

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

Departamento de Eletrônica e de Computação

Medição Multiponto de Temperatura Utilizando Fibras Ópticas com Redes de Bragg com Acesso Remoto via Web

Autor:

Eric Albert Ivor Jones

Orientador:

Prof. Marcelo Martins Werneck, Ph. D.

Co-orientadora:

Regina C. S. B. Allil, D. Sc.

Examinador:

Prof. Antonio Petraglia, Ph. D.

DEL

Agosto de 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Escola Politécnica – Departamento de Eletrônica e de Computação

Centro de Tecnologia, bloco H, sala H-217, Cidade Universitária

Rio de Janeiro – RJ CEP 21949-900

Este exemplar é de propriedade da Universidade Federal do Rio de Janeiro, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

AGRADECIMENTO

Agradeço a todos do Laboratório de Instrumentação e Fotônica que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho e disponibilizaram os meios e recursos que o viabilizaram, em especial ao professor Werneck e a minha orientadora Regina pelas idéias do projeto e também pela orientação.

RESUMO

Este trabalho consiste no estudo da aplicação de fibras ópticas como instrumento de medição através do desenvolvimento de um sistema de medição de temperatura para um painel solar utilizando o conceito de telemetria.

A temperatura afeta diretamente o rendimento da geração de energia de um painel solar, se a temperatura for muito elevada o rendimento diminui e o painel passa a gerar menos energia elétrica. Portanto é essencial saber a qual temperatura o painel está operando.

Com o objetivo de medir a temperatura de um painel solar que gera energia para as luzes de emergência do Laboratório de Instrumentação e Fotônica, este trabalho apresenta uma técnica inovadora baseada em fibra óptica, através da tecnologia conhecida como Rede de Bragg, que permite a medição.

Serão apresentados os princípios físicos que permitem o uso da fibra óptica como um sensor de temperatura e os métodos e recursos utilizados no desenvolvimento do trabalho.

Palavras-Chave: Fibra óptica, Rede de Bragg, sensor de temperatura, telemetria.

ABSTRACT

This project is a study of the application of optical fibers as measuring instrument, by developing a system of measuring temperature to a solar panel, using the concept of telemetry.

The temperature directly affects the efficiency of the power generation of a solar panel, if the temperature is very high yield decreases and the panel generate less electricity. Therefore it is essential to know which temperature the panel is operating.

In order to measure the temperature of a solar panel that generates power for emergency lights of Instrumentation and Photonics Laboratory, this work presents an innovative technique based on optical fiber, through technology known as Bragg Network, which allows measurement .

Will present the physical principles that allow the use of optical fiber as a temperature sensor and the methods and resources used in the development of the work.

Key-words: Optical fiber, Bragg Grating, temperature sensor, telemetry.

SIGLAS

CWDM – Coarse Wavelength Division Multiplexing

FBG - Fiber Bragg Grating

FOS - Fibre Optic Sensors

ITU - International Telecommunication Union

LIF - Laboratório de Instrumentação e Fotônica

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

WDM – Wavelength Division Multiplexing

Sumário

1	Introdução	1
	1.1 - Tema	1
	1.2 - Delimitação	1
	1.3 - Justificativa	2
	1.4 - Objetivos	2
	1.5 - Metodologia	4
	1.6 - Descrição	4
2	Fundamentos Teóricos	5
	2.1 - Fibra Óptica	5
	2.2 - Fibra Óptica como Sensor	6
	2.3 - Rede de Bragg	7
	2.4 - Multiplexação Óptica	9
3	Fibra Óptica como Medidor de Temperatura	10
	3.1 - Interrogador Óptico	10
	3.2 - Calibração das FBG's	11
4	Metodologia	15
	4.1 - Sistema de Medição	15
	4.2 - Instalação e Acomodação das Fibras	16
	4.3 - Multiplexador Óptico	19

4.4 - Programa de Transferência de Banco de Dados	21
5 Resultados e Discussão	22
6 Trabalhos Futuros	24
Bibliografia	25
A Código Fonte do Programa de Transferência de Banco de Dados para o LIF-Remoto	26

