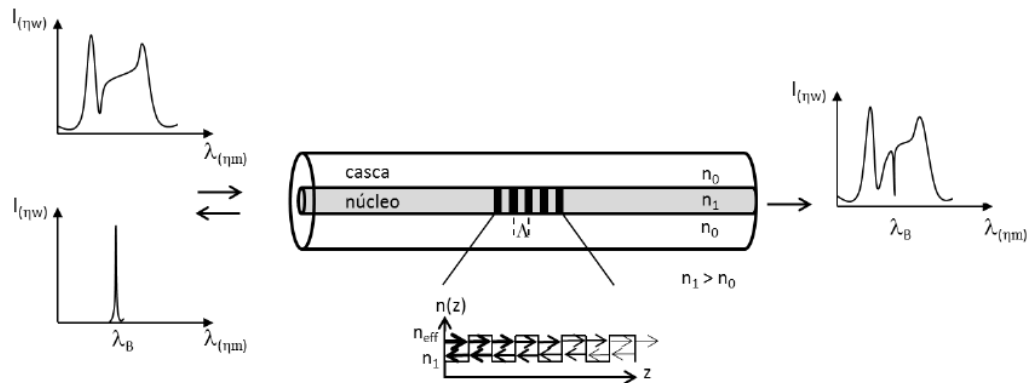
Redes de Bragg em fibras são elementos periódicos de modulação do índice de refração no núcleo da fibra óptica, através do seu eixo de propagação, como pode ser visto na Figura 4 (KUHNE, 2016).



**Figura 4 - Modelo de uma FBG, modulação local e periódica do índice de refração em relação ao núcleo da fibra**  
**Fonte: Quintero (2006, p.21)**

O termo rede de Bragg refere-se à uma homenagem à Willian Henry Bragg e Willian Lawrence Bragg (pai e filho, respectivamente) que em 1915 receberam o prêmio Nobel de Física pelas significativas contribuições à respeito dos estudos de estruturas cristalinas utilizando difração de raios-X (CARVALHO, 2010).

Essas redes inscritas no núcleo das fibras ópticas refletem uma estreita banda de comprimento de onda, atuando como um filtro espectral reflexivo, como visto na Figura 5.



**Figura 5 - Modelo de acoplamento de uma estreita faixa de comprimentos de onda em uma FBG. Situa-se na parte esquerda superior o espectro transmitido pela fonte óptica de banda larga, e o espectro refletido com o comprimento de onda ressonante na localidade inferior. À direita se apresenta o espectro de transmissão.**  
**Fonte: Kuhne (2016, p. 38).**

A Figura 5 representa um desenho esquemático de uma FBG. Quando um espectro de luz incidente se propaga pelo cordão de fibra óptica a rede de Bragg reflete uma parte deste espectro transmitindo o restante. O espectro refletido situado ao lado esquerdo inferior da Figura 5 e se assemelha a um pulso, um estreito comprimento de banda e um pico bem definido. O comprimento de onda refletido de maior intensidade, ou seja o pico do espectro é chamado de comprimento de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ) e pode ser expresso por:

$$\lambda_B = 2\eta_{eff}\Lambda \quad (1)$$

onde  $\eta_{eff}$  expressa o índice de refração efetivo do núcleo e  $\Lambda$  indica o período espacial da modulação do índice de refração.

A equação 1 representa o comprimento de onda de pico do espectro de luz refletido, que está relacionado ao índice de refração efetivo do núcleo ( $\eta_{eff}$ ) e também do período da modulação periódica de índice de refração da rede de Bragg ( $\Lambda$ ). Estas duas variáveis quando submetidas à variações de temperatura, pressão ou esforços mecânicos afetam diretamente o comprimento de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ), devido às propriedades da sílica (CAZO et al., 2000).

Por apresentar sensibilidade à estímulos mecânicos e efeitos de temperatura, uma vez que interferem diretamente no deslocamento total do comprimento da onda de Bragg, permite que a rede atue diretamente como elemento sensor. A equação 2 apresenta a variação total do comprimento de onda de Bragg ( $\Delta\lambda_B$ ):

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{\partial \eta_{eff}}{\partial l} + \eta_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l}\right) \Delta l + 2\left(\Lambda \frac{\partial \eta_{eff}}{\partial T} + \eta_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right) \Delta T \quad (2)$$

onde  $\partial \eta_{eff} / \partial l$  descreve a variação do índice de refração efetivo da fibra devido ao efeito fotoelástico,  $\partial \Lambda / \partial l$  é a deformação mecânica do sensor,  $\Delta l$  representa a variação da deformação mecânica do sensor,  $\Delta T$  é a variação de temperatura no sensor,  $\partial \eta_{eff} / \partial T$  é a variação no índice de refração efetivo da fibra devido ao efeito termo-óptico e  $\partial \Lambda / \partial T$  é a expansão térmica inerente do material da fibra (SANTOLIN, 2016).

Devido à problemas relacionados à sensibilidade cruzada (medição simultânea da temperatura e deformação sobreposta), uma vez que variações na temperatura e deformações mecânicas afetam diretamente  $\lambda_B$ , é de grande importância adotar um método em que se reduza tais efeitos (SANTOLIN, 2016). O procedimento melhor empregado para evitar problemas de sensibilidade cruzada é fazer o encapsulamento da rede de Bragg por meio de um material rígido com baixo coeficiente de expansão térmica ou com valor de coeficiente similar ao da fibra (SONG et al., 2010).

Neste trabalho se aborda como variável de interesse apenas a temperatura, segunda componente da equação 3, simplificando a mesma obtém-se:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta T \quad (3)$$

no qual  $\alpha$  representa o coeficiente de expansão térmica da sílica, sendo aproximadamente  $0,55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  e  $\xi$  descreve o coeficiente termo-óptico considerando o núcleo dopado com germânio e com valor aproximado de  $8,3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (SANTOLIN, 2016).

Em um comprimento de onda de ressonância próximo a 1550 nm observa-se que uma deformação de 1 microstrain ( $\mu\epsilon$ ) resulta em um deslocamento no comprimento de onda de 1,3 pm e uma variação de  $1^\circ\text{C}$  acarreta uma mudança de aproximadamente 10 pm/ $^\circ\text{C}$ , sendo que este valor define a sensibilidade da rede de Bragg (YIN et al.).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a elaboração deste trabalho fez-se o uso de uma câmera termográfica infravermelho modelo TI-25 fabricado pela empresa Fluke, uma vez que com ela foi possível mapear e analisar os gradientes térmicos em um painel solar em ambiente aberto para verificar quais células possuíam maior aquecimento determinando quais pontos específicos devem ser monitorados.

Segundo o fabricante a câmera IR utilizada permite a captura de imagens térmicas apresentadas em um visor de cristal líquido LCD VGA de 640 x 480 pixels, variando sua faixa de temperatura de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  e possui precisão de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  ou 2% (o que for maior). As imagens fornecidas pela câmera IR geram uma matriz de 120x160 pixels, ou seja, 19200 pontos de temperatura, com distância focal mínima da câmera IR de 15 cm (FLUKE CO, 2007).

O painel fotovoltaico modelo KC85TS usado no decorrer dos ensaios foi fabricado pela empresa Kyocera, composto por 36 células de silício policristalino, com potência de 87 W e dimensões de 100,70 cm de comprimento, 65,20 cm de largura e 5,80 cm de profundidade (KYOCERA, 2015). Segundo o fabricante, o painel apresenta as especificações elétricas sob condições em ambiente controlado, demonstrado na tabela 3.

**Tabela 1 – Especificações elétricas do painel utilizado, modelo KC85TS**

<b>Desempenho elétrico sob condições de teste de 1000 W/m<sup>2</sup>, AM 1.5 e temperatura de 25 °C</b>	
Potência máxima (P <sub>M</sub> )	87 W (+10 % / -5 %)
Tensão de potência máxima (V <sub>M</sub> )	17,4 V
Corrente de potência máxima (I <sub>M</sub> )	5,02 A
Tensão de circuito aberto (V <sub>oc</sub> )	21,7 V
Corrente de curto-circuito (I <sub>sc</sub> )	5,34 A
Coefficiente térmico de V <sub>oc</sub>	-82,1 mV/°C
Coefficiente térmico de I <sub>sc</sub>	2,12 mA/°C

Fonte: Autoria própria.

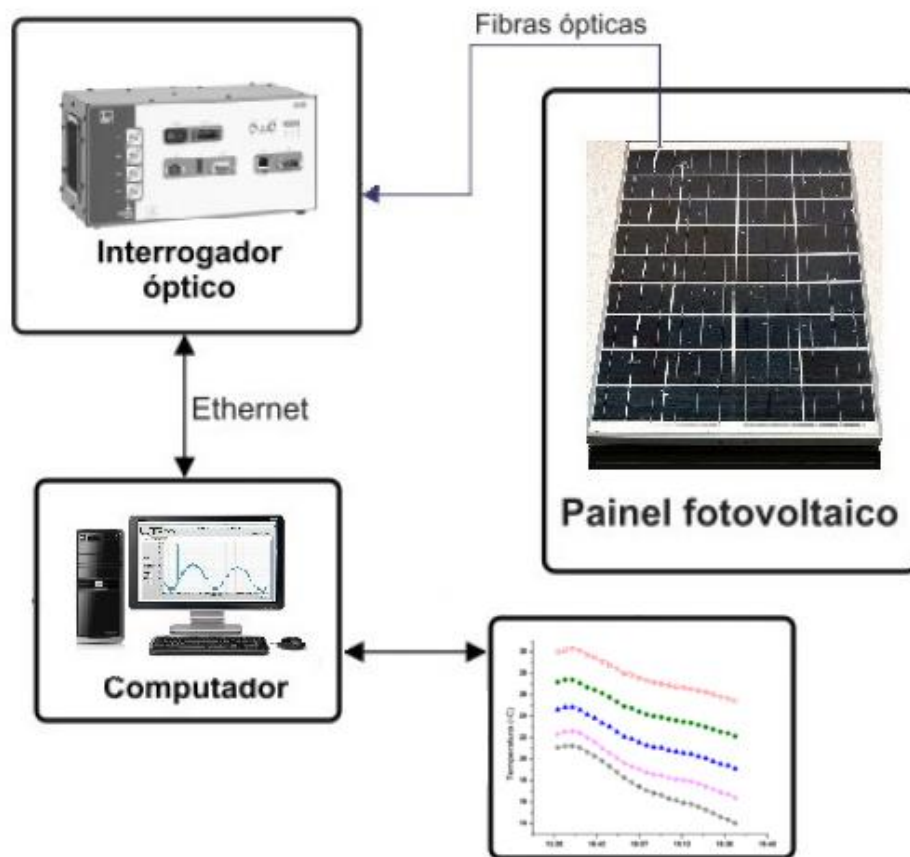
É importante ressaltar que com o passar do tempo o painel vai perdendo suas características originais. Estas perdas elétricas do painel variam conforme sua utilização (perdas por aumento de temperatura, perdas nos inversores, descasamento de módulos, entre outros) e também o modo com o qual o painel é utilizado ao longo do tempo.

A elaboração deste trabalho apresenta uma técnica de medição de temperatura utilizando sensores à fibra óptica em um painel fotovoltaico, em comparativo com uma câmera térmica, com o objetivo de se obter informações sobre o comportamento de pontos

quentes nas células deste painel, suas possíveis causas e como se apresentam nos testes realizados com carga e em curto-circuito.

Devido à indisponibilidade de dados solarimétricos obtidos sobre o painel fotovoltaico, utilizou-se uma abordagem indireta fazendo uso de um luxímetro. O dispositivo mede a intensidade da luz através de seu sensor, e foi posicionado a uma distância de 30 cm à frente do painel solar fotovoltaico, não ocasionando sombra sobre suas células.

Por meio do sistema de aquisição de dados apresentado na Figura 6, obtiveram-se as medidas de temperatura frontal do painel com o uso dos sensores ópticos posicionados sobre as células, onde o sistema registrou as medidas de temperatura em intervalos de 1 segundo, armazenando as informações na base de dados do computador geradas através de um software.



**Figura 6 - Sistema de aquisição de dados**  
**Fonte: Autoria própria.**

Para se obter os dados dos sensores ópticos utilizou-se um interrogador óptico SI101 (equipamento encarregado por medir as informações sensoriadas e registrá-las) fabricado pela empresa HBM, que possui taxa de aquisição de 1 Hz. Este modelo dispõe de uma entrada de



canal óptico, conseqüentemente permite a conexão de apenas um cordão de fibra óptica com os sensores, estes por sua vez foram instalados sobre o painel fotovoltaico (HBM, 2014).

O princípio básico de funcionamento do interrogador óptico consiste em uma fonte de luz sintonizável que ilumina regularmente os cordões de fibra óptica conectados em um único canal, identificando o pico de comprimento de onda central do espectro refletido em cada rede de Bragg, de modo que estes valores são interpretados pelo computador e apresentado no sistema via tabela ou em modo gráfico (SANTOLIN, 2014).

### 3.1 ANÁLISE TÉRMICA DE SUPERFÍCIE COM CÂMERA TERMOGRÁFICA

Com o uso da câmera térmica realizaram-se três ensaios em diferentes dias para se examinar o padrão de aquecimento no painel solar utilizado e também para verificar como se comportava a distribuição de temperatura superficial do mesmo. Pelo fato do painel utilizado não ser novo, com aproximadamente treze anos de fabricação, há grande probabilidade por estudos comprovados na área que devido o tempo de uso, exposição ao sol e intempéries climáticas houvesse algum tipo de deteriorização por parte das células, fazendo com que as mesmas apresentem comportamento não uniforme.

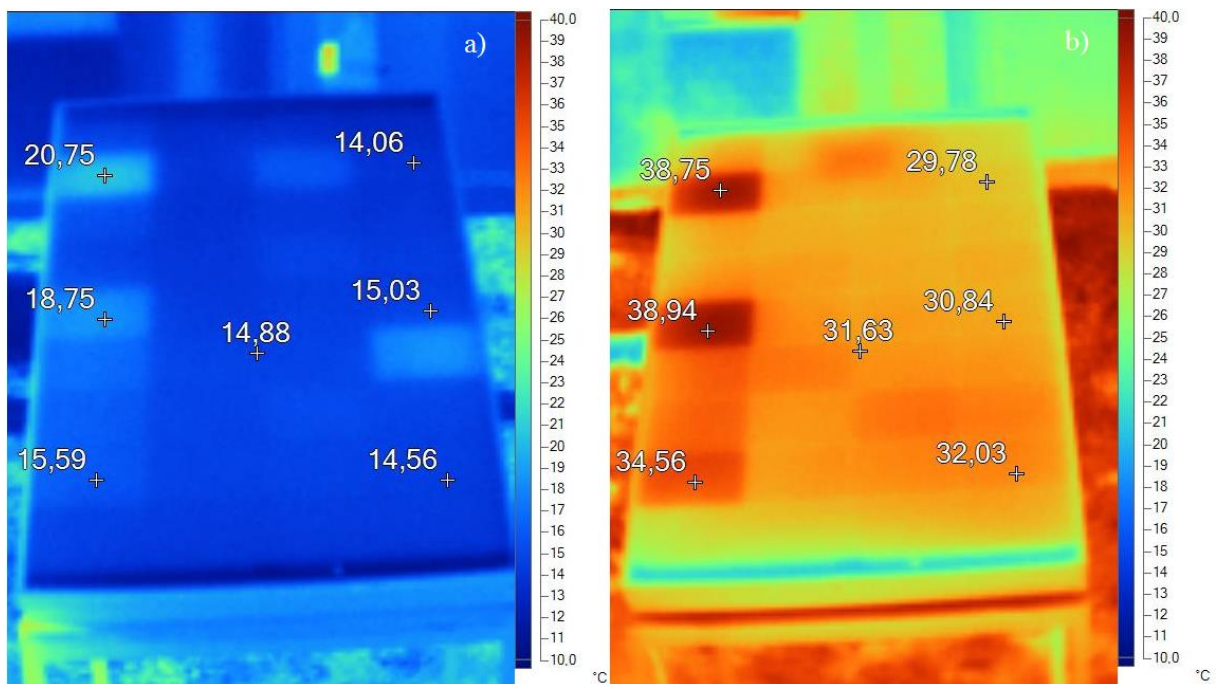
Todas as imagens sofreram pré-processamento por meio da utilização do software de relatório e análise fornecido pelo fabricante, chamado *SmartView*<sup>TM</sup>, que contém diversas características e permite o ajuste fino nas imagens obtidas pela câmera infravermelho, com ferramentas completas de visualização e otimização, facilitando a verificação da temperatura em pontos escolhidos utilizando marcadores fornecidos pelo próprio aplicativo.

