

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

CARLOS HENRIQUE PALMA KOTINDA

**MONITORAMENTO TÉRMICO DE PAINEL FOTOVOLTAICO
UTILIZANDO REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2018

CARLOS HENRIQUE PALMA KOTINDA

**MONITORAMENTO TÉRMICO DE PAINEL FOTOVOLTAICO
UTILIZANDO REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Fotônica em Engenharia.

Orientador: Dr. Valmir de Oliveira

Co-orientador: Dr. Jean Carlos Cardozo da Silva

CURITIBA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

K87m
2018 Kotinda, Carlos Henrique Palma
Monitoramento térmico de painel fotovoltaico utilizando redes de Bragg em fibra ótica / Carlos Henrique Palma Kotinda.-- 2018.
95 f. : il. ; 30 cm

Texto em português com resumo em inglês
Disponível também via World Wide Web
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2018
Bibliografia: f. 93-94

1. Redes de Bragg. 2. Fibras ópticas. 3. Fotônica. 4. Sistemas de energia fotovoltaica. 5. Temperatura - Medidas. 6. Calorimetria. 7. Termômetros e termometria. 8. Engenharia elétrica - Dissertações. I. Oliveira, Valmir de. II. Silva, Jean Carlos Cardozo. III. Título.

CDD: Ed. 23 – 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba
Bibliotecário: Adriano Lopes CRB-9/1429

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 809

A Dissertação de Mestrado intitulada “**Monitoramento Térmico de Painel Fotovoltaico Utilizando Redes de Bragg em Fibra Ótica**” defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Carlos Henrique Palma Kotinda**, no dia 19 de outubro de 2018, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área de concentração Fotônica em Engenharia, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.

BANCA EXAMINADORA:

Prof(a). Dr(a). Valmir de Oliveira - Presidente – (UTFPR)

Prof(a). Dr(a). Anselmo Rodrigues - (Uniofet)

Prof(a). Dr(a). Ilda Abe - (UTFPR)

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 19 de outubro de 2018.

Aos meus pais, Celso e Alice, minhas irmãs Janaina, Ana Camila e Ana Carolina e em especial à minha esposa Janaína e meu filho Pedro Henrique.

AGRADECIMENTOS

Neste espaço gostaria de deixar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que este trabalho se tornasse possível. Seria impossível citar todos os nomes que fizeram parte desta jornada, por isso, peço desculpas se esqueci de alguém.

Primeiramente sou grato a Deus, que meu deu vida, saúde e discernimento para viver. Sem ele nada seria possível.

Agradeço aos meus pais Celso e Alice, por me criarem de forma primorosa e pelo amor incondicional.

À minha amada esposa, pela paciência, compreensão, fidelidade, cuidado com o nosso filho, e acima de tudo pelo amor a mim despendido. Sem ela a realização deste trabalho não seria possível.

Aos professores Valmir de Oliveira e Jean Carlos Cardozo da Silva, que confiaram em meu potencial desde o princípio.

Ao Exército Brasileiro, em especial à Comissão Regional de Obras 5 e seus integrantes, que me forneceram condições para realizar o mestrado.

Aos meus colegas do CPGEI, que me apoiaram sem hesitar.

Às agências de fomento CAPES, CNPq e FINEP pelo suporte financeiro ao laboratório.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Curitiba por disponibilizar a estrutura física e equipamentos para o desenvolvimento das atividades.

E finalmente um agradecimento aos amigos e familiares pelas orações, apoio e encorajamento durante este trabalho.

Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor, mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser... mas Graças a Deus, não somos o que éramos.
(Martin Luther King Jr.)

RESUMO

KOTINDA, Carlos Henrique Palma. MONITORAMENTO TÉRMICO DE PAINEL FOTOVOLTAICO UTILIZANDO REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA. 95 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Este trabalho apresenta um estudo da aplicação de sensores de temperatura utilizando redes de Bragg em fibra ótica (FBG) no monitoramento térmico de um módulo fotovoltaico cuja planta em operação está conectada à rede elétrica instalada no telhado do Escritório Verde, prédio pertencente à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) em Curitiba, PR. Foram instalados 20 sensores em um único módulo de uma planta e 1 sensor medindo a temperatura ambiente. O ambiente monitorado sofre ações de intempéries como ventos, chuva, e grande variação de temperatura ao longo do dia e das estações do ano, o que justifica a utilização dos sensores em fibra ótica, pois, são robustos e com pequenas dimensões, praticamente imperceptíveis quando instalados externamente, não causando, desse modo, sombreamento sobre o módulo. Além disso, eles também podem ser instalados internamente fazendo do módulo uma estrutura inteligente. O trabalho consiste desde a fabricação até a montagem e monitoramento das redes de Bragg. A fibra ótica foi encapsulada e seus efeitos serão analisados. Os dados de medição dos sensores FBG foram comparados com instrumentos como o Termopar e termômetro infravermelho. Foi realizada a comparação do comportamento térmico com a potência produzida pelo módulo fotovoltaico. Os resultados possibilitarão a detecção de falhas e avarias no módulo, bem como a verificação de perdas na eficiência causadas pela temperatura, onde houve registro acima de 70°C durante a operação.

Palavras-chave: Módulo fotovoltaico. Redes de Bragg em fibra ótica. Análise de temperatura.

ABSTRACT

KOTINDA, Carlos Henrique Palma. THERMAL MONITORING OF PHOTOVOLTAIC PANEL USING OPTICAL FIBER BRAGG GRATINGS. 95 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

This work presents a study of the application of temperature sensors using Fiber Bragg Gratings (FBG) in the thermal monitoring of a photovoltaic module whose plant in operation is connected to the electric grid installed on the roof of the Green Office, a building belonging to the Federal Technological University of Paraná (UTFPR) in Curitiba, PR. Twenty sensors were installed in a single module of a plant and 1 sensor measuring the room temperature. The monitored environment suffers from weathering events such as wind, rain, and great variation of temperature throughout the day and the seasons, which justifies the use of fiber optic sensors, since they are robust and small, practically imperceptible when installed externally, thus not causing shading on the module. In addition, they can also be installed internally by making the module an smart structure. The work consists of manufacturing, assembly and monitoring of FBG. The optical fiber was encapsulated and its effects were analyzed. The measurement data of the FBG sensors were compared with instruments like the Thermocouple and infrared thermometer. The thermal behavior was compared with the power produced by the photovoltaic module. The results will allow the detection of faults and defects in the module, as well as the verification of efficiency losses caused by temperature, where there was a register above 70 °C during the operation.

Keywords: Photovoltaic panel. Optical fiber Bragg grating sensor. Temperature analysis.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Corte transversal de uma célula fotovoltaica	24
FIGURA 2	– Exemplo de aplicação de módulos fotovoltaicos flexíveis (filme fino) em equipamentos portáteis	25
FIGURA 3	– Módulos fotovoltaicos instalados em estádios	26
FIGURA 4	– Curvas características de um módulo fotovoltaico	27
FIGURA 5	– Curvas dos dois fatores que influenciam as características elétricas do módulo	28
FIGURA 6	– Sistema Fotovoltaico isolado	29
FIGURA 7	– Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede	30
FIGURA 8	– Dispersão intermodal em fibra multimodo de índice escalonado	32
FIGURA 9	– Configurações de uma fibra ótica	33
FIGURA 10	– Representação de uma Rede de Bragg e espectros da luz	35
FIGURA 11	– Configurações de uma fibra ótica	37
FIGURA 12	– Esquema de difração de um raio incidente em uma máscara de fase	39
FIGURA 13	– Representação de feixe UV em uma máscara de fase	39
FIGURA 14	– Esquema de leitura de Redes de Bragg	40
FIGURA 15	– Comportamento do comprimento de onda de Bragg em FBG deformada ..	41
FIGURA 16	– Esquema de gravação de FBG por Máscara de Fase	43
FIGURA 17	– Disposição de equipamentos para gravação de FBG por Máscara de Fase .	44
FIGURA 18	– Foto do sistema de gravação de FBG	44
FIGURA 19	– Dimensões do segmento de fibra ótica com FBGs	45
FIGURA 20	– Inserção da fibra ótica internamente ao encapsulamento	46
FIGURA 21	– Fibra ótica encapsulada	46
FIGURA 22	– Sistema de caracterização dos sensores	47
FIGURA 23	– Sistema de caracterização dos sensores em laboratório	48
FIGURA 24	– Planta Fotovoltaica do Escritório Verde	49
FIGURA 25	– Dimensões do módulo e posição dos sensores no módulo fotovoltaico	50
FIGURA 26	– Diagrama de emendas realizadas no segmento de fibra ótica	50
FIGURA 27	– Detalhe do suporte de fixação do sensor de temperatura ambiente	51
FIGURA 28	– Módulo Fotovoltaico Instrumentado	52
FIGURA 29	– Identificação de componentes do sistema externo	53
FIGURA 30	– Locação do <i>Rack</i> de monitoramento	53
FIGURA 31	– Detalhamento interno do sistema de monitoramento	54
FIGURA 32	– Detalhamento construtivo de uma fibra ótica monomodo	55
FIGURA 33	– <i>Laser</i> Excímero ArF Xantos Coherent®	56
FIGURA 34	– Analisador de espectro ótico OSA AQ6375B®	56
FIGURA 35	– Interrogador Ótico SM-125®	57
FIGURA 36	– Interrogador IMON 512 USB®	58
FIGURA 37	– Máscara de fase	59
FIGURA 38	– Encapsulamento FT900SM®	60
FIGURA 39	– Banho térmico LAUDA® ECO GOLD RE415	62
FIGURA 40	– Camadas que compõem um módulo fotovoltaico	63

FIGURA 41	– Cola fixadora LOCTITE® 495	63
FIGURA 42	– Termômetro infravermelho digital Minipa® MT-360	64
FIGURA 43	– Termopar tipo K e acessórios	65
FIGURA 44	– Espectro das 20 FBGs gravadas	67
FIGURA 45	– Espectro das 21 FBGs gravadas	68
FIGURA 46	– Tempo de resposta à variação de temperatura na FBG em fibra nua	69
FIGURA 47	– Tempo de resposta à variação de temperatura na FBG em fibra encapsulada	70
FIGURA 48	– Tempo de resposta à variação de temperatura na fibra nua entre 10% e 90%	70
FIGURA 49	– Tempo de resposta à variação de temperatura na fibra encapsulada entre 10% e 90%	71
FIGURA 50	– Média dos comprimentos de onda de Bragg e sensibilidades para a fibra encapsulada	72
FIGURA 51	– Gráfico de Comprimento de onda de Bragg x Temperatura para a fibra encapsulada	72
FIGURA 52	– Média dos comprimentos de onda de Bragg e sensibilidades para fibra nua	73
FIGURA 53	– Gráfico de Comprimento de onda de Bragg x Temperatura para a fibra nua	74
FIGURA 54	– Distância entre placa solar e telhado	75
FIGURA 55	– Comparação Temperatura Média do módulo e Temperatura Ambiente ao longo do dia 12/09/2017	75
FIGURA 56	– Comportamento térmico dos 21 sensores de temperatura	78
FIGURA 57	– Comportamento térmico de seis sensores de temperatura	78
FIGURA 58	– Comportamento térmico médio de seis sensores de temperatura	79
FIGURA 59	– Comportamento térmico de seis sensores de temperatura durante uma hora	80
FIGURA 60	– Comportamento térmico médio de seis sensores de temperatura durante uma hora	81
FIGURA 61	– Variação do comprimento de onda durante o dia 05/09/2018	82
FIGURA 62	– Potência produzida pela planta fotovoltaica durante o dia 05/09/2018	83
FIGURA 63	– Comparação entre Produção e Comprimento de onda de Bragg durante o dia 05/09/2018	83
FIGURA 64	– Variação da temperatura durante o dia 05/09/2018.	84
FIGURA 65	– Variação do comprimento de onda durante o dia 06/09/2018	85
FIGURA 66	– Potência produzida pela planta fotovoltaica durante o dia 06/09/2018	85
FIGURA 67	– Comparação entre Produção e Temperatura durante o dia 06/09/2018	86
FIGURA 68	– Variação da temperatura durante o dia 06/09/2018.	87
FIGURA 69	– Comportamento térmico do módulo fotovoltaico durante o dia 06/09/2018.	88
FIGURA 70	– Posição dos sensores no módulo fotovoltaico.	88

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Especificações do OSA AQ6375B®	57
TABELA 2	– Especificações do SM125®	57
TABELA 3	– Especificações do IMON512®	58
TABELA 4	– Especificações da Fonte Ótica DL-BP1-1501A	59
TABELA 5	– Especificações das Máscaras de Fase	60
TABELA 6	– Especificações do encapsulamento HYTREL®	61
TABELA 7	– Especificações do Banho Térmico	61
TABELA 8	– Especificações do Módulo Fotovoltaico KYOCERA® KD210GXLP	63
TABELA 9	– Especificações da cola instantânea Loctite® 495	64
TABELA 10	– Especificação do Termômetro infravermelho	65
TABELA 11	– Especificação do Termopar Tipo K	66
TABELA 12	– Especificação do Alicata Amperímetro	66
TABELA 13	– Especificação do adaptador para Termopar Tipo K	66
TABELA 14	– Comprimento de Onda de Bragg das 21 redes gravadas	73
TABELA 15	– Medições de temperatura por termômetro infravermelho e FBG	76
TABELA 16	– Medições de temperatura por Termopar tipo K e FBG	77

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

FBG	Redes de Bragg em fibra ótica
CC	Corrente Contínua
V_{oc}	Tensão de circuito aberto
I_{sc}	Corrente de Curto Circuito
P_m	Potência Máxima
V_{mp}	Tensão de Potência Máxima
I_{mp}	Corrente de Potência Máxima
SFVI	Sistema Fotovoltaico Isolado
SFVCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
RTD	Resistance Temperature Detector
LANOE	Laboratório de Nanoestruturas da UTFPR
OSA	Optical Spectrum Analyzer

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>c – Si</i>	silício cristalino
<i>a – Si</i>	silício amorfo
<i>GaAs</i>	arseneto de gálio
<i>CdTe</i>	telureto de cádmio
<i>CIGS</i>	cobre-índio-gálio-selênio
<i>a – Si : H</i>	silício amorfo hidrogenado
<i>ArF</i>	Fluoreto de Argônio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 MOTIVAÇÃO	20
1.2 OBJETIVOS	21
1.2.1 Objetivo Geral	21
1.2.2 Objetivos Específicos	21
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	21
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	23
2.1.1 Energia Fotovoltaica	23
2.1.2 Células Fotovoltaicas	23
2.1.3 Módulos Fotovoltaicos	24
2.1.3.1 Tipos de Módulos Fotovoltaicos	25
2.1.3.2 CARACTERÍSTICAS E CURVAS DE OPERAÇÃO	26
2.1.3.3 TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	28
2.2 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA	31
2.3 REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA	32
2.3.1 PERSPECTIVA HISTÓRICA	34
2.3.2 DEFINIÇÃO DE REDES DE BRAGG	34
2.3.3 GRAVAÇÃO DE REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA	38
2.3.4 SISTEMA DE LEITURA	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 GRAVAÇÃO, ENCAPSULAMENTO E CALIBRAÇÃO DOS SENSORES	42
3.1.1 GRAVAÇÃO DOS SENSORES	42
3.1.2 ENCAPSULAMENTO DOS SENSORES	45
3.1.3 CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES	47
3.1.3.1 OBTENÇÃO DO TEMPO DE RESPOSTA	47
3.1.3.2 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES	48
3.2 SISTEMA DE MONITORAMENTO	49
3.3 EQUIPAMENTOS E DISPOSITIVOS	54
3.3.1 Fibras Óticas	55
3.3.2 <i>Laser</i> Excímero	55
3.3.3 Interrogadores Óticos	56
3.3.3.1 OSA AQ6375B	56
3.3.3.2 SM-125	57
3.3.3.3 IMON 512 USB	58
3.3.4 Máscara de Fase	59
3.3.5 Encapsulamento	60
3.3.6 Banho Térmico	61
3.3.7 Módulo Fotovoltaico	62
3.3.8 Cola Fixadora	63
3.3.9 Termômetro Infravermelho	64

3.3.10Termopar tipo K	65
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1 SENSORES FBG GRAVADOS	67
4.2 TEMPO DE RESPOSTA À TEMPERATURA	69
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES	71
4.4 MONITORAMENTO DE TEMPERATURA	74
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
5.1 CONCLUSÕES	89
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
REFERÊNCIAS	93
Apêndice A – PUBLICAÇÕES RESULTANTES DESTA DISSERTAÇÃO	95

1 INTRODUÇÃO

É evidente para o ser humano que as fontes de energias fósseis são finitas, o que leva a uma preocupação na descoberta ou aprimoramento de novas fontes de energia, principalmente as renováveis.

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz é hoje, certamente, uma das alternativas energéticas mais promissoras para enfrentarmos os desafios do novo milênio. E, quando se fala em energia, deve-se lembrar que o Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia. Em outras palavras, as fontes de energia são, em última instância, derivadas da energia do Sol. É a partir da energia do Sol que se dá a evaporação, origem do ciclo das águas, que possibilita o represamento e a consequente geração de eletricidade (hidroeletricidade). A radiação solar também induz a circulação atmosférica em larga escala, causando os ventos. Petróleo, carvão e gás natural foram gerados a partir de resíduos de plantas e animais que, originalmente, obtiveram a energia necessária ao seu desenvolvimento, da radiação solar (CRESESB, 2006). A energia solar pode ser aproveitada diretamente de três formas: termosolar, termoelétrica e fotovoltaica. A técnica termosolar é utilizada para o aquecimento, através da captação da radiação solar e sua conversão em calor. A tecnologia termoelétrica consiste em converter a energia térmica em mecânica, como por exemplo a evaporação de um fluido para girar uma turbina e posteriormente gerar energia elétrica. A tecnologia fotovoltaica consiste basicamente na captação da radiação solar, através de módulos fotovoltaicos, e sua conversão direta em energia elétrica.

As energias eólica e fotovoltaica são atualmente as fontes de eletricidade de maior crescimento mundial. Em 2015, sua geração anual adicional atingiu mais de 90% da demanda incremental de eletricidade. Entre 2008 e 2015, o custo médio da energia solar fotovoltaica reduziu em quase 80% (IEA, 2016). Os avanços da tecnologia e consequentes baixos custos de material são os responsáveis por esta redução.

O Sol pode ser a maior fonte mundial de eletricidade até 2050, à frente de combustíveis

fósseis, energia eólica, hídrica e nuclear. O sistema solar fotovoltaico pode gerar até 16% da eletricidade do mundo, enquanto a eletricidade heliotérmica, a partir de energia solar concentrada, forneceria um adicional de 11% (IEA, 2016).

O potencial da energia solar fotovoltaica no Brasil é muitas vezes superior ao consumo total de energia elétrica do país e muito maior que o potencial eólico (RÜTHER, 2004).

Os sistemas fotovoltaicos possuem baixo impacto ambiental, produzem energia através de uma fonte renovável e de maneira silenciosa.

Uma das vantagens dos sistemas fotovoltaicos é a possibilidade de aplicação em meios urbanos, onde é grande o consumo da energia gerada de forma convencional, podendo ser instalados em edifícios, condomínios, casas, indústrias e comércios.

Para o sistema elétrico, são muitos os benefícios dos sistemas solares fotovoltaicos em área urbana, como por exemplo, as perdas por transmissão e distribuição de energia são minimizadas, os investimentos em linhas de transmissão e distribuição são reduzidos. Os edifícios solares fotovoltaicos não apresentam necessidade de área física dedicada, uma vez que a área necessária já é ocupada pela edificação, tendo a capacidade de oferecer um elevado fator de capacidade a alimentadores da rede com picos diurnos e apresentam mínima capacidade ociosa de geração (RÜTHER, 2004).

Uma característica fundamental de sistemas fotovoltaicos instalados no meio urbano é principalmente a possibilidade de interligação à rede elétrica pública, dispensando assim os bancos de baterias necessários em sistemas do tipo autônomo e os elevados custos e manutenção decorrentes. Na configuração mais comum, estes sistemas são instalados de tal maneira que, quando o gerador solar fornece mais energia do que a necessária para o atendimento da instalação consumidora, o excesso é injetado na rede elétrica e a instalação consumidora acumula um crédito energético. Por outro lado, quando o sistema solar gera menos energia do que a demandada pela instalação consumidora, o déficit é suprido pela rede elétrica.

Algumas desvantagens dos sistemas fotovoltaicos são: o seu custo de aquisição e instalação são relativamente altos quando comparado ao retorno do investimento; os módulos fotovoltaicos possuem baixo rendimento na faixa de 10% à 20%; no Brasil, comparado aos países desenvolvidos, ainda não existem políticas fortemente incentivadoras e subsídios para implantação do sistema, o que faz com que muitas vezes se opte pela instalação de um outro meio de geração de energia. A Alemanha, um dos principais mercados da tecnologia fotovoltaica, instituiu tarifas diferenciadas para os edifícios solares fotovoltaicos onde as concessionárias alemãs compram a energia excedente gerada pelos edifícios. O custo deste

programa de incentivo é diluído na tarifa de todos os consumidores, com impacto desprezível na conta final de cada consumidor. Isso incentiva a aquisição do sistema, a geração distribuída e ainda gera muitos empregos diretos e indiretos, fortalecendo a economia e o desenvolvimento do país.

Devido à importância do sistema fotovoltaico de geração de energia elétrica, é imprescindível que se analise os fatores que causem danos ou degradação do sistema. Especificamente para este sistema, a maior preocupação é com os módulos fotovoltaicos, pois estes são os que possuem a menor eficiência em todo o sistema quando comparado aos demais componentes como, inversores, cabos, conectores, entre outros. O fabricante do módulo fornece vários dados referentes às especificações técnicas, desempenho, métodos de instalação e comportamento dos equipamentos em condições variáveis. O problema é que estas informações são válidas para um módulo em perfeitas condições quando novo, mas o real comportamento ao longo do tempo de uso, não é mais o mesmo devido à degradações físicas ou até mesmo fatores intrínsecos dos componentes. Os danos físicos podem ser causados pela chuva, granizo, ventos ou demais intempéries. Ao longo do tempo de uso, a dilatação térmica ocasionada pelos ciclos de aquecimento durante o dia e a contração provocada pelo resfriamento a noite, começam a deteriorar gradativamente as conexões, terminais, trilhas e as próprias células, comprometendo significativamente a eficiência de conversão do painel (HERRMANN, 2010). As células quando fora de suas condições originais de fabricação tem sua resistência aumentada, como consequência surgem pontos muito quentes, conhecidos como *hotspots*, ou diferentes níveis de aquecimento entre as células, que acabam dissipando parte da energia gerada. Ao longo do tempo de uso, a diferença de temperatura entre os diversos pontos do módulo fotovoltaico chega a ultrapassar 10°C. Por esta razão é muito importante o monitoramento da temperatura nos módulos, a fim de prever possíveis falhas e garantir o máximo rendimento possível.

Diversos são os métodos e tipos de sensores que podem ser utilizados para medição da temperatura dos módulos fotovoltaicos, porém é imprescindível evitar que os sensores façam sombreamento sobre as células, a fim de manter o funcionamento normal destas. Sensores muito utilizados e já consolidados principalmente em ambientes industriais são os termopares, os sensores de estado sólido e os termorresistivos como o PT100. Para a aplicação fotovoltaica existe o problema do tamanho e forma de instalação destes sensores, atualmente não existe comercialmente dispositivos prontos para a instalação nos módulos, é necessário desenvolver suportes para esta fixação. A quantidade de cabos, onde cada sensor tem o seu, também faz com que a instalação seja mais trabalhosa e muitas vezes mais onerosa. Para uma planta industrial fotovoltaica, onde o número de módulos é imenso, praticamente inviabiliza a utilização destes tipos de sensores, quando se deseja monitorar todos os módulos. São

mais adequados para medições pontuais. A fim de suprir aquela necessidade é possível utilizar o método por imagens, com a utilização de câmeras termográficas que mostram o gradiente de temperatura na superfície do módulo fotovoltaico. A vantagem deste método é a possibilidade de adquirir a temperatura de qualquer ponto do módulo, porém é utilizado mais para manutenções preditivas pois, assim como na utilização de sensores termorresistivos, não é praticável em um monitoramento em tempo real em plantas industriais.

O presente trabalho apresenta uma aplicação ainda pouco utilizada em laboratório e talvez ainda inexistente no monitoramento de temperatura em módulos fotovoltaicos operando em uma planta real conectada à rede elétrica. É monitorada a temperatura de um módulo fotovoltaico em uma planta operando desde 2011, conectada à rede elétrica da concessionária de energia elétrica, onde o sistema está exposto a diversos fatores ambientais. Este trabalho utiliza a fibra ótica como sensor de temperatura, através de Redes de Bragg (FBG), monitorando simultaneamente 20 pontos fixos ao longo de um módulo fotovoltaico e 1 ponto medindo a temperatura ambiente externa à este módulo.

1.1 MOTIVAÇÃO

A motivação pra o presente trabalho é devido à necessidade de determinar o comportamento da temperatura em módulos fotovoltaicos em operação, para futuras análises do impacto desta na eficiência da geração de energia elétrica, utilizando sensores óticos FBG e consequentemente analisando também o desempenho dos sensores e todo o sistema de coleta de dados de temperatura. Os dados coletados poderão auxiliar em manutenções corretivas, preventivas e preditivas e até mesmo serão válidos para verificação da vida útil do equipamento, onde muitas plantas instaladas no Brasil ainda não possuem mais de 25 anos de funcionamento, que é o tempo médio de garantia oferecida pelos fabricantes de módulos fotovoltaicos (FOTOVOLTAICO *et al.*, 2017). É possível que estes módulos não cheguem a durar todo este tempo de garantia, informação muito útil ao fabricante. O que motivou a utilização de sensores FBG foi devido ao tamanho reduzido dos sensores, precisão, resposta linear, possibilidade de sensoriamento em vários pontos utilizando somente uma fibra ótica e para a análise do comportamento deste tipo de sensoriamento na área de fotovoltaica.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo principal o monitoramento de temperatura em um módulo fotovoltaico de uma planta real em funcionamento, situada na edificação do Escritório Verde da UTFPR, utilizando as redes de Bragg em fibra ótica, desejando avaliar o desempenho de todo o sistema de monitoramento e coleta de dados de temperatura.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, alguns objetivos específicos foram estabelecidos, com o propósito de fundamentar cada uma das etapas. São eles:

- realizar a gravação, encapsulamento e calibração de 21 sensores de temperatura FBG e compará-los com outro sensor de temperatura FBG sem encapsulamento para obtenção do tempo de resposta à temperatura;
- realizar a instalação dos sensores encapsulados na parte traseira do módulo fotovoltaico, instalado no telhado do Escritório Verde, e de todos os equipamentos auxiliares para coleta de dados;
- realizar o monitoramento de temperatura do módulo fotovoltaico durante vários dias em operação;
- compilar os dados coletados e convertê-los em valores temperatura.
- analisar os dados obtidos e apresentá-los em forma de gráficos e tabelas;
- comparar os valores obtidos com medições realizadas com outros instrumentos;
- concluir se os sensores óticos, para o monitoramento de temperatura de módulos fotovoltaicos, são eficientes e confiáveis.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos onde são descritos a gravação, calibração e testes de 21 sensores de temperatura baseado nas redes de Bragg em fibra ótica, para o monitoramento de temperatura em um módulo fotovoltaico em operação. Também é explanado sobre o sistema fotovoltaico conectado à rede de energia elétrica e seus componentes.

No capítulo 1, introdução, é apresentada a estrutura da dissertação e o contexto em que este trabalho é aplicado. O enfoque do estudo em módulos fotovoltaicos foi dado em função de trabalhos analisados e relatos de profissionais da área, o que motiva o desenvolvimento dos sensores óticos para monitoramento de temperatura em módulos fotovoltaicos.