Lista de Figuras

1.1 – Painel solar do LIF instalado no terraço do CT	3
2.1 – Princípio de funcionamento da fibra óptica	5
2.2 – Rede de Bragg	7
2.3 – Comprimentos de onda centrais no CWDM	9
3.1 – Interrogador Óptico (FOS)	10
3.2 – Experimento de calibração das FBG's	12
3.3 – Variação da temperatura e do comprimento de onda no tempo	13
4.1 – Diagrama Geral do Projeto	15
4.2 – Tubo de cobre para proteger a FBG	16
4.3 – Caixa de passagem para proteger as emendas	16
4.4 – Fixação dos sensores (FBG) e caixas de passagens	17
4.5 – Ligação dos sensores no painel solar com os multiplexadores ópticos	18
4.6 – Interior do armário	18
4.7 – FOS conectado ao sensores	19
4.8 – Esquema de ligação do CWDM	20
4.9 – Tela do programa em execução	22
5.1 – Comparativo dos registros de temperatura dos sensores 1 e 2	22
5.2 – Temperatura registrada pelo sensor 1 e por um termopar	23

Lista de Tabelas

3.1 – Observações dos registros de temperatura	12
3.2 – Resultados obtidos com a regressão linear nos três experimentos	14
4.1 – Resultados obtidos com a medição de potência óptica.	20

Capítulo 1

Introdução

1.1 – Tema

O tema do trabalho é sobre a aplicação de fibras ópticas como sensor de temperatura e como meio de transmissão das informações sensoriadas, que são moduladas nos parâmetros da luz transmitida. Desta forma, pretende-se estudar a viabilidade e testar um sistema de medição multiponto de temperatura remoto, aplicando o conceito de telemetria, constituído de fibras ópticas dotadas de estruturas denominadas Rede de Bragg que possibilitam a fibra uma forma de sensibilidade à temperatura.

1.2 – Delimitação

Este trabalho se propõe a apresentar o estudo das características da fibra óptica, especificamente no que diz respeito a tecnologia conhecida como Rede de Bragg, que viabilizam seu uso como um sensor de temperatura. Para isso, expõe o desenvolvimento de um sistema de medição multiponto para um painel solar do Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF) que se encontra instalado no terraço do Centro de Tecnologia (CT) da UFRJ, bem como as características da aplicação desta técnica explicitando os recursos empregados nesta aplicação.

1.3 – Justificativa

Apesar de já ser utilizada no setor de telecomunicações como meio de transmissão de dados desde a década de 80, e atualmente ser a tecnologia dominante, a fibra óptica ainda não se popularizou comercialmente como um instrumento de medição, mesmo oferecendo também vantagens tais quais a sua aplicação em transmissão comparado a tecnologias já estabelecidas e mesmo tendo sido igualmente estudada durante esse período. Este trabalho visa demonstrar que a fibra óptica pode ser, em um futuro próximo, uma tecnologia bastante empregada também em instrumentação.

O setor industrial está em uma constante busca por tecnologias que aperfeiçoem o sistema de produção e a fibra óptica pode atender a essa demanda oferecendo vantagens na sua utilização como sensor, como por exemplo, isolamento elétrica e imunidade a interferência eletromagnética. Em alguns casos como na medição multiponto de temperatura a longas distâncias, não é possível a utilização de cabos de cobre, pois como estes são um meio de condução elétrica, seu uso é inviável em ambientes de alta tensão para este fim e estão sujeitos a interferência eletromagnética que pode interferir significativamente na transmissão dos dados da medição. Nestes casos as vantagens na utilização da tecnologia a fibra óptica se enquadram perfeitamente para essas aplicações. Este é justamente o caso em pauta, onde se desejam medir em diversos pontos as temperaturas de um painel solar.

1.4 – Objetivos

O objetivo final do trabalho é realizar a instrumentação do painel solar fotovoltaico, que gera energia para as luzes de emergência do Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF), possibilitando a medição remota da temperatura em quatro pontos distintos do painel. A monitoração da temperatura no painel solar é importante para se garantir o rendimento na geração de energia elétrica, uma vez que, o aumento na temperatura acarreta na diminuição da capacidade da célula fotovoltaica de converter energia solar em energia elétrica.

Para instrumentar o painel serão utilizadas quatro fibras ópticas com Redes de Bragg, de diferentes comprimentos de onda, como sensores de temperatura e como meio de transmissão de dados que serão multiplexados, através de um multiplexador óptico, em apenas um cabo de fibra óptica. O cabo óptico, que tem 2 fibras, interliga o painel solar ao laboratório, onde está o interrogador óptico que é o equipamento responsável por medir as informações sensoriadas e registrá-las.

Foi desenvolvido ainda, um programa (em linguagem de programação C++) que é responsável pela captura do banco de dados gerado pelo sistema de medição de temperatura e disponibilização destes dados em um site acessível através do website do LIF.

A Figura 1.1 mostra a fotografia do painel solar instalado no terraço do CT.