O primeiro ensaio realizou-se no dia 13 de julho de 2017, de modo que logo após o painel fotovoltaico ser exposto ao ambiente aberto, demonstrado na Figura 7, iniciou-se o processo de análise e verificação de seu processo de aquecimento sob influência da irradiação solar.

Fez-se a conexão de uma carga resistiva de aproximadamente  $1,7\Omega$ , com o intuito de provocar o aquecimento e elevação da temperatura em todas as células e verificar a ocorrência de anomalias elétricas e outros problemas relacionados à degradação do painel.

Depois de aproximadamente 20 minutos com a carga conectada, Figura 7(a) pode-se verificar o aquecimento de trabalho diferente entre as células do painel, indicando que poderia haver pontos localizados de maior aquecimento nas células (pontos quentes). Após aproximadamente uma hora, Figura 7(b), ainda com a resistência conectada, à medida que a temperatura aumenta no painel, ocorre um desequilíbrio térmico entre as células, chegando a

ter uma diferença de temperatura de aproximadamente 9,0 °C. Um multímetro digital foi utilizado para medir a tensão de 6,3 V e corrente de 3,19 A sobre a resistência elétrica.



**Figura 7 - Comparativo entre medições feita pela câmera IR com o painel conectado com carga (  $R = 1,7 \Omega$  )**

**Fonte: Autoria própria.**

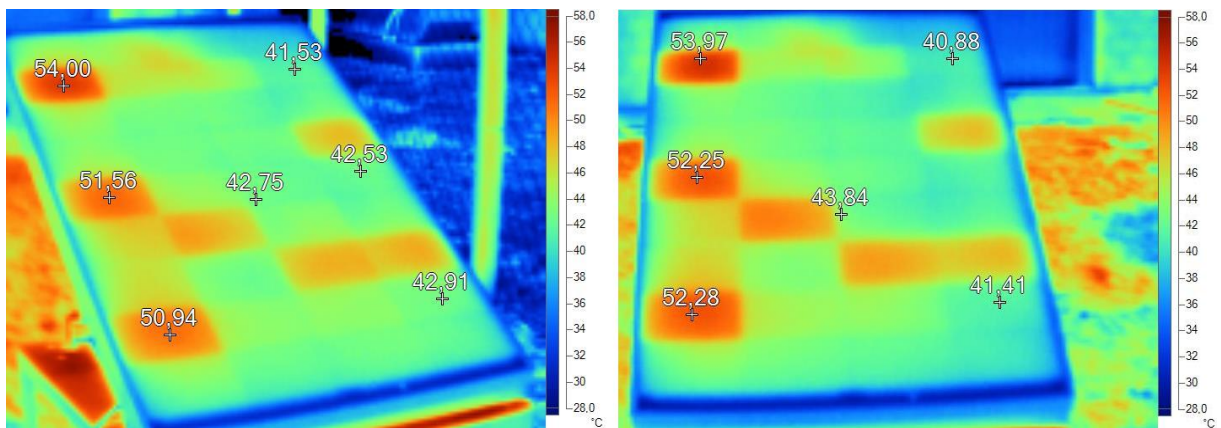
De modo a compreender como a temperatura estava distribuída entre as 36 células, mesmo sabendo que não há um padrão bem definido, principalmente pelo tempo de uso, degradação elétrica e também por fatores não controláveis (nível de radiação solar, ventos, dentre outros) se buscou por meio de repetidos ensaios analisar como se comportava a temperatura das células que constituem o painel.

É importante ressaltar que o foco deste procedimento estava apenas em determinar quais células estariam aquecendo demasiadamente, de modo que não houve a preocupação em se medir a intensidade da radiação solar nestes ensaios.

Assim, o segundo ensaio realizou-se no dia 08 de agosto de 2017, semelhante ao primeiro, se expôs o painel ao ambiente aberto, e verificou-se o comportamento neste dia. Uma diferença entre este e o primeiro ensaio é que ao invés de se conectar o painel com carga, o mesmo foi submetido a um curto-circuito. A mudança na metodologia da resistência para o curto-circuito deve-se ao fato que as condições atmosféricas não eram as mesmas, por exemplo um dia estava nublado e outro havia sol constante, uma vez que o objetivo era apenas o maior aquecimento das células para ser possível a observação dos pontos quentes.

Com o aquecimento ocasionado pela circulação de corrente no painel, o mesmo foi exposto em um período de tempo maior para este segundo ensaio, onde a Figura 8 apresenta dois momentos nos quais se repete o aquecimento de praticamente as mesmas, apresentando um padrão de temperatura entre as células.

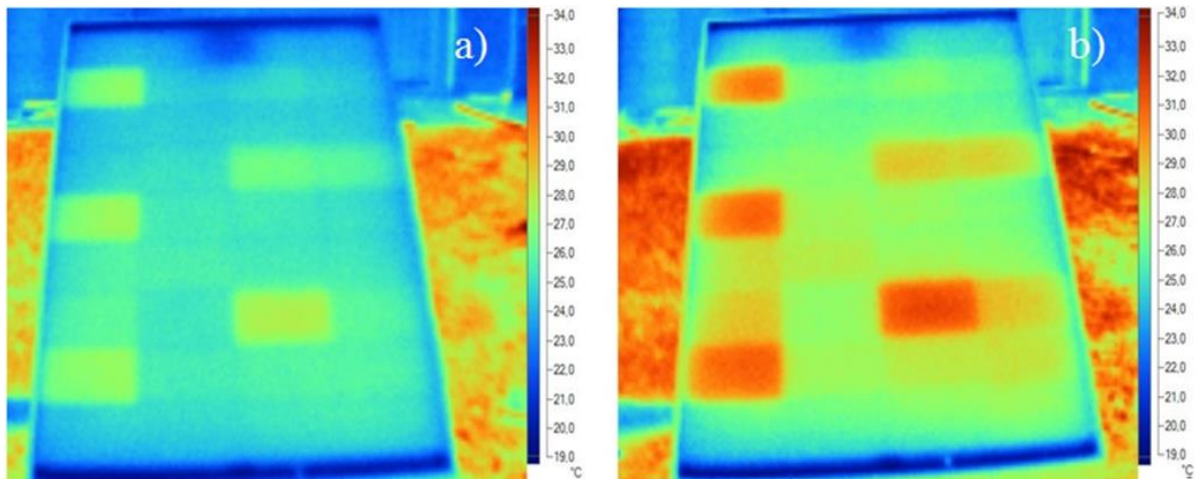
Observa-se um gradiente de temperatura entre as células do painel, e a máxima temperatura medida foi de 53,9 °C, Figura 8(b). Foi realizado outro ensaio para verificar novamente se existiria a incidência do mesmo padrão de comportamento apresentado pelas células referente à temperatura, que se apresentou igual nos primeiros dois testes.



**Figura 8 - Comparativo entre medições feitas pela câmera IR com o painel em curto-circuito**  
**Fonte: Autoria própria.**

O terceiro e último ensaio de análise térmica de superfície com a câmera IR ocorreu no dia 09 de agosto de 2017, demonstrado na Figura 9, novamente exposto o painel ao ambiente aberto, e depois de estabilizado sua temperatura conectou-se os terminais em curto circuito, desta vez em menos tempo (cerca de 10 minutos) observando novamente o aquecimento elevado das células ao lado esquerdo, em relação ao direito.

Foi possível verificar também neste terceiro e último ensaio com o uso da câmera IR que com o painel fotovoltaico em curto-circuito, em dois momentos, elevando-se a temperatura das células, torna-se nítido quais estão aquecendo demasiadamente.



**Figura 9 - Comparativo entre medições feitas pela câmera IR com o painel em curto-circuito em dois momentos**

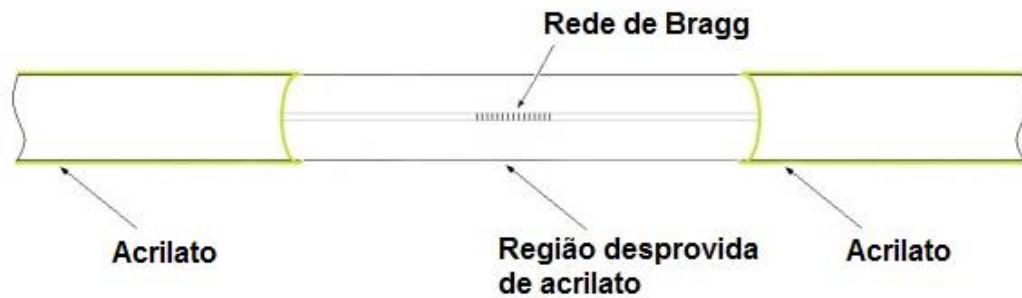
**Fonte: Autoria própria.**

Após a verificação e constatado o maior aquecimento em todos os ensaios em uma faixa de células, se escolheu monitorar com as FBGs pelo fato de possuírem o maior aquecimento, de modo que seria possível que os pontos quentes poderiam coexistir com maior incidência nestes locais.

### 3.2 TÉCNICA DE ENCAPSULAMENTO DOS SENSORES FBGs

Pelo fato de o presente trabalho atuar com medições utilizando um painel solar em ambiente aberto, foi de grande importância adotar uma técnica de encapsulamento para proteger os sensores FBGs, pois a fibra é um dispositivo frágil às intempéries. Esta fragilidade se dá no momento da gravação das redes de Bragg no núcleo da fibra óptica, onde se retira o acrilato que reveste a casca, resultando em uma região que pode variar dependendo da aplicação (entre 5mm e 20mm de comprimento), tornando a fibra suscetível à quebra e rúptil à estímulos mecânicos (SANTOLIN, 2016).

É importante ressaltar que a gravação da rede (faixas tracejadas no núcleo da fibra apresentado na Figura 10) só ocorre depois da retirada do acrilato (material polimerizado que reveste a fibra do desgaste preservando suas propriedades ópticas) (OLIVEIRA, 2012).

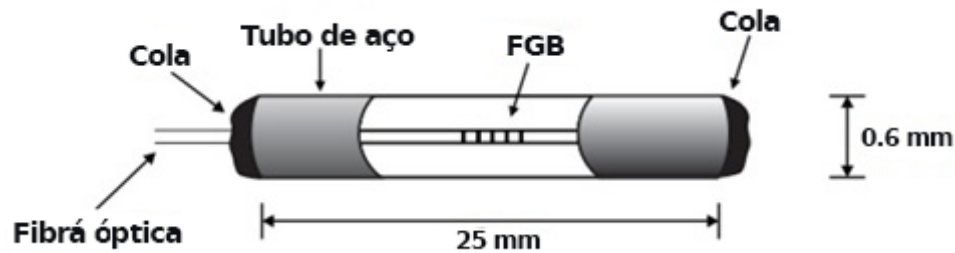


**Figura 10 - Representação da fibra óptica após a gravação da rede de Bragg**  
**Fonte: Adaptado de Oliveira (2012, p. 48).**

Na literatura, diferentes métodos de encapsulamento foram testados e bem empregados adequando-se ao tipo de aplicação necessária, levando-se em conta a faixa de temperatura necessária (em alguns casos chegando à 200 °C) o tipo de ambiente (quimicamente agressivos, de alta alcalinidade e humidades elevadas) e também a acessibilidade técnica e econômica, dentre outros fatores (GALVÃO, 2015).

Em particular, neste trabalho, além do baixo custo, o fator determinante para escolher o método de encapsulamento foi com que se conseguisse por meio desta técnica uma proteção à ventos, estudando procedimentos relacionados que se encaixassem à este tipo de aplicação. Algumas técnicas foram analisadas na literatura e dentre as que foram estudadas destaca-se o encapsulamento fabricado com tubo de aço manganês com melhoramento de contato térmico utilizado por Song e Yu (2010) e fazendo uso de um tubo de aço inox de tamanho reduzido, apresentado por Bortolotti et al. (2014) e Sousa et al. (2014).

Por apresentar um estudo relacionado na área e compreendendo faixas de temperaturas de trabalho similares, a melhor metodologia visando a viabilidade técnica e econômica para o encapsulamento adotado foi o de Santolin (2016), proposto anteriormente por Bortolotti et al. (2014) e Sousa et al. (2014). De acordo com os autores citados, deve-se fazer o uso de um (ou mais dependendo do número de sensores) tubo de metal para arranjar o mesmo com o sensor em seu interior, de modo que as extremidades desse tubo são coladas na fibra, como pode ser visto na Figura 11.