No capítulo 2, fundamentação teórica, são apresentados a estrutura e os conceitos físicos de funcionamento dos módulos fotovoltaicos e sensores em fibra ótica (FBG). É apresentada uma abordagem de sistemas fotovoltaicos, onde são contextualizados os conceitos e funcionamento do sistema fotovoltaico, principalmente o sistema conectado à rede elétrica da concessionária e são apresentadas as curvas de temperatura em relação à máxima potência de um módulo fotovoltaico. Também são apresentados os métodos de medição de temperatura de módulos. É explanado sobre os conceitos e funcionamento de redes de Bragg e são abordados os sensores óticos para medição de temperatura pela variação do comprimento de onda.

No capítulo 3, materiais e métodos, são explicados os conceitos de gravação, sensibilidade e caracterização das redes de Bragg em fibra ótica. É exposta a estrutura do sistema montado para a gravação, calibração e aquisição de dados, e na sequência são apresentados os aspectos de montagem dos sensores óticos, detalhando cada equipamento pertencente ao sistema, explicado sobre os ensaios para calibração dos sensores, tipo de encapsulamento, fixação no módulo, aquisição e tratamento dos dados coletados;

No capítulo 4, resultados e discussões, são apresentados os resultados da calibração e tempo de resposta dos sensores e os valores obtidos através do monitoramento e aquisição dos dados de temperatura ao longo de vários dias. Neste capítulo é realizada também a discussão dos resultados obtidos.

No capítulo 5, conclusões e sugestões para trabalhos futuros, são expostas as conclusões a respeito do estudo e monitoramento de temperatura de um módulo fotovoltaico em operação, baseado em redes de Bragg em fibra ótica. Também são sugeridos trabalhos futuros, como forma de continuar os estudos e implementações propostos nesta dissertação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Na seção 2.1 deste capítulo é apresentada uma abordagem de sistemas fotovoltaicos, onde são contextualizados os conceitos e funcionamento do sistema fotovoltaico, principalmente o sistema conectado à rede elétrica da concessionária e são apresentadas as curvas de temperatura e máxima potência de um módulo fotovoltaico. Na seção 2.2 são apresentados os métodos de medição de temperatura de módulos. Na seção 2.3 é explanado sobre os conceitos e funcionamento de redes de Bragg e são abordados os sensores óticos para medição de temperatura pela variação do comprimento de onda.

2.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Neste item é abordado o conceito de energia fotovoltaica e os equipamentos constituintes deste sistema.

2.1.1 ENERGIA FOTOVOLTAICA

A Energia Solar Fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico). O efeito fotovoltaico, relatado por Edmond Becquerel, em 1839, é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz (CRESESB, 2006).

2.1.2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

A célula fotovoltaica é a unidade fundamental do processo de conversão. As células são construídas basicamente por materiais semicondutores como o silício cristalino ($c - Si$) ou amorfo ($a - Si$), arseneto de gálio ($GaAs$), telureto de cádmio ($CdTe$) e até uma liga de cobre-índio-gálio-selênio ($CIGS$). O efeito fotovoltaico em semicondutores se caracteriza pela presença de bandas de energia onde é permitida a presença de elétrons (banda de valência) e de outra totalmente "vazia"(banda de condução). O semicondutor mais usado é o silício.

Seus átomos se caracterizam por possuírem quatro elétrons ligados por ligações covalentes com os átomos adjacentes, formando uma rede cristalina. Ao adicionarem-se átomos com cinco elétrons na banda de valência (pentavalente), como o fósforo, por exemplo, haverá um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado e que ficará "sobrando", fracamente ligado a seu átomo de origem. Isto faz com que, com pouca energia térmica, este elétron se livre, indo para a banda de condução. Diz-se assim, que o fósforo é um dopante doador de elétrons e denomina-se dopante tipo n ou impureza tipo n. Se, por outro lado, introduzem-se átomos com apenas três elétrons na camada de valência, como é o caso do boro, haverá uma falta de um elétron para completar as ligações com os átomos de silício da rede. Esta falta de elétron é denominada buraco ou lacuna e ocorre que, com pouca energia térmica, um elétron vizinho pode passar a esta posição, fazendo com que o buraco se desloque. Diz-se portanto que o boro é um aceitador de elétrons ou um dopante tipo p (CRESESB, 2006). A Figura 1 mostra um corte transversal de uma célula fotovoltaica. Na mesma figura é possível verificar as camadas N e P, bem como a junção PN estabelecida, a qual é responsável pela geração da diferença de potencial foto induzida.

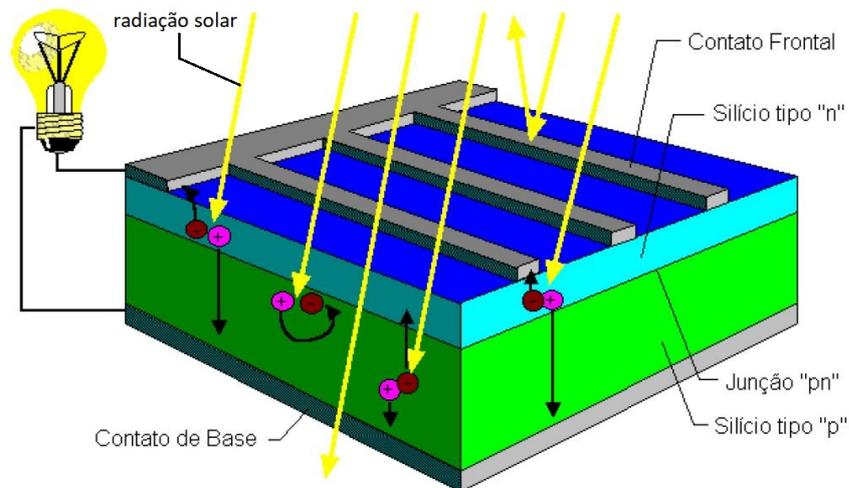


Figura 1: Corte transversal de uma célula fotovoltaica.

Fonte: (CRESESB, 2006)

2.1.3 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Módulo é o conjunto de células fotovoltaicas. O módulo fotovoltaico é o equipamento básico para qualquer instalação fotovoltaica, não há como gerar energia sem ele. A quantidade de módulos conectados em série irá determinar a tensão de operação do sistema em corrente contínua (CC) e a corrente elétrica do gerador solar é definida pela conexão em paralelo de painéis individuais ou de *strings* (conjunto de módulos conectados em série) (RÜTHER, 2004).

2.1.3.1 TIPOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Os módulos solares apresentam normalmente tensões médias de circuito aberto (V_{oc}) em torno de 20 V, apropriadas para a carga de baterias de 12 V em sistemas autônomos (não conectados à rede), por esta razão são utilizadas combinações série/paralelo de vários módulos, para que se obtenham as tensões e correntes desejadas. Existem várias tecnologias fotovoltaicas comercialmente disponíveis, de acordo com a característica da célula: silício cristalino (c-Si); o silício amorfo hidrogenado ($a-Si:H$) (ou simplesmente a-Si); o telureto de cádmio (CdTe) e os compostos relacionados ao disseleneto de cobre (gálio) e índio ($CuInSe_2$ ou CIS e $Cu(InGa)Se_2$ ou CIGS). O c-Si é a tecnologia fotovoltaica mais tradicional e a única dentre as mencionadas acima que faz uso de lâminas cristalinas (diâmetro aproximado de 10 cm tipicamente) relativamente espessas (espessura 300- 400 μm), o que representa uma maior limitação em termos de redução de custos de produção. Todas as outras tecnologias estão baseadas em películas delgadas (filmes finos, com espessura da ordem de 1 μm) de material ativo semiconductor e é neste aspecto que reside o grande potencial de redução de custos que estas tecnologias detêm (RÜTHER, 2004). O mercado de módulos fotovoltaicos vem crescendo acentuadamente nos últimos anos, com novas tecnologias oferecendo alternativas especialmente desenvolvidas para a integração ao entorno construído. Dependendo da arquitetura do ambiente, é utilizado o a-Si, ou seja, filmes finos que tem menor custo de produção e são mais flexíveis para serem moldados na estrutura desejada.

Na Figura 2 é mostrado um exemplo de aplicação de módulos fotovoltaicos em equipamentos portáteis que são transportados à locais onde não há fonte de energia elétrica.



Figura 2: Exemplo de aplicação de módulos fotovoltaicos flexíveis (filme fino) em equipamentos portáteis.

Fonte: (ECOD, 2017)

Os módulos fotovoltaicos também podem ser utilizados como parte da arquitetura de uma edificação de forma decorativa, como é mostrado na Figura 3, onde estão instalados em estádios de futebol no Brasil. Nesses casos a instalação se deu na cobertura.



Figura 3: Módulos fotovoltaicos instalados no Maracanã, Mineirão e Mané Garrincha.

Fonte: (GREENBRAS, 2017)

2.1.3.2 CARACTERÍSTICAS E CURVAS DE OPERAÇÃO

Geralmente, a potência dos módulos é dada pela potência de pico. Tão necessário quanto este parâmetro, existem outras características elétricas que melhor caracterizam a funcionalidade do módulo. As principais características elétricas dos módulos fotovoltaicos são as seguintes:

- Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})
- Corrente de Curto Circuito (I_{sc})
- Potência Máxima (P_m)
- Tensão de Potência Máxima (V_{mp})
- Corrente de Potência Máxima (I_{mp})

A condição padrão para se obter as curvas características dos módulos é definida para radiação de 1000 W/m^2 (radiação recebida na superfície da Terra em dia claro ao meio dia), e temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ na célula (a eficiência da célula é reduzida com o aumento da temperatura) (CRESESB, 2006). A Figura 4 representa as curvas características. Em a) observamos $\cong 1 \text{ A}$ no modo de curto circuito e $0,6 \text{ Vcc}$ para circuito em aberto. Em b) a potência máxima de $\cong 450 \text{ mW}$ se dá na tensão $0,5 \text{ Vcc}$. Em c) há a sobreposição das curvas dadas por a) e b), determinando o ponto ótimo (máxima potência) para operação.

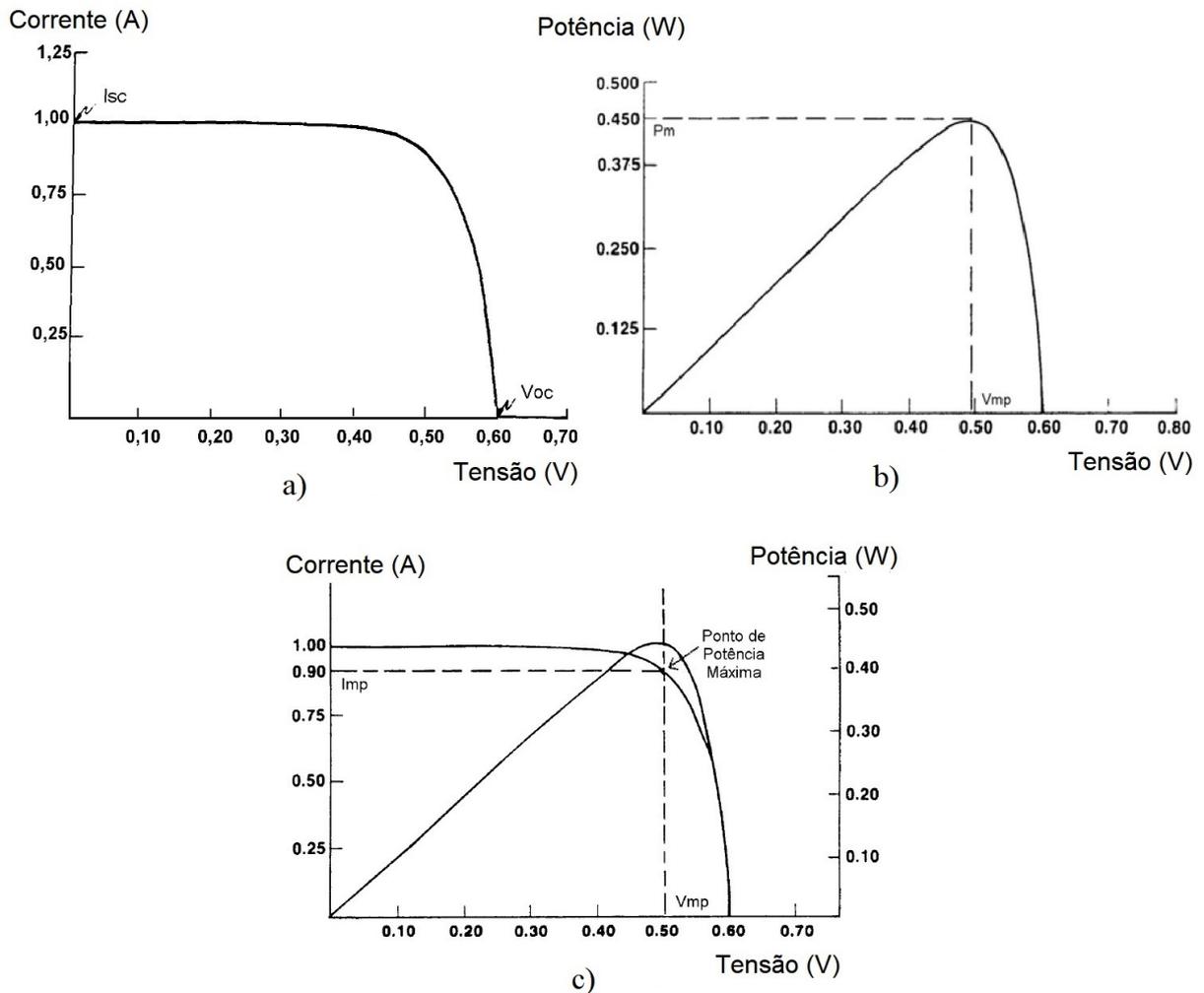


Figura 4: a) Curva característica IxV mostrando a corrente I_{sc} e a tensão V_{oc} , b) Curva típica de Potência x Tensão, c) Parâmetros de potência máxima.

Fonte: (CRESESB, 2006)

Os principais fatores que influenciam nas características elétricas de um painel é a Intensidade Luminosa e a Temperatura das Células. A corrente gerada nos módulos aumenta de forma razoavelmente linear com o aumento da Intensidade luminosa, conforme mostra a Figura 5a. Por outro lado, o aumento da temperatura na célula faz com que a eficiência do módulo caia abaixando assim os pontos de operação para potência máxima gerada (CRESESB, 2006). Ainda na Figura 5, em b) mostra-se a redução da potência máxima diretamente proporcional ao aumento da temperatura.

Este comportamento do módulo fotovoltaico justifica e incentiva o monitoramento da temperatura deste, como ferramenta para a obtenção do ponto de máxima potência. Na maioria dos casos próximo às 12h é o momento de maior eficiência de produção de energia elétrica

devido à maior radiação incidida, porém em dias muito quentes, a maior eficiência do módulo pode ser alterada para outros horários, mesmo com radiação menor devido à temperatura ideal de operação.

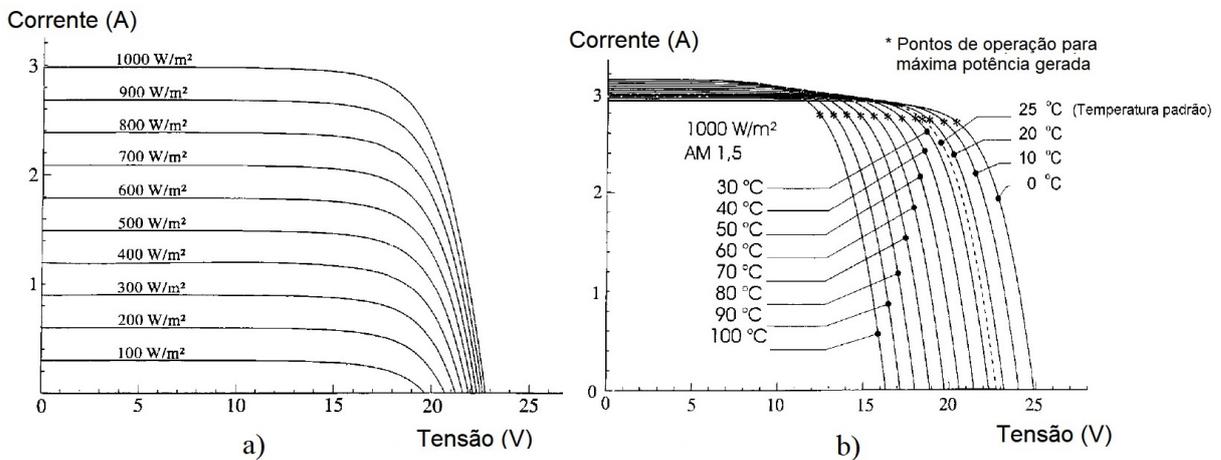


Figura 5: a) Efeito causado pela variação de intensidade luminosa, b) Efeito causado pela temperatura na célula.

Fonte: (CRESESB, 2006)

2.1.3.3 TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Existem duas categorias principais de sistemas fotovoltaicos: Sistemas Isolados (SFVI) ou Sistemas Conectados à Rede Elétrica (SFVCR). De acordo com Pinho e Galdino (2014) ambos casos podem operar apenas como fonte fotovoltaica ou combinada com outras fontes de energia, quando são chamados de híbridos. A escolha da configuração a ser utilizada depende principalmente da disponibilidade de recursos energéticos, da aplicação em questão e das restrições do projeto.

2.1.3.3.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO

Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFVI), também conhecidos como autônomos, são comumente utilizados em áreas sem acesso à rede elétrica como fazendas, ilhas e comunidades isoladas. Uma das principais vantagens é a substituição dos geradores movidos a combustíveis fósseis, fornecendo energia de forma mais silenciosa e menos poluente, entretanto a principal desvantagem é o alto custo de manutenção dos componentes (MACHADO; CORREA, 2015). O esquema de montagem desse sistema é apresentado na Figura 6, onde podemos ver a tensão DC resultante do painel, aplicada ao controle de carga, posteriormente ligada ao banco de baterias. Por último o banco de baterias alimenta o inversor responsável por alimentar a carga.

Ainda segundo Machado e Correa (2015) existem sistemas fotovoltaicos isolados com vários tipos de armazenamento como, por exemplo, de energia potencial gravitacional, ou até mesmo sem armazenamento, usados em situações bastante restritas, quando o momento de geração coincide com o de consumo. Porém, na maioria dos casos, esse armazenamento é feito através de baterias, suprindo a demanda de períodos em que a geração é baixa ou inexistente além de evitar o desperdício da energia gerada em períodos de baixo consumo. Para que não ocorram sobrecargas ou descargas excessivas na bateria, é necessário instalar um controlador de carga entre ela e o painel fotovoltaico, ajudando também a prolongar a vida útil do equipamento.



Figura 6: Sistema Fotovoltaico isolado

Fonte: (NEOSOLAR, 2017)

A partir dessa configuração é possível alimentar cargas CC de maneira direta, pois ao contrário dos painéis, a tensão de saída da bateria é constante. Contudo, esses sistemas também são capazes de alimentar cargas CA, exigindo apenas a introdução de um inversor no sistema, responsável por converter a tensão contínua em tensão alternada (MACHADO; CORREA, 2015).

2.1.3.3.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFVCR) são constituídos basicamente por: painel fotovoltaico (PFV) e inversor, este último é o equipamento mais complexo do sistema pois controla e monitora a produção de energia elétrica. Não são utilizados elementos para armazenar a energia elétrica. Basicamente, a rede elétrica da concessionária é vista como

o elemento armazenador, pois toda a energia gerada é colocada em paralelo com a energia da rede. As principais vantagens desse tipo de sistema são: a elevada produtividade (toda a energia disponibilizada pelos módulos é utilizada) e a ausência do conjunto de baterias (um elo frágil no SFVI devido à baixa vida útil em relação a dos módulos FV e dos inversores) (JUNIOR, 2010). Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica têm grande aplicação no ambiente urbano como geradores de energia elétrica junto ao ponto de consumo. São facilmente integrados à edificação, não necessitando de área adicional, visto que são normalmente instalados sobre a cobertura da edificação. Possuem elevada confiabilidade e operam de forma limpa e silenciosa (JUNIOR, 2012). A configuração mais aplicada é conhecida como Sistema Aplicado à Edificação na qual os painéis são aplicados sobre a edificação e não compõem o envoltório da construção. Cujo esquema de montagem é apresentado na Figura 7.

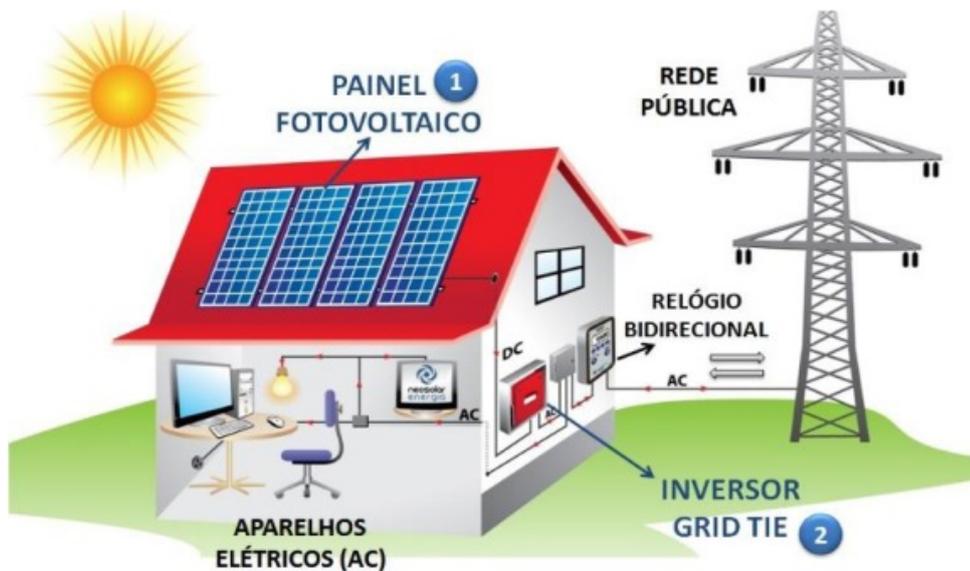


Figura 7: Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

Fonte: (NEOSOLAR, 2017)

Nesta configuração a geração está próxima ao ponto de consumo, eliminando gastos e perdas com linhas de transmissão. A potência instalada nesses casos costuma ser mais baixa (kW), pois visa basicamente a alimentação das cargas existentes na residência ou na indústria onde o sistema fotovoltaico está instalado (RÜTHER, 2004). Segundo MACHADO e CORREA (2015) os principais componentes desse tipo de sistema são:

- Painel fotovoltaico: é responsável por converter a energia solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico.
- Inversor: converte a energia CC em CA para a alimentação das cargas e é responsável

pelo sincronismo do sistema com a rede elétrica. Além disso, possui outra função de extrema importância, pois independente da configuração ou da potência instalada, o inversor deve se desligar automaticamente na ausência da rede elétrica, evitando o fenômeno conhecido como “ilhamento”, ou seja, por questões de segurança, pois quando há um desligamento da rede elétrica externa, há a possibilidade de que esta esteja sendo reparada por técnicos da concessionária de energia, por este motivo não pode ser conectada nenhuma outra rede neste período.

- Medidor bidirecional: responsável por medir a energia consumida da rede elétrica pública nos momentos de baixa geração, bem como a energia injetada nela durante os momentos em que a geração do sistema fotovoltaico excede o consumo da instalação à qual pertence. Isso é necessário para que o micro ou o mini gerador possa participar do Sistema de Compensação de Energia, no qual o excedente injetado na rede é convertido em créditos de energia (kWh) para o consumidor, que poderá utilizá-los para abater o consumo nas faturas dos próximos meses. Este crédito de energia tem uma validade de 60 meses.

2.2 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

Neste trabalho a temperatura foi medida por Redes de Bragg em Fibra Ótica, porém comparada à valores obtidos com termoresistências (PT-100) e termopares. A origem de equipamentos de medição de temperatura se deu há muitos anos por alguns cientistas porém, registra-se que aproximadamente em 1592 (BARRY; CHORLEY, 2003), Galileo Galilei utilizou um tubo invertido, com água e ar, e criou uma espécie de termômetro no qual a elevação da pressão exterior fazia com que o ar dilatasse e, em consequência, elevasse o nível da água dentro do tubo (COMPANY, 2018). Em 1821, Thomas Johann Seebeck descobriu que uma tensão elétrica era criada quando as extremidades de metais diferentes eram unidas e colocadas sob temperaturas diferentes. Peltier descobriu que esse efeito de termopar pode funcionar no sentido inverso, e assim, pode ser usado para esfriar ou aquecer utilizando pastilhas termoelétrica em presença da corrente elétrica. No mesmo ano, Humphry Davy demonstrou como a resistividade elétrica de um metal está relacionada a sua temperatura. Cinco anos depois, Becquerel propôs o uso de um termopar platina-platina para a medição de temperatura, mas foi só em 1829 que Leopoldi Nobili criou efetivamente o equipamento chamado de termopar. A platina também é usada no detector de temperatura de resistência (RTD) inventado em 1932 por C.H. Meyers. O RTD mede a resistência elétrica de um pedaço de fio de platina e é geralmente considerado o tipo mais preciso de sensor de temperatura (COMPANY, 2018). O PT-100 é um exemplo de RTD amplamente utilizado para medições precisas.

2.3 REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA

As fibras óticas são basicamente formadas por materiais dielétricos cristalinos e homogêneos, como a sílica (SiO_2) dopada ou pura. Sua construção consiste de um núcleo envolto por uma casca com índice de refração menor (sílica pura), onde esta diferença no índice é de aproximadamente 1%. O índice de refração do núcleo sendo maior, tende a confinar em seu interior o feixe de luz acoplado ao guia de onda através da reflexão interna total, conforme a Lei de Snell-Descartes da ótica geométrica. As fibras podem ser definidas como Multimodo e Monomodo (HECHT, 2016). De acordo com Hecht, para a fibra multimodo pode haver centenas, até milhares de diferentes caminhos ou modos pelos quais a energia pode se propagar pelo núcleo, conforme Figura 8, em que cada modo corresponde a um tempo de trânsito ligeiramente diferente. Uma fibra é um guia de ondas óticas e a maneira precisa pela qual a “luz” se propaga ao longo desse tipo de canal pode ser bastante complexa.

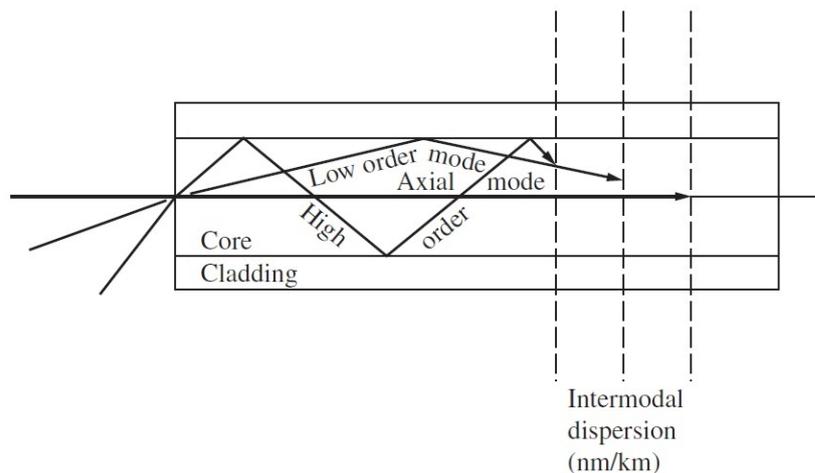


Figura 8: Dispersão intermodal em fibra multimodo de índice escalonado

Fonte: (HECHT, 2016)

A melhor solução para o problema da dispersão intermodal nas fibras multimodo é tornar o núcleo tão estreito (menos de $10\ \mu\text{m}$) que ele permitirá apenas um modo de propagação, conforme Figura 9c. Este é o caso da fibra monomodo, tais fibras de sílica fornecem o melhor desempenho. Uma fibra monomodo é projetada para permitir que apenas o modo fundamental em um determinado comprimento de onda se propague ao longo de seu núcleo. Isso é conseguido reduzindo a diferença entre os índices de refração do núcleo e do revestimento, diminuindo as perdas. Haverá então um comprimento de onda que é o menor possível, no qual somente o modo fundamental será sustentado.