Figura 1.1 – Painel solar do LIF instalado no terraço do CT

1.5 – Metodologia

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF) e consiste nos seguintes pontos:

1. Estudo bibliográfico de sensores a fibra óptica baseados em Redes de Bragg para medir temperatura.
2. Treinamento no equipamento responsável pela interpretação dos sinais ópticos provenientes da Redes de Bragg.
3. Treinamento na manipulação de fibras ópticas para clivagem e emendas por fusão para realizar as conexões do sistema.
4. Calibração dos sensores em relação a temperatura.
5. Desenvolvimento do software para coleta de dados do interrogador óptico e disponibilização destes no website do LIF.
6. Medição das perdas de inserção do multiplexador óptico.
7. Avaliação do funcionamento do sistema de medição de temperatura.

1.6 – Descrição

No capítulo 2 serão apresentados os fundamentos teóricos em que se baseiam este trabalho. Os capítulos 3 e 4 apresentam as etapas de desenvolvimento do sistema. Enquanto que nos capítulos 5 e 6 estão as conclusões sobre o trabalho e a avaliação dos resultados.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

2.1 – Fibra Óptica

Fibra óptica pode ser definida como um filamento de vidro, ou de materiais poliméricos, capaz de transmitir luz de uma extremidade à outra com pouca perda de energia. Essa capacidade de transmissão é possível graças ao fenômeno conhecido por Reflexão Interna Total, onde um feixe de luz emitido - com um determinado ângulo mínimo - de um meio físico com índice de refração maior para outro meio físico com índice de refração menor é totalmente refletido de volta.

A fibra óptica é essencialmente constituída de duas camadas: a interna denominada núcleo que possui um índice de refração maior, e a externa denominada revestimento, ou casca, com índice de refração menor. Essa diferença entre os índices de refração das camadas satisfaz as condições do fenômeno da Reflexão Interna Total, logo a luz emitida em uma extremidade da fibra fica confinada no núcleo e após sucessivas reflexões atinge a outra extremidade, desde que o ângulo de incidência na camada de revestimento seja superior a um ângulo mínimo que é função dos índices de refração das duas camadas. O material usado para fabricação das fibras permite que esse ângulo crítico seja bem pequeno, logo para que ocorra um ângulo de incidência menor que o crítico e a luz deixe de ser refletida é necessário dobrar demasiadamente a fibra.

A Figura 2.1 apresenta o princípio de funcionamento da fibra óptica.

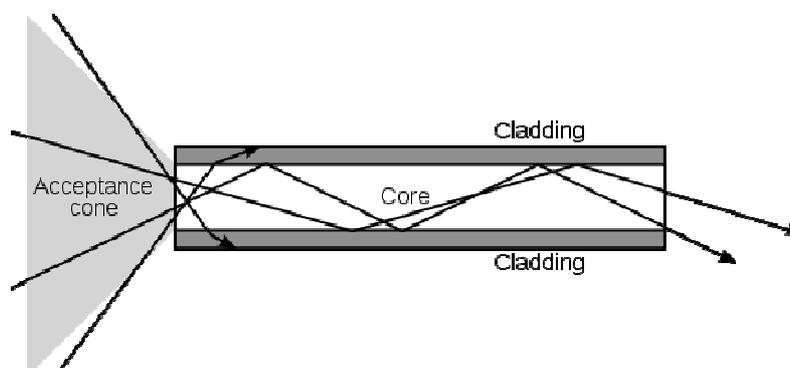


Figura 2.1 – Princípio de funcionamento da fibra óptica
Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_fiber

Atualmente é a tecnologia dominante para se transmitir informações a grandes distância uma vez que, por se utilizar da luz, a fibra óptica possibilita o envio de grande quantidade de dados à velocidade da luz, que é a maior velocidade possível de se atingir. Além disso, se destaca também por outras vantagens como por exemplo a isolamento elétrica e a imunidade a interferência eletromagnética, já que é construída por materiais dielétricos.

2.2 – Fibra Óptica como Sensor

Apesar de atualmente ser mais utilizada como meio de transmissão, a fibra óptica também pode ser usada como um sensor para diversas grandezas físicas aplicadas diretamente a ela, incluindo:

- Deformação
- Vibração
- Corrente elétrica
- Tensão elétrica
- Pressão
- Temperatura

Com a grande demanda do setor de telecomunicações por fibras ópticas para transmissão de dados, diminuíram os custos e aumentou a disponibilidade dos equipamentos relacionados a operação e ao seu manuseio. Logo, mesmo sendo utilizados em menor escala, os sensores baseados em fibra óptica também se tornaram mais atrativos para estudo e aplicação. Isso, aliado às vantagens já mencionadas anteriormente, pode levar esses tipos de sensores a dominarem o mercado industrial em um futuro próximo.