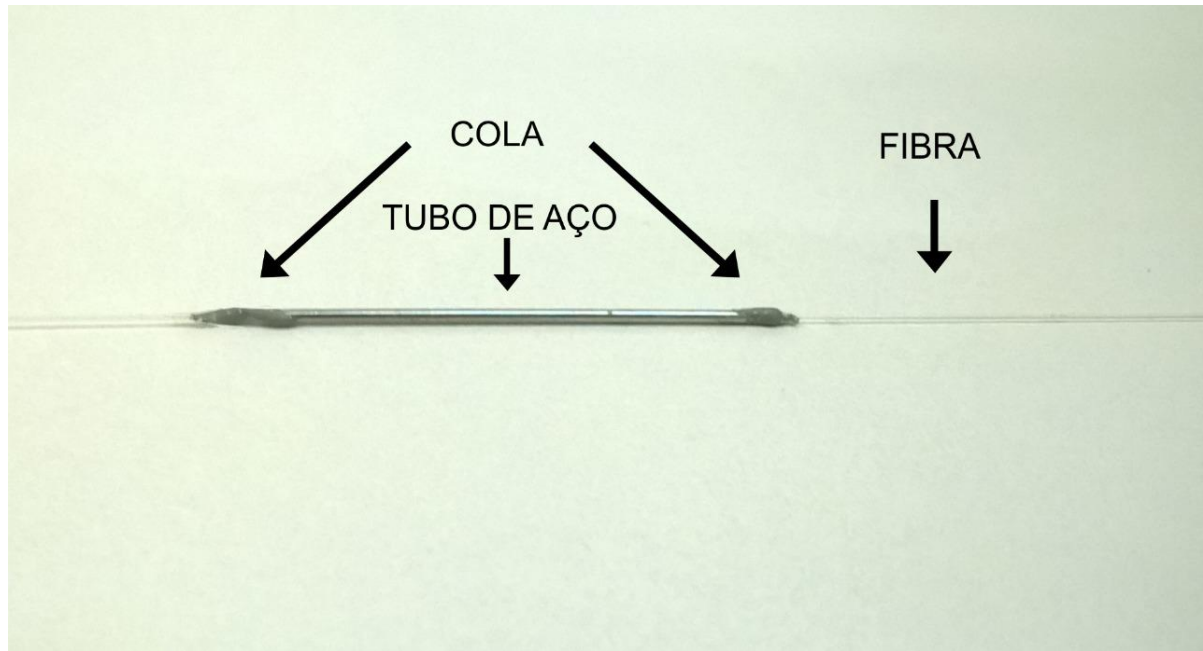
**Figura 11 - Técnica de encapsulamento para os sensores FBGs**  
**Fonte: Adaptado de Bortolotti et al. 2014.**

Segundo Santolin (2016), este procedimento de encapsulamento possui grandes vantagens, pois não gera sombreamento no painel, devido às pequenas dimensões do tubo de metal. Outra particularidade interessante é que por ter suas extremidades coladas ao acrílico do cordão, o núcleo da fibra fica isolado de tensões mecânicas decorrentes da fixação do cordão de fibra na superfície frontal do módulo ou da dilatação térmica de trabalho do painel, eliminando assim problemas relacionados a sensibilidade cruzada (SANTOLIN, 2016).

Desta maneira, empregou-se como referência de tubo de metal um tubo hipodérmico de aço inoxidável modelo 23G1, segundo o fabricante apresenta 25,0 mm de comprimento, diâmetro externo de 0,6 mm e diâmetro interno de 0,4 mm. Depois de se testar modelos semelhantes este foi o padrão de tubo que apresentava menor diâmetro e um comprimento mínimo que garantiria a proteção total da região que o núcleo estava exposto (15,0 mm) e um espaço que possibilitasse a colagem nas extremidades do tubo no acrílico, aproximadamente 3,0 mm cada extremidade, se encaixando perfeitamente para esta aplicação.

Dos cinco sensores encapsulados a Figura 12 representa um (de um total de cinco) sensor encapsulado, de modo que em cada extremidade da agulha foi utilizada cola pastosa da marca araldite fix bi componente à base de resina epóxi a prova d'água. Conforme o fabricante informa, possui alto poder de adesão para diversas superfícies, incluindo o vidro (material que compõe o painel solar) além de baixo poder de escorrimento permitindo aplicações em superfícies verticais, ideal para esta função.





**Figura 12 - Fibra óptica após a técnica de encapsulamento ser empregada**  
**Fonte: Autoria própria.**

O procedimento de encapsulamento tornou os sensores mais resistentes à esforços mecânicos e à intempéries climáticas, facilitando a aplicação direta no monitoramento da temperatura, melhor explicados na seção 3.4. Depois de completo, para cada um dos cinco sensores, fez-se necessário o processo de caracterização, apresentado na seção a seguir.

### 3.3 MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS

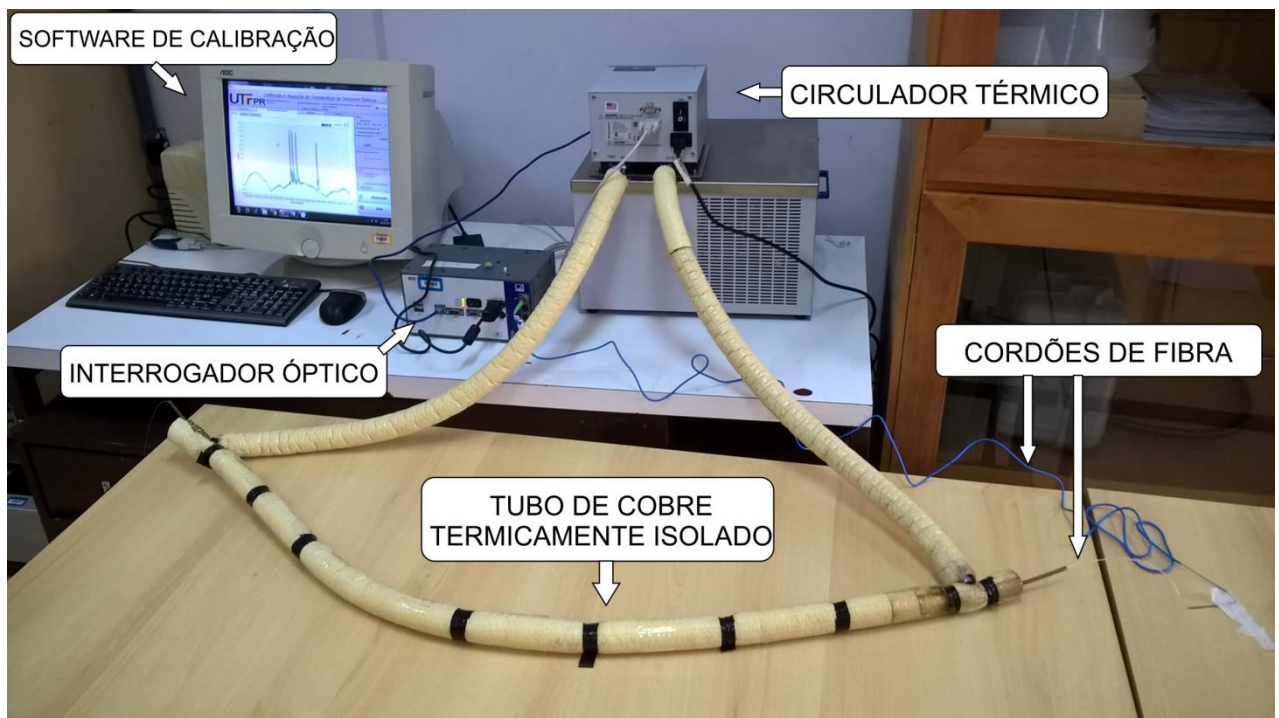
O método de caracterização das fibras ópticas é essencial para a determinação da função característica de cada um dos sensores possibilitando a utilização dos mesmos como sensores de temperatura, de modo que por meio da sensibilidade térmica relaciona-se a dependência de temperatura com a expressão do comprimento de onda.

Por ser mais conveniente, preferiu-se trabalhar com um sistema completo que realizasse de forma automática a calibração dos sensores ópticos e efetuasse a medição de temperatura. Sendo assim, as fibras ópticas foram dispostas em um tubo de cobre oco com aproximadamente 4,0 mm de diâmetro interno e 6,0 mm de diâmetro externo, que permite a passagem de água destilada em um fluxo contínuo, dentro da faixa de temperatura dos ensaios realizados.

Fez-se o controle da temperatura através de um circulador térmico de imersão (também conhecido como banho térmico) da marca Polyscience, modelo 9002A11B, com

precisão de 0,25 °C, estabilidade térmica de  $\pm 0,01$  °C com faixa de temperatura de trabalho de -20,0 °C a 200,0 °C (POLYSCIENCE, 2015; SANTOLIN, 2016). O ensaio foi realizado em laboratório, ambiente monitorado e com temperatura controlada via ar condicionado a 22,0 °C.

Após o sistema completo estar integrado e apto para funcionamento, como se apresenta na Figura 13, com o cordão de fibra óptica imerso no banho térmico e com o auxílio do *software* “Sistema para Calibração e Aquisição de Temperatura de Sensores à Fibra Óptica”, foi possível iniciar o processo de caracterização dos sensores.



**Figura 13 - Sistema completo para caracterização de fibras ópticas com circulador térmico**  
**Fonte: Autoria própria.**

Após a determinação das configurações desejadas e os parâmetros que foram utilizados para a caracterização dos sensores, demonstrados na tabela 2, o programa efetua de forma automática o processo por completo. Como a temperatura inicial foi determinada para 10 °C, ao atingir este valor o programa define o primeiro degrau térmico, faixa de temperatura de aquisição oscila entre 9,9 °C e 10,1 °C, logo os valores de temperatura e comprimento de onda coletados estão distribuídos nessa faixa. Para determinar qual o valor de temperatura teve maior número de ocorrência, o programa faz um histograma com os dados coletados. O processo se repete a cada 10 °C, efetuando seis degraus até atingir a temperatura final de 60 °C, com variação do próprio programa de  $\pm 0,1$  °C.



**Tabela 2 – Parâmetros escolhidos para a caracterização dos sensores**

Parâmetro	Valor
Número de ensaios	3
Faixa de temperatura	10,0 °C a 60,0 °C
Variação Utilizada	0,1 °C
Número de degraus	6
Modo de degraus	Sobe/Desce
Temperatura de cada degrau	10,0 °C
Tempo de duração de cada degrau	10 minutos
Taxa de aquisição	1 Hz
Resolução do interrogador	0,001 nm
Tempo total aproximado utilizado	7 hrs 31min 59 seg
Resolução do circulador	0,25 °C

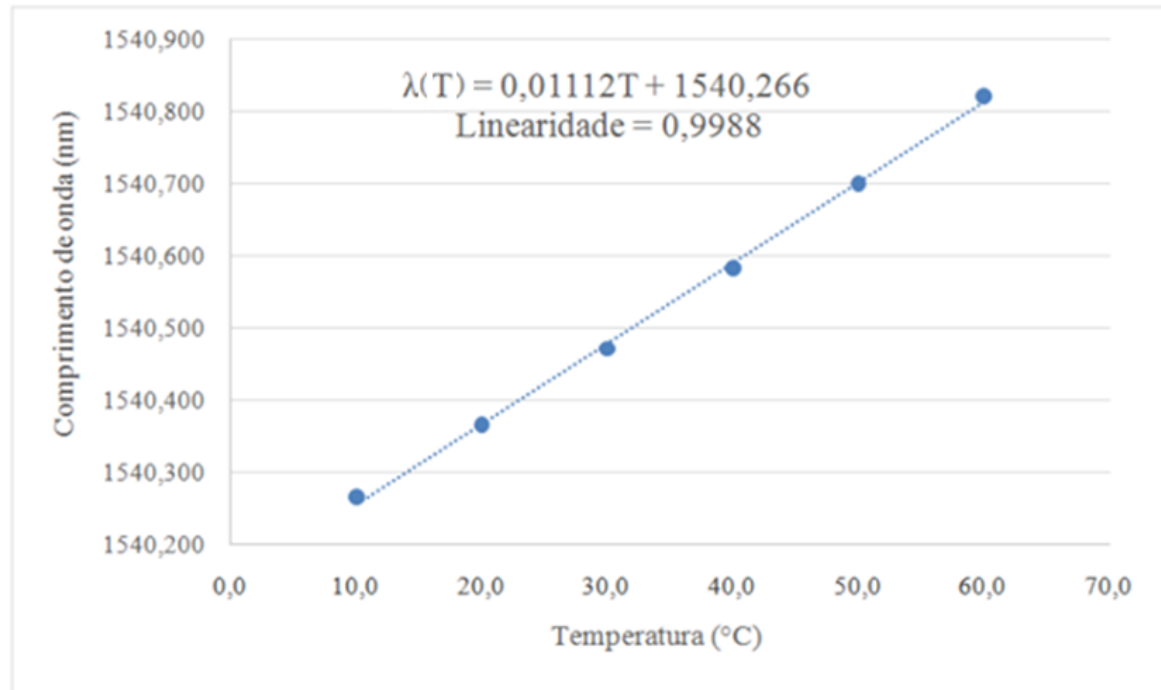
Fonte: Autoria própria.

Ao final da calibração, o *software* apresenta todos os cálculos necessários para se obter a função que relaciona a variação do comprimento de onda de cada um dos sensores com a temperatura, e também calcula as incertezas dos sensores em cada degrau. Além de serem apresentados, estes são salvos em arquivos de texto padrão.

Segundo Oliveira (2012) a sensibilidade térmica esperada para uma rede de Bragg em 1550 nm é de aproximadamente 10 pm/°C, uma vez que este sensor não esteja encapsulado. Desta forma, buscou-se compreender como o encapsulamento iria interferir nos valores de sensibilidade para os sensores utilizados.

Por meio dos dados fornecidos pelo programa e com o auxílio do *software* Excel, fez-se a regressão linear de modo a obter a equação da reta correspondente para um dos sensores escolhido de forma arbitrária (processo análogo aos demais) por meio do método dos mínimos quadrados.

Por meio da regressão linear apresentada, calcula-se o valor da sensibilidade térmica do sensor com encapsulamento, que é numericamente igual ao coeficiente angular da reta apresentada, e seu valor é de 11,12 pm/°C. Na Figura 14, identifica-se também a faixa de temperatura em que o sensor foi calibrado, de 10,0 °C até 60,0 °C.

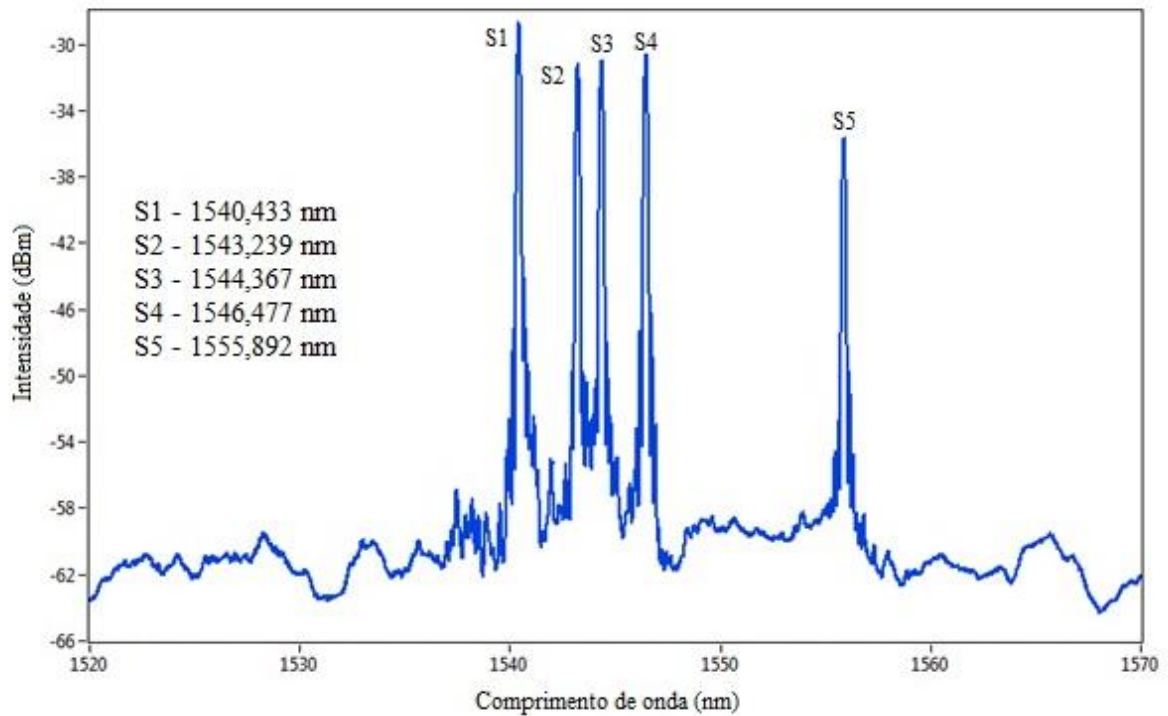


**Figura 14 - Regressão linear para o sensor 1**  
**Fonte: A autoria própria.**

Por meio do *software* foi possível também identificar o pico dos cinco sensores FBGs inscritos na fibra óptica, indicados em azul através do espectro na Figura 15, onde o eixo horizontal retrata o comprimento de onda (nm) e ao eixo vertical têm-se a potência da luz refletida expressa em decibéis.