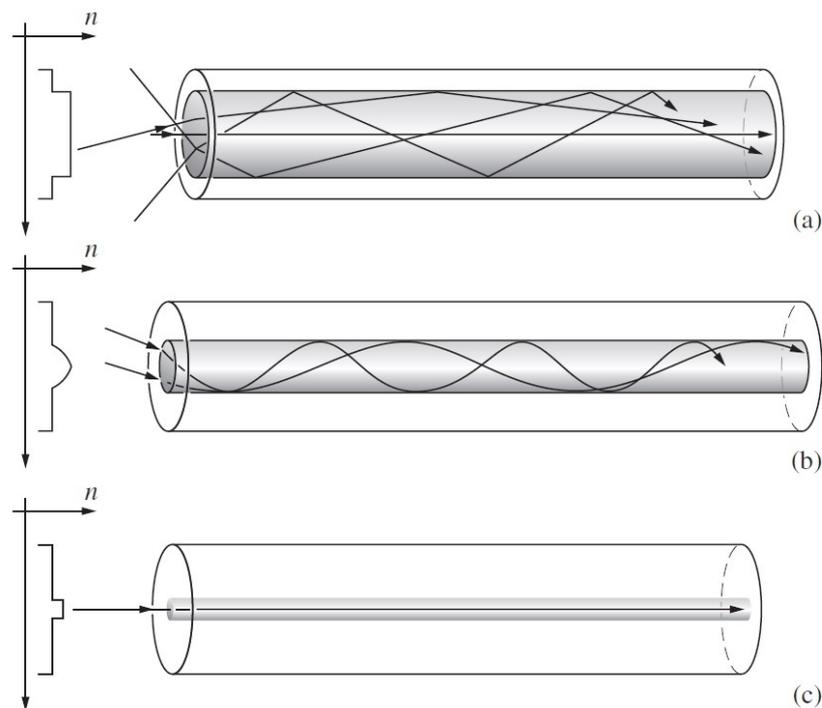


Figura 9: As três principais configurações de uma fibra óptica e seu perfis de índices. (a) Fibra multimodo de índice degrau b) Fibra multimodo de índice gradual (c) Fibra monomodo de índice degrau

Fonte: (HECHT, 2016)

Para a aplicação em FBG se utiliza a fibra óptica monomodo ou multimodo. Nesse trabalho as FBGs foram produzidas em fibra monomodo padrão de telecomunicações.

Com a descoberta da fotossensibilidade em fibras ópticas (possibilidade de alteração do índice de refração através da luz *laser*), uma nova classe de componentes intrínsecos à fibra foi desenvolvida, chamada de Rede de Bragg em fibra óptica. A fotossensibilidade das fibras ópticas permite a fabricação de estruturas de fase ou redes de difração que são obtidas pela alteração permanente e periódica do índice de refração ao longo do núcleo. Este dispositivo permite a realização de muitas das funções primárias mencionadas, como reflexão e filtragem de uma maneira altamente eficiente e com baixa perda. Este pode ser considerado um dispositivo comparativamente simples (OTHONOS; KALLI, 1999). Redes de Bragg, aplicadas como sensor, apresentam variação no comprimento de onda central do espectro em função de variações de parâmetros físicos como a temperatura ou deformação.

Redes de Bragg possuem técnica de fabricação consolidada. Elas frequentemente resultam em uma perturbação mínima na estrutura da fibra e sua fabricação tende a ter um custo cada vez menor. As vantagens oferecidas pela fibra óptica, como baixa perda de transmissão, alta imunidade a interferência eletromagnética, peso leve e isolamento elétrico, também fazem deste tipo de rede intra-núcleo ideal para uso em telecomunicações e sensores.

A variação do comprimento de onda no qual a reflexão de Bragg ocorre, pode estar relacionado à magnitude de uma perturbação externa a ser mensurada. Essa funcionalidade está de acordo com o objetivo ideal dos sensores de fibra ótica: ter uma estrutura no núcleo da fibra que ofereça um mecanismo de leitura precisa, no caso a leitura do comprimento de onda central da luz refletida. A rede de Bragg pode ser foto-gravada no núcleo da fibra durante o processo de fabricação da fibra, sem perda mensurável da resistência mecânica do material. Isto torna possível colocar um grande número de redes de Bragg em locais pré-determinados na fibra ótica para realizar uma rede de sensores quase distribuída para monitoramento estrutural com relativa facilidade e a baixo custo. As Redes de Bragg são ideais como sensores que medem a deformação dinâmica em aplicações aeroespaciais e como sensores de temperatura para aplicações médicas. Elas também operam bem em ambientes hostis, tais como aplicações de alta pressão, perfuração de poços, como resultado das propriedades da sílica. Finalmente, também é possível ter estruturas de redes de fibra que sejam transmissivas, acoplando luz entre os modos de núcleo e de casca. Neste caso, a concordância de fase determina que a periodicidade da rede seja de várias centenas de microns e, portanto, esses componentes são conhecidos como redes de período longo (OTHONOS; KALLI, 1999).

2.3.1 PERSPECTIVA HISTÓRICA

A fotossensibilidade na fibra foi observada primeiramente em fibras de sílica dopadas com germânio em experimentos realizados por Hill e colaboradores no *Communication Research Center* no Canadá em 1978. Durante um experimento realizado para estudar os efeitos não-lineares em uma fibra ótica especialmente projetada, um intensa luz visível de um *laser* de íons de argônio foi lançado no núcleo da fibra. Sob exposição prolongada, foi observado aumento na atenuação das fibras. Foi verificado que durante a exposição a intensidade da luz refletida da fibra aumentou significativamente com o tempo, com quase toda a radiação incidente refletida de volta. Medições espectrais confirmaram que o aumento na refletividade foi o resultado de uma rede de índice de refração permanente sendo foto-induzida sobre o comprimento de 1 m de fibra - posteriormente chamado de redes de Hill.

2.3.2 DEFINIÇÃO DE REDES DE BRAGG

A rede de Bragg consiste de uma modulação periódica longitudinal do índice de refração, η_{eff} , do núcleo da fibra ótica, com a alteração de índices perpendiculares ao eixo longitudinal, com um período, Λ , constante. Índice de Refração (η) é a relação entre a velocidade de propagação da luz no vácuo (c_{vac}) e, a velocidade de propagação da luz em

um determinado material (c_{mat}). O núcleo da fibra ótica tem o índice de refração (η_{eff}) maior do que o da casca e cada modo de propagação enxerga um índice de refração efetivo que é o valor intermediário entre o índice de refração do núcleo e o da casca. Uma rede de Bragg é dita uniforme quando apresenta uma variação em seu índice de refração com amplitude e periodicidade, Λ , constante durante toda a extensão longitudinal da FBG. Para um pequeno intervalo de comprimentos de onda, em torno do comprimento de onda de Bragg (λ_B), uma porção da luz é refletida pela rede e outra porção é transmitida, conforme mostra a figura 10.

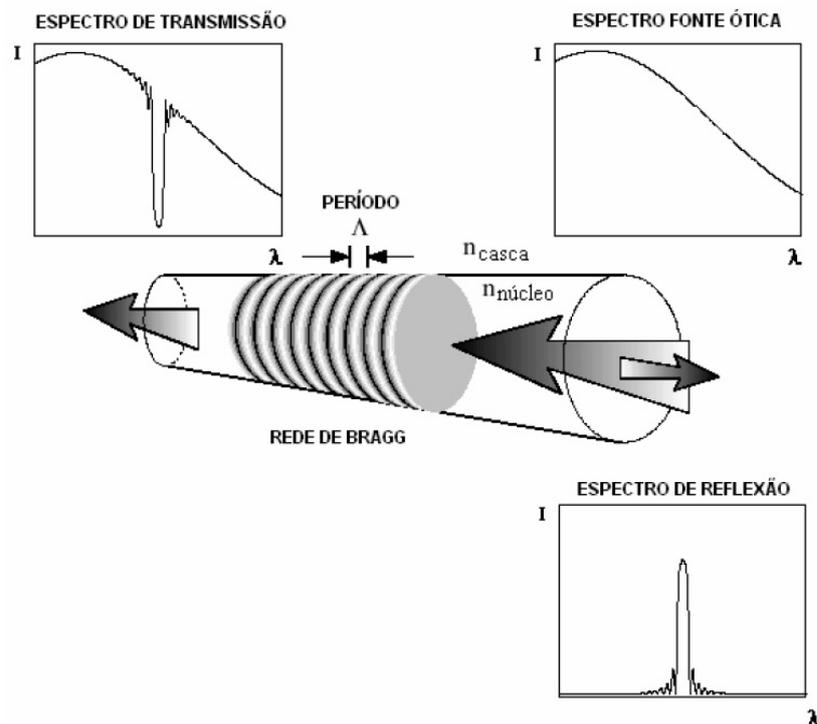


Figura 10: Representação de uma Rede de Bragg e espectros da luz

Fonte: Adaptado de (OTHONOS; KALLI, 1999)

A luz guiada ao longo do núcleo da fibra ótica será refletida por cada plano da rede de Bragg e o restante do sinal será transmitido. Se a condição de Bragg não for satisfeita, a luz refletida em cada plano subsequente torna-se progressivamente fora de fase e eventualmente a intensidade de luz refletida é cancelada. Quando a condição de Bragg é satisfeita, a contribuição da luz refletida por cada plano da rede contribui construtivamente na direção contra propagante, formando uma banda de reflexão com comprimento de onda central definido pelos parâmetros da rede. Desta forma o espectro refletido por uma FBG é uma estreita faixa espectral, centrada no comprimento de onda de Bragg. A variação do comprimento de onda central do sinal refletido é a componente que será monitorada nos sensores baseados em FBGs (OTHONOS; KALLI, 1999). Neste trabalho, foram utilizadas FBGs uniformes (Período e índice de refração

uniforme). De acordo com a lei de Bragg, dada pela Equação 1, o espectro refletido é centralizado próximo ao comprimento de onda de Bragg (λ_B).

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

onde, η_{eff} é o índice efetivo de refração do núcleo da fibra e Λ é o período de modulação do índice de refração. A Equação 1, também conhecida como comprimento de onda de reflexão de Bragg, determina o comprimento de onda de pico da componente espectral de banda estreita refletida por cada FBG gravada ao longo da fibra ótica. A Equação 1 também mostra que o comprimento de onda de Bragg é uma função de Λ e η_{eff} . Assim, pode-se concluir que uma deformação longitudinal, em virtude de uma força externa, pode alterar tanto o Λ como o η_{eff} , a última pelo efeito fotoelástico e o primeiro pelo aumento do período da rede. Igualmente, a variação de temperatura também pode alterar ambos os parâmetros através da dilatação térmica e do efeito termo-ótico, respectivamente, conforme Equação 2 (OTHONOS; KALLI, 1999) (KASHYAP, 1999).

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

Efeito Termo Óptico
Efeito de expansão térmica

Efeito da deformação
Efeito da temperatura

(2)

O segundo termo da equação representa o efeito da temperatura (T) na fibra ótica. O deslocamento no comprimento de onda de Bragg, devido à expansão térmica, resulta da modificação no espaçamento da rede e mudança do índice de refração. Esse deslocamento, para uma variação de temperatura ΔT , pode ser escrita pela Equação 3 (OTHONOS; KALLI, 1999), (KASHYAP, 1999).

$$2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \longrightarrow \Delta\lambda_B = \lambda_B (\alpha_\Lambda + \alpha_n) \Delta T \quad (3)$$

onde $\alpha_\Lambda = (1/\Lambda)(\delta\Lambda/\delta T)$ é o coeficiente de expansão térmica para a fibra (aproximadamente $0,55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para sílica). O valor $\alpha_\eta = (1/\eta_{eff})(\rho\eta_{eff}/\delta T)$ representa o coeficiente termo-ótico, aproximadamente igual a $8,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para fibra com núcleo de sílica dopada com germânio. A Equação 3 fornece sensibilidade de, aproximadamente, $13,7 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, para rede com comprimento de onda de Bragg em 1550 nm (OTHONOS; KALLI, 1999), (KASHYAP, 1999).

Os coeficientes foto-elástico e termo-ótico, presentes na Equação 3, para a sílica empregada na produção das fibras, determinam que as características das redes de Bragg sejam afetadas, quer pela aplicação de tensão mecânica, quer pela temperatura, respectivamente. Isso torna as redes de Bragg elementos sensores para essas grandezas, podendo ser incorporados facilmente a enlaces em fibra ótica. A Figura 11 mostra a caracterização de um sensor térmico FBG. A mesma figura apresenta a variação do comprimento de onda da rede de Bragg em função da variação da temperatura. Na Figura 11a, podemos obter a razão entre a variação no comprimento de onda ($\Delta\lambda_B$) e a correspondente variação de temperatura (ΔT), resultando na sensibilidade das FBGs, normalmente apresentada em $\text{pm}/^\circ\text{C}$. Na Figura 11b é apresentado o espectro de reflexão e transmissão da luz emitida pela fonte ótica.

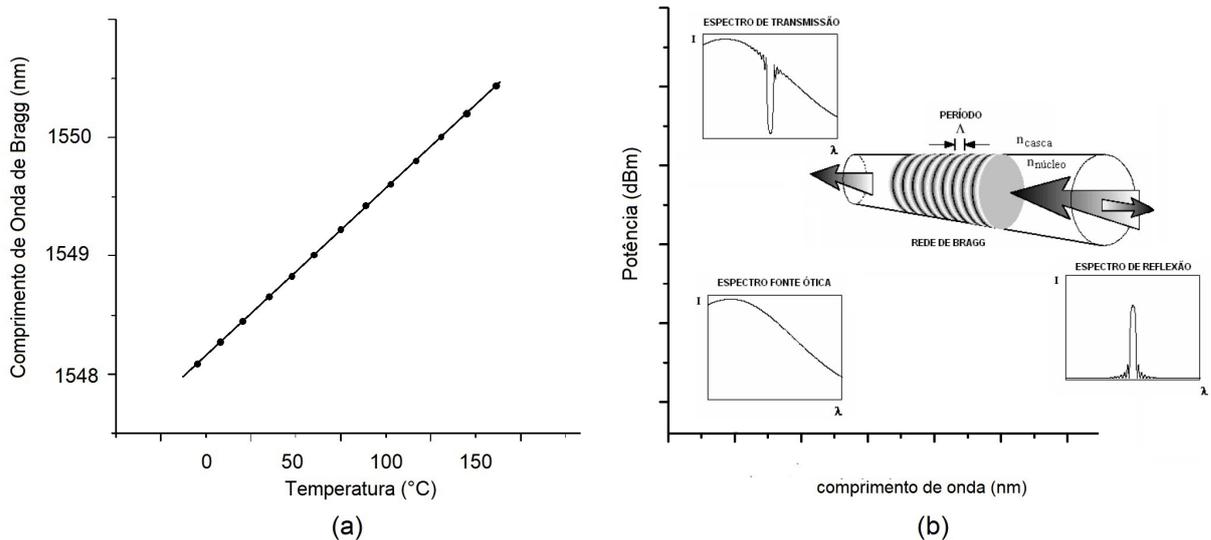


Figura 11: a) Gráfico de Comprimento de onda de Bragg x Temperatura, b) Espectro de reflexão e transmissão da luz

Fonte: Adaptado de (OTHONOS; KALLI, 1999)

2.3.3 GRAVAÇÃO DE REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA

As gravações das redes de Bragg tiveram início com Hill et al. em 1978, o qual utilizou um método interno de gravação, que consistia no acoplamento de uma radiação de um *laser* de argônio, com 488 nm, no núcleo da fibra ótica. A interferência do sinal propagante com o contra-propagante, resultante da reflexão de Fresnel na face clivada, formava uma onda estacionária no núcleo da fibra. Deste modo induziu-se uma modulação do índice de refração do núcleo da fibra com valores máximos correspondentes aos máximos da onda estacionária criada (HILL *et al.*, 1978).

A técnica atual mais difundida não utilizando um interferômetro é a da máscara de fase, devido à sua simplicidade, capacidade de reprodutibilidade e a reduzida coerência da emissão *laser* necessária para formar interferência (HILL *et al.*, 1978).

A criação da máscara de fase foi um passo importante para facilitar a gravação das Redes de Bragg em fibra ótica. Usada em transmissão, uma máscara de fase é uma rede gravada em uma placa de sílica produzida por fotolitografia. As características significativas da máscara de fase são as ranhuras gravadas nesta placa de sílica transmissora de UV, com uma relação ranhuras / espaço cuidadosamente controlada, bem como a sua espessura.

O princípio de operação baseia-se na difração de um feixe UV incidente em várias ordens, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Isso é mostrado esquematicamente na Figura 12. As ordens incidente e difratada satisfazem a equação geral da difração (Equação 4), com período Λ_{pm} da máscara de fase,

$$\Lambda_{pm} = \frac{m\lambda_{uv}}{\text{sen}\frac{\theta_m}{2} - \text{sen}\theta_i} \quad (4)$$

onde $\theta_m/2$ é o ângulo da ordem difratada, λ_{uv} o comprimento de onda e θ_i o ângulo do feixe UV incidente. Nos casos em que o período da rede fica entre λ_{uv} e $\lambda_{uv}/2$, a onda incidente é difratada em apenas uma única ordem ($m = -1$) com o restante da energia transmitida ($m = 0$). Com a radiação UV em incidência normal, $\theta_i = 0$, a radiação difratada é dividida em ordens $m = 0$ e ± 1 , como mostrado na Figura 12. O padrão de interferência na fibra de dois desses feixes de ordens ± 1 reunidos por espelhos paralelos tem um período Λ_g relacionado ao ângulo de difração $\theta_m/2$ é indicado pela Equação 5.

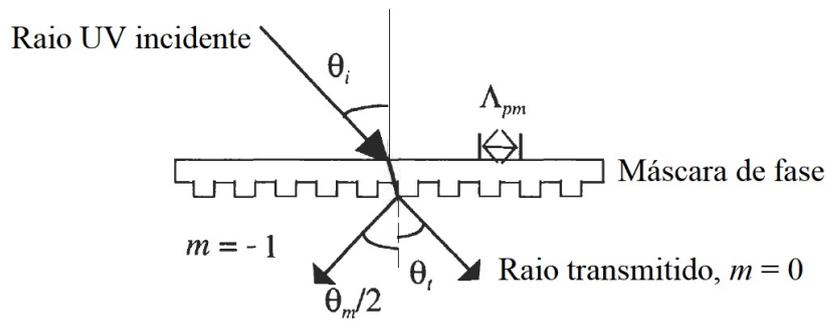


Figura 12: Esquema de difração de um raio incidente em uma máscara de fase

Fonte: Adaptado de (KASHYAP, 1999)

$$\Lambda = \frac{\lambda_{uv}}{2\sin(\frac{\theta_m}{2})} = \frac{\Lambda_{pm}}{2} \quad (5)$$

A maneira mais simples de se utilizar a máscara de fase na gravação de redes é manter a fibra ótica junto a superfície da máscara alinhada transversalmente com as depressões, conforme mostrado na Figura 13. O período gravado na rede será a metade do período da máscara (Equação 5). A razoável simplicidade do alinhamento da máscara de fase e a estabilidade inerente do padrão de interferência permitem fabricar redes de Bragg com elevada reprodutibilidade. O método descrito não permite que redes de diferentes comprimentos de onda sejam gravadas com o uso da mesma máscara de fase (OTHONOS; KALLI, 1999) e (KASHYAP, 1999).

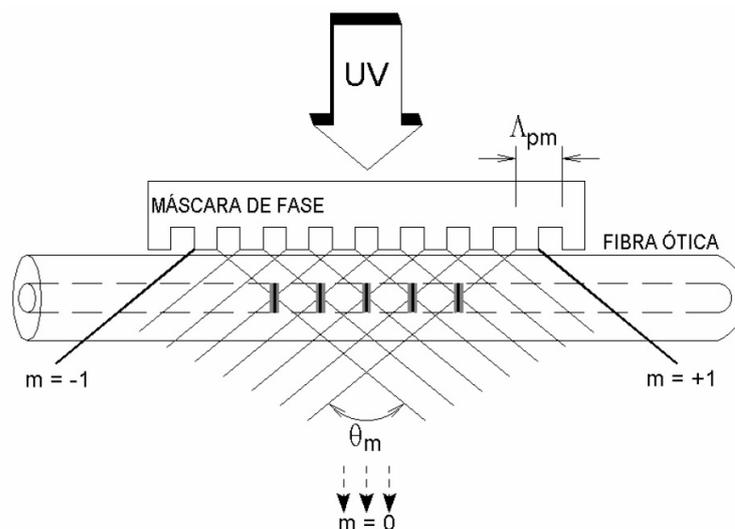


Figura 13: Máscara de fase com representação do feixe UV incidente e as ordens $0e \pm 1$

Fonte: Adaptado de (KASHYAP, 1999)

Por esta razão, neste trabalho foram utilizadas 21 máscaras de fase com diferentes períodos para cada rede.

2.3.4 SISTEMA DE LEITURA

O sistema de leitura dos comprimentos de onda de Bragg (λ_B) é feito por interrogadores e analisadores de espectro ótico (OSA). Estes equipamentos são capazes de realizar a leitura de várias redes simultaneamente em um conjunto com vários sensores multiplexados em uma rede quase distribuída. Durante a gravação das redes, cada FBG era monitorada em tempo real, de forma que as amplitudes de cada espectro refletido fossem próximas e também para controle da evolução de cada gravação. Basicamente o sistema para leitura e aquisição de dados é conforme mostrado na Figura 14, onde o sistema é composto de uma fonte que emitirá a luz que percorrerá no núcleo da fibra ótica, um interrogador ou analisador de espectro, um circulador ótico para fazer a conexão entre a luz transmitida para as FBG's e refletida por estas, e finalmente as Redes de Bragg.

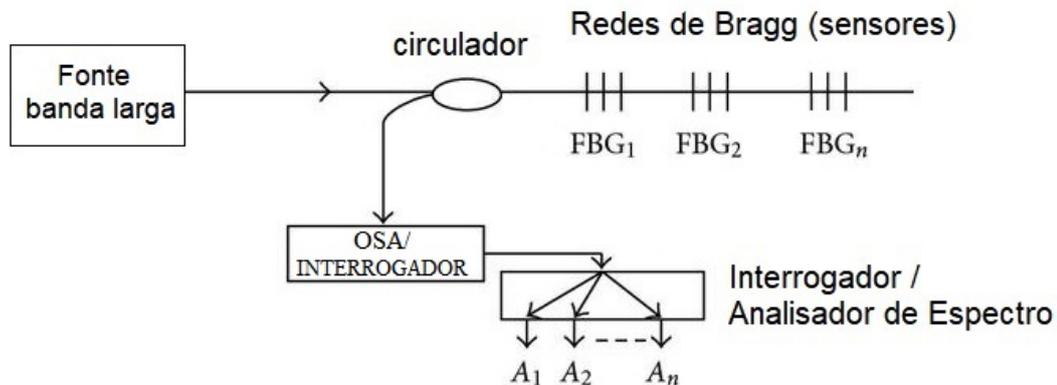


Figura 14: Esquema de leitura de Redes de Bragg

Fonte: Autoria própria

Finalmente o sistema realizará a leitura conforme exposto na figura 15, que mostra exatamente o que acontece com o espectro da luz refletida quando a FBG sofre uma deformação, ou seja, é tensionada ou comprimida. Como explicado teoricamente, quando há um tensionamento ou compressão da FBG, há um aumento ou redução física do período (Λ) da rede de Bragg e conseqüentemente uma alteração no comprimento de onda de Bragg (λ_B). É este fenômeno que faz da FBG um dispositivo para sensoriamento. Nesta figura temos o exemplo de uma FBG sendo tensionada. Percebe-se que a potência não se altera e há um deslocamento do espectro para a direita, ou seja, há um aumento no valor do comprimento de onda de Bragg.

Da mesma forma aconteceria uma redução deste comprimento de onda de Bragg (deslocamento para a esquerda) caso a FBG fosse comprimida. De forma similar ao que ocorre com o espectro refletido pela FBG em função da variação na tração aplicada à fibra ótica, as variações na temperatura também provocam deslocamento proporcional no comprimento de onda de Bragg, característica utilizada no trabalho para monitoramento de temperatura no painel fotovoltaico.

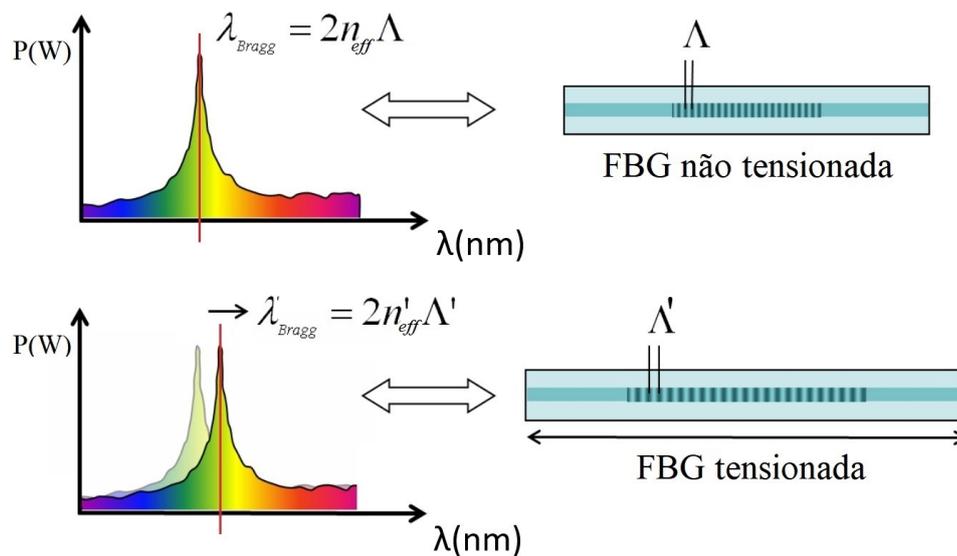


Figura 15: Comportamento do comprimento de onda de Bragg na FBG em situação de deformação física da rede de Bragg

Fonte: Adaptado de (FBGS, 2017)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado o sistema de monitoramento de temperatura e todo o processo que o originou, dividido em três seções.

Na seção 3.1 deste capítulo é detalhado o sistema de gravação, encapsulamento e calibração dos sensores. Na seção 3.2 são apresentados a montagem e o sistema de leitura dos sensores em campo. Na seção 3.3 são mostradas as especificações de cada equipamento pertencente ao sistema e utilizado durante todo o trabalho.

3.1 GRAVAÇÃO, ENCAPSULAMENTO E CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

Para o experimento foi realizada uma análise da FBG em dois arranjos para fibra ótica: sem encapsulamento e com encapsulamento. O encapsulamento basicamente serve para proteção mecânica da fibra ótica e amenisar os efeitos da deformação, porém este encapsulamento pode alterar o tempo de resposta à temperatura em relação à fibra nua, por este motivo foi realizada uma comparação com o sensor sem encapsulamento para determinar o tempo de resposta à temperatura nas duas situações. O sensor encapsulado será utilizado para a medição de temperatura em um módulo fotovoltaico. A escolha pelo uso do encapsulamento em elastômero de poliéster termoplástico foi devido sua grande flexibilidade mecânica e resistência à intempéries, principalmente à temperatura e suas variações, pois os sensores serão instalados em um ambiente externo exposto à intempéries. Outra razão da escolha por este material é por já ser amplamente comercializado e disponível em formatos para aplicação nas fibras óticas.

3.1.1 GRAVAÇÃO DOS SENSORES

Para o estudo em questão foram utilizadas FBGs padrão, todas produzidas no Laboratório de Nanoestruturas (LANOE) da UTFPR, com a técnica de exposição *laser* diretamente sobre máscara de fase. Usou-se fibra ótica de sílica monomodo padrão de telecomunicações (SMF G-652). A princípio, foram gravados, em um mesmo segmento de

fibra, 20 sensores para serem aplicados na instrumentação do módulo fotovoltaico em sua parte traseira. Na produção das redes de Bragg utilizou-se máscaras de fase (IBSEN PHOTONICS®) com diferentes períodos usando o *Laser* Excímero com Fluoreto de Argônio (*ArF*) Xantos Coherent®, operação em 193 nm, com um tempo de exposição de 2 minutos, energia de 1,5 mJ/pulso e taxa de repetição de 250 Hz. Para todas as FBGs foram armazenados os espectros em reflexão a partir de um analisador de espectro ótico (OSA) YOKOGAWA® AQ6375B com banda de operação entre 1200 a 2400 nm, e um interrogador de redes de Bragg IBSEN® I-MON 512E-USB2 operando entre 1510 e 1590 nm e taxa de aquisição de 2 Hz. A figura 16 apresenta o sistema de gravação.

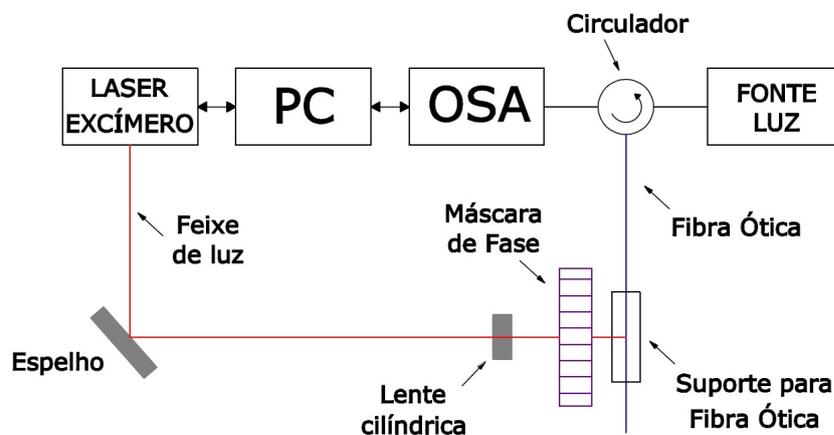


Figura 16: Esquema de gravação de FBG por Máscara de Fase

Fonte: Autoria própria

A Figura 17 apresenta a disposição de todos os equipamentos necessários para a gravação das FBGs diretamente por máscara de fase.

E na Figura 18 é possível verificar a foto detalhando o sistema utilizado para a gravação das FBGs.

Para gravar os 20 sensores FBG, foi utilizado um único segmento de fibra ótica monomodo de 6,8 m de comprimento considerando sobra suficiente para facilitar o trabalho de instalação em campo. As rede de Bragg foram gravadas a cada 30 cm de forma a estarem uniformemente distribuídas quando instaladas no módulo fotovoltaico. As redes foram gravadas uma de cada vez, com a utilização de 20 máscaras de fase com comprimentos de onda diferentes, conforme já mencionado. Para realizar a gravação, no trecho da fibra a ser gravada a FBG é removido o acrilato (revestimento) e limpado o local com álcool isopropílico para garantir a ausência de qualquer partícula ou gordura. A fibra é presa em um suporte específico (ver Figura 18) e a máscara de fase é posicionada rente à fibra ótica. Com os espelhos e lentes alinhados, o

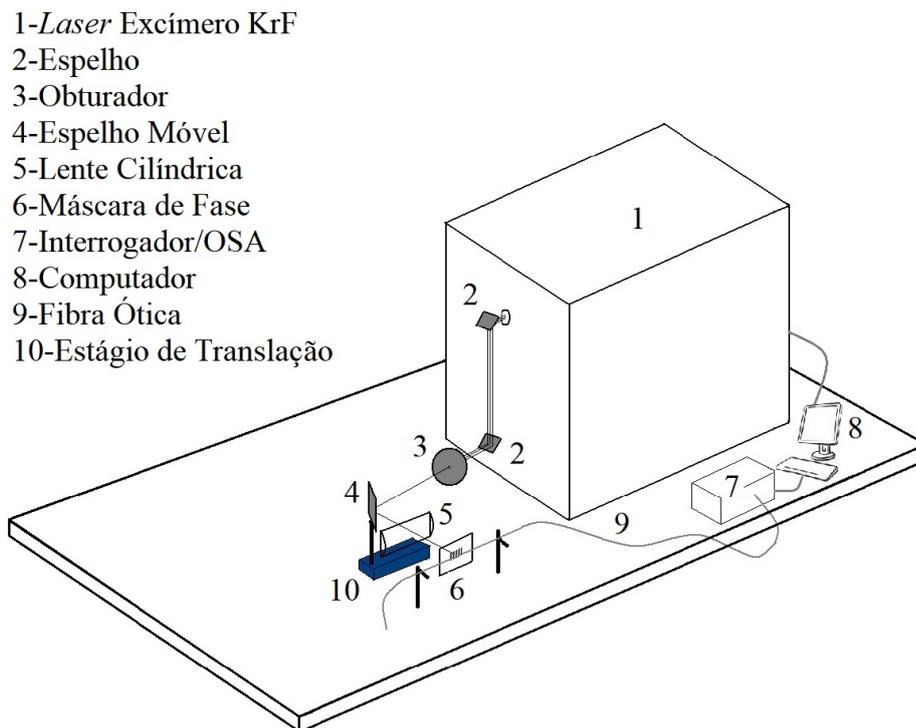


Figura 17: Disposição de equipamentos para gravação de FBG por Máscara de Fase

Fonte: Autoria própria

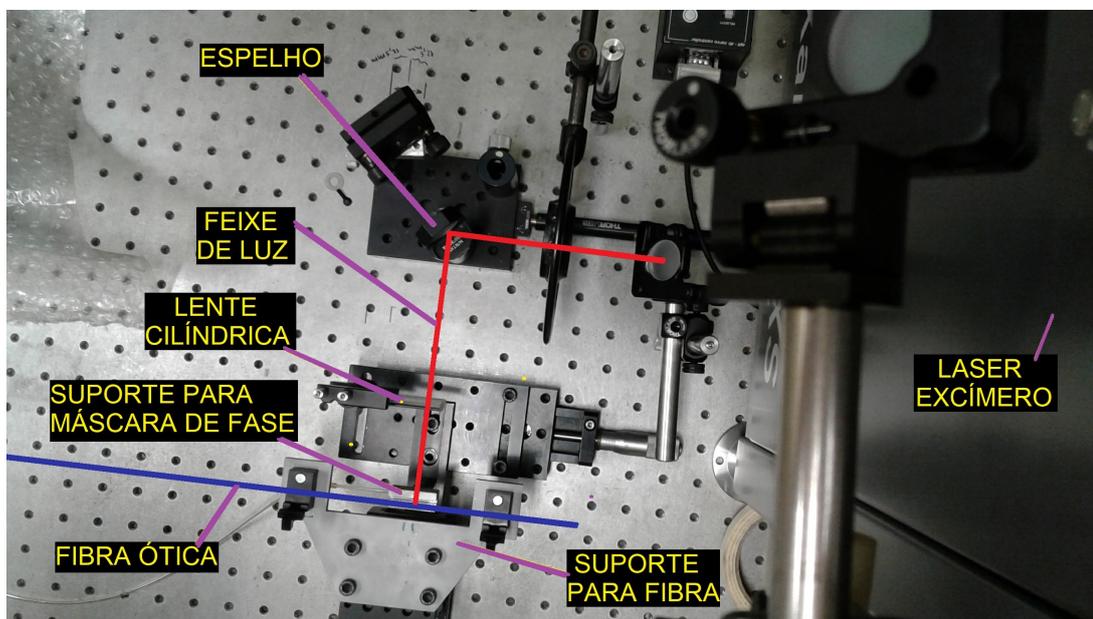


Figura 18: Foto do sistema de gravação de FBG

Fonte: Autoria própria

Laser Excímero é acionado e o processo de gravação se inicia com monitoramento do espectro da luz pelo computador, através de *software* específico do fornecedor do OSA. O processo é controlado manualmente e interrompido após verificação da amplitude da onda refletida estar com potência satisfatória. O processo é repetido para a gravação das redes restantes. Para a fácil localização das redes após gravadas, foi realizada a identificação com uma caneta de tinta permanente sobre a posição gravada. A Figura 19 representa o segmento de fibra ótica com os 20 sensores gravados.

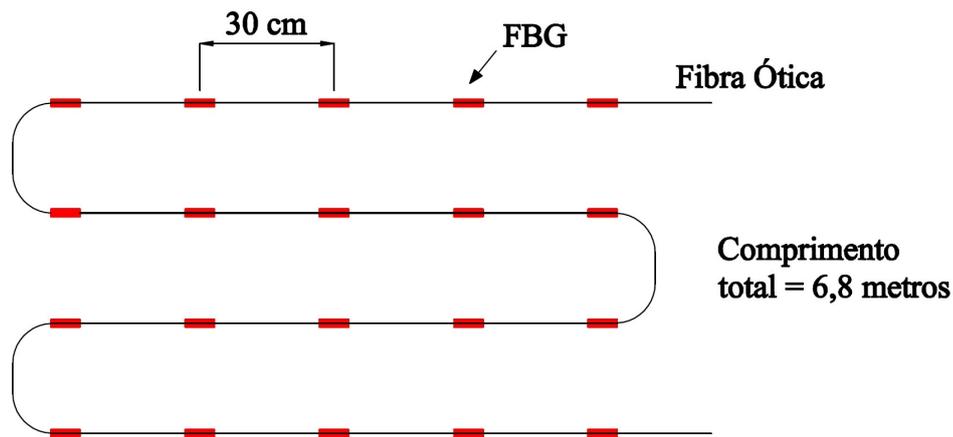


Figura 19: Dimensões do segmento de fibra ótica com FBGs

Fonte: Autoria própria

3.1.2 ENCAPSULAMENTO DOS SENSORES

Após a produção de todos os sensores e realizada a caracterização espectral do conjunto, a fibra ótica com as 20 FBGs foi encapsulada manualmente com um tubo flexível produzido em elastômero de poliéster termoplástico, conhecido como Hytrel®, totalizando um segmento com 6,8 m de comprimento. O tubo capilar elastomérico utilizado no encapsulamento foi o FT900SM (HYTREL®), fornecido pela THORLABS®, com 900 μm de diâmetro externo e 500 μm de diâmetro interno. A fibra ótica padrão apresenta diâmetro com recobrimento primário (acrilato) de 250 μm , dessa forma, a inserção da fibra no encapsulamento é facilitada, e com a folga nas dimensões, a fibra não sofrerá deformação com a dilatação do encapsulamento. A tensão de ruptura do encapsulamento é de 44 MPa. A temperatura de fusão do tubo capilar é de aproximadamente 203 °C, o que permite sua aplicação em módulos fotovoltaicos. As duas extremidades do encapsulamento foram vedadas com a cola instantânea LOCTITE®495 para não haver a entrada de umidade, ficando somente ar confinado entre o tubo de encapsulamento e a fibra ótica. A Figura 20 apresenta a forma de inserção manual da fibra ótica dentro do tubo elastomérico, mostrando uma relação das dimensões entre eles.

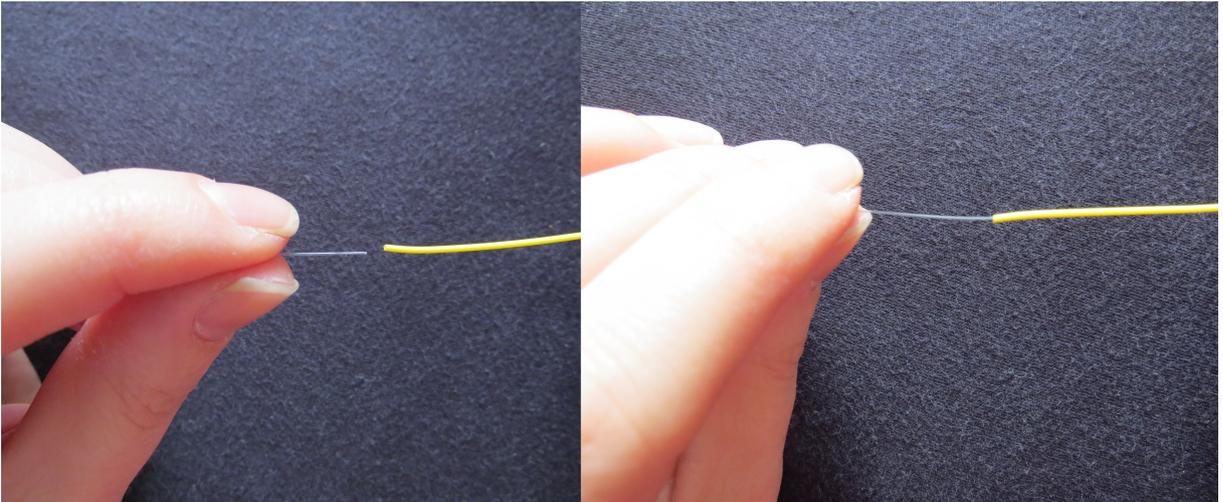


Figura 20: Inserção da fibra ótica internamente ao encapsulamento

Fonte: Autoria própria

A Figura 21 apresenta o cordão ótico em sua totalidade encapsulado, com conector FC-PC necessário para a conexão do seguimento de fibra com os sensores no instrumento de medição.

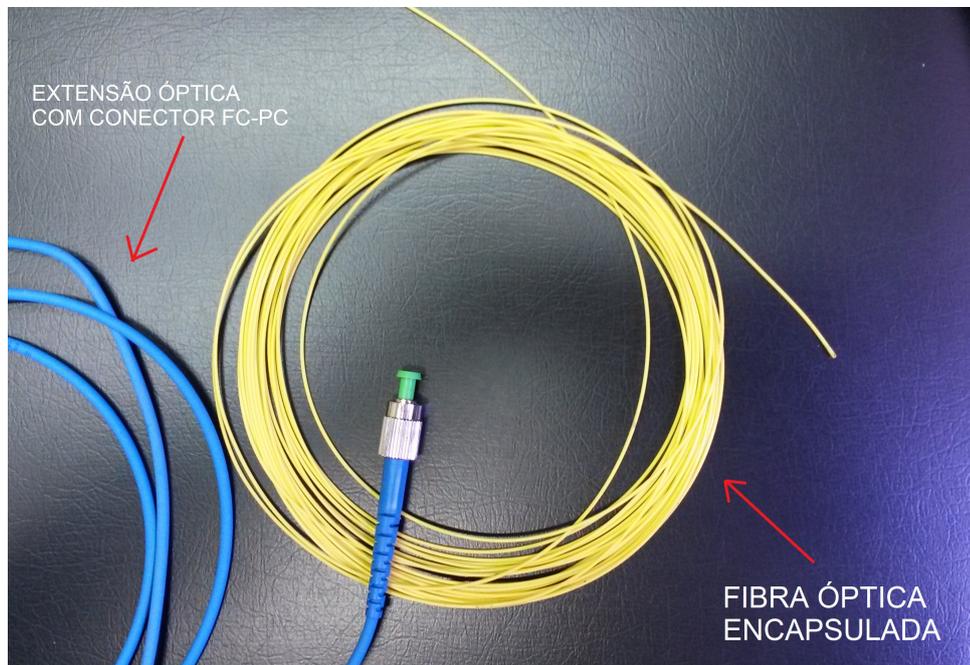


Figura 21: Fibra ótica encapsulada e conectorizada.

Fonte: Autoria própria

3.1.3 CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES

Para a aquisição dos dados dos sensores utilizou-se o interrogador IBSEN® I-MON 512E-USB2 e para a caracterização dos sensores o banho térmico LAUDA® ECO GOLD RE415. Para a calibração, o *software* utilizado para aquisição dos dados e manipulação destes não é de uso comercial e foi desenvolvido pela UTFPR para essa finalidade, contudo, há comercialmente diversos sistemas de aquisição de sinal de sensores FBG. Este *software*, após parametrizado pelo usuário, controla automaticamente o processo de caracterização dos sensores, tendo *interface* e controle do interrogador e do banho térmico durante o teste. A Figura 22 mostra a sistema de caracterização (tempo de resposta e calibração) dos sensores. Através do computador são feitas as aquisições de tempo e comprimento de onda. Na mesma figura ainda pode ser visto o cabo ótico ligado ao interrogador levando a FBG ao banho térmico. Após a realização dos testes para obtenção do tempo de resposta à temperatura dos sensores, foi realizada a caracterização das redes para determinação da sensibilidade destes, aplicando o mesmo sistema.

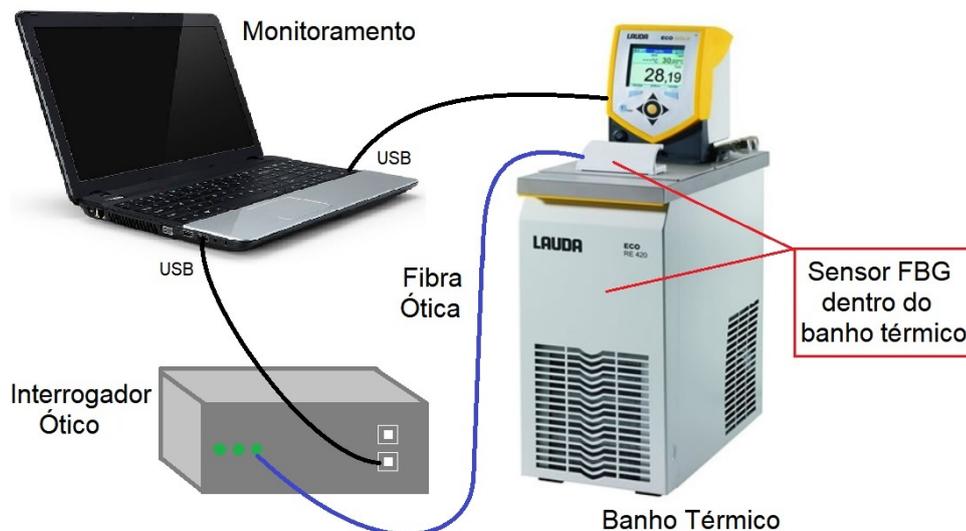


Figura 22: Sistema de caracterização dos sensores.

Fonte: Autoria própria

3.1.3.1 OBTENÇÃO DO TEMPO DE RESPOSTA

Com a finalidade de obter o tempo de resposta à temperatura dos sensores encapsulados e não encapsulados, foram realizadas diversas medições de comprimento de onda utilizando o banho térmico e o interrogador I-MON. A Figura 23 apresenta o sistema de calibração.

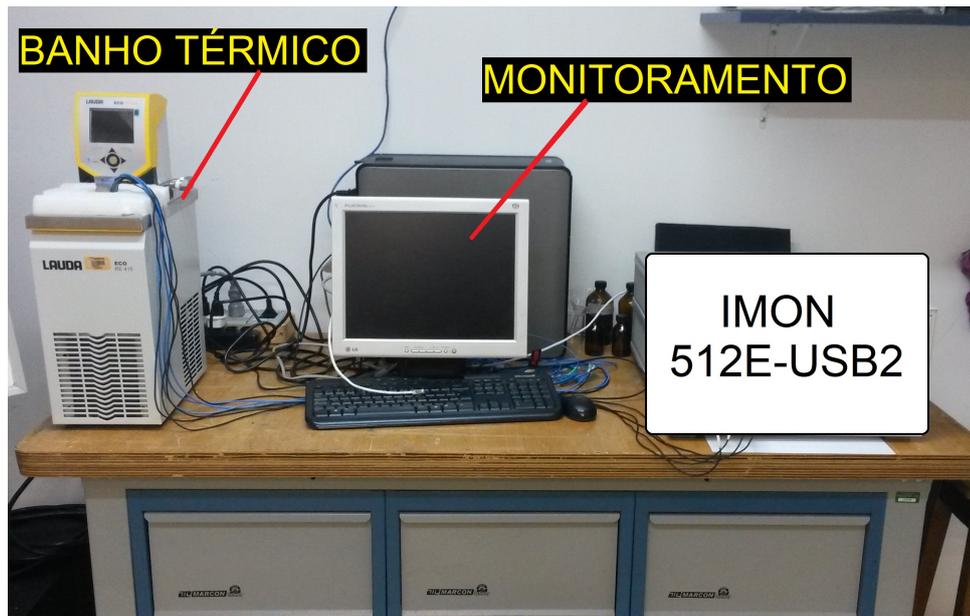


Figura 23: Sistema de caracterização dos sensores em laboratório.

Fonte: Autoria própria

Foram repetidos cinco vezes um mesmo procedimento para minimizar o erro nas leituras. Para o teste da fibra encapsulada utilizou-se somente um sensor dos 20 existentes, no caso o sensor nº2 com $\lambda_B = 1563,9250nm$, e para a fibra nua somente um sensor gravado para esta finalidade com $\lambda_B = 1553,1601nm$ ambos à 22 °C. A temperatura ambiente era de 22°C e a temperatura do banho térmico ajustada em 40 °C. O procedimento consistiu em mergulhar os dois sensores no banho térmico monitorando simultaneamente, via *software*, o tempo e a variação no comprimento de onda de Bragg até a estabilização na nova temperatura (40 °C). Ao final dos cinco testes, foram gerados dois gráficos com as médias dos comprimentos de onda de Bragg dos 5 testes para cada patamar de temperatura, em ambas fibras.

3.1.3.2 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

O objetivo deste ensaio é obter a sensibilidade dos sensores, ou seja, a variação do comprimento de onda a cada grau Celcius ($pm/^\circ C$). Para a calibração, foi utilizado o mesmo sistema montado para obter os tempos de resposta à temperatura. O procedimento para caracterizar os sensores encapsulados e obter a sensibilidade destes foi realizado da seguinte forma: 5 patamares de temperatura com variação de 10 °C, no intervalo entre 10 °C e 60 °C. Repetiu-se cinco vezes o procedimento. Cada patamar de temperatura apresentava duração aproximada de 12 minutos com a temperatura constante; no ciclo de aquecimento a transição térmica durava aproximadamente 3 minutos e na fase de resfriamento 10 minutos para ir de um

patamar à outro. Em cada patamar térmico a aquisição de dados (comprimentos de onda) foi feita em taxa de 1 Hz, depois calculada a média destes comprimentos de onda contidos em cada faixa. O processo foi repetido para todos os patamares.

Assim como na obtenção do tempo de resposta foi realizada uma comparação entre a fibra nua e a encapsulada, conhecimento do impacto deste encapsulamento na linearidade da sensibilidade dos sensores.

3.2 SISTEMA DE MONITORAMENTO

Após a realização dos testes de tempo de resposta e da caracterização, os sensores foram instalados na parte traseira do painel fotovoltaico KYOCERA®, KD210GX-LP. A Figura 24 mostra a planta fotovoltaica sobre o telhado indicando a posição do módulo monitorado.



Figura 24: Planta fotovoltaica com módulo monitorado

Fonte: Autoria própria

A fixação da fibra foi feita com Etil cianoacrilato, LOCTITE® 495, adesivo instantâneo e cola silicone comum para reforçar a aderência. Os pontos da fibra onde os sensores estão localizados foram fixados de forma a maximizar o contato com o módulo, a fim de garantir correta medição da temperatura naquele ponto da superfície. Após fixada a fibra e ainda antes de comunicar os sensores ao interrogador, foi verificado que seria de suma

importância realizar também a medição de temperatura ambiente, externa ao módulo, para se ter uma referência da influência desta temperatura no módulo fotovoltaico. Para isso, foi gravado um único sensor FBG, respeitando a sequência de comprimentos de onda de Bragg, em um trecho de aproximadamente 1m de fibra óptica com as mesmas características do segmento com os 20 sensores, e emendada esta fibra dentro da caixa de emendas, formando assim um enlace com 21 sensores. Cada sensor possui um comprimento de onda de Bragg específico e para isto foram utilizadas 21 máscaras de fase, conforme mostrado no item 3.3.4. A Figura 25 mostra a posição dos sensores e o segmento de fibra óptica na parte traseira do módulo fotovoltaico, detalhando também o sensor número 21 que foi incluído. Ainda nesta figura são mostradas as dimensões do módulo (990 mm x 1500 mm).

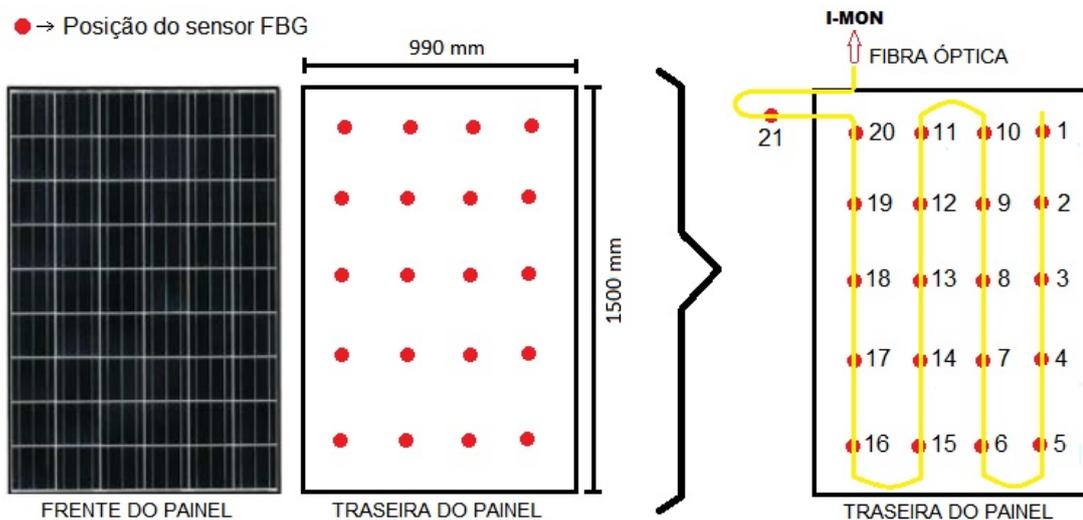


Figura 25: Dimensões do módulo e posição dos sensores na parte traseira do módulo fotovoltaico.

Fonte: Autoria própria

A Figura 26 apresenta o diagrama das emendas realizadas.

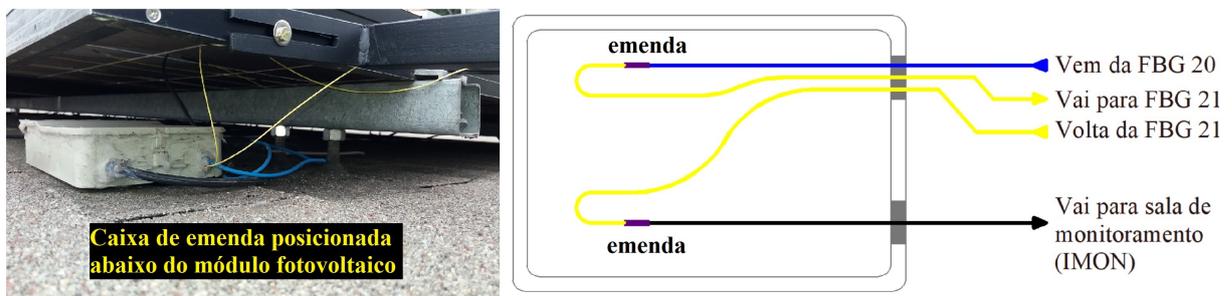


Figura 26: Diagrama de emendas realizadas no segmento de fibra óptica, com a mesma representação de cores dos cabos em campo

Fonte: Autoria própria

A Figura 27 apresenta a posição e detalhe construtivo do suporte de fixação da FBG nº21 responsável pela medição da temperatura ambiente.



Figura 27: Detalhe do suporte de fixação do sensor de temperatura ambiente (nº21).

Fonte: Autoria própria

O suporte é feito de aço carbono, pintado com tinta específica para metais, e foi projetado para que o ponto onde se encontra o sensor FBG sofra a menor influência mecânica possível, como ventos, acúmulo de água, sujeira, entre outros agentes ambientais. Para isto o suporte possui um corte exatamente onde está a FBG para que o sensor não meça a temperatura do suporte, e sim a temperatura ambiente. Há também a presença de abas laterais pra reduzir a influência dos ventos diretamente no sensor. A fixação do suporte foi realizada em dois pontos utilizando os mesmos parafusos da estrutura onde o módulo fotovoltaico está posicionado, garantindo assim uma estrutura rígida e isenta de grandes oscilações ou vibrações. A fibra encapsulada foi fixada com a mesma cola aplicada nos demais pontos.