É essencial a verificação do espectro de cada um dos sensores utilizados por meio do *software* antes do processo ser iniciado a fim de observar se não há nenhum problema físico relacionado aos sensores, de modo que esse problema podem alterar o número de sensores no programa durante a calibração, danificando o processo.

A Figura 15 apresenta o espectro dos cinco sensores utilizados. Analisando o gráfico é possível observar que a intensidade do primeiro pico (referente ao sensor 1) possui um comprimento de onda de 1540,433 nm. Para o sensor 2 é possível perceber um pico característico de 1543,239 nm. Da mesma forma o sensor 3 apresenta um pico de 1544,367 nm, 1546,477 nm para o sensor 4 e 1555,892 nm para o sensor 5.



**Figura 15 - Comprimento de onda da rede de Bragg refletido pelo interrogador óptico e apresentado no sistema de aquisição de dados via software**

**Fonte: Autoria própria.**

O sistema de calibração e aquisição de temperatura de sensores ópticos utilizado apresenta em tempo real o espectro e o comprimento de onda exato para cada um dos sensores identificados (neste caso cinco, conforme tabela 3) sabendo que o valor do pico de  $\lambda_B$  varia conforme a temperatura em que se encontra cada sensor.

**Tabela 3 – Valores de comprimento de onda apresentados para os cinco sensores utilizados**

Canal 1	Comprimento de onda (nm)
Sensor 1	1540,433
Sensor 2	1543,239
Sensor 3	1544,367
Sensor 4	1546,477
Sensor 5	1555,892

**Fonte: Autoria própria.**

Por fim, após a calibração concluída para os cinco sensores utilizados neste trabalho, os mesmos estavam aptos a serem utilizados na determinação da temperatura.

### 3.4 ARRANJO E FIXAÇÃO DOS SENSORES NO MÓDULO FOTOVOLTAICO

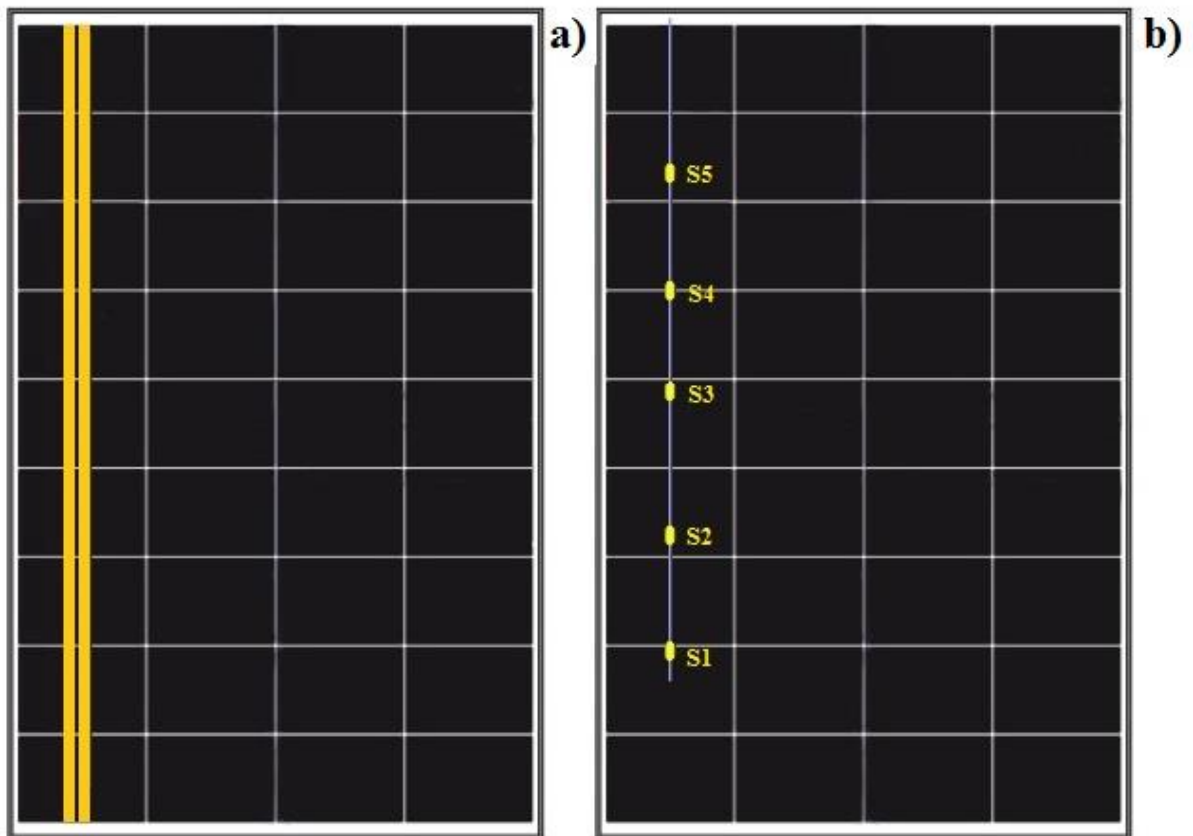
Para que a fibra não ficasse suspensa sobre as células, foi utilizada uma técnica de modo que fosse possível ordenar e fixar os sensores em um local pré-determinado, na face frontal do painel fotovoltaico. Utilizou-se um procedimento em que possibilitasse ao cordão com o sensor uma resistência física a ventos fortes e que houvesse um bom contato entre o vidro e a fibra, uma vez que se não ocorresse tal fato, interferiria negativamente nas medições de temperatura.

Devido a possibilidade de reutilização do cordão de fibra óptica, preferiu-se não utilizar colas instantâneas e super-resistentes, de modo que seria muito difícil fazer a separação posteriormente, sem causar dano à fibra ou o vidro.

De acordo com Santolin (2016), se observou a potencialidade de usar pasta térmica à base de silicone tanto como agente melhorador do contato térmico quanto elemento fixador para o cordão, visto que sua boa condutividade térmica (excelentes condutores), alta viscosidade e podendo atingir elevada temperatura, se mostrou interessante em aplicações envolvendo painéis solares e fibras ópticas.

A pasta térmica utilizada neste trabalho é de consistência pastosa e à base de silicone (modelo IPT) e segundo o fabricante possui condutividade térmica de 0,4 W/mk e ponto de gota inexistente, utilizada para melhorar a condução térmica entre dois meios, neste caso a fibra óptica e o vidro, e pode operar em temperaturas de até 300 °C.

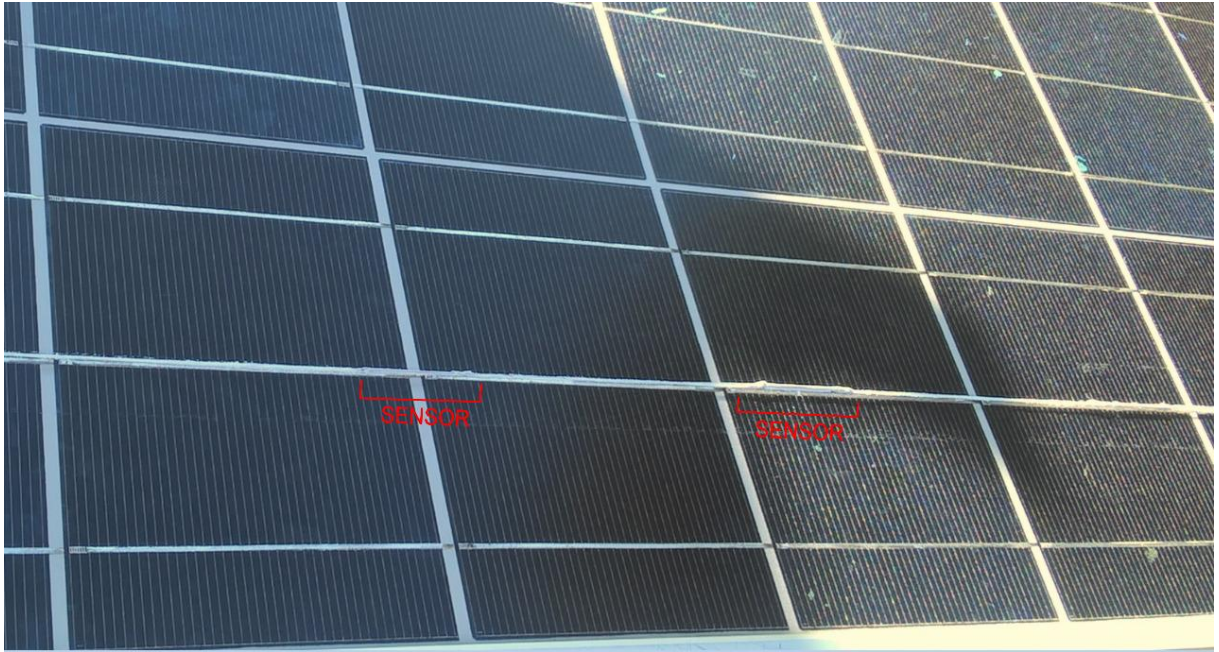
Definido o meio com o qual o cordão iria se dispor sobre o painel, criou-se uma estreita trilha de pasta térmica entre duas tiras de fita comum na superfície frontal do painel (representadas em amarelo escuro na Figura 16), ajustando o cordão de fibra óptica em cima do local aonde a trilha foi feita, onde após a estabilização completa do cordão e após um tempo após a pasta secar a mesma foi removida



**Figura 16 - Representação de parte da técnica de fixação do cordão de fibra óptica (a) e em um segundo momento (b) o arranjo dos sensores na face frontal do painel**  
**Fonte: Autoria própria.**

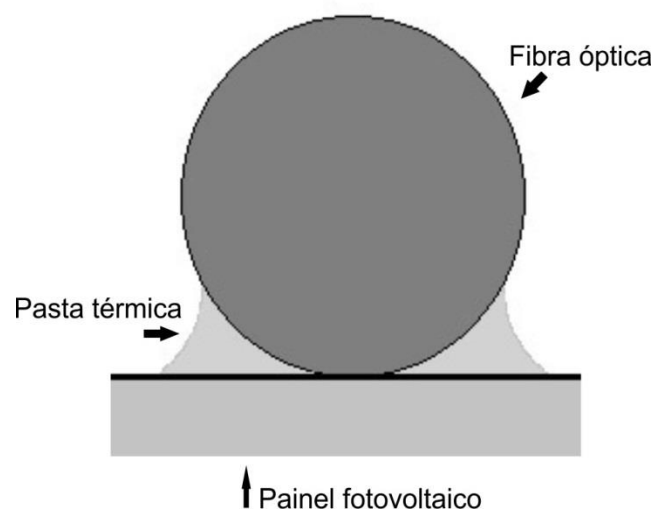
Em um primeiro momento não foi necessário realizar o ajuste de nenhum dos cinco sensores fixados entre a fibra e o vidro, pois o cordão não apresentou instabilidade no momento em que a fita foi retirada e tampouco no momento em que se levou o painel ao local das medições, deixando o cordão imóvel na superfície do vidro, de modo que seria analisado em um segundo momento o contato térmico por meio de ensaios.

Dois sensores encapsulados são apresentados na Figura 17 evidenciando a trilha feita com a pasta térmica na parte frontal do painel fotovoltaico, sem apresentar excessos de cola. Na extremidade do cordão de fibra óptica fez-se um guia com um pequeno tubo de termoplástico para evitar que o cordão tenha pequenos deslocamentos com incidências de ventos, deixando a fibra firme e estável, uma vez que a mesma se movimentasse poderia interferir nas medições.



**Figura 17 - Sensores fixados na superfície frontal do painel fotovoltaico**  
**Fonte: Autoria própria.**

O desenho esquemático que pode ser observado na Figura 18 representa um dos cinco sensores instalados apresentando o comportamento ideal que se buscou atingir por meio da pasta térmica com a técnica de fixação das fibras, sem deixar falhas, limpando os excessos de cola que ficaram para não causar sombreamento ou efeitos negativos nas medições e ensaios que seriam realizados. É importante ressaltar que para o bom contato térmico toda a área da fibra óptica deve estar em contato com o vidro.



**Figura 18 - Representação de corte na secção transversal por meio da técnica de fixação do cordão de fibra óptica**  
**Fonte: Autoria própria.**

Depois de uma inspeção visual, foi realizado o comparativo com o auxílio de uma câmera térmica, de modo a verificar a qualidade do contato térmico com a superfície do painel em cada um dos cinco sensores, que será apresentado e discutido na seção 4.1.



#### 4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Após a etapa de fixação dos sensores sobre o painel fotovoltaico ser concluída, iniciou-se os procedimentos experimentais, onde todos os testes foram realizados no POLITEC da UTFPR *campus* Pato Branco (latitude: 26°13'43" S, longitude: 52°40'14" W e altitude: 761 metros) em ambiente aberto conforme apresentado na Figura 19.



**Figura 19 - Painel fotovoltaico instalado**  
**Fonte: Autoria própria.**

O painel fotovoltaico está fixado em uma estrutura de metal com uma inclinação de 35° com a horizontal. Esta configuração permite ao painel ser orientado conforme desejado.

Como o intuito do trabalho não visava a produção de energia com o mesmo, buscou-se situar o painel em uma orientação geográfica que não houvesse sombras durante o horário referente às medições, maximizando a incidência solar nos horários de trabalho, ocasionando



sombreamento apenas no período da tarde quando o sol está para se por ao oeste geográfico. É importante destacar que a orientação correta para a geração de energia utilizando um painel fotovoltaico é voltado para o norte geográfico e como citado anteriormente, o foco deste trabalho não era analisar a geração de energia elétrica.

Realizaram-se diferentes ensaios verificando a temperatura apresentada pelos sensores instalados e pela câmera infravermelho, por meio de cargas resistivas conectadas manualmente ao painel, visando através do controle destas provocar o aquecimento das células e permitir a visualização de problemas térmicos nas células do painel.

#### 4.1 EXPERIMENTO 1 – MONITORAMENTO E OBSERVAÇÃO DA FIXAÇÃO DOS SENSORES NO MÓDULO FOTOVOLTAICO

O primeiro ensaio se realizou no dia 24 de agosto de 2017 e teve como objetivo mensurar o valor da temperatura obtida por meio dos sensores à fibra óptica em comparação com a câmera térmica, verificando o comportamento dos mesmos (pois o painel já se encontrava em ambiente externo) bem como a fixação adotada (bom contato entre o tubo de aço e o vidro) e se a técnica não iria ocasionar sombreamento no local onde estavam instalados.