Na Figura 28a é possível verificar a localização do módulo fotovoltaico instrumentado dentro da planta em funcionamento e na Figura 28b o segmento de fibra encapsulada com os sensores colados na parte traseira do painel, onde em cada mancha branca está fixado um sensor e, circulado em vermelho, um deles está destacado. Na Figura 28c é detalhada a fixação da fibra ótica, mostrando o sensor localizado onde o encapsulamento está pintado de vermelho. No procedimento de colagem foi cuidado para não utilizar cola sobre o encapsulamento onde o sensor está localizado. Foram feitos dois pontos de fixação na fibra com o sensor ao centro. Tal

procedimento garante que o adesivo não interfira na dissipação ou propagação de temperatura.

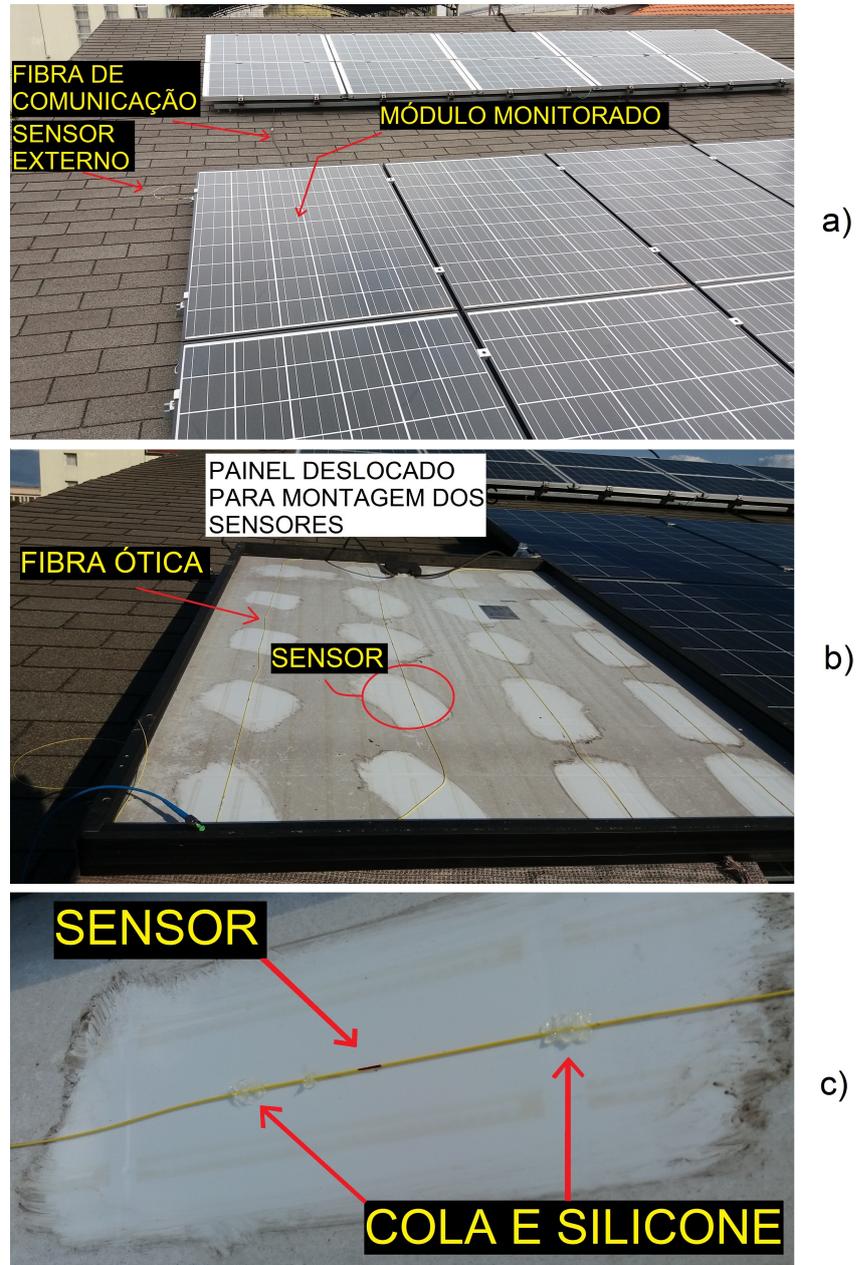


Figura 28: a) Módulo monitorado, b) Enlace de fibra ótica, c) detalhe de fixação do sensor.

Fonte: Autoria própria

Após realizada a instrumentação do módulo, a fibra ótica com os sensores foi emendada em um trecho de fibra monomodo para uso externo. A Figura 29 apresenta os componentes do sistema externo.

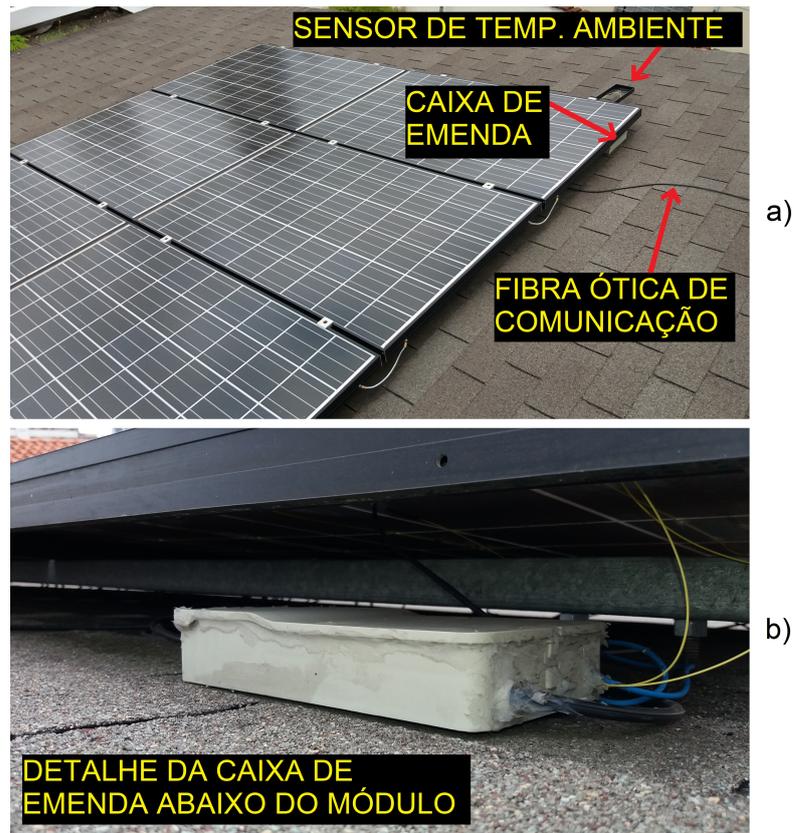


Figura 29: a) Identificação do sistema, b) Caixa de emenda.

Fonte: Autoria própria

Dessa forma, o conjunto de sensores pode ser lido pelo interrogador instalado dentro do Escritório Verde, em uma sala onde foi montado um armário metálico para armazenamento dos equipamentos de medição, como mostra a Figura 30.



Figura 30: Localização do Rack de monitoramento.

Fonte: Autoria própria

Dentro desse armário constam: um interrogador IBSEN® I-MON 512E-USB2, um computador notebook Positivo® com processador Intel Celeron® e sistema operacional Windows 7, ponto de rede *Ethernet* e ponto de tomada elétrica 127 Vca. A fibra ótica lançada foi conectorizada com o conector FC/PC para conexão no interrogador interno ao painel metálico. A Figura 31 mostra o armário metálico e o detalhamento do sistema de monitoramento de temperatura.

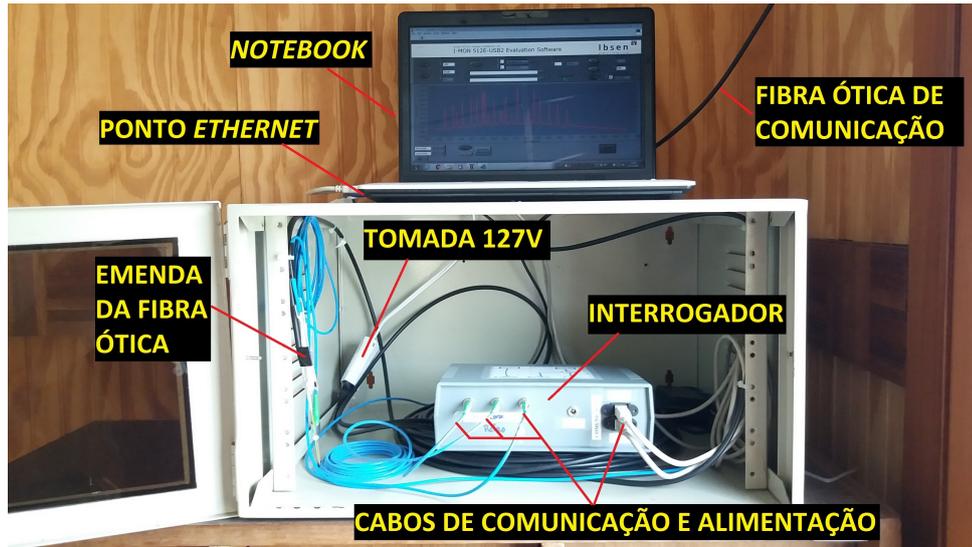


Figura 31: Detalhamento interno do sistema de monitoramento.

Fonte: Autoria própria

A aquisição dos dados iniciou no mês de agosto de 2017 e foi realizada em vários períodos apresentados posteriormente neste trabalho. Os dados foram lidos e registrados pelo *software* *I_MON_Ext_Evaluation_4.0.vi*, desenvolvido pelo mesmo fabricante do interrogador óptico. Os valores em comprimento de onda (nm) de cada sensor, apresentam correlação razoavelmente linear com a temperatura na região de cada sensor. Com o auxílio do *software* Microsoft Excel realizou-se as operações de conversão de comprimento de onda em temperatura, bem como as médias destas. Para o monitoramento e controle do sistema de medição foi empregado o *software* *Team Viewer*, disponível com licença gratuita, oferecendo acesso remoto a partir de outros computadores via internet, possibilitando não estar presente no local da instalação para acesso ao computador que controla e monitora o sistema.

3.3 EQUIPAMENTOS E DISPOSITIVOS

Nesta seção são apresentados os principais equipamentos presentes em todas as etapas do experimento.

3.3.1 FIBRAS ÓTICAS

A fibra ótica utilizada para a gravação dos sensores é de sílica, monomodo, padrão de telecomunicações (SMF G-652). Tanto a transmissão analógica como a digital podem ser usadas com esta fibra. Basicamente esta fibra ótica é composta de dois vidros circunscritos denominados núcleo (*core*) e casca (*cladding*). O núcleo é muito fino e feito de sílica com alto grau de pureza, sendo envolvido por outra camada de sílica com diâmetro de $125\ \mu\text{m}$. O vidro externo (casca) possui índice de refração mais baixo do que o vidro interno (núcleo), o que faz com que a luz transmitida seja refletida nas paredes internas da fibra e fique confinada no núcleo. A Figura 32 apresenta o detalhe construtivo de uma fibra ótica monomodo.

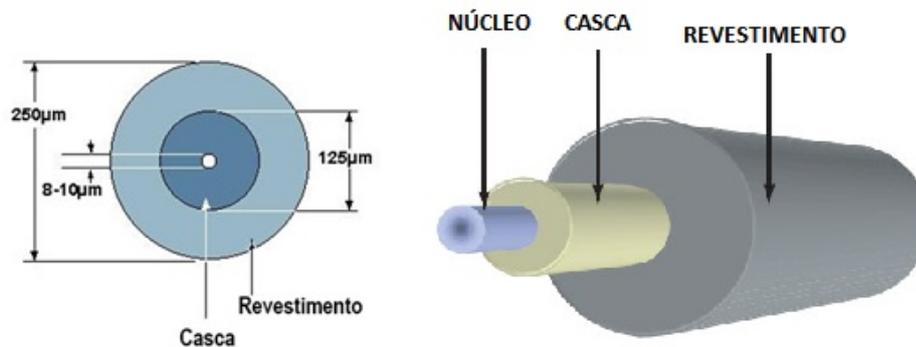


Figura 32: Detalhamento construtivo de uma fibra ótica monomodo.

Fonte: Adaptado de (CONDUFIBRA, 2017)

A fibra ótica utilizada para a comunicação entre os sensores e o interrogador é a FURUKAWA® CFOT-EO INDOOR/OUTDOOR MONOMODO, composta por duas fibras que foram emendadas em caixa específica fixada sob módulo fotovoltaico conforme mostrado Figura 29b. Uma fibra foi utilizada para a comunicação entre os sensores e o interrogador e a outra ficou sobressalente em caso de uso posterior ou algum dano na fibra principal.

3.3.2 LASER EXCÍMERO

Para a gravação das redes de Bragg na fibra ótica, foi utilizado o *Laser* Excímero ArF Xantos Coherent® em 193 nm, equipado com um sistema completo de gerenciamento de gás, incluindo o cilindro de gás pré-misturado, equipado com pré-ionização corona e comutação de estado sólido, monitor de energia e obturador eletro-mecânico incluído. O tempo de exposição utilizado foi de 2 minutos, energia de 1,5 mJ/pulso e taxa de repetição de 250 Hz. A Figura 33 apresenta o equipamento.



Figura 33: Laser Excímero ArF Xantos Coherent®.

Fonte: (COHERENT, 2010)

3.3.3 INTERROGADORES ÓTICOS

Para a leitura e monitoramento dos espectros e comprimentos de onda, foram utilizados 3 interrogadores óticos;

3.3.3.1 OSA AQ6375B

Este equipamento foi utilizado no momento da gravação dos sensores para análise do espectro ótico da cada sensor, de forma a se obter uma similaridade na amplitude da onda de cada sensor. A Figura 34 apresenta o equipamento e as especificações estão contidas na Tabela 1 a seguir:



Figura 34: Analisador de espectro ótico OSA AQ6375B®.

Fonte: (YOKOGAWA, 2017)

Tabela 1: Especificações do OSA AQ6375B®

OSA AQ6375B	
Fibras aplicadas	SM (9,5/125); GI (50/125 ; 62,5/125)
Intervalo de comprimento de ondas medidos	1200 to 2400 nm
Precisão	$\pm 0,05nm$ (1520a1580nm) $\pm 0,1nm$ (1580a1620nm) $\pm 0,5nm$ (paratodasfaixadecomprimentodeonda)
Repetibilidade	$\pm 0,015nm$ (1minuto)
Configuração da resolução	0,05; 01, 0,2; 0,5; 1,0 e 2,0 nm
Fonte de luz para calibração	para alinhamento e calibração do comprimento de onda

3.3.3.2 SM-125

Este equipamento foi utilizado somente para verificação das medições realizadas e comparação com os outros interrogadores utilizados, a fim de garantir a confiabilidade do sistema. A Figura 35 apresenta o equipamento e as especificações estão contidas na Tabela 2.



Figura 35: Interrogador Ótico SM-125®.

Fonte: (OPTICS, 2017)

Tabela 2: Especificações do SM125®

Propriedades de desempenho	SM125
Número de canais óticos	4
Frequência de leitura	2 Hz
Intervalo de comprimento de ondas medidos	1510-1590 nm
Estabilidade; Precisão	1; 1 pm
Repetibilidade	0.5 pm at 1 Hz, 0.2 pm at 0.1 Hz
Capacidade de sensores FBG	60
Conectores óticos	FC/APC

3.3.3.3 IMON 512 USB

Este é o equipamento de monitoramento principal do sistema. Todas as medições em campo foram registradas por ele. Ele é o responsável pela leitura e armazenamento dos valores de comprimento de onda dos 21 sensores FBG. O equipamento utilizado foi montado por integrantes da UTFPR de forma a conter em um mesmo compartimento a fonte ótica e o interrogador ótico IMON 512 USB. A Figura 36 apresenta o equipamento e as especificações estão contidas na Tabela 3 e 4. A Figura 36c apresenta o equipamento montado com o interrogador e fonte ótica internamente.

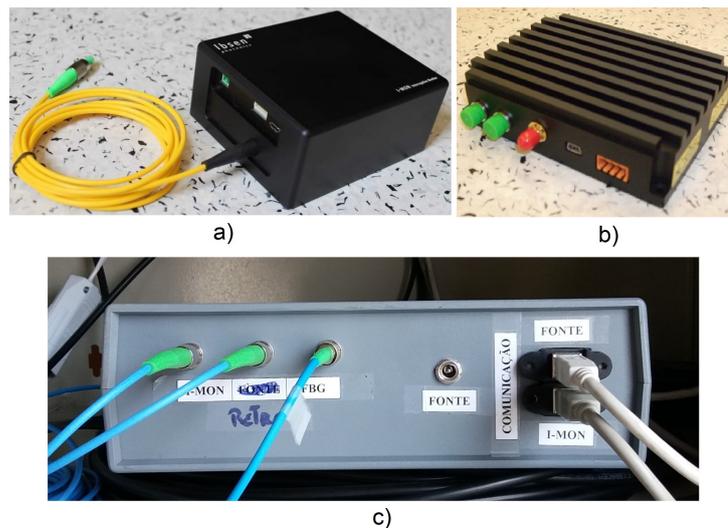


Figura 36: a) Interrogador ótico IMON512USB, b) Fonte ótica DL-BP1-1501A, c) Interrogador completo.

Fonte: Adaptado de (PHOTONICS, 2014b)

Tabela 3: Especificações do IMON512®

Propriedades de desempenho	IMON512
Número de canais óticos	1
Frequencia de medição	3 kHz max
Intervalo de comprimento de ondas medidos	1510-1595 nm
Resolução	0,5 pm
Repetibilidade	3 (5 max)
Capacidade de sensores FBG	>70 em 1000/1200 pm
Conectores óticos	FC/APC

Tabela 4: Especificações da Fonte Ótica DL-BP1-1501A

Parâmetros	DL-BP1-1501A
Tipo de Fonte	LED banda larga
Potência Ótica Máxima (ajustável via software)	> 12 mW
3 dB Largura Espectral	> 70 nm
Comprimento de Onda Central	1535 à 1565 nm (típico: 1550 nm)
Corrente máxima na entrada	4 A
Tensão de entrada	5,5 V
Modo de operação	Contínuo (APC/ACC) ou Pulsado (ACC)
Interface de controle	USB Mini-B

3.3.4 MÁSCARA DE FASE

Para a gravação das 21 FBGs foram utilizadas 21 máscaras de fase da marca IBSEN® Photonics, específicas para gravação de FBGs. Todas estas foram produzidas pelo fabricante holograficamente em ambiente de salas 100% limpas. A Precisão e uniformidade do período é de +/- 0,01 nm, sem *chirp*, ordem zero baixa, baixa contagem de defeitos, identificação clara sobre a máscara. Outras características importantes são: parâmetros de máscara de fase para todas as aplicações de fibra / guia de onda até 260 nm e através das gamas de 1310 e 1550 nm, precisão e uniformidade do período melhor que 0,01 nm, zero residual altamente suprimido (típico: 0-2%). A Figura 37 apresenta o equipamento e as especificações estão contidas na Tabela 5 a seguir:

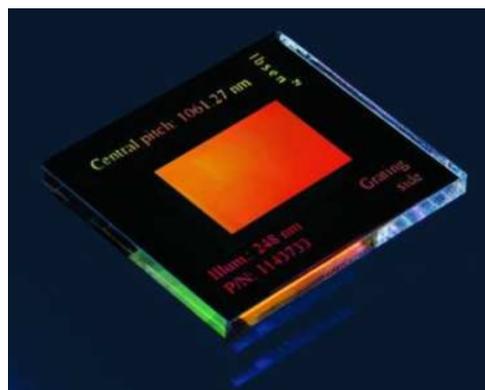


Figura 37: Exemplo de máscara de fase

Fonte: (PHOTONICS, 2014a)

Tabela 5: Especificações das Máscaras de Fase

SENSOR	Pitch (nm)	λ_B (22°C)	Illumination (nm)
P1	1083,80	1568,0804	248
P2	1081,00	1563,9212	248
P3	1078,30	1560,0758	248
P4	1075,50	1555,8482	248
P5	—	1553,1760	248
P6	1071,60	1550,4597	248
P7	1068,50	1545,6999	248
P8	1066,50	1542,9684	248
P9	1064,50	1540,2033	248
P10	1063,09	1538,6104	248
P11	1062,50	1538,3841	248
P12	1061,00	1534,8997	248
P13	1060,00	1532,4409	248
P14	1057,90	1530,7104	248
P15	1056,82	1529,6898	248
P16	1055,00	1527,0203	248
P17	1053,10	1524,3610	248
P18	1050,80	1520,5511	248
P19	1048,76	1517,8606	248
P20	1047,40	1516,1811	248
P21	1045,30	1512,4900	248

3.3.5 ENCAPSULAMENTO

Para reforço da resistência da fibra ótica e melhoria no manuseio durante a instalação desta no módulo fotovoltaico, foi optado pelo uso de um encapsulamento que fosse flexível e compacto não aumentando grandemente as dimensões da fibra. O encapsulamento utilizado foi o FT900SM. A Figura 38 apresenta o encapsulamento que possui as características apresentadas na Tabela 6:

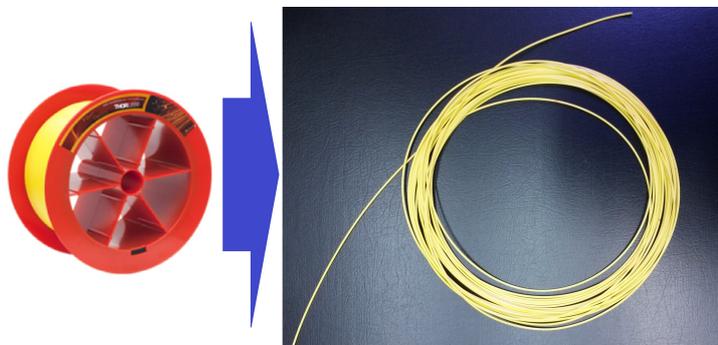


Figura 38: Segmento do encapsulamento FT900SM® fornecido em bobina

Fonte: (DUPONT, 2017)

Tabela 6: Especificações do encapsulamento HYTREL®
Especificação do encapsulamento HYTREL®

Nome comercial	HYTREL®
Material	elastômero de poliéster termoplástico
Componentes químicos	ftalato de butileno / poli (éter alquilenos) copolímero de ftalato
Ponto de fusão	150 - 225°C (302 - 437F)
Solubilidade na água	insolúvel
Odor	nenhum
Densidade	>1
Diâmetro externo	900 μm
Diâmetro interno	500 μm

É importante ressaltar que o tubo capilar elastomérico utilizado é fornecido pela THORLABS®, ou seja, já é de uso comercial para aplicações em fibras óticas. Como possui 900 μm de diâmetro externo e 500 μm de diâmetro interno e a fibra ótica padrão apresenta diâmetro com recobrimento primário (acrilato) de 250 μm , a inserção da fibra no encapsulamento é facilitada, e com a folga nas dimensões, a fibra não sofrerá deformação com a dilatação do encapsulamento. Esta inserção foi realizada manualmente e vagarosamente, a fim de não quebrar a fibra. Após realizado o encapsulamento, foi realizada a verificação dos sensores com o uso do analisador de espectro ótico.

3.3.6 BANHO TÉRMICO

Para a calibração dos sensores foi utilizado o equipamento chamado de banho térmico modelo LAUDA® ECO GOLD RE415. Como o nome informa, trata-se de um recipiente com água, onde há um controle da temperatura da mesma. A Figura 39 apresenta o equipamento e as especificações constam na Tabela 7.

Tabela 7: Especificações do Banho Térmico
Banho Térmico LAUDA® ECO GOLD RE415

Faixa de temperatura de trabalho	-15 °C ... 200 °C
Controle de temperatura	$\pm 0.02^\circ C$
Potência elétrica	1.3 kW
Capacidade de arrefecimento à 20 °C	0.180 kW
Pressão máxima de bombeamento	0.55 bar
Fluxo máximo de bombeamento	22 L/min
Volume do tanque	4.0 L
Controle	microprocessador e sistema de refrigeração integrado
Controlador	totalmente eletrônico com ação PID
Bomba	com seis níveis de desempenho ajustáveis
Interface	USB



Figura 39: Banho térmico LAUDA® ECO GOLD RE415

Fonte: (BRINKMANN, 2017)

Para a calibração, o software utilizado para aquisição dos dados e manipulação destes não é de uso comercial e foi desenvolvido pela UTFPR para essa finalidade, contudo, há comercialmente diversos sistemas de aquisição de sinal de sensor FBG. Aquele *software*, após parametrizado pelo usuário, controla automaticamente o processo de caracterização dos sensores, tendo interface e controle do interrogador e do banho térmico durante o teste.

3.3.7 MÓDULO FOTOVOLTAICO

O módulo fotovoltaico monitorado é o KYOCERA® KD210GXLP e encontra-se instalado na planta fotovoltaica do Escritório Verde da UTFPR, em um sistema fotovoltaico conectado à rede. A planta possui uma potência instalada de 2,1 kWp (10 módulos KYOCERA de tecnologia de silício policristalino, modelo KD210GXLP ligados em série) e um inversor monofásico em 220 V de 2 kW de potência nominal (PVPOWERED modelo PVP2000), que entrou em operação em 14 de dezembro de 2011. A área ocupada pela planta na cobertura da edificação é de 15 m²(JUNIOR, 2012).

As camadas constituintes do módulo fotovoltaico são representadas na Figura 40 e a Tabela 8 apresenta as especificações do equipamento:



Figura 40: Camadas que compõem um módulo fotovoltaico

Fonte: (KYOCERA, 2017)

Tabela 8: Especificações do Módulo Fotovoltaico

Especificações KYOCERA® KD210GXLP (STC - Standart Test Conditions)	
Máxima Potência (Pmax)	210 W ($\pm 5\%$)
Tensão de máxima potência (Vmpp)	26,6 V
Corrente de máxima potência (Impp)	7,90 A
Tensão de circuito aberto (Voc)	33,2 V
Corrente de circuito aberto	8,58 A
Tensão máxima do sistema	600 V
Temperatura de operação	-40 °C à 90 °C
Número de células por módulo	54

3.3.8 COLA FIXADORA

Foi utilizada cola instantânea LOCTITE® 495 para fixação da fibra encapsulada na parte traseira do módulo fotovoltaico, cujo material é o fluoreto de polivinila. A opção desta cola foi devido sua rapidez na secagem e a durabilidade e resistência da aderência. Devido ao fato das fibras permanecerem imóveis, não foi necessário o uso de uma cola com alta resistência à tração. A Figura 41 apresenta o equipamento e as especificações constam na Tabela 9.



Figura 41: Cola fixadora LOCTITE® 495

Fonte: (LOCTITE, 2012)

Tabela 9: Especificações da cola instantânea Loctite® 495

Especificação Loctite® 495	
Base química	Etil cianoacrilato
Modelo	495
Conteúdo	100 g
Viscosidade	20 a 60
Resistência ao Cisalhamento	12 a 26 (N/mm ²)
Tempo de Cura	Inicial 10 a 30 s / total 24h
Temperatura de Trabalho	-54 a 82°C
Aparência	Líquido transparente
Diâmetro interno	500µm

3.3.9 TERMÔMETRO INFRAVERMELHO

O termômetro infravermelho digital Minipa® MT-360 foi utilizado para realizar medições de temperatura comparativas e com a finalidade também de validar as medições realizadas pelos sensores FBG nos 21 pontos. A Figura 42 apresenta o equipamento e a Tabela 10 apresenta as especificações mais relevantes do termômetro.



Figura 42: Termômetro infravermelho digital Minipa® MT-360

Fonte: (MINIPA, 2017)

Tabela 10: Especificação do Termômetro infravermelho
Especificação Termômetro infravermelho

Modelo	MT-360
Faixa	-30 °C à 550 °C ou -22 °F à 1022 °F -30 °C à 100 °C $\pm 2^{\circ}C$ -22 °F à 212 °F $\pm 4^{\circ}F$
Precisão	101 °C à 550 °C $\pm 2\%$ Leitura 213 °F à 1022 °F $\pm 2\%$ Leitura
Resolução	0,5 °C / 1 °C Automático ou 1 °F
Coefficiente de temperatura	$\pm 0,2\%$ Leitura ou $\pm 0,2^{\circ}C / \pm 0,36^{\circ}F$ (o que for maior para < 18 °C/64,4 °F ou > 28 °C/82,4 °F)
Tempo de Resposta	250 ms (nominal)
Ambiente de Operação	0 à 50 °C, RH < 70%
Ambiente de Armazenamento	-20 °C à 60 °C, RH < 80%

3.3.10 TERMOPAR TIPO K

Com a mesma finalidade do uso do termômetro infravermelho, foi utilizado o termopar tipo K. Para a leitura de temperatura é necessário o uso de um multímetro (Alicate amperímetro digital Minipa® ET-3880) e adaptador. A Figura 43 apresenta os equipamentos e as especificações constam nas Tabelas 11, 12 e 13.



Figura 43: Termopar tipo K e equipamentos para leitura

Fonte: (BRASIL, 2017)

Tabela 11: Especificação do Termopar Tipo K

Especificação Termopar Tipo K	
Faixa de Medição	-40 à +204 °C
Precisão	$\pm 0,75\%$ Leitura ou $\pm 2,2^\circ\text{C}$
Tipo	K
Aplicação	Universal
Conexão	Soquete Tipo K
Comprimento (mm)	1170

Tabela 12: Especificação do Alicate Amperímetro

Especificação do Alicate Amperímetro	
Modelo	Minipa® ET-3880
Display LCD/Contagem	4 Dígitos/10000
True RMS	True RMS AC
Corrente DC	1000 A
Corrente AC	1000 A
Tensão DC	600 V
Tensão AC	600 V
Resistência	1k/10 k Ω
Temperatura	-40 à +1200 °C/-40 à +2192 °F

Tabela 13: Especificação do adaptador para Termopar Tipo K

Especificação do Alicate Amperímetro	
Termopares Aceitos	Tipo K
Entrada	Tipo K Fêmea
Conexão	Pino Banana 4 mm Macho
Distância entre Pinos	20 mm

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões do sistema de monitoramento de temperatura através de sensores FBG, em todas as etapas: gravações dos sensores e realização do encapsulamento, análise do tempo de resposta dos sensores encapsulados, caracterização dos sensores, montagem do sistema e por último a monitoramento em campo da temperatura do módulo fotovoltaico em operação.

4.1 SENSORES FBG GRAVADOS

As redes de Bragg em fibra ótica (FBG) foram gravadas no LANOE da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba. Como descrito no item 3.2, inicialmente foram gravados 20 sensores em um segmento de fibra, pois se considerava necessário somente a medição de temperatura do módulo fotovoltaico. Por este motivo o espectro gerado pelo OSA foi de 20 FBGs. A Figura 44 apresenta estes espectros.

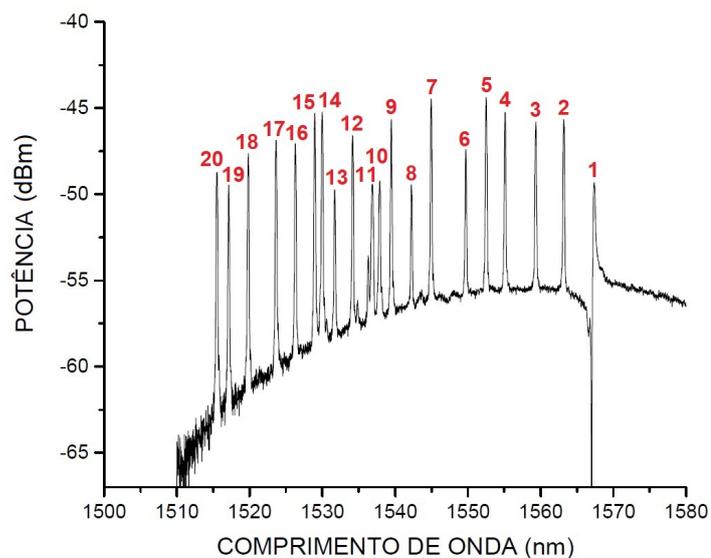


Figura 44: Espectro das 20 FBGs gravadas gerado pelo OSA

Fonte: Autoria própria

É possível verificar que a potência de cada onda refletida não é a mesma, a visualização melhora quando transposta para o plano horizontal, conforme Figura 45 gerada pelo interrogador IMON, em uma medição de rotina onde constam os 21 sensores no módulo fotovoltaico em funcionamento.

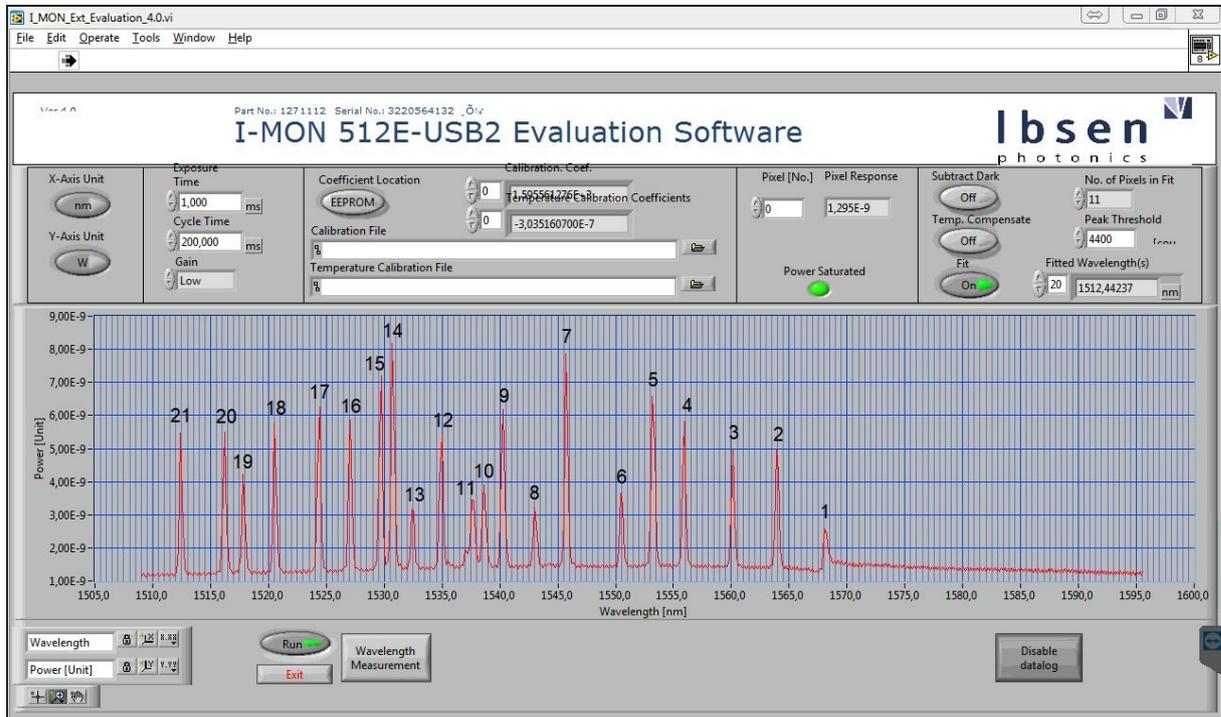


Figura 45: Espectro das 21 FBGs gravadas gerado pelo IMON

Fonte: Autoria própria

Esta diferença de potência ocorreu devido algumas dificuldades de alinhamento durante a gravação. A quantidade relativamente grande de redes a serem gravadas em um ambiente não industrial, não facilitou manter um padrão idêntico de gravação. A eficiência das máscaras de fase também influenciou na amplitude das redes. A soma destes dois problemas fica visível focando no espectro dos sensores 11 e 12. Ao lado esquerdo do sensor 11 e ao lado direito do sensor 12 existem duas pequenas redes, semelhantes à lóbulos laterais, porém são redes que não evoluíram durante a gravação. Apesar disto, houve sucesso na gravação das 21 FBGs, e mesmo com esta diferença de potência, é possível realizar leituras simplesmente ajustando os parâmetros do *software* de leitura, detectando o valor do comprimento de onda de pico para cada rede.

4.2 TEMPO DE RESPOSTA À TEMPERATURA

Para conhecer o impacto do encapsulamento na sensibilidade do sensor foram realizadas diversas medições de comprimento de onda por intermédio do banho térmico e do interrogador I-MON com a finalidade de verificar o tempo de resposta à variação de temperatura, conforme detalhado no item 3. Foi realizada uma comparação entre o tempo de resposta da fibra encapsulada com uma fibra nua sem encapsulamento. Os tempos de resposta à temperatura da fibra nua e encapsulada são mostrados na Figura 46 e Figura 47. As figuras apontam o intervalo de tempo para a fibra passar da temperatura ambiente de 22 °C até 40 °C ao ser mergulhada no banho térmico.

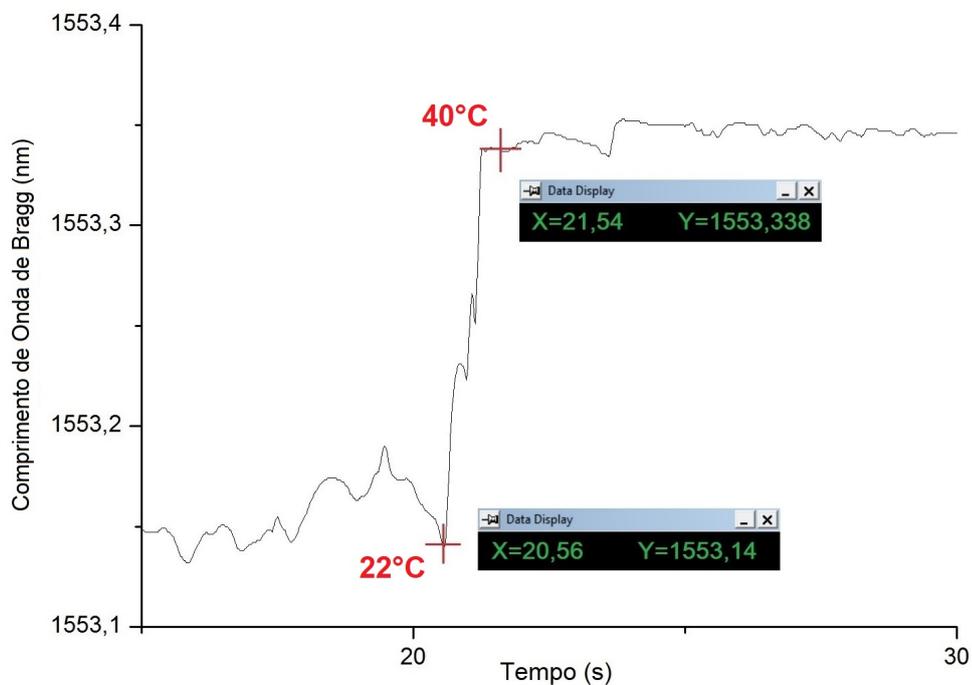


Figura 46: Tempo de resposta à variação de temperatura na FBG em fibra nua.

Fonte: Autoria própria

Por definição, o tempo de resposta consiste do intervalo compreendido entre 10% e 90% da variação máxima no comprimento de onda. As Figuras 48 e 49 mostram os correspondentes comprimentos de onda nos limites do intervalo considerado. A taxa de aquisição de dados ocorreu a cada 20 ms.

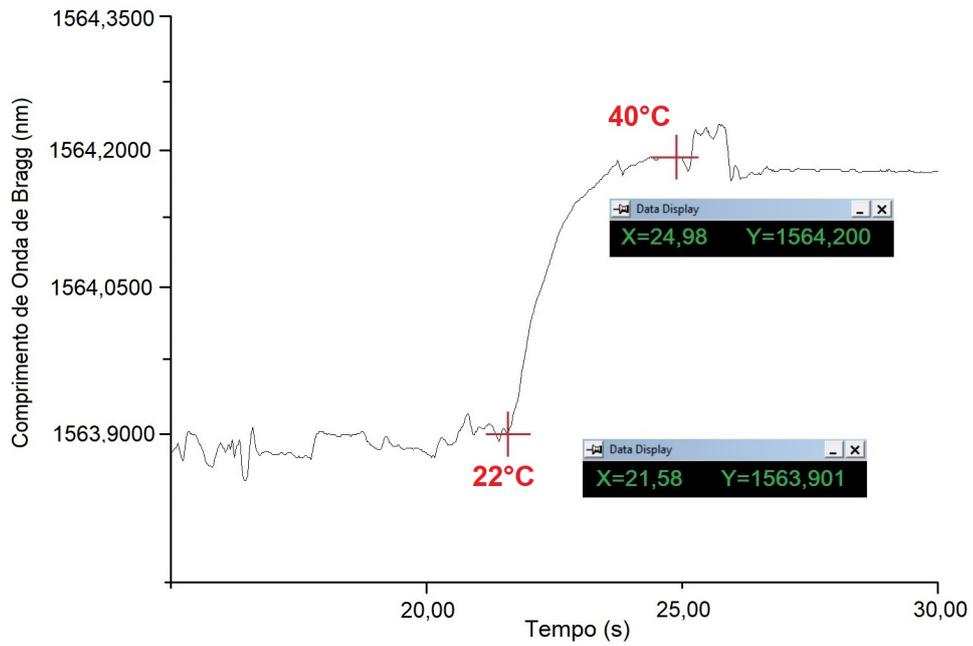


Figura 47: Tempo de resposta à variação de temperatura na FBG em fibra encapsulada.

Fonte: Autoria própria

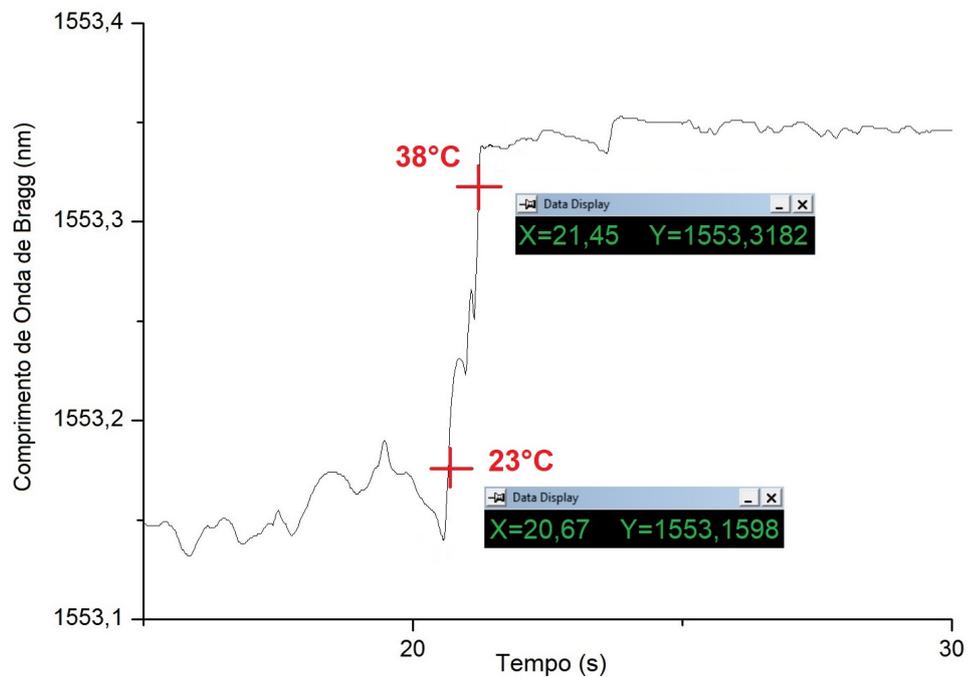


Figura 48: Tempo de resposta à variação de temperatura na fibra nua entre 10% e 90%.

Fonte: Autoria própria

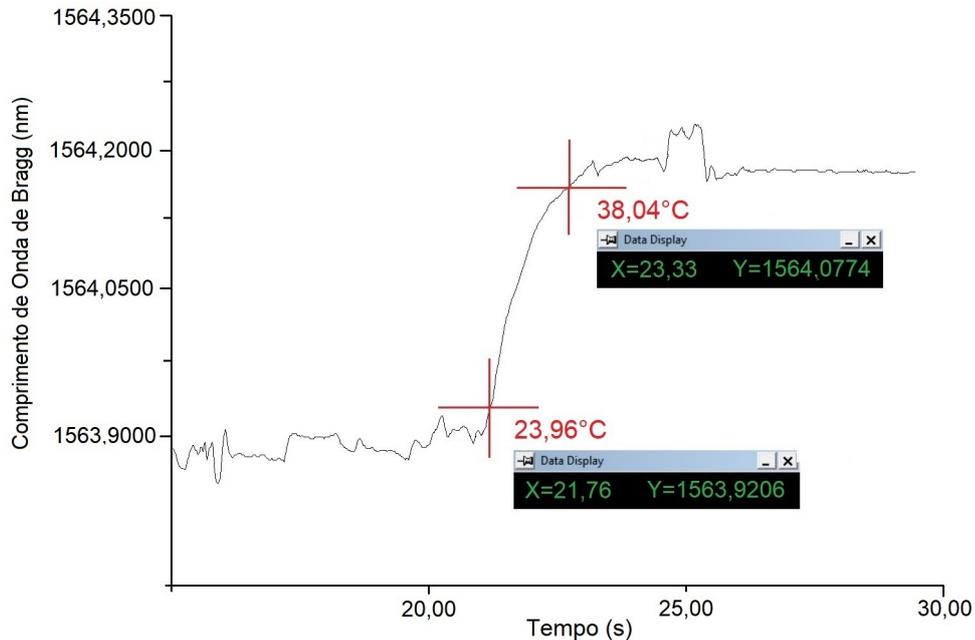


Figura 49: Tempo de resposta à variação de temperatura na fibra encapsulada entre 10% e 90%.

Fonte: Autoria própria

Ao subtrair o tempo final e inicial neste intervalo entre 10% e 90% foram encontrados:

a) para a fibra nua: encontrado o valor de 0,78 s de tempo de resposta à variação de 15°C, ou seja, 52 ms/°C.

b) para a fibra encapsulada: encontrado o valor de 1,57 s de tempo de resposta à variação de 14,08°C, ou seja, 111,5 ms/°C.

É preciso registrar que para essa ação deve-se considerar o comportamento da temperatura sendo praticamente linear nesse intervalo, o que é um valor aceitável para a aplicação em módulos fotovoltaicos, onde a temperatura não sofrerá variações em intervalos menores que este tempo de resposta.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES

O objetivo da caracterização das FBGs é de se obter a curva característica da resposta à temperatura em relação ao tempo, e conseqüentemente calcular a sensibilidade dos sensores, para realizar a conversão dos valores de comprimento de onda de Bragg monitorados no módulo fotovoltaico. Apesar de serem instalados somente os sensores encapsulados no módulo, foram obtidas as curvas da fibra nua e fibra encapsulada. As Tabelas 50a e 50b apresentam os

resultados da calibração:

VARIAÇÃO DE TEMPERATURA			SENSIBILIDADE		
	Aquecimento	Resfriamento		Aquecimento	Resfriamento
Média (°C)	Média λ_B (nm)	Média λ_B (nm)	temp var. (°C)	Sens. (pm/°C)	Sens. (pm/°C)
10	1563,8043	1563,8000	10	9,6	9,7
20	1563,9010	1563,8970	10	9,8	9,9
30	1563,9997	1563,9960	10	9,6	10,0
40	1564,0965	1564,0960	10	10,3	10,4
50	1564,2001	1564,2000	10	10,1	10,2
60	1564,3020	1564,3020	Média pm/°C =	9,9	10,0

Figura 50: a) Média dos comprimentos de onda de Bragg para a fibra encapsulada, b) Média das sensibilidades em pm/°C para a fibra encapsulada.

Fonte: Autoria própria

O comportamento da temperatura em relação ao comprimento de onda de Bragg dos sensores em redes de Bragg na fibra encapsulada é praticamente linear, o que se confirmou na calibração, conforme Figura 51.

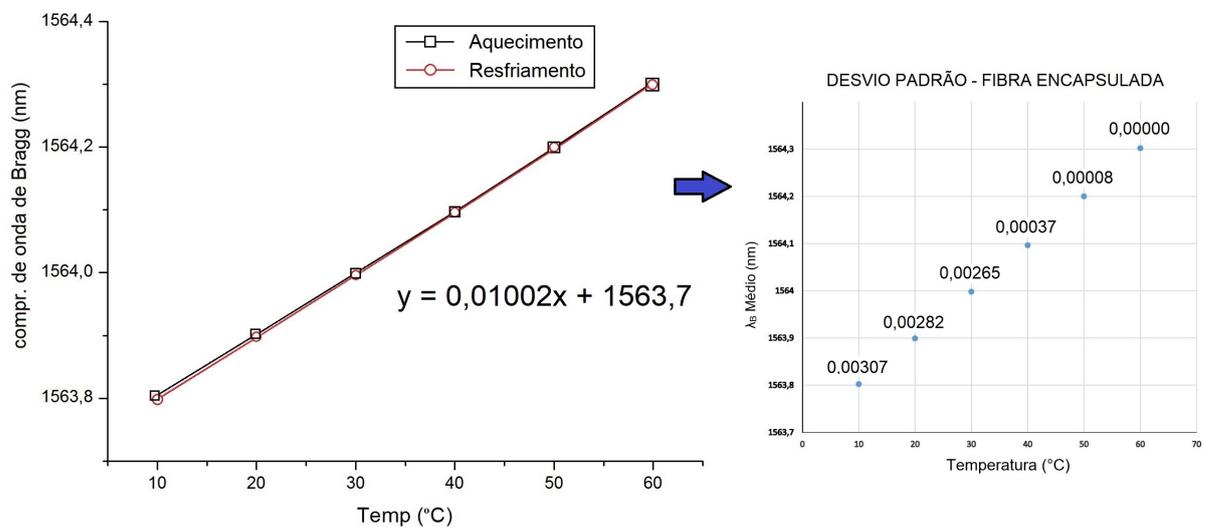


Figura 51: Gráfico de Comprimento de onda de Bragg x Temperatura para a fibra encapsulada.

Fonte: Autoria própria

Baseado nesta linearidade do sensor calibrado, é possível considerar a mesma sensibilidade para os demais sensores, ou seja 9,95 pm/°C. Referente ao comprimento de onda de Bragg de cada FBG, para que seja substituído na equação da Figura 51, cada um foi obtido através do espectro de onda gerado após a gravação dos sensores em laboratório, representados na Figura 44, ou seja, foi medido o comprimento de onda central de cada espectro (FBG).

Conforme já citado no item 3, devido o comportamento linear apresentado pelas FBGs, a mesma constante apresentada na equação pode ser utilizada para todos os sensores. A Tabela 14 apresenta os comprimentos de onda de Bragg de cada FBG encontrados através do Gráfico da Figura 44, na temperatura de 22°C.

Tabela 14: Comprimento de Onda de Bragg das 21 redes gravadas

| λ_B (nm) |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Sensor 21 | Sensor 20 | Sensor 19 | Sensor 18 | Sensor 17 | Sensor 16 | Sensor 15 | Sensor 14 | Sensor 13 | Sensor 12 | Sensor 11 |
| | 1516,223 | 1517,843 | 1520,535 | 1524,346 | 1527,007 | 1529,678 | 1530,699 | 1532,43 | 1534,89 | 1538,601 |
| 1512,558 | Sensor 10 | Sensor 9 | Sensor 8 | Sensor 7 | Sensor 6 | Sensor 5 | Sensor 4 | Sensor 3 | Sensor 2 | Sensor 1 |
| | 1538,722 | 1540,196 | 1542,962 | 1545,695 | 1550,457 | 1553,255 | 1555,858 | 1560,078 | 1563,925 | 1568,126 |

O mesmo procedimento foi realizado para a fibra nua, para conhecimento do impacto desta cobertura na linearidade da sensibilidade dos sensores.

As Tabelas 52a e 52b apresentam os resultados da calibração das FBG's em fibra nua, onde temos a sensibilidade de $\cong 10,6$ pm/°C para os ciclos de aquecimento e resfriamento.

VARIAÇÃO DE TEMPERATURA			SENSIBILIDADE		
	Aquecimento	Resfriamento		Aquecimento	Resfriamento
Média (°C)	Média λ_B (nm)	Média λ_B (nm)	temp var. (°C)	Sens. (pm/°C)	Sens. (pm/°C)
10	1553,0557	1553,0490	10	9,1	9,4
20	1553,1472	1553,1437	10	9,8	9,8
30	1553,2461	1553,2418	10	11,0	10,1
40	1553,3562	1553,3430	10	11,6	10,7
50	1553,4723	1553,4505	10	13,2	11,9
60	1553,6048	1553,5701	Média pm/°C =	10,9	10,4

Figura 52: a) Média dos comprimentos de onda de Bragg para fibra nua, b) Média das sensibilidades em pm/°C para a fibra nua.

Fonte: Autoria própria

O comportamento dos sensores em redes de Bragg na fibra nua é, também, praticamente linear, o que se confirmou na calibração, conforme 53.

É possível verificar que na fibra encapsulada, os sensores apresentaram um comportamento praticamente sem histerese para aquecimento e resfriamento. Referente à curva da fibra nua (Figura 53), é possível verificar que há uma diferença de indicação do comprimento de onda de Bragg para a temperatura inicial e final comparando a rampa de aquecimento e rampa de resfriamento. Isto se deve à diferença de temperatura medida pelo sistema do banho térmico no ponto de medição de temperatura e no ponto onde a FBG está posicionada, nos dois ciclos. Como o tempo de resposta à temperatura da fibra nua é menor, esta detectou esta diferença antes da estabilização.

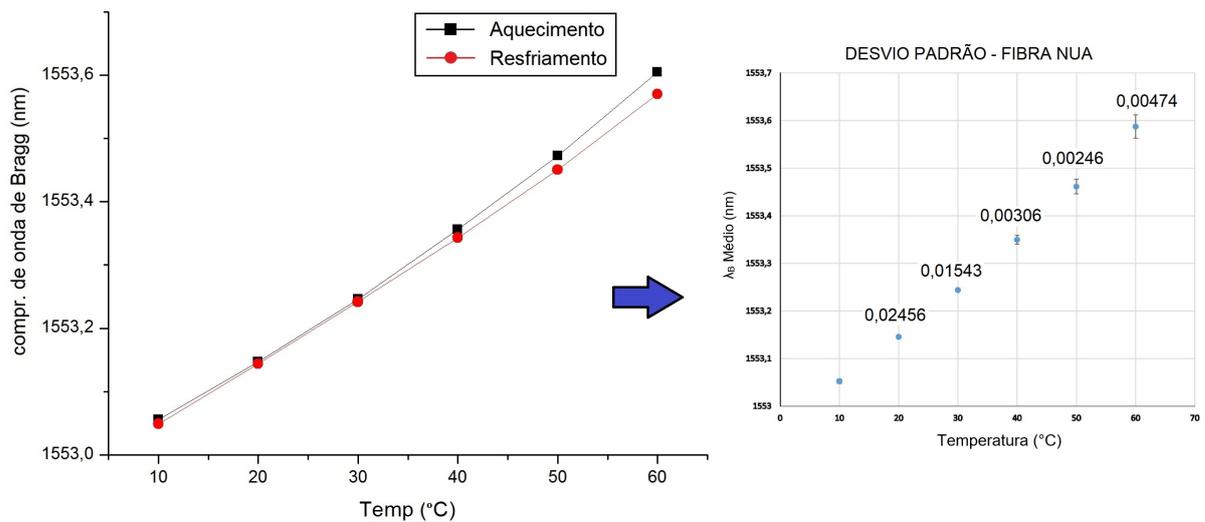


Figura 53: Gráfico de Comprimento de onda de Bragg x Temperatura para a fibra nua.

Fonte: Autoria própria

Após calibração, os sensores foram montados no módulo em operação e iniciou-se o monitoramento da temperatura.

4.4 MONITORAMENTO DE TEMPERATURA

Após a montagem dos sensores no módulo e todo o sistema de monitoramento já estar pronto no Escritório Verde, conforme já detalhado, iniciou-se o monitoramento de temperatura em tempo real no dia 25 de agosto de 2017. A aquisição dos dados foi realizada a cada 30 segundos para gerar um banco de dados mais completo e preciso para análises futuras do comportamento térmico do módulo fotovoltaico, porém para melhor visualização foi realizada a média em cada ponto dentro de intervalos pré definidos onde não houve variação brusca de temperatura. É importante ressaltar que os sensores foram instalados na parte traseira do módulo, distantes a 10 cm do telhado, não sofrendo interferência dos raios ultravioleta, porém os mesmos estão em um ambiente onde sofrem a interferência da temperatura deste telhado, que pode ser considerado um pequeno acumulador de calor. A Figura 54 representa esta forma construtiva.