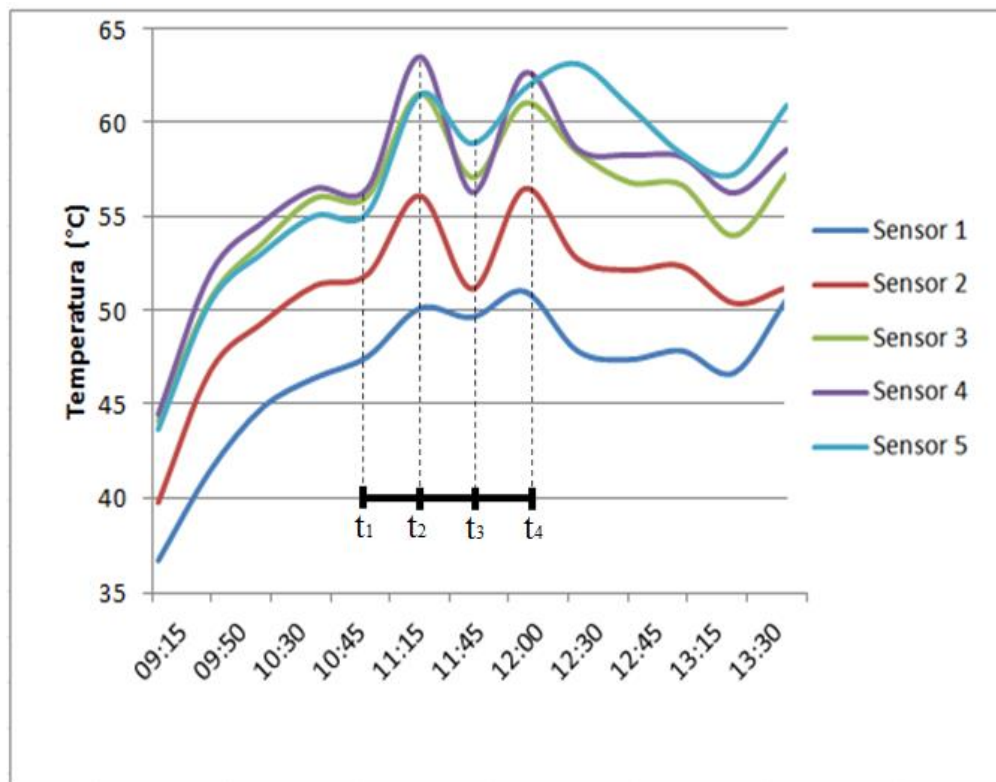
Neste primeiro ensaio avaliou-se a temperatura advinda dos cinco sensores FBGs por aproximadamente quatro horas, iniciando-se as medidas às 09h15min e com término às 14h20min, de modo que neste intervalo de tempo foi possível observar o comportamento linear de resposta dos sensores principalmente em momentos de variação da irradiação solar e velocidade do vento.

Como no período de realização deste trabalho o piranômetro (instrumento utilizado para a medição da intensidade da radiação solar) estava em manutenção e não pode ser utilizado, foi utilizado um luxímetro apenas para sinalizar os intervalos de tempo onde havia maior ou menor intensidade de irradiação solar.

No início das medições, se observou com o uso do luxímetro um valor medido de iluminância de aproximadamente 452 lux, aumentando este valor gradativamente à medida que se chegava ao meio-dia solar (horário de máxima intensidade de radiação solar) chegando um valor máximo de 664 lux às 11h25min, como demonstra a Figura 20.

Nos instantes  $t_1$  e  $t_3$  o painel foi submetido ao curto-circuito com o intuito de averiguar se os sensores respondiam bem e aumentavam de fato sua temperatura, de modo que o

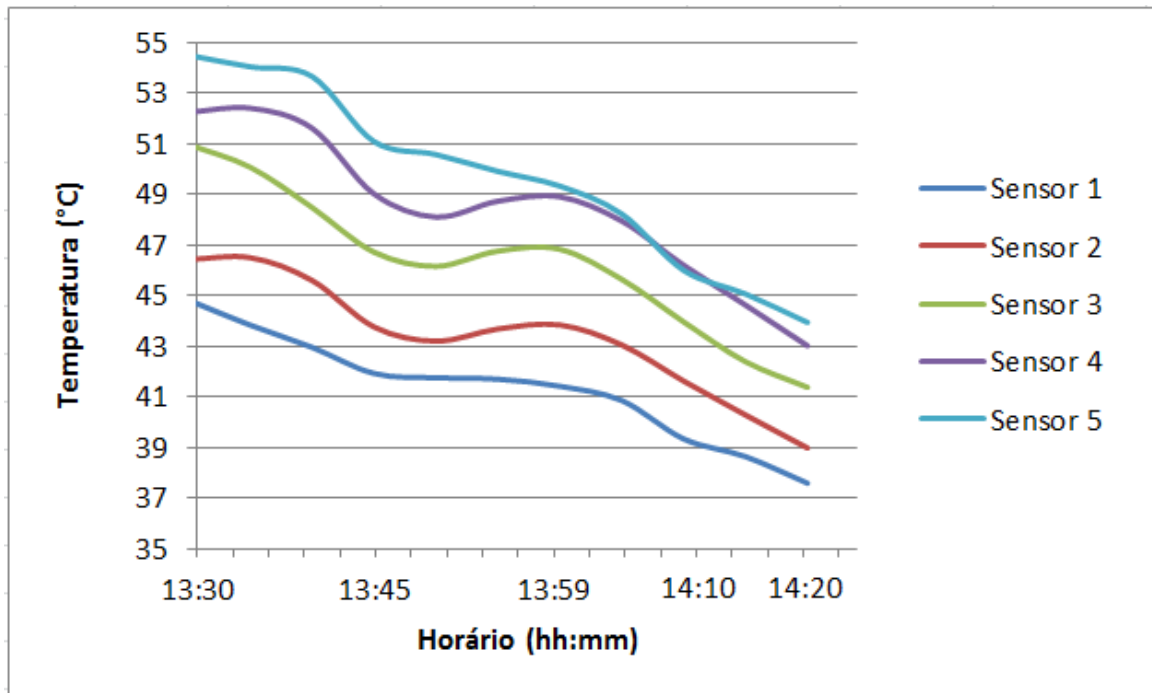
circuito foi aberto nos instantes  $t_2$  e  $t_4$  fazendo com que a temperatura das células consequentemente diminuíssem.



**Figura 20 - Temperatura medida pelos sensores FBGs**  
**Fonte: Autoria própria.**

Outra evidência do bom comportamento de resposta apresentada pelos sensores utilizados foi observada em um momento de sombreamento parcial do módulo fotovoltaico, de modo que o luxímetro utilizado decaiu linearmente seu valor em lux de 578 às 13h30min para 410 às 14h20min (pelo fato da incidência solar decair) e consequentemente os detectores instalados rapidamente modificaram sua temperatura, apresentada na Figura 21.

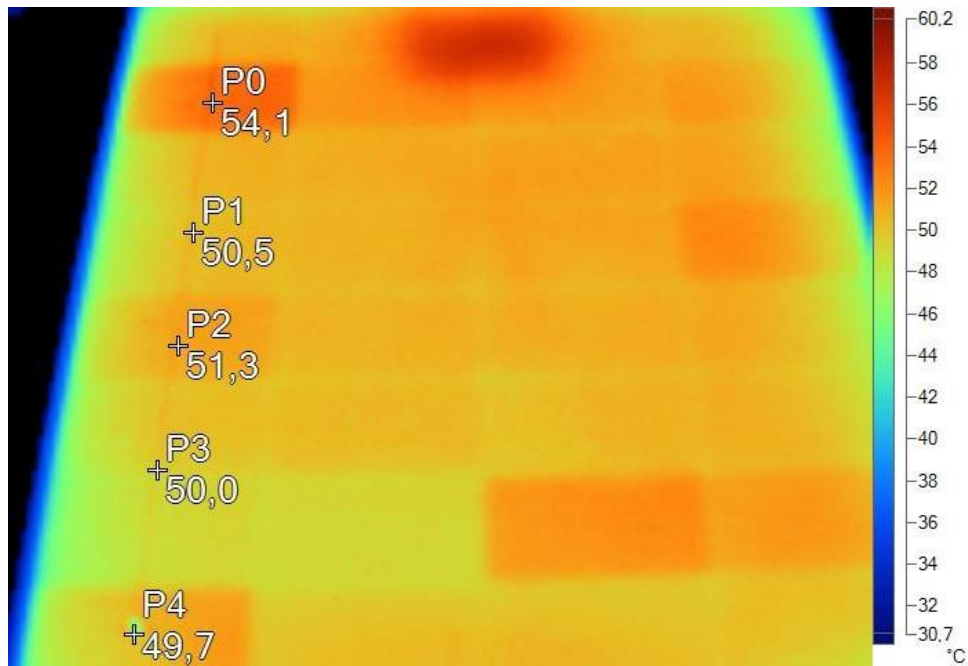
A temperatura e a incidência solar que refletiam diretamente sobre o painel (instalado ao leste geográfico) foi decaindo pelo fato do sol estar se movimentando em direção ao oeste geográfico, até atingir ao fim da tarde o sombreamento completo.



**Figura 21 - Temperatura medida pelos sensores FBGs**  
**Fonte: Autoria própria.**

Fez-se um comparativo referente à temperatura entre os cinco sensores e a câmera térmica, apresentando boa concordância entre os mesmos, com uma pequena diferença de no máximo 2,4 °C. A imagem apresentada na Figura 22 por meio da câmera IR foi retirada a uma distância de aproximadamente 40 cm de distância do painel, sendo que os pontos P0 à P4 indicam cada um dos cinco sensores utilizados, marcados no local exato onde cada sensor foi sobre o painel por meio do *software* da câmera utilizado.

Pela Figura 22 observa-se também os diferentes gradientes de temperatura com o painel em curto-circuito, em temperatura bastante elevada, pois o painel já estava exposto ao sol por cerca de quatro horas, apresentando bom comportamento e estabilidade dos sensores FBGs.



**Figura 22 - Gradiente de temperatura apresentado com o uso da câmera IR**  
**Fonte: Autoria própria.**

A tabela 4 informa os valores oriundos dos sensores no instante exato em que se retirou a imagem (Figura 22) da câmera IR, sendo possível comparar a temperatura em que o sistema estava realizando a leitura dos dados com outro sensor, no caso aqui a câmera térmica.

**Tabela 4 – Valores de temperatura medidos pelos sensores FBGs**

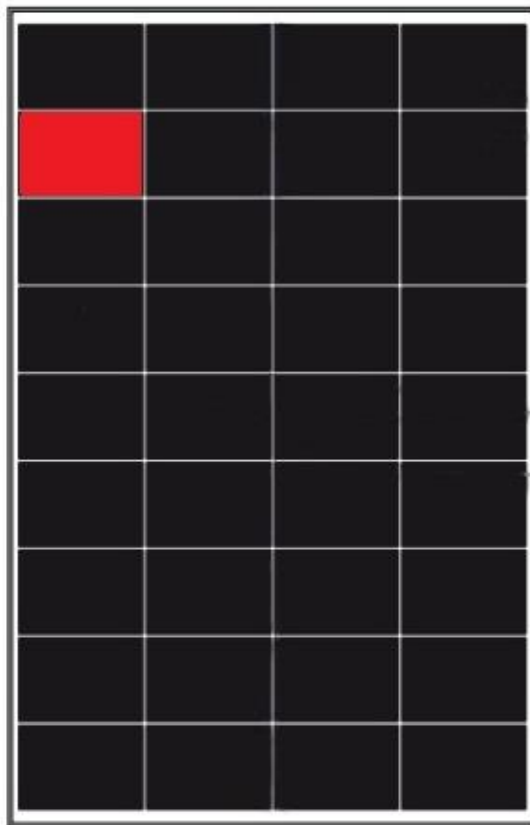
Ponto	Temperatura (°C)
P0	54,9
P1	52,4
P2	53,1
P3	52,4
P4	48,9

**Fonte: Autoria própria.**

Pela pequena diferença entre os valores de temperatura medidos entre os instrumentos utilizados a técnica de fixação dos sensores se mostrou eficiente sem demonstrar sombreamento e um contato térmico eficiente, pelo qual não se fez necessário refazer a trilha com a pasta térmica, caso houvesse uma grande discrepância entre os valores.

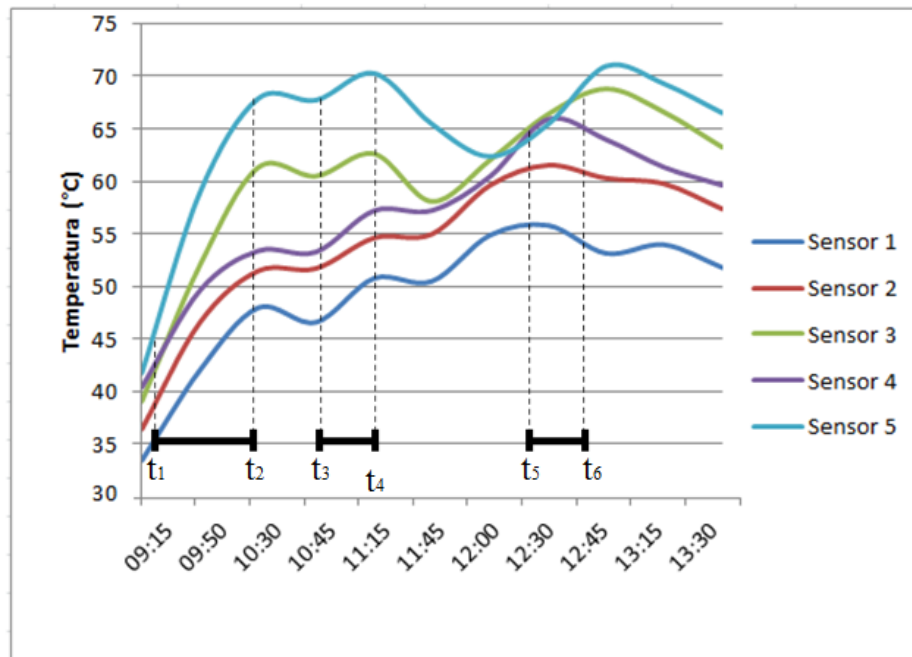
## 4.2 EXPERIMENTO 2 – ANÁLISE DE PONTOS QUENTES DA CÉLULA DE MAIOR AQUECIMENTO COM SENSORES FBGs E CÂMERA TÉRMICA

Por apresentar maior aquecimento em relação às outras células do painel, tanto nos testes iniciais com a câmera térmica e no primeiro ensaio realizado já com a fibra óptica instalada, escolheu-se monitorar a célula representada em vermelho na Figura 23, demonstrando uma maior probabilidade de possuir os pontos quentes. As demais células com os sensores seriam analisadas em outros ensaios específicos, apresentado na seção 4.3.



**Figura 23 - Representação da face frontal do painel com a célula de maior aquecimento em destaque  
Fonte: Autoria própria.**

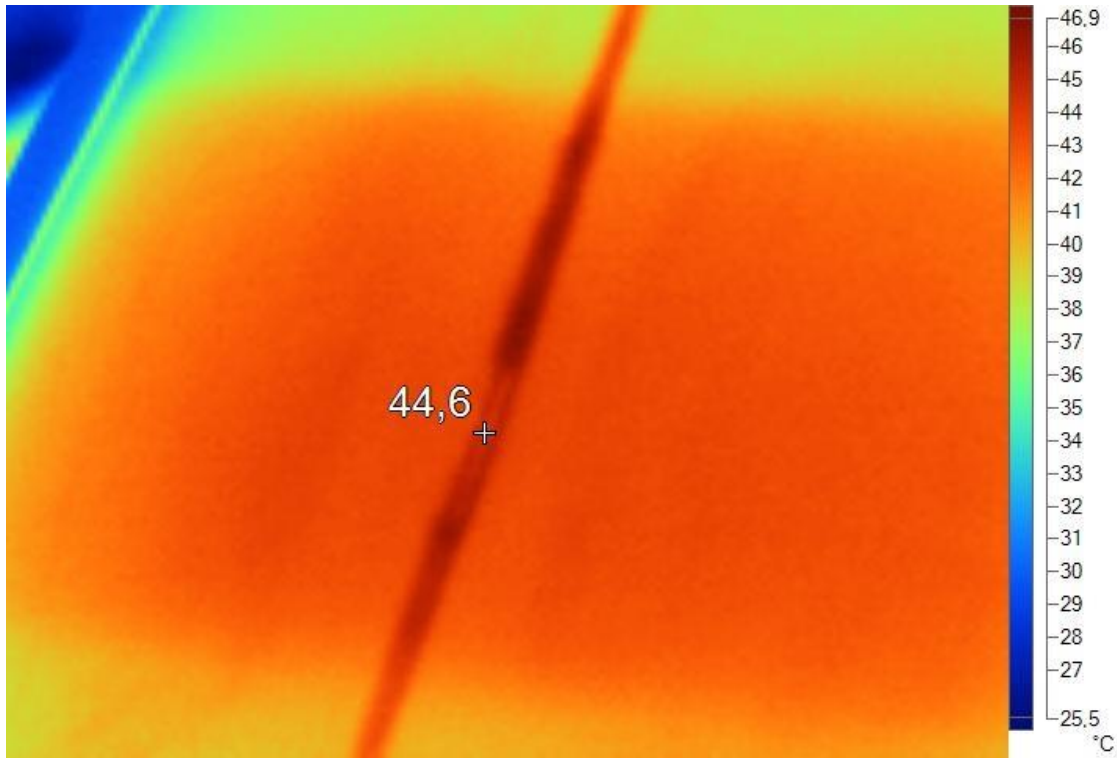
Mediante tais fatores, o segundo ensaio realizado no dia 25 de agosto de 2017 teve enfoque em analisar o comportamento exclusivo da célula retratada em vermelho na Figura 23. O painel solar foi levado ao ambiente aberto e exposto à irradiação solar de modo que se aquecesse gradualmente, iniciando as medidas com os sensores FBGs às 09h15min e com término às 13h30min, como pode ser visto na Figura 24.



**Figura 24 - Temperatura do painel obtida pelos sensores FBGs**  
**Fonte: A autoria própria.**

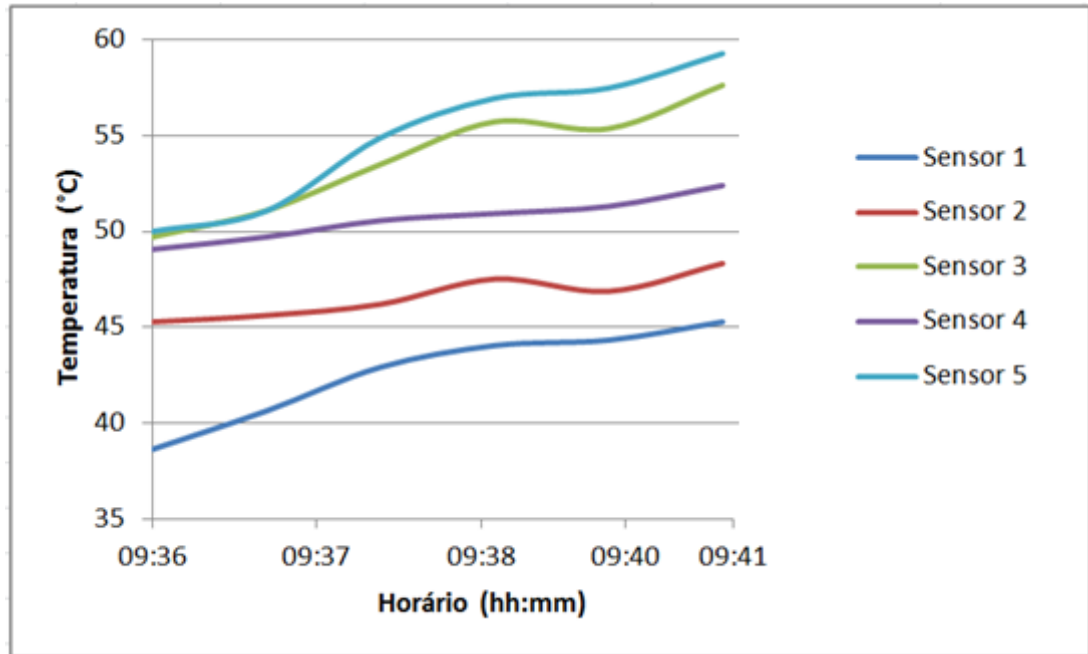
Em diversos momentos apresentados pela Figura 24 a temperatura medida pelos cinco sensores oscilava pelo fato da incidência solar variar no tempo, conforme observado com o luxímetro (mínimo 57 lux e máximo 700 lux) fazendo com que houvesse variação na temperatura lida pelos sensores. Além disso, períodos em que o painel foi submetido ao curto-circuito (intervalo de tempo  $t_3-t_4$  e  $t_5-t_6$ ) e com carga (intervalo de tempo  $t_1-t_2$ ) também contribuíram para a oscilação na temperatura apresentada pelos sensores FBGs.

Neste ensaio, utilizando uma carga resistiva de  $1,4\Omega$  conectada ao painel, provocou-se o aquecimento forçado das células para permitir a visualização de possíveis problemas elétricos (dentre eles hotspots) acarretados pelo tempo de vida do painel em questão. Pelo software da câmera térmica fez-se a verificação comprovando que o gradiente entre as células praticamente não se alterava, sem apresentar qualquer indício de pontos desiguais de temperatura.



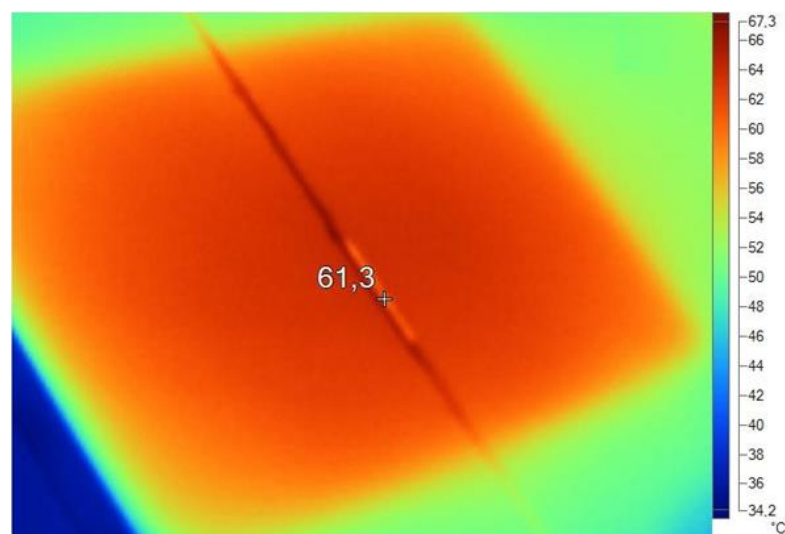
**Figura 25 - Imagem térmica da célula em análise com o painel conectado manualmente com carga**  
**Fonte: Aatoria própria.**

O painel foi avaliado também em curto-circuito (Figura 25), em diversos momentos, onde em um deles pode-se evidenciar o aquecimento superior da célula em observação em relação às outras. Este aquecimento foi comprovado pelo sensor número cinco e pela câmera térmica, uma vez que este sensor apresentou maior temperatura logo que se conectou a carga ao painel, como pode ser visto na Figura 26.



**Figura 26 - Temperatura do painel obtida pelos sensores FBGs**  
**Fonte: Autoria própria.**

Com o painel em curto-circuito por um período de tempo e com radiação solar aumentando, a fibra instalada na célula em observação chegou a mais de 60,0 °C, apesar disso, não foi possível visualizar pontos quentes, mesmo com a alta temperatura na célula, demonstrado na Figura 27. Os gradientes de temperatura apresentam a escala com um valor máximo de 67,3 °C, entretanto a célula em análise retratada nas duas imagens não demonstram nenhum aquecimento localizado, com a célula uniforme em relação à temperatura.



**Figura 27 - Imagem térmica da célula em análise com o painel em curto-circuito**  
**Fonte: Autoria própria.**

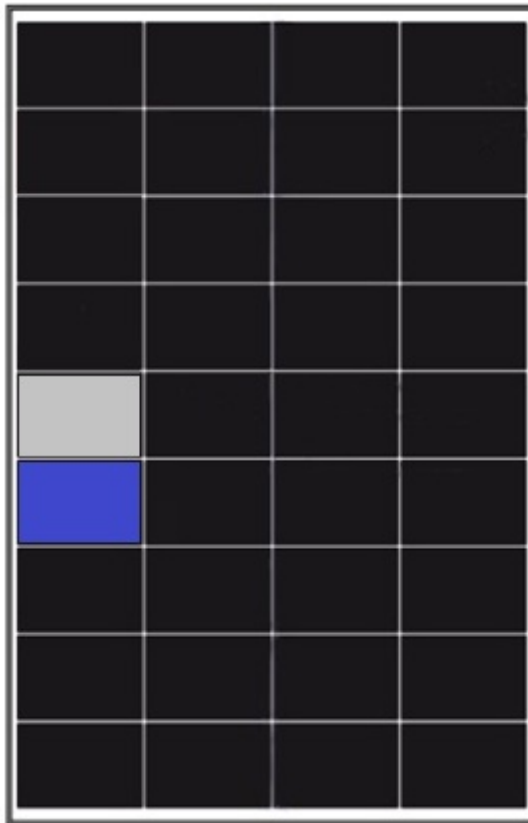


Porém, a hipótese inicial não se comprovou e por meio da câmera térmica e dos sensores e em todos os momentos o painel não demonstrou pontos quentes, de modo que a célula em questão permaneceu homogênea em todos os testes. Foi possível observar também que a célula que apresentou a maior temperatura no painel não tinha pontos quentes.

Outros dois testes foram efetuados para observação desta célula onde se repetiu o mesmo padrão e comportamento do teste apresentado.

#### 4.3 EXPERIMENTO 3 – ANÁLISE DE PONTOS QUENTES EM CÉLULAS ESPECÍFICAS COM SENSORES FBGs E CÂMERA TÉRMICA

Depois de efetuada a verificação de pontos quentes na célula de maior aquecimento, buscou-se analisar todas as outras células situadas ao lado esquerdo do painel fotovoltaico (onde a fibra estava localizada) de modo que duas células estudadas e demonstradas na Figura 28, uma em cinza (C<sub>51</sub>) e outra em azul (C<sub>61</sub>) demonstraram pontos quentes nos testes realizados compreendendo o experimento 3.

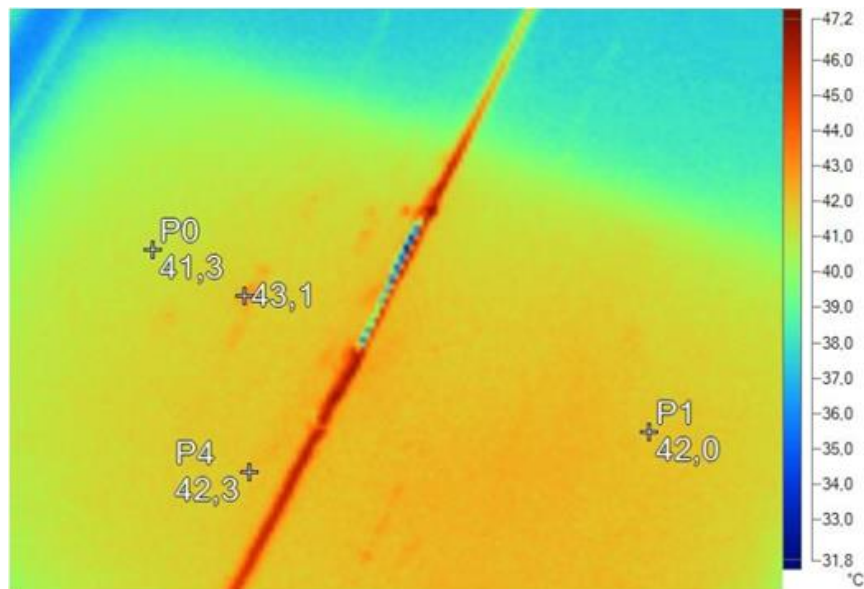


**Figura 28 - Representação da face frontal do painel com a célula em cinza (C<sub>51</sub>) e em azul (C<sub>61</sub>)**  
**Fonte: Autoria própria.**

Os ensaios apresentados nesta seção foram realizados praticamente no mesmo período, porém em diferentes dias, das 10h00min às 13h00min, compreendendo o horário de maior incidência solar no arranjo utilizado. Já no primeiro experimento realizado, no dia 28 de agosto de 2017 observou-se a ocorrência de pontos quentes no painel no teste com carga e em curto-circuito.

Neste primeiro teste realizado, duas células em potencial apresentaram pontos quentes quando fez-se a análise nas células. A Figura 29 retirada com o uso da câmera térmica apresenta o painel alimentado em seus terminais com carga resistiva de aproximadamente  $2,8\Omega$ , demonstrando pontos desiguais em relação à temperatura.

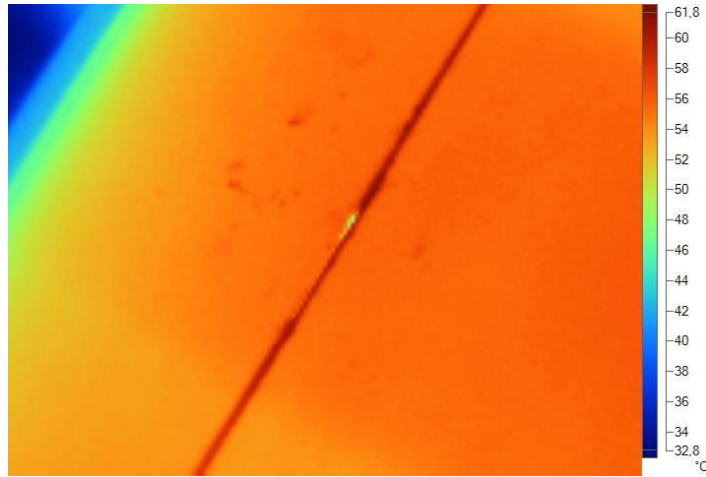
A partir do programa *smartview* analisou-se a célula por completo constatando pontos quentes que superavam em até  $3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  outros pontos da mesma célula, o que não é comum em uma célula nova, por exemplo.