Para uma visualização inicial do comportamento térmico do módulo, foi calculada a média de temperatura dos 20 sensores FBGs e representada no Gráfico da Figura 55 junto à temperatura ambiente. Este gráfico apresenta os registros do os dia 12/09/2017 durante todo o dia.

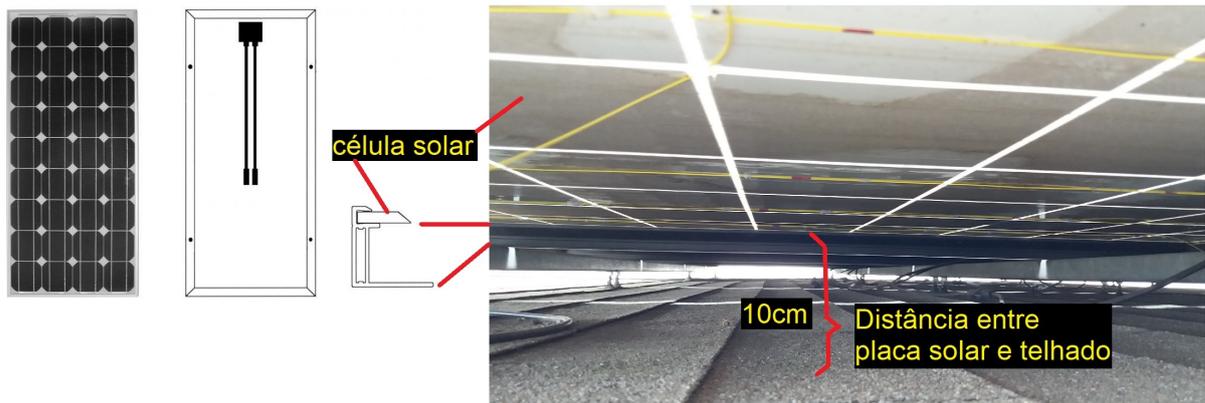


Figura 54: Distância entre placa solar e telhado.

Fonte: Autoria própria

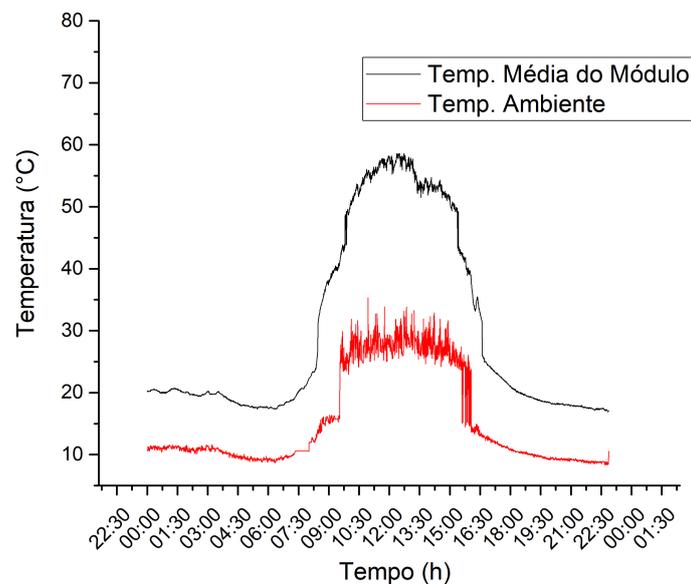


Figura 55: Comparação Temperatura Média do módulo e Temperatura Ambiente ao longo do dia 12/09/2017.

Fonte: Autoria própria

A Figura 55 apresenta a média de temperatura de todos os pontos (20 sensores) distribuídos no módulo, pois cada ponto monitorado possui uma temperatura diferente, mas é muito útil para se verificar que a variação da temperatura é muito expressiva, e também apresenta a temperatura ambiente (sensor 21) ao longo de um dia. Referente à este gráfico e especificamente ao comportamento da temperatura ambiente, é válido ressaltar que o suporte onde está fixado a FBG nº 21 foi projetado de forma a evitar ao máximo a interferência térmica de corpos próximos, porém por questões de disponibilidade de recursos e também para evitar

o sombreamento que o suporte poderia causar no módulo, este foi instalado muito próximo ao telhado, portanto é possível que esteja sofrendo interferência térmica deste, uma vez que foram registradas temperaturas do telhado próximas a 60°C.

Durante a apresentação dos resultados nos demais gráficos e tabelas, será possível verificar esta oscilação e também a diferença de temperatura entre os diversos pontos do módulo. Vale reforçar que estas ocorrências são rápidas e bruscas devido ao tempo ter ficado nublado, chuvas momentâneas devido ao alto calor, fortes ventos refrigerando o módulo, entre outros, o que implica na variação de temperatura de diferentes formas. Os sensores FBG encapsulados, por possuírem altas velocidades de leitura, conseguem detectar rapidamente a variação térmica. Comparados com o termopar tipo K e até mesmo o termômetro infravermelho, a amostragem no mesmo tempo medido se difere, devido à estabilidade e tempo de resposta do instrumento de medição. Como exemplo desta fato, é demonstrado na Tabela 15 os valores medidos com o termômetro infravermelho e também com as FBGs no mesmo horário. É possível verificar a razoável correlação, porém a indicação do termômetro está próxima à 3% inferior.

Tabela 15: Medições de temperatura por termômetro infravermelho e FBG

PONTO	HORA	TEMPERATURA TERMÔMETRO (°C)	TEMPERATURA FBG (°C)	TEMPERATURA TELHADO (°C)
P1	15:02	58,16	59,86	57
P2	15:02	53,45	55,75	
P3	15:02	54,12	55,91	
P4	15:02	48,23	50,86	
P5	15:03	36,71	52,07	
P6	15:03	54,12	54,42	
P7	15:03	55,9	56,44	
P8	15:03	58,65	61,16	
P9	15:04	54,45	55,95	
P10	15:04	56,01	57,47	
P11	15:04	53,23	55,06	
P12	15:04	54,88	55,02	
P13	15:04	57,28	58,21	
P14	15:05	63,08	65,07	
P15	15:05	68,08	68,73	
P16	15:05	70,35	72,61	
P17	15:05	68,63	70,96	
P18	15:05	74,89	75,71	
P19	15:05	72,56	73,25	
P20	15:05	65,87	66,06	
P21	15:05	-	39,80	

A Tabela 16 apresenta os valores medidos com o termopar tipo K e também com as FBGs no mesmo horário, porém em outra data. Comparando as Tabelas 15 e 16, percebe-se nesta última uma indicação superior vinda do termopar, exceto no ponto 13, porém ainda há razoável correlação, o que confirma a eficácia da leitura da temperatura com as FBGs.

Tabela 16: Medições de temperatura por Termopar tipo K e FBG

PONTO	HORA	TEMPERATURA TERMOPAR TIPO K (°C)	TEMPERATURA FBG (°C)	TEMPERATURA TELHADO (°C)
P1	10:16	39,50	34,199	55,5
P2	10:17	40,00	38,032	
P3	10:18	40,00	38,026	
P4	10:19	39,60	34,398	
P5	10:20	32,00	36,230	
P6	10:21	38,60	38,200	
P7	10:22	38,50	35,400	
P8	10:22	39,20	38,560	
P9	10:23	39,30	38,590	
P10	10:27	38,30	36,540	
P11	10:28	38,60	37,200	
P12	10:28	38,70	36,500	
P13	10:29	43,30	44,260	
P14	10:30	44,25	43,890	
P15	10:31	46,83	45,780	
P16	10:32	47,25	45,200	
P17	10:33	53,75	53,210	
P18	10:35	54,10	53,540	
P19	10:36	49,70	48,200	
P20	10:37	49,80	47,340	
P21	10:39	32,60	35,800	

Está claro nas duas planilhas 15 e 16 que os valores medidos em relação às FBGs não são iguais. Isto ocorre devido a diversos motivos, entre eles a precisão dos instrumentos, erros, tempo de resposta e também pela medição ter sido realizada sobre o módulo com o termopar tipo K e termômetro infravermelho, enquanto as medições com as FBGs são realizadas sob o módulo, apesar da espessura entre a superfície e o fundo ser aproximadamente 9 mm, ou seja, bem fina. Abaixo do módulo, há também a influência direta da irradiação de calor do telhado. O Gráfico da Figura 56 detalha o comportamento térmico com os registros dos 21 sensores, no dia 19/10/2017 das 00:01h às 23:59h, com o objetivo de apresentar as grandes variações da temperatura, mesmo dentro dos períodos com incidência solar.

Como as temperaturas são muito próximas entre a maioria dos pontos monitorados, é apresentado no Gráfico da Figura 57 valores medidos por 6 sensores, para melhor visualização dos resultados. Foi escolhida data de 08/09/2017 devido à grande variação de temperatura que

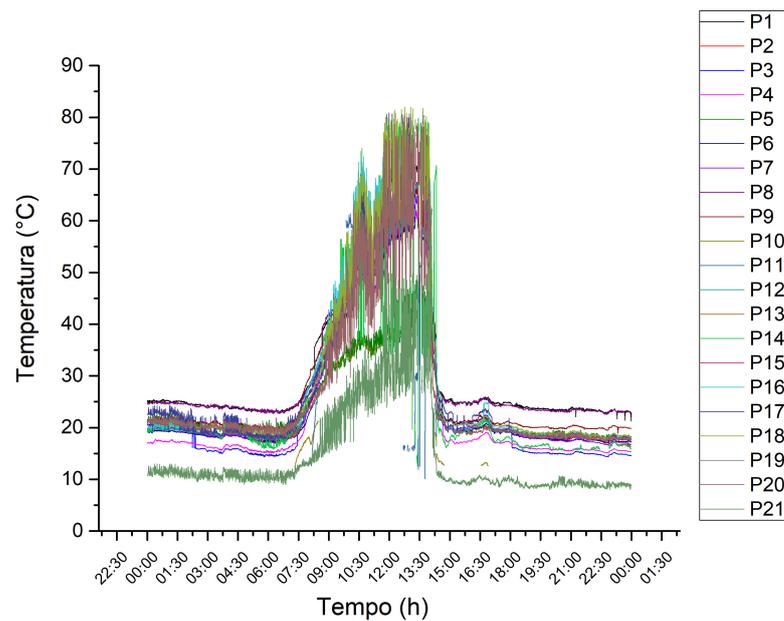


Figura 56: Comportamento térmico dos 21 sensores de temperatura durante o dia 19/10/2017.

Fonte: Autoria própria

ocorreu durante este dia. Foram escolhidos seis pontos de amostragem no módulo, um em cada canto do módulo, e dois centrais, a fim de se ter um uma noção geral do comportamento do módulo. A resolução do instrumento de medição (IMON) é de 0,5 pm, ou seja, 0,05 °C.

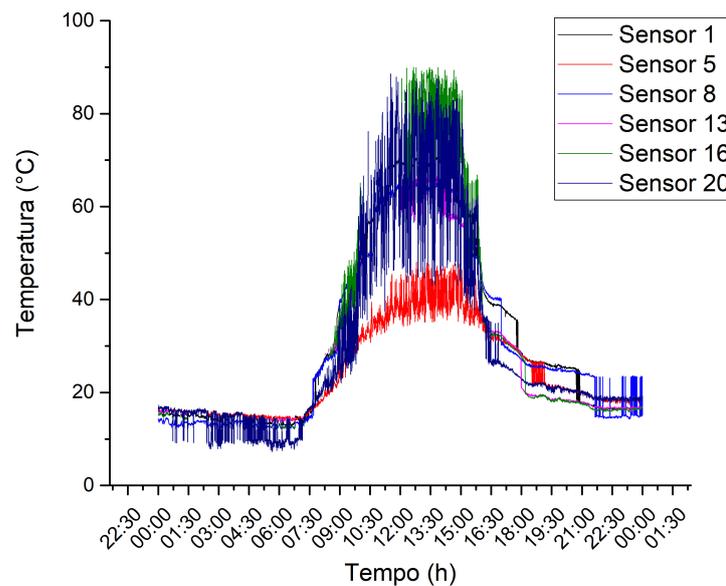


Figura 57: Comportamento térmico de seis sensores de temperatura durante o dia 08/09/2017.

Fonte: Autoria própria

Verificamos nestes dois gráficos, 56 e 57, que é muito grande a variação de temperatura ao longo de um dia. Aproximadamente antes das 7:30h e após as 17:30h, a temperatura do módulo é mais constante e bem próxima à ambiente, pois não há produção de energia elétrica devido pouca ou até ausência da luz solar. Durante os período em que o módulo está produzindo energia elétrica, há grandes variações de temperatura, chegando a uma variação de quase 10°C dentro de um intervalo de trinta minutos. Diversos são os fatores que justificam esta variação. É válido ressaltar que a planta fotovoltaica está instalada na cidade de Curitiba, onde a variação climático durante o dia é muito grande, não somente em temperatura, como em quantidade de vento, chuva, nuvens, o que não oferece as melhores condições para estabilidade térmica do módulo fotovoltaico.

Para uma melhor visualização e nitidez do comportamento térmico do módulo medido por estes seis sensores, foi gerado o Gráfico da Figura 58 que apresenta a variação da temperatura em um dia, obtendo a média das temperaturas em cada intervalo de 10 minutos.

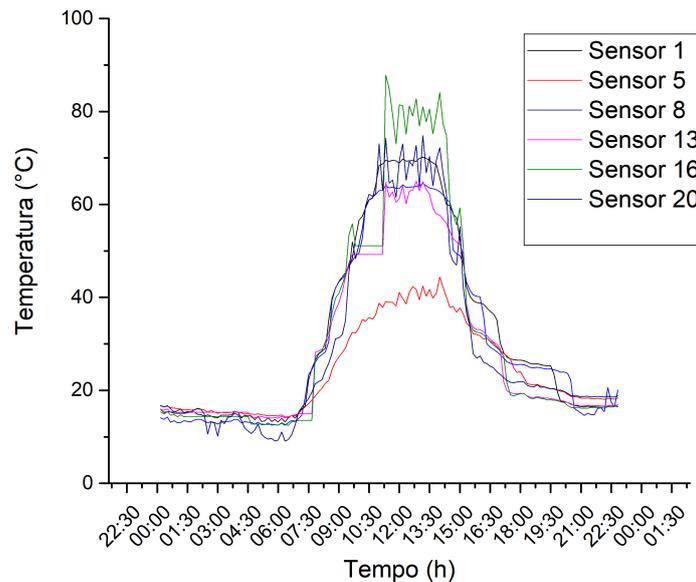


Figura 58: Comportamento térmico médio de seis sensores de temperatura durante o dia 08/09/2017.

Fonte: Autoria própria

É possível verificar no gráfico da Figura 58 que, assim como a temperatura ambiente, o módulo possui temperaturas mais baixas nos períodos sem incidência solar, e o auge da temperatura às 12h aproximadamente, onde é o horário com maior incidência de radiação solar. Este módulo KD210GX-LP possui 54 células fotovoltaicas por onde, após incidência solar, circula corrente elétrica. Esta corrente elétrica também é um fator determinante da variação de temperatura, ou seja, o módulo aquecerá mesmo em dias frios e dependerá diretamente da

carga instalada no sistema fotovoltaico. Quanto maior a corrente elétrica, maior a temperatura da célula. Caso a célula esteja degradada ou avariada pelo tempo de uso ou outro fator, a temperatura neste ponto específico poderá diferir dos demais no módulo. É importante ressaltar também que o módulo monitorado sofre a influência de temperatura dos demais módulos constituintes da planta fotovoltaica, o que é mais um fator que pode contribuir para a diferença de temperatura entre os pontos. Esta diferença é agravada quando não há a presença de ventos ou outros fatores que auxiliam na refrigeração do painel. Este é um dos objetivos em se monitorar a temperatura, servindo como um indicador do desempenho de um sistema fotovoltaico e também um detector de falhas nas células, baseado na diferença de temperatura entre estas. A Figura 59 apresenta a medição em um intervalo de uma hora no dia 08/09/2017, mostrando a variação da temperatura.

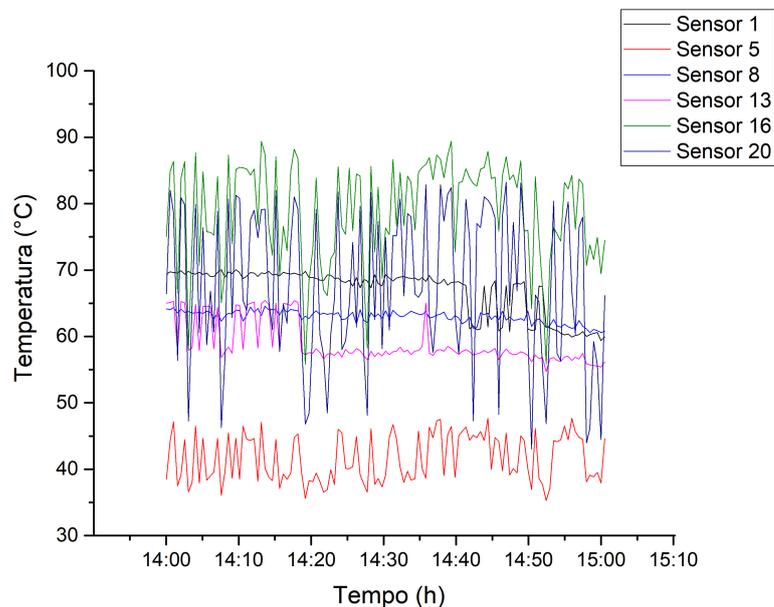


Figura 59: Comportamento térmico de seis sensores de temperatura durante uma hora no dia 08/09/2017.

Fonte: Autoria própria

Da mesma forma como realizado anteriormente, para uma melhor visualização e nitidez do comportamento térmico do módulo medido por estes seis sensores durante uma hora, foi gerado o gráfico mostrado na Figura 60 que apresenta a variação da temperatura durante uma hora no dia 08/09/2017, obtendo a média das temperaturas de cada sensor em intervalos de 10 minutos.

É mostrado neste Gráfico representado na Figura 60 que em um intervalo de uma hora há uma variação de até 25°C.

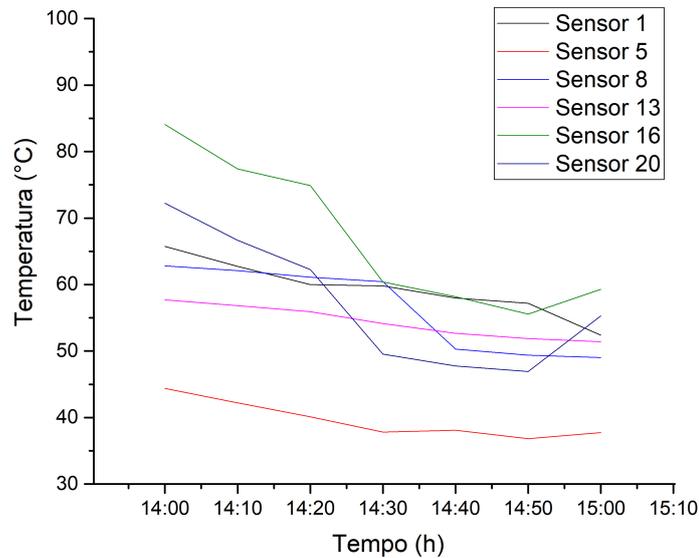


Figura 60: Comportamento térmico médio de seis sensores de temperatura durante uma hora no dia 08/09/2017.

Fonte: Autoria própria

Nestes gráficos apresentados, foi mostrado intencionalmente o comportamento térmico do sensor nº 5. É possível verificar que a temperatura medida neste ponto sempre está abaixo dos demais. Como todos os sensores foram validados, inicialmente era um indicio de uma possível avaria na célula fotovoltaica localizada naquela posição ou outro problema. Após realizada a medição com o termômetro infravermelho e com o termopar, foi observado que a temperatura no ponto 5 era muito próxima dos demais, o que indicava que a FBG instalada neste local não estava medindo exatamente a temperatura do módulo onde possivelmente, a fibra não estava totalmente em contato com o módulo, evidenciando um problema de fixação (colagem). Como experimento, é extremamente válido este registro, o que comprova uma das maiores dificuldades na aplicação de fibras óticas para monitoramento térmico, a fixação da mesma.

Visto o perfil térmico do módulo fotovoltaico, a seguir será apresentado e comparado o comportamento térmico em relação à potência gerada pela planta fotovoltaica ao longo de um dia. Neste trabalho não são analisadas as condições dos demais módulos constituintes à planta fotovoltaica, porém é muito provável que o perfil de produção geral seja bem semelhante ao de cada módulo, inclusive ao módulo monitorado neste trabalho. De vários dias de monitoramento, será apresentado para a primeira comparação o gráfico do comprimento de onda do sensor nº 01 ao longo do dia 05/09/2018. Este dia foi escolhido devido às condições climáticas apresentadas,

onde estava frio, houve uma enorme instabilidade com chuvas durante vários momentos, ventos fortes e presença de sol em horas variadas. Optou-se por apresentar primeiramente a variação do comprimento de onda, pois é um gráfico visualmente mais limpo, devido à variação do comprimento de onda ser na ordem de décimos ou centésimos, o que facilita a comparação com a produtividade do módulo em kW. A Figura 61 apresenta o gráfico. É apresentado o comportamento somente do sensor 1, pois os demais apresentam semelhança.

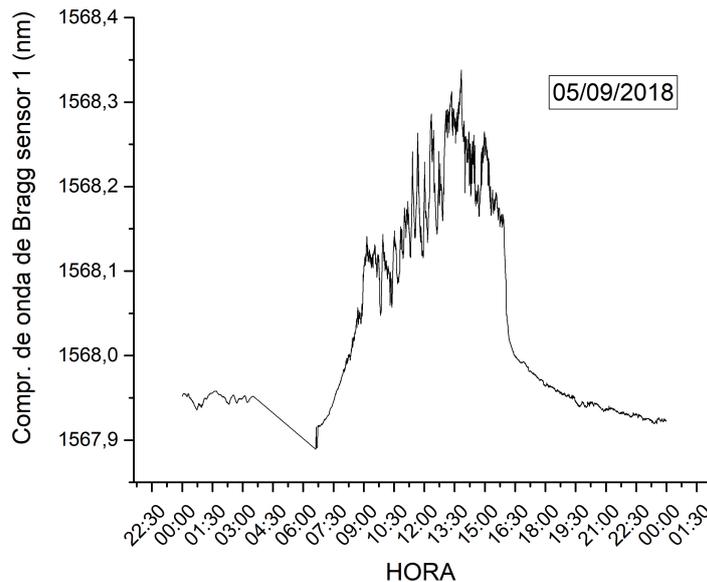


Figura 61: Variação do comprimento de onda do sensor nº 01 durante o dia 05/09/2018.

Fonte: Autoria própria

É possível verificar que houve uma grande instabilidade no período entre às 9:00h e 15:30h. É visível também que as maiores temperaturas registradas não foram próximas às 12h, devido à incidência da luz solar ser maior próximo às 13:30h. Na Figura 62 é apresentada a potência produzida em cada momento durante o mesmo dia, como forma de verificar se há uma relação entre temperatura e produção.

Os gráficos das Figuras 61 e 62 são muito semelhantes o que comprova uma relação entre as grandezas comprimento de onda de Bragg (temperatura) e potência, porém o comportamento não é idêntico. É importante saber que no Gráfico da Figura 61 o período de amostragem é de 30 segundos enquanto no Gráfico da Figura 62 a taxa é de 15 minutos.

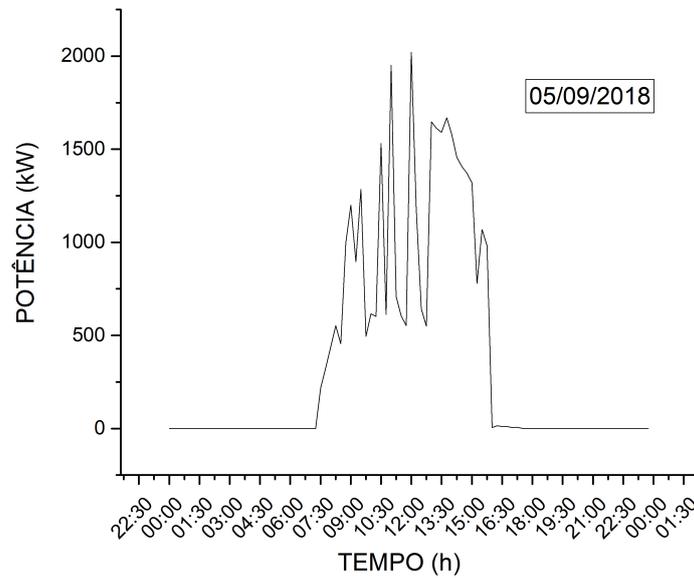


Figura 62: Potência produzida pela planta fotovoltaica durante o dia 05/09/2018.

Fonte: Autoria própria

Os dados de produção foram fornecidos pelos responsáveis técnicos do Escritório Verde. Podemos visualizar de uma melhor forma posicionando os gráficos um ao lado do outro, conforme figura 63.

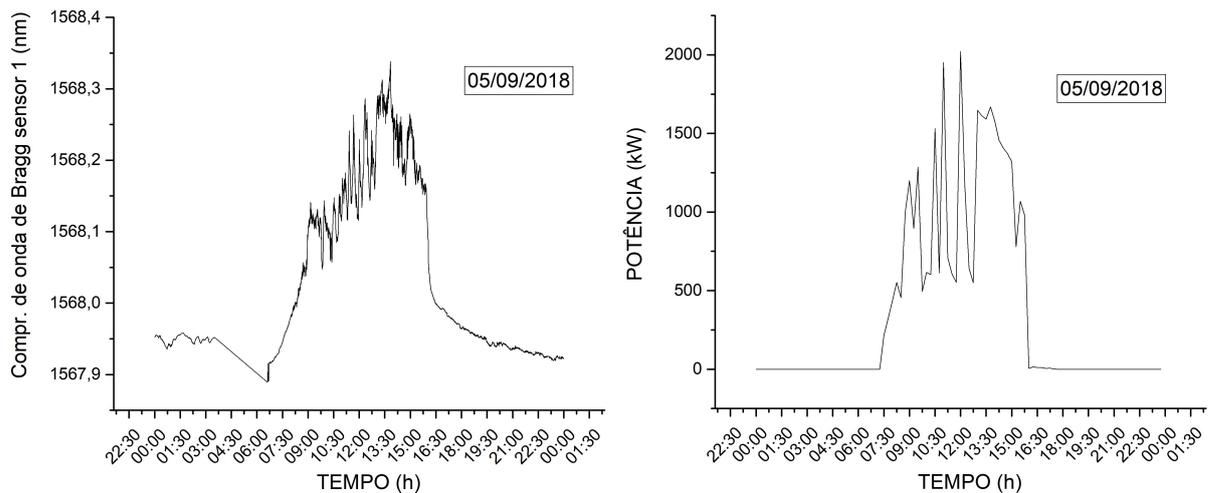


Figura 63: Comparação entre Produção e Comprimento de onda de Bragg durante o dia 05/09/2018.

Fonte: Autoria própria

Com o mesmo perfil de comportamento, é apresentado na Figura 64 o registro da temperatura de todos os sensores neste dia 05/09/2018. Verifica-se que, diferente do gráfico apresentado na Figura 61, visualmente nota-se um gráfico aparentemente com maior oscilação, porém é exatamente o mesmo perfil, onde a diferença está na amplitude da variação, pois devido à sensibilidade de aproximadamente $10 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$, enquanto o comprimento de onda varia décimos, a temperatura varia alguns graus Célcios, deixando o gráfico mais intenso. A período de amostragem neste gráfico também é de 30 segundos.