**Figura 29 - Medições do painel obtido pela câmera IR, célula C51**  
**Fonte: Autoria própria.**

Buscou-se na literatura e a mesma apresenta que estes pontos que aquecem de maneira desigual transferem energia de pontos vizinhos elevando sua temperatura, causando um efeito que interfere negativamente no rendimento completo do painel. Em alguns casos, como o sombreamento, diferente de pontos quentes, tornam-se regiões com aumento de temperatura tão elevadas que podem até danificar as células, pela dissolução dos soldadores. Ressalta-se que a maioria dos painéis atuais já vêm com diodos de *by-pass* para evitarem este efeito reverso (RUTHER, 2004).

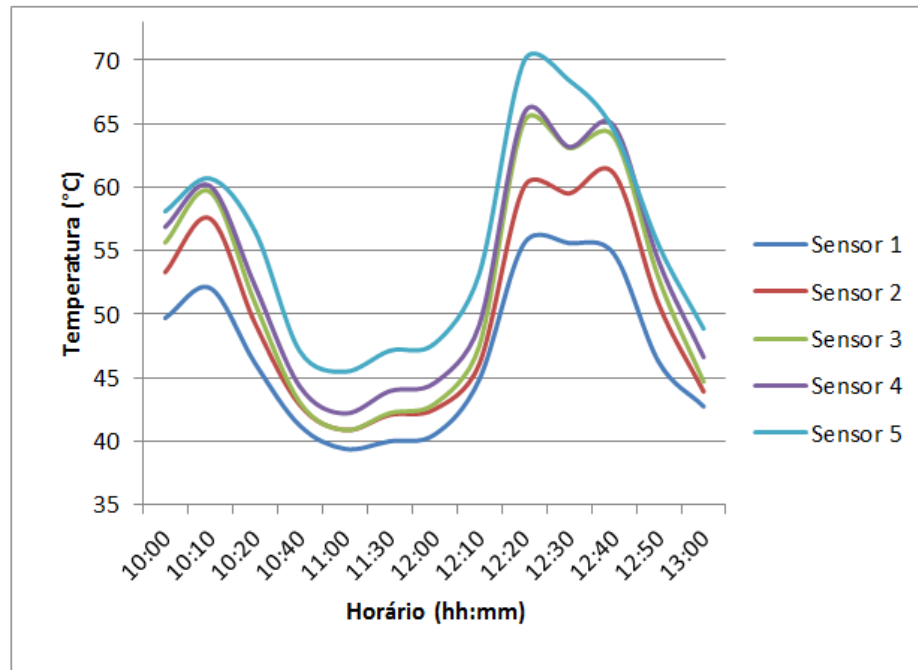
Depois de conectado com carga, o painel foi ligado em curto-circuito, observando outra célula que apresentou pequenos pontos quentes (Figura 30), que serão abordados no ensaio seguinte.



**Figura 30 - Medições feita pela câmera IR com a célula C<sub>61</sub>**  
**Fonte: Autoria própria.**

Nos pontos quentes observados na célula C<sub>61</sub> houve uma variação de aproximadamente 2 °C em relação à outros pontos na mesma célula, retratados na imagem acima. Os sensores FBGs apresentaram dificuldade em medir tais pontos pois não estavam localizados exatamente sobre estes, como retrata a Figura 30, apresentando tamanho na ordem de milímetros, dificultando a fixação em seu local de ocorrência.

A Figura 31 apresenta as medições realizadas neste dia pelos sensores FBGs onde houve grande variação dos fatores ambientais (principalmente pela irradiação solar) fazendo com que a temperatura das células diminuísse e aumentasse em vários momentos, destacando sempre o aquecimento superior de uma das células (identificada pelo sensor cinco).

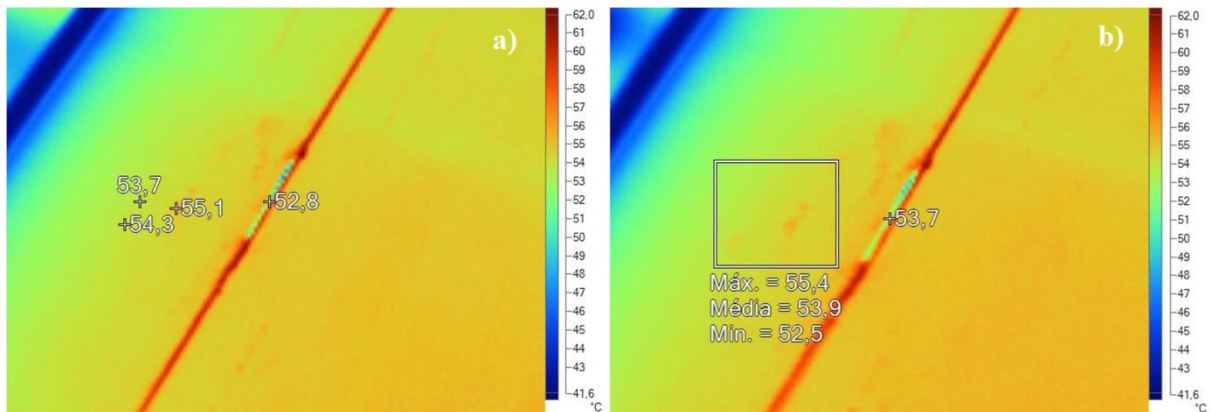


**Figura 31 - Temperatura do painel obtida pelos sensores**  
**Fonte: A autoria própria.**

Realizou-se no dia 29 de agosto de 2017 outro teste para confrontar os valores e medidas e para examinar o comportamento dos pontos quentes. Se por acaso estes pontos seriam originados de degradação elétrica no painel, os mesmos deveriam se repetir.

Com a ocorrência novamente de pequenos pontos de alta temperatura no teste realizado, agora com o painel em curto-circuito por um período de tempo de aproximadamente 20 minutos, comprova-se que há uma degradação elétrica no painel analisado, uma vez que não se observa por inspeção visual quaisquer microfissuras presentes nas células em questão.

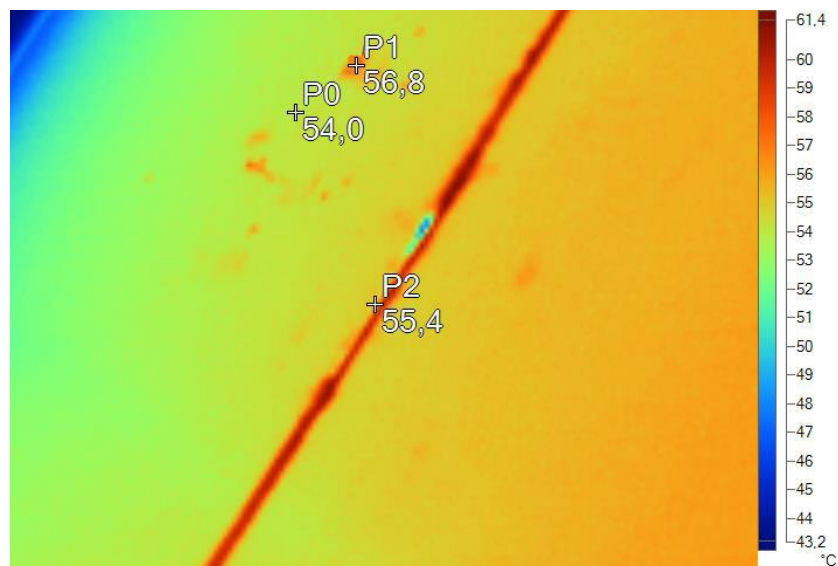
A Figura 32 apresenta pontos de temperatura avaliados em dois momentos, em um intervalo de aproximadamente cinco minutos entre as duas fotos retiradas pela câmera IR. Na Figura 32(a) fez-se quatro marcações (cada um com um ponto de temperatura) com diferença de 55,13 °C para 52,8 °C em uma mesma célula do painel fotovoltaico. Este valor de 52,8 °C apresentado pela câmera foi comparado no mesmo instante pelo sistema de aquisição de dados e o sensor em questão apresentou um valor de temperatura de 52,3 °C.



**Figura 32 - Comparativo entre medições do painel obtido pela câmera IR em dois momentos, célula C51**  
**Fonte: Autoria própria.**

Por meio das diferentes tonalidades da Figura 32(b), ilustrou-se em um pequeno quadrado os valores de máximo e mínimo de temperatura para auxiliar na visualização detalhada na área da célula observada, evidenciando o aquecimento localizado (pontos quentes). Nesta célula do painel houve diferença de 2,9 °C em uma pequena região da célula, comportamento não desejado principalmente quando se busca eficiência de painéis solares.

Outra célula onde estava instalado o sensor 2 também demonstrou não homogeneidade da temperatura da célula com uma imagem retirada muito próxima ao painel, quase no limite da distância focal mínima permitida pela câmera IR (15 cm, segundo o fabricante informa), apresentada na Figura 33.



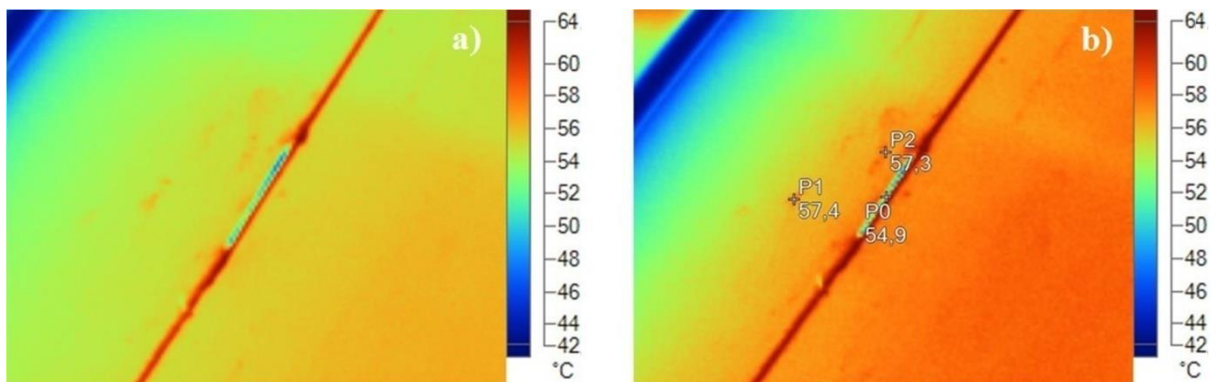
**Figura 33 - Imagem obtida do painel com o uso da câmera IR, célula C61**  
**Fonte: Autoria própria.**

Por fim, realizou-se no dia 30 de agosto de 2017 o terceiro e último experimento com o painel em análise. Mesmo com uma distância muito próxima dos sensores FBGs até o local

de incidência dos pontos quentes, os sensores apresentaram dificuldades em medi-los e realizar a fixação dos sensores exatamente nestes pontos, em razão de apresentarem tamanho muito reduzidos, de modo que com o programa utilizado os pontos são analisados pixel-a-pixel.

No comparativo apresentado pela câmera IR, é possível observar na Figura 34(a) pontos quentes muito próximos ao sensor FBG instalado, uma vez que pela análise no programa a temperatura destes pontos quentes superou em quase 2,5 °C pontos da mesma célula, teste este realizado com o painel em curto-circuito.

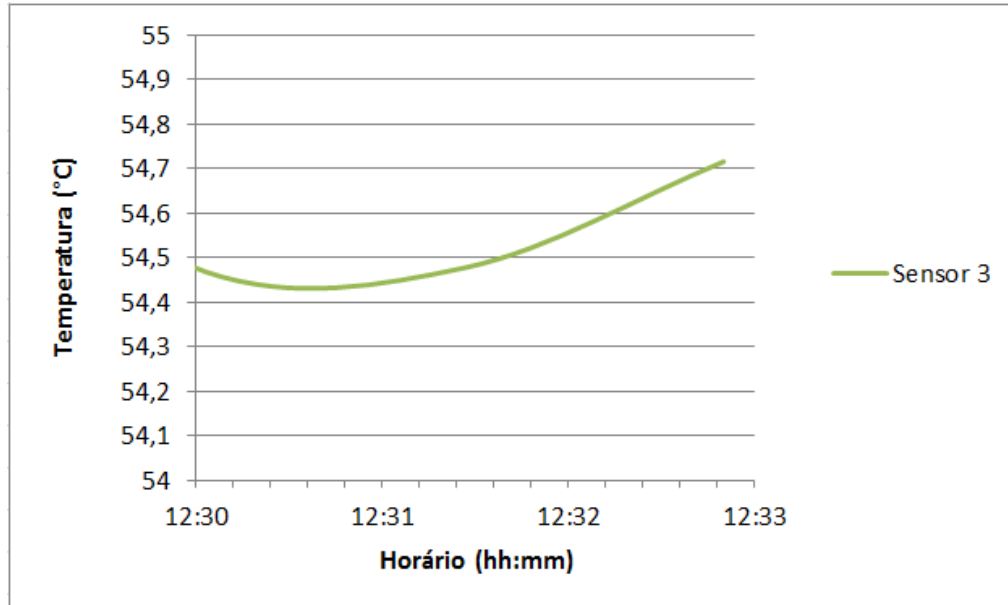
Na Figura 34(b), utilizou-se uma propriedade da câmera IR (disponível no modelo utilizado) que tornou os pontos de temperatura mais nítidos, deixando a imagem com um aspecto mais escuro, de modo que marcou-se três pontos, com diferença de 2,4 °C entre o ponto P2 e o ponto P0 (situado em cima do sensor).



**Figura 34 - Comparativo entre medições do painel obtido pela câmera IR, célula C<sub>51</sub>**

**Fonte: Autoria própria.**

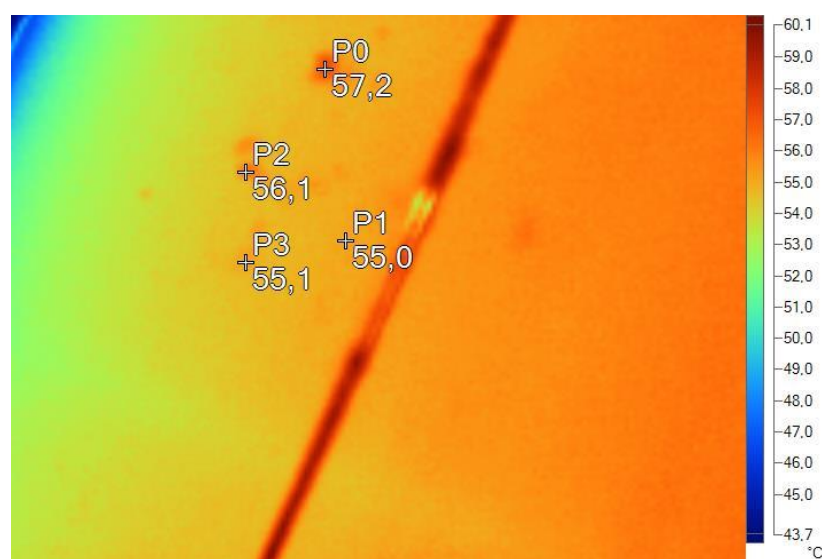
A partir dos dados obtidos pelos sensores, gerou-se um gráfico (Figura 35) afim de comparar a temperatura no horário em que se retirou as duas imagens (com intervalo de aproximadamente 2 minutos) com o sensor 3, o qual marcou temperaturas muito próximas aos valores correspondentes obtidos pela câmera IR, chegando a quase 55,0 °C, comprovando a não homogeneidade de temperatura nesta célula.



**Figura 35 - Temperatura obtida pelo sensor 3 instalado no painel**  
**Fonte: Autoria própria.**

A outra célula que estava sob análise repetiu o mesmo comportamento neste último ensaio, uma vez que se deixou a temperatura chegar próximo de valores do segundo ensaio, verificando a ocorrência do mesmo padrão de comportamento observado, demonstrando que os pontos quentes não variam de um dia para o outro, apenas em longos períodos de tempo.

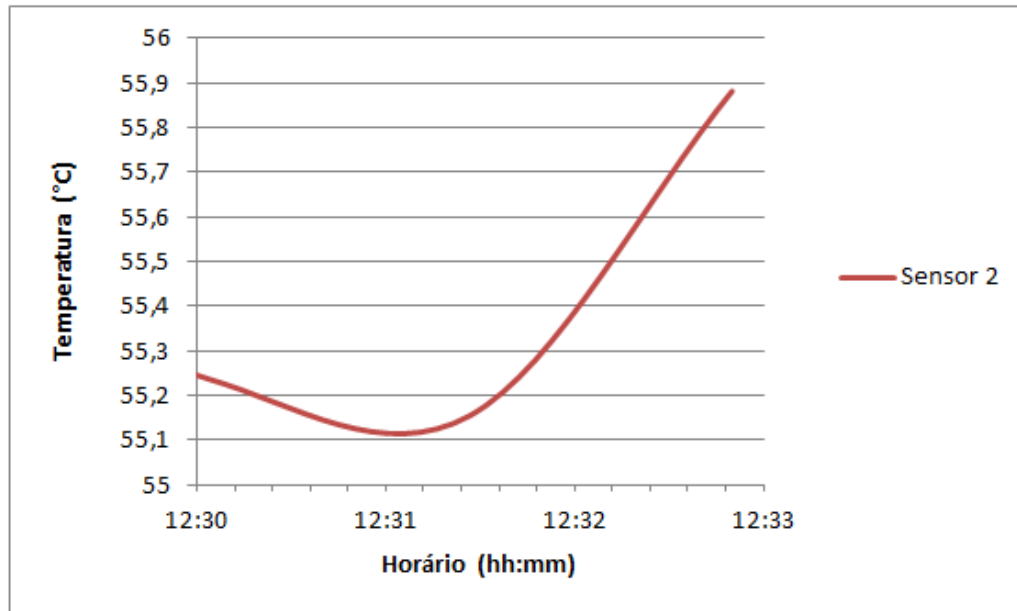
Comparou-se a temperatura do sensor 2 (Figura 36) tanto com o software da câmera IR (não exibido na imagem acima para não sobrepor outros pontos marcados na célula) e com o sistema de aquisição de dados em momentos próximos em que se retirou a imagem.



**Figura 36 - Imagem obtida do painel com o uso da câmera IR, célula C61**  
**Fonte: Autoria própria.**



O programa da câmera IR marcou um valor de temperatura para o sensor 2 correspondente à 55,4 °C, valor muito próximo à temperatura do sensor FBG, indicada no gráfico da Figura 37, denotando que os outros pontos estavam mesmo em sobreaquecimento em relação à célula analisada.



**Figura 37 - Temperatura obtida pelo sensor 2 instalado no painel**  
**Fonte: Autoria própria.**

Pela correspondência entre os ensaios realizados na medição de temperatura dos pontos analisados, não se observou alteração significativa nos pontos quentes presentes nas duas células que os demonstraram, em três ensaios realizados. A causa mais provável é que a degradação das células por meio de variações climáticas e tempo de vida do painel utilizado, chegando a quase 13 anos de vida, fazem com que apareçam estas anomalias elétricas.

Os possíveis efeitos (em relação ao desempenho e geração de energia elétrica) deste aumento de temperatura nas células ocasionados pelos pontos quentes não foram possíveis de serem correlacionados pois teria de ser feito uma análise mais longa e detalhada com cálculos matemáticos e em condições especiais.



## 5 CONCLUSÃO

Nesse trabalho apresentaram-se sensores a fibra óptica baseados em redes de Bragg que foram encapsulados a fim de verificar pontos quentes em um painel solar específico, onde se utilizou em comparação uma câmera infravermelho, analisando a distribuição da temperatura superficial do módulo e comparando os valores obtidos pelos instrumentos de medição utilizados.

Durante os ensaios em ambiente aberto, por meio dos sensores FBGs, foi possível verificar que pelo pequeno tamanho dos pontos quentes tornou-se difícil a fixação de um (ou mais, caso fosse possível) sensor exatamente sobre um ponto de maior aquecimento, na tentativa da medição direta e análise contínua, pois os mesmos apresentam dimensões bastante reduzidas (na ordem de milímetros) até mesmo para o sensor empregado, tornando sua visualização possível apenas com o uso da termografia por infravermelho (IR) em distâncias muito próximas ao painel.

Outra evidência que foi possível ser analisada neste trabalho sobre os pontos quentes, que estes não variam drasticamente em um curto espaço de tempo, ou seja, sua alteração física só ocorre ao longo de vários meses ou anos (caso não se tenha trincas ou fissuras nas células). Observou-se que algumas células específicas revelaram uma não homogeneidade da temperatura da célula resultando em aquecimento localizado (pontos quentes).

Por meio da análise no painel solar fotovoltaico usado, foi possível verificar que as anomalias elétricas estudadas estão relacionadas à degradação das células do painel e tempo de uso (com aproximadamente treze anos de vida), de modo que os pontos quentes se repetiram nos ensaios realizados.

Como o tempo de garantia padrão de eficiência (desempenho) informado pelos fabricantes de painéis fotovoltaicos giram em torno de 25 anos, degradações solares e problemas elétricos começam a surgir com o passar de longos períodos de tempo, dependendo muito de como o painel é utilizado, por exemplo em Sistemas Conectados à Rede elétrica (Sistemas On Grid) ou em Sistemas Isolados (Off Grid), regime de trabalho, dentre outros fatores.

Nos ensaios utilizando o arranjo experimental apresentado, as células de maior aquecimento foram medidas com sucesso, de modo que se houvesse uma aplicação, por meio de um interrogador óptico de baixo custo (único equipamento de alto custo no sistema completo, o que traria uma limitação) se conseguiria trazer uma boa opção para painéis instalados em locais de difícil acesso e que houvessem a necessidade de um monitoramento

contínuo. Com isto, se traria uma grande vantagem em relação à manutenção (feita atualmente com câmeras térmica) de vários painéis instalados visando para produção de energia elétrica, para se conhecer eventuais problemas (células afetadas ou com defeito, com trincas), uma vez que em alguns locais o acesso torna-se difícil, pela técnica empregada atualmente.

Conclui-se no presente trabalho que a câmera térmica apresentou melhor eficiência para a análise comportamental dos pontos quentes, e que os mesmos não apresentam um padrão definido (a célula que mais aquecia no painel inteiro não os demonstrou), e que estes não variam em um curto espaço de tempo e suas causas dependem de alguns fatores e como o painel é utilizado, se ligado à rede ou não, tempo de vida, dentre outros fatores não considerados aqui pelas limitações encontradas.

Além dessa aplicação, por mais que a câmera se mostrou mais eficiente, os sensores ópticos dependendo das necessidades de trabalho conseguem atender a vários requisitos que os sensores convencionais não se encaixam, sendo um deles o monitoramento contínuo aqui apresentado, juntamente com um tempo de leitura rápida de temperatura pelos sensores FBGs, observada principalmente em momentos de sombreamento de algumas células do painel.

Para trabalhos futuros, comprovou-se com os resultados que teria que se efetuar uma verificação com vários sensores em arranjo, com distâncias muito pequenas e com um interrogador óptico com mais canais disponíveis, para ser feito uma análise mais criteriosa sobre os pontos quentes, em um intervalo de tempo maior, na escala de meses ou anos.

## REFERÊNCIAS

WITTMANN, Douglas. **A indústria de energia elétrica no brasil e o desenvolvimento sustentável: uma proposta para o horizonte 2050 à luz da teoria de sistemas**. 2014.200f. Dissertação - Universidade de São Paulo. Programa de Pós-Graduação em Energia. 2014.

VERMA, D.; MIDTGARD, O.-M.; SATRE, T. O. **Review of photovoltaic status in a European (EU) perspective**. In: 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). p. 3292-3297, 2011.

BRITO, M. A. G., et al. **Research on photovoltaics: review, trends and perspectives**. In: Brazilian Power Electronics Conference (COBEP). p. 531-537, 2011.

ALVARENGA, Carlos Alberto. **O módulo fotovoltaico para gerador solar de eletricidade**. 2017. Disponível em: <<http://www.solenerg.com.br/files/Modulo-Fotovoltaico-Solenerg.pdf>>. Acesso em: 06 abr 2017.

SOLHEIM, H. J.; FJAER, H. G.; SORHEIM, E. A.; FOSS, S. E. Measurement and simulation of hot spots in solar cells. **Energy Procedia**, v. 38, p. 183-189, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.266>>. Acesso em: 06 abr 2017.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Grupo de Trabalho de Energia Solar. Rio de Janeiro: CEPTEL - DTE - CRESES, 2014.

SANTOLIN, Edson Antonio. **Aplicação de sensores à fibra óptica no monitoramento térmico de painel fotovoltaico**. 2016.105f. Dissertação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. 2016.

GALVÃO, José Rodolfo. **Sensor a fibra óptica encapsulado em resina polimérica com reforço de fibra de vidro para aplicação em gerador de alta potência**. 2015.88f. Dissertação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. 2015.

OLIVEIRA, Valmir. **Redes de bragg para medições em altas temperaturas**. 2012.139f. Dissertação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. 2016.

RUTHER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos**. Florianópolis: LABSOLAR, 2004.

KUHNE, Jean Filipe. **Redes de bragg em fibras ópticas multimodo: análise numérica e experimental da sensibilidade ao índice de refração**. 2016.95f. Dissertação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. 2016.

GOMES, Gabriela Cerqueira. **Sensores ópticos com base em grades de bragg em fibra para monitoramento de temperatura e de índice de refração**. 2011.100f. Dissertação - Instituto Militar de Engenharia. Programa de Mestrado em Engenharia Elétrica. 2011.

SHAH, A.; Meier, J.; Tscharnner, R. & Wyrsh, N. 1992. **Photovoltaic Power Generation, Plasma Physics & Controlled Fusion**, vol. 37, 1992.

HAMMOND, C. R. 1992. **The elements, Handbook of chemistry and physics**, Ed. D.R.Lide, CRC Press.

MAYCOCK, P.D. 2003. **V News annual survey of PV module production**, PV News, Vol. 22

YIN, S.; RUFFIN, P.B.; YU, F. T. S. **Fiber Optic sensors**. 2nd, 494 p. CRC press. Taylor & Francis Grou, 2008. ISBN 987-1-4200-5365-4.

CAZO, R. M.; HATTORI, H. T.; BARBOSA, L. C.; LISBÔA, O.; RABELO, R. C. **Sensor de deformação usando grades de Bragg**. Revista Científica Periódica – Telecomunicações. vol. 03, n. 02, p. 76-79. Dezembro, 2000. ISSN 1516-2338.

OTHONOS, A., **Fiber Bragg gratings, Review of Scientific Instruments**, vol. 68, 1997.

TRINURUK, P.; SORAPIPATANA, C.; CHENVIDHYA, D. **Estimating operating cell temperature of BIPV modules in Thailand**. Renewable Energy, vol.34, Issue 11, 98

November 2009, p. 2515-2523, ISSN 0960-1481, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.02.027>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109000962>>. Acesso em: 11 jun 2017.

FUENTES, M.; NOFUENTES, G.; AGUILERA, J.; TALAVERA, D. L.; CASTRO, M. **Application and validation of algebraic methods to predict the behaviour of crystalline silicone PV modules in Mediterranean climates**. Solar Energy, vol. 81, Issue 11, pp. 1396-1408, November 2007. ISSN 0038-092X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2006.12.008>.

HERRMANN, W.; **How temperature cycling degrades photovoltaic-module performance**. International society advancing an interdisciplinary approach to the science and application of light (SPIE) Newsroom. DOI: 10.1117/2.1201007.003177, 2010. Disponível em: <http://spie.org/x41305.xml>>. Acesso em: 10 jun 2017.

FLUKE CO. **Thermal imagers Ti9, Ti10, Ti25, TiRx, TiR and TiR1: Manual do usuário**. 28 p. Rev 2. August, 2007.

RASHLEIGH, S. C. **Acoustic sensing with a single coiled monomode fiber**. OPT. Lett., 5,392-394, 1980.

GOLNABI, H. **Design and operation of a fiber optic sensor for liquid level detection**. Optics Lasers Eng 41, pp. 801–812, 2004.

CARVALHO, Marcos de Castro. **Redes de Bragg em fibras ópticas poliméricas (FOP)**. 2010.305f. Dissertação – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Doutorado em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, 2010.

SONG, L.; YU, G. **The packaging technique about FBG temperature sensor**. Communication Systems, Networks and Applications (ICCSNA), 2010 Second International Conference on, vol. 1, p. 67-70, June 2010, doi: 10.1109/ICCSNA.2010.5588773. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5588773&isnumber=558866>>. Acesso em: 25 out 2017.

POLYSCIENCE. **Constant temperature equipment: Circulators**. 2015. Disponível em: <<http://www.icientifica.com/Files/Productos/140.pdf>>. Acesso em: 10 out 2017.

HBM. **Interrogator for optical strain gages**: DI. Darmstadt: Alemanha. Disponível em: <<https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/a2301.pdf>>. Acesso em: 15 out 2017.

QUINTERO, Sully Milena Mjía. **Aplicações de Sensores a Rede de Bragg em Fibras Ópticas na Medição de ph e Deformação de Filmes Finos de Alta Dureza**. 2006.124f. Dissertação – Pontífica Universidade Católica. . Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio, 2006.

ANJOS, Ruben Serra. **Análise e simulação de pontos quentes em painéis fotovoltaicos**. 2016.186f. Dissertação - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrotécnica. 2016.

TORRES, Regina Célia. **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais**. 2012.164f. Dissertação - Universidade de São Paulo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. 2012.

MIRANDA, Raul Figueiredo Carvalho. **Análise da Inserção de Geração Distribuída de Energia Solar Fotovoltaica no Setor Residencial Brasileiro**. 2013.309f. Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE. 2013.

KYOCERA. **KC85TS: High efficiency multicrystal photovoltaic module**. 2015. Disponível em: <<http://www.kyocerasolar.com/assets/001/5179.pdf>>. Acesso em 20 nov 2017.