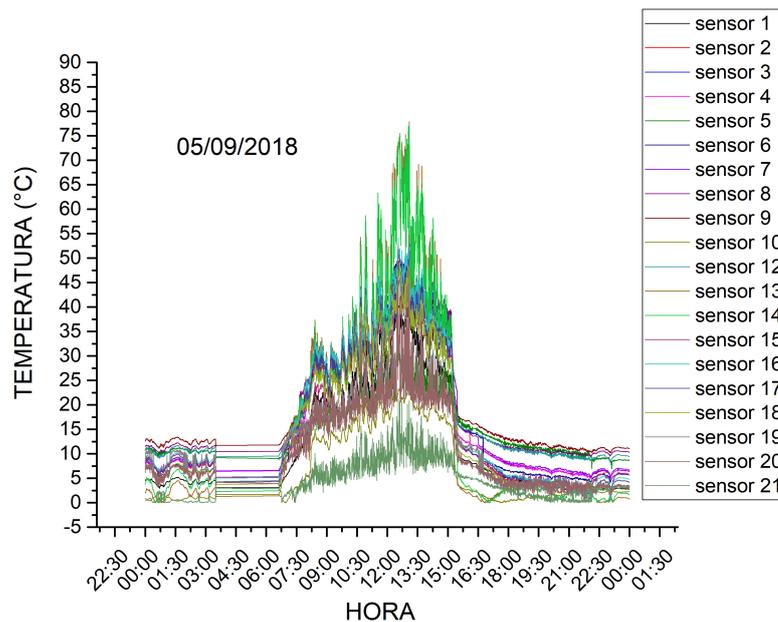


Figura 64: Variação da temperatura nos sensores durante o dia 05/09/2018.

Fonte: Autoria própria

Assim como apresentados os gráficos do monitoramento realizado dia 05/09/2018, são mostrados agora os mesmos gráficos, porém registrados no dia 06/09/2018. Optou-se pela apresentação destes registros, devido ter sido um dia muito diferente do anterior. Neste dia 06 o clima se manteve muito estável, sem chuva e ventos e houve a presença de luz solar durante todo o período entre 7:00h e 18:00h. Devido estes fatores, a curva foi muito diferente, porém nota-se que a relação entre temperatura e potência tem o mesmo comportamento. A Figura 65 apresenta o comportamento do comprimento de onda de Bragg ao longo do dia.

É possível visualizar que as oscilações de temperatura são muito pequenas. O período de amostragem para o gráfico da Figura 65 é de 30 segundos. Da mesma forma que este gráfico, a potência gerada pela planta fotovoltaica também foi estável, aumentando ao longo do dia atingindo o ápice próximo às 12h. A Figura 66 apresenta o comportamento da potência gerada durante o dia 06/09/2018. O período de amostragem deste gráfico é de 15 minutos.

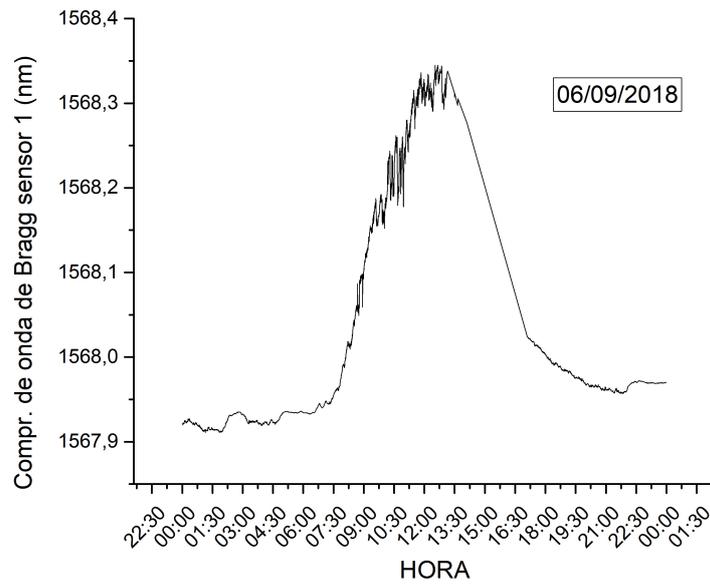


Figura 65: Variação do comprimento de onda do sensor nº 01 durante o dia 06/09/2018.

Fonte: Autoria própria

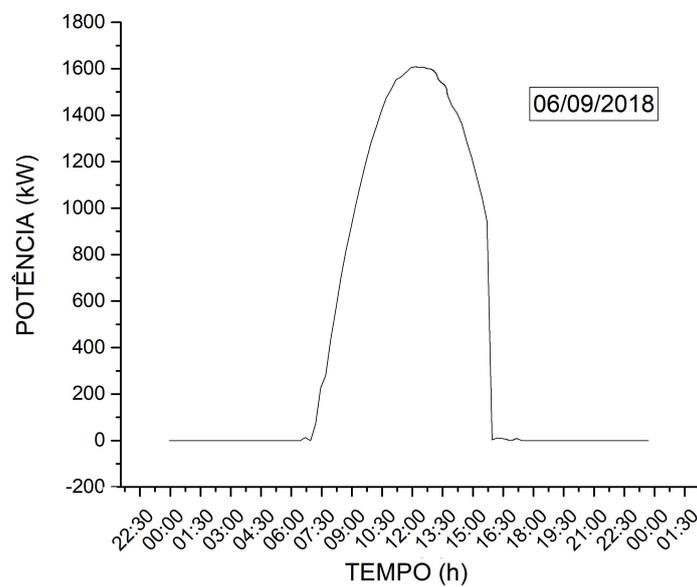


Figura 66: Potência produzida pela planta fotovoltaica durante o dia 06/09/2018.

Fonte: Autoria própria

Para melhor visualização, foram posicionados os gráficos um ao lado do outro, conforme figura 67.

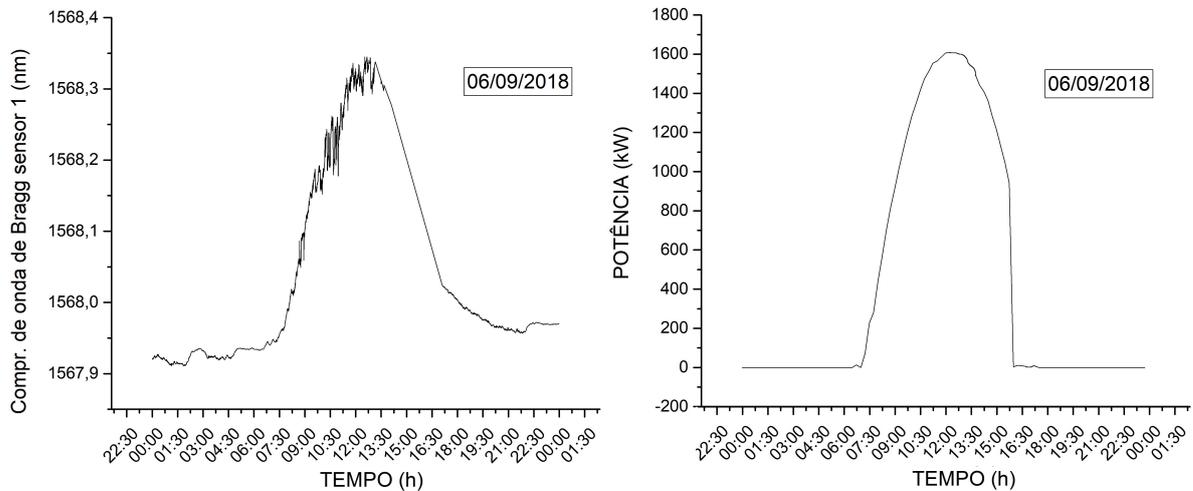


Figura 67: Comparação entre Produção e Temperatura durante o dia 06/09/2018.

Fonte: Autoria própria

Com o mesmo perfil de comportamento, é apresentado na Figura 68 o registro da temperatura de todos os sensores neste dia 06/09/2018. É um gráfico onde nota-se uma maior oscilação comparado ao comprimento de onda, porém tem o mesmo perfil. Este gráfico foi escolhido intencionalmente, pois é possível observar que a partir das 12:00 h, o gráfico está mais linear, isto se deve à falhas de alguns registros de temperatura durante este período, ou seja, o software de monitoramento e registros de dados de comprimento de onda, esporadicamente não registrava os dados de algum sensor em momentos aleatórios, desta forma todos os dados medidos erroneamente foram descartados. É apresentado então que o sistema de monitoramento possui algumas falhas a serem corrigidas.

Conforme já comentado, os efeitos dos intempéries influenciam na variação de temperatura do módulo e também de cada ponto monitorado. Como exemplo é possível citar que, quando há incidência de ventos, nem todos os pontos serão afetados da mesma forma devido arquitetura da instalação deste módulo, ou seja, um ponto pode ser resfriado e outro talvez não se altere, dependendo de como ocorreu a incidência.

Uma melhor forma de ilustrar o comportamento térmico do módulo fotovoltaico é através da geração de gradientes térmicos. É um método visual que possibilita o fácil entendimento do comportamento térmico do módulo, compilando de forma ilustrativa os dados registrados. O gradiente foi gerado com o uso *software* LabView®[®], utilizando blocos de mapeamento térmico existente no *software* especificamente para esta finalidade. Os dados utilizados para gerar os gradientes são os mesmos registrados pelo *software* de monitoramento.

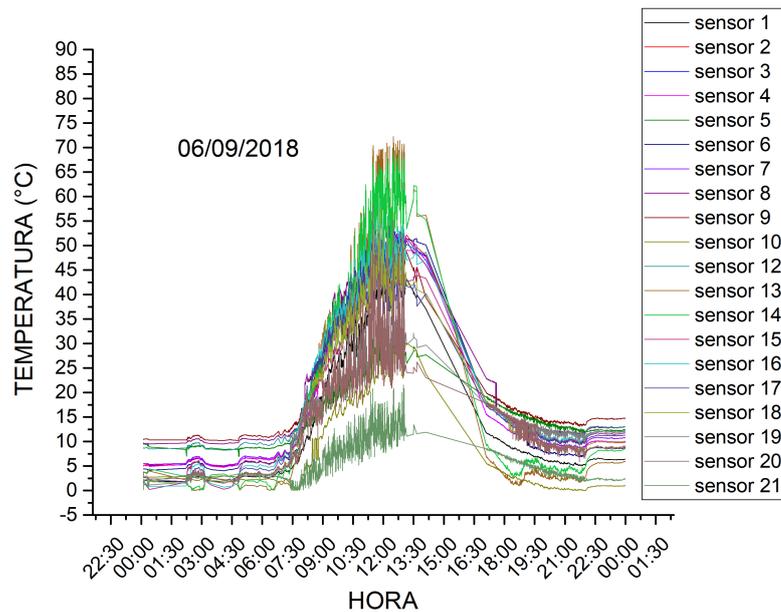


Figura 68: Variação da temperatura nos sensores durante o dia 06/09/2018.

Fonte: Autoria própria

A figura 69 apresenta o gradiente de temperatura com os 20 sensores no módulo, indicando a evolução da temperatura pela numeração de 1 à 10, no período das 07:00h às 17:30h respectivamente. A Figura 70 apresenta a posição dos sensores. É importante lembrar que os sensores estão instalados na parte traseira do painel, porém a figura mostra a vista frontal do painel. O data deste monitoramento é do dia 06/09/2018, mesma data representada na Figura 68.

É possível verificar uma pequena deformação no canto inferior direito do módulo, isto não é um defeito no monitoramento, ocorreu após a geração das imagens pelo *software*, o que não altera a análise, é só uma questão estética. Neste mesmo local, se encontra o sensor nº05. É visível que em todo o período este apresenta uma temperatura menor que os demais pontos. Isto foi explicado anteriormente e agora se evidencia. Também não é um problema no sensor, possivelmente é devido à fixação não estar mantendo a fibra totalmente encostada no módulo neste ponto, efetuando uma medição diferente dos demais pontos.

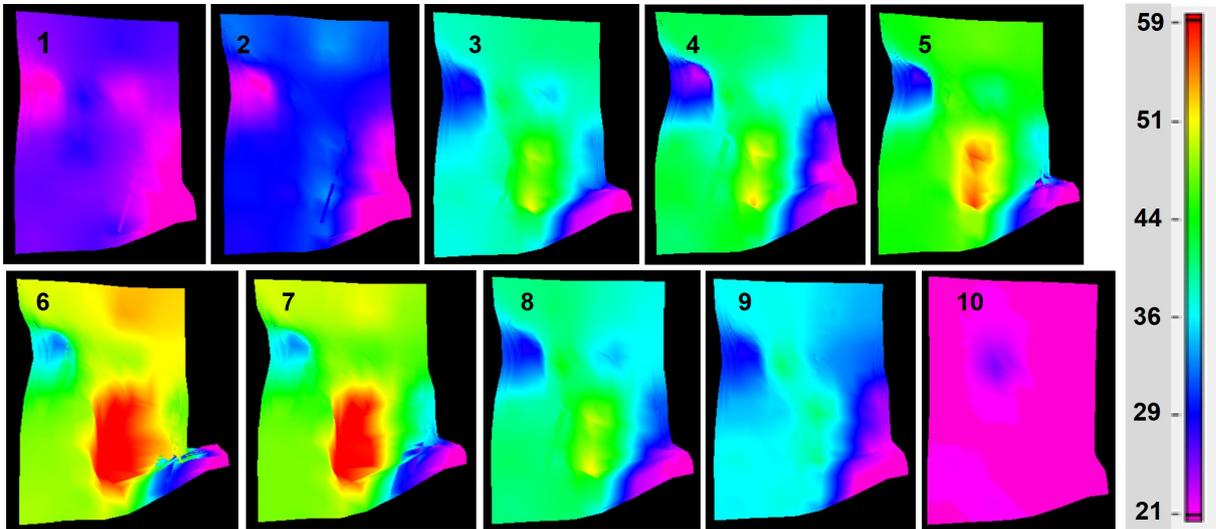


Figura 69: Comportamento térmico do módulo fotovoltaico durante o dia 06/09/2018.

Fonte: Autoria própria

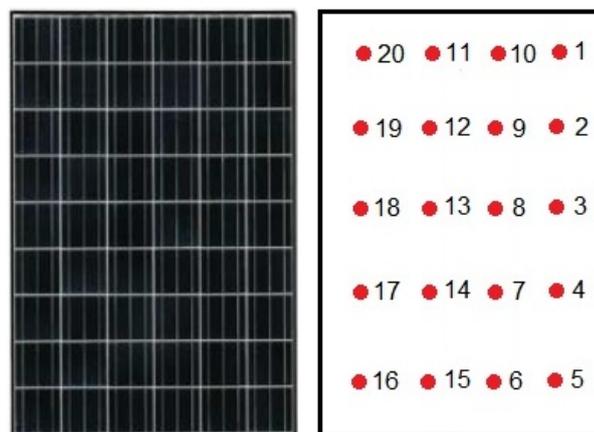


Figura 70: Vista frontal indicando a posição dos 20 sensores no módulo fotovoltaico.

Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões relacionadas a gravação, encapsulamento, caracterização e calibração de 21 redes de Bragg em fibra ótica, que tiveram a finalidade de monitorar a temperatura em um módulo fotovoltaico instalado em uma planta real em produção, assim como as sugestões para a continuação desta análise de temperatura em módulos fotovoltaicos.

5.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados a gravação, encapsulamento, caracterização e calibração de 21 redes de Bragg em fibra ótica, que tiveram a finalidade de monitorar a temperatura em um módulo fotovoltaico instalado em uma planta real em produção, situada no telhado do Escritório Verde da UTFPR, edificação esta pertencente à UTFPR campus Curitiba, PR.

O primeiro ponto a ser comentado é sobre o objetivo desta dissertação, que foi o monitoramento da temperatura e a validação do uso de redes de Bragg em módulos fotovoltaicos instalados em ambientes expostos à intempéries. Os dados obtidos foram expostos e comparados à outros métodos de medição e também relacionados com a potência produzida pelo sistema fotovoltaico, porém de forma a auxiliar o entendimento e aprimorar a validação do monitoramento de temperatura, desta forma o objetivo principal foi obtido e considerado satisfatório, que foi o monitoramento de temperatura de um módulo fotovoltaico durante um longo período de tempo, aproximadamente um ano, em diversas condições climáticas e estações do ano. Durante todo este período foram monitoradas também as condições da instalação, a fim de evitar registros errados devido à um descolamento ou até quebra da fibra ótica.

Outro ponto muito importante registrado neste monitoramento foi a diferença de temperatura medida entre os pontos no mesmo módulo e também a grande variação de temperatura ao longo do dia, onde em curtos espaços de tempo houve a variação brusca da temperatura devidos à vários fatores já expostos no trabalho.

Diversas foram as adversidades ao experimento. Apesar do foco durante o trabalho ser a obtenção e registro de temperaturas, é importante citar que o processo se iniciou com à concordância e liberação do uso do sistema instalado no Escritório Verde pelos setores competentes dentro da Universidade, pois se trata de uma planta que não poderia ser danificada e a produção de energia pelos módulos não poderia ser interrompida.

Este trabalho se diferencia de muitos outros devido sua aplicação em um sistema em operação, não foi uma simulação, ele transcendeu os limites do laboratório, e foi aplicado de forma prática, sendo impactado por muitas variáveis, desde humanas, políticas e técnicas. É importante ressaltar que a estação de monitoramento foi instalada dentro do Escritório Verde, em um ambiente com acesso restrito em meio à profissionais que lá trabalham, onde a cada vez que era necessário o acesso ao escritório, a privacidade de cada profissional não poderia ser afetada. Os recursos aplicados no experimento foram restritos ao disponibilizados pela UTFPR e disponíveis comercialmente.

Explanando sobre o procedimento técnico do trabalho, a maior dificuldade apresentada foi a preparação dos dados, adquiridos pelo interrogador ótico, para realizar a conversão dos comprimentos de onda em temperatura. A conversão é relativamente simples, porém devido à diferença na amplitude de cada rede de Bragg gravada, no *software* de monitoramento e registro é ajustado um *threshold*, ou seja, um limite na amplitude a ser medida e registrada de cada rede de Bragg. Qualquer oscilação na potência da fonte ótica faz com que a amplitude da onda da FBG se altere e, uma vez que o *threshold* está fixado, esta alteração da amplitude pode causar a perda de leitura de uma ou mais FBGs. Uma vez que o *software* de aquisição dos comprimentos de onda de Bragg registra as 21 redes em forma de planilha sequencial, sempre que uma rede é “perdida”, as redes subsequentes assumem a posição desta rede perdida, registrando falsos valores para a posição do sensor monitorado. O trabalho de filtragem destes dados, para posterior conversão, é realizado manualmente, com o auxílio de *softwares* como o Microsoft Excel® e OriginPro®. Como o monitoramento foi realizado por alguns dias consecutivos, esta perda de medição aconteceu de formas aleatórias em vários períodos de cada dia. Para amenizar esta falha, foi necessário realizar uma verificação manual várias vezes ao dia, para certificação de que as leituras e registros estavam ocorrendo de forma correta. Este problema fez com que se perdessem os dados de temperatura medidos em alguns períodos, mas isto não invalida o sistema, é uma situação que pode ser corrigida futuramente através de ajustes na fonte ótica, ou até mesmo na melhor qualidade de gravação das redes de Bragg. Referente à gravação das 21 redes de Bragg, as condições do equipamento de gravação (*laser* excímero) e das máscaras de fase utilizadas não contribuíram para a gravação de redes perfeitamente idênticas.

Outro ponto observado durante o ano de monitoramento foi que, o encapsulamento que ficou exposto ao efeitos de raios Ultra Violeta, no caso a FBG n°21 que mede temperatura ambiente, ressecou e quebrou em pequenas partículas, expondo a fibra diretamente ao ambiente. O manual técnico fornecido pelo fabricante do encapsulamento não fornecia esta informação. Este ocorrido também não causou nenhum impacto no monitoramento, pois a fibra ótica permaneceu intacta. O encapsulamento que ficou instalado abaixo do módulo fotovoltaico, no caso dos 20 sensores, se manteve em perfeitas condições.

As características das redes de Bragg em fibra ótica e suas capacidades de multiplexação, permitem que em um único cordão ótico seja feita a divisão dos sensores, diminuindo os custos das instalações em virtude da diminuição de infra-estrutura de cabeamento, assim como também a imunidade a interferência eletromagnética possibilita o monitoramento de ambientes em que este fator é relevante. No caso desta aplicação em um módulo fotovoltaico instalado em um telhado, o fator inoxidação foi um dos mais positivos, devido ao ambiente ser úmido. O tamanho reduzido dos sensores e a utilização de uma única fibra manteve o ambiente arquitetônico intacto e fez a presença do sistema praticamente imperceptível.

Diferente de outros métodos de medição de temperatura já citados, o monitoramento por redes de Bragg possui maior precisão de leitura e menor tempo de resposta ao monitoramento, ou seja, mede variações rápidas de temperatura.

Em nenhum momento o sistema se demonstrou instável ou inviável, apresentou excelente confiabilidade e robustez. O método de monitoramento remoto utilizando o *software Team Viewer* contribui grandemente possibilitando acesso ao dados a qualquer momento, e por vários dispositivos eletrônicos como computadores e *smartphones*.

Apesar deste sistema de monitoramento ótico ainda apresentar um custo elevado em comparação aos sistemas convencionais utilizados na indústria, devido ao custo do interrogador ótico, em equipamentos de grande valor como plantas fotovoltaicas se torna viável. Comercialmente ainda pode haver rejeição no seu uso por razão do desconhecimento da tecnologia, que ainda é pouco difundida entre o corpo técnico presente nas indústrias e até mesmo em algumas universidades.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho representa muito mais do que dados em uma planilha, demonstra as condições da aplicação da ciência na sociedade e a aplicação prática da técnica.

Como continuidade deste trabalho poderão ser realizados:

- testes com encapsulamentos resistentes à raios Ultra Violeta;
- correlações entre a temperatura do módulo fotovoltaico e outras variáveis de processo como a eficiência do sistema fotovoltaico, condições de limpeza dos painéis instalados no telhado, pontos de máxima potência de produção, condições climáticas, entre outros;
- desenvolvimento de *softwares* que detectem falhas nas medições, evitando coleta de dados errôneos;
- Aplicação deste tipo de sensoriamento em maior escala, monitorando toda a planta fotovoltaica.

REFERÊNCIAS

- BARRY, ROGER G.; CHORLEY, RICHARD J. **Atmosphere, Weather and Climate**. Oitava edição. [S.l.: s.n.], 2003. ISBN 0415271703.
- BRASIL, Minipa do. **Alicate Ampermetro e acessórios**. Direitos de minipa industria e comercio Ltda. [S.l.], 2017. 21 p.
- BRINKMANN, Lauda. **LAUDA ECO RE 415 S Cooling thermostat**. Copyright 2017 lauda-brinkmann, lp. [S.l.], 2017. 2 p.
- COHERENT. **Compact Excimer Laser with Integrated Gas Compartment**. Copyright 2010 coherent, inc. [S.l.], 2010. 2 p.
- COMPANY, OMEGA. **Hstórico do sensor de temperatura** <https://br.omega.com/artigos-tecnicos/historia-do-sensor-de-temperatura.html>. 2018. <https://br.omega.com/artigos-tecnicos/historia-do-sensor-de-temperatura.html> p. Disponível em: <<https://br.omega.com/artigos-tecnicos/historia-do-sensor-de-temperatura.html>>.
- CONDUFIBRA. **Diferença entre fibra ótica monomodo (SM) e multimodo (MM)**. 2017. Disponível em: <<https://www.condufibra.com.br/diferenca-entre-fibra-otica-monomodo-e-multimodo/>>.
- CRESESB. Energia solar princípios e aplicações. p. 28, 2006. ISSN 0038092X. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf>.
- DUPONT. **Thermoplastic Polyester Elastomer -Hytrel**. Copyright 2017 dupont. [S.l.], 2017. 2 p.
- ECOD. **Empresa Desenvolve Linha de painéis solares flexíveis e portáteis**. 2017. Disponível em: <<http://www.ecodesenvolvimento.org/noticias/empresa-desenvolve-linha-de-paineis-solares>>.
- FBGS. **FIBER BRAGG GRATING (FBG) SENSOR PRINCIPLE**. 2017. Disponível em: <<https://www.fbgs.com/technology/fbg-principle/>>.
- FOTOVOLTAICO, Painel; SABER, Coisas Para; SOLAR, Portal; FOTOVOLTAICA, Energia Solar. **Escolhendo o Painel Fotovoltaico - 10 Coisas Para Saber**. 2017. 1–6 p.
- GREENBRAS. **A ENERGIA SOLAR NOS ESTÁDIOS DE FUTEBOL DO BRASIL**. 2017. Disponível em: <<http://greenbras.com/energia-solar/energia-fotovoltaica-no-brasil/a-energia-solar-nos-estadios-brasileiros/>>.
- HECHT, Eugene. **Optics**. [s.n.], 2016. 625–627 p. ISSN 0031921X. ISBN 9780133977226. Disponível em: <<https://bookshelf.vitalsource.com/#/books/9781292096964/cfi/519!/4/4@0.00:0.00>>.
- HERRMANN, Werner. **How temperature cycling degrades photovoltaic-module performance**. 2010. 1–2 p.

HILL, K. O.; FUJII, Y; JOHNSON, Derwyn C.; KAWASAKI, B. S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. **Applied Physics Letters**, v. 32, p. 647–649, 1978.

IEA, International Energy Agency. Next Generation Wind and Solar Power. 2016. Disponível em: <http://www.oecd-ilibrary.org/energy/next-generation-wind-and-solar-power_9789264258969-en>.

JUNIOR, Jair Urbanetz. Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbanas: Sua Influência na Qualidade da Energia Elétrica e Análise dos Parâmetros que Possam Afetar a Conectividade. p. 189, 2010.

JUNIOR, Jair Urbanetz Junior e Eloy Fassi Casagrande. Energia para o Século XXI: Sociedade e Desenvolvimento 12 a 15 de agosto de 2012 Curitiba - PR. p. 1–10, 2012.

KASHYAP, RAMAN. **Fiber Bragg Gratings**. [S.l.]: Academic Press, 1999.

KYOCERA. **High Efficiency Multicrystal Photovoltaic Module - KD210GX-LP**. Copyright 2017 kyocera company. [S.l.], 2017. 2 p.

LOCTITE. **LOCTITE 495 Adesivo de Cianocrilato**. Copyright 2012 henkel ltda. [S.l.], 2012. 3 p.

MACHADO, KARLA SUZANE VAN-DALL; CORREA, NICOLI. Análise Do Desempenho De Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede Elétrica Em Curitiba. 2015.

MINIPA. **TERMÔMETRO INFRAVERMELHO MT-360**. Direitos de minipa industria e comercio ltda. [S.l.], 2017. 3 p.

NEOSOLAR. **SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E SEUS COMPONENTES**. 2017. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>>.

OPTICS, Micron. **Static Optical Sensing Interrogator - SM125**. Copyright 2017 micronoptics, inc. [S.l.], 2017. 2 p.

OTHONOS, Andreas; KALLI, Kyriacos. **Fiber Bragg Gratings - Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing**. [S.l.]: Artech House, 1999.

PHOTONICS, Ibsen. **FBG Phase Mask**. Copyright 2014 ibsen photonics, inc. [S.l.], 2014. 3 p.

PHOTONICS, Ibsen. **Interrogation Monitors for FBG sensor systems**. Copyright 2014 ibsen photonics, inc. [S.l.], 2014. 2 p.

RÜTHER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. [S.l.: s.n.], 2004. 114 p. ISBN 8587583042.

YOKOGAWA. **AQ6375B Optical Spectrum Analyzer**. Copyright 2015 yokogawa test & measurement corporation. [S.l.], 2017. 417 p.

APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES RESULTANTES DESTA DISSERTAÇÃO

ARTIGOS PUBLICADOS EM ANAIS DE CONGRESSOS

- KOTINDA, Carlos Henrique Palma; OLIVEIRA, Valmir de; SILVA, Jean Carlos Cardozo da. **Monitoramento Térmico de Pannel Fotovoltaico Utilizando Redes de Bragg em Fibra Óptica.** CBENS 2018 - VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2018, Gramado - RS. ISBN: 978-85-62179-02-0.