2.3 – Rede de Bragg

As redes de Bragg (FBG do inglês fiber Bragg grating) consistem em uma modulação periódica do índice de refração do núcleo da fibra óptica, que refletem uma parte do espectro da luz que se propaga pela fibra. O espectro refletido se assemelha a um pulso, com banda estreita e um pico bem definido. O valor máximo da refletividade, ou seja o pico do espectro refletido, dessa microestrutura ocorre quando o comprimento de onda da luz incidente se encontra em ressonância com a modulação espacial do índice (de período Λ) satisfazendo a condição de Bragg, dada pela equação:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \cdot \Lambda \quad (1)$$

Onde n_{eff} é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra, Λ é o período da modulação e λ_B o comprimento de onda onde ocorre o pico do espectro refletido (também denominado comprimento de onda de Bragg).

A Figura 2.2 ilustra o efeito de uma FBG inscrita no núcleo da fibra sobre o espectro da luz propagada.

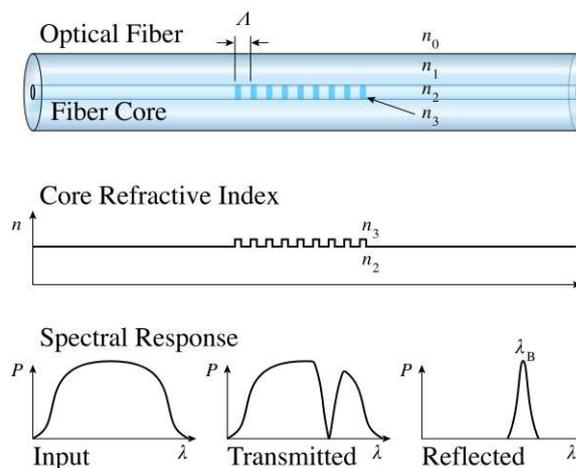


Figura 2.2 – Rede de Bragg

Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Fiber_Bragg_grating

Como essa modulação do índice de refração é uma estrutura feita no material da fibra, também está sujeita às alterações físicas submetidas à fibra, portanto o período de modulação Λ pode sofrer variações o que conseqüentemente altera o pico do espectro refletido λ_B . O princípio básico de sensores do usando FBG baseia-se então na medição da variação de comprimento de onda do pico de máxima refletividade para se determinar a variação das grandezas físicas que provocaram a alteração do período de modulação.

Conforme pode ser visto em [5], a relação entre o comprimento de onda de Bragg, a deformação mecânica e a temperatura aplicadas a FBG é dada por:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e) \varepsilon_z + (\alpha + \eta) \Delta T \quad (2)$$

Onde ε_z é a deformação mecânica longitudinal aplicada a fibra; ΔT a variação de temperatura; ρ_e o coeficiente fotoelástico e η é o coeficiente termo-óptico que representa a dependência do índice de refração com a temperatura. Para a fibra de vidro com núcleo dopado com germânio, esses parâmetros assume valores típicos de: $\rho_e = 0,22$; $\alpha = 0,55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ e $\eta = 8,6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

Focando apenas na variação de temperatura, mantendo a fibra sem deformação mecânica, e considerando os valores típicos acima, a equação (2) se reduz a relação direta entre a variação da temperatura e a variação do comprimento de onda de Bragg, que para o comprimento de onda na ordem de 1550nm é:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\Delta T} = 14,18 \frac{\text{pm}}{^{\circ}\text{C}} \quad (3)$$

Assim concluímos que uma variação de 1°C na FBG provoca uma variação no comprimento de onda de Bragg de 14,18pm. Examinando por outra perspectiva, onde a FBG é usada como sensor de temperatura, temos que a variação do comprimento de onda de Bragg de 1pm significa a variação de temperatura de aproximadamente 0,07°C. Porém o coeficiente dessa relação (14,18pm/°C) é absolutamente teórico e varia para cada FBG devido aos materiais empregados na fabricação de fibras.

Conforme exposto acima é possível notar que uma aplicação notável da FBG é como sensor de temperatura. Medindo-se o deslocamento do espectro refletido na FBG, é possível relacioná-lo as alterações de temperatura ocorridas na fibra com rede de Bragg que causam a expansão térmica. A principal vantagem desta técnica é o fato de que a informação a ser medida está contida no comprimento de onda, tornando-o independente das flutuações na intensidade da luz. Existem também outras vantagens na utilização de sensores a FGB como por exemplo a possibilidade de multiplexação de várias redes de Bragg ao longo da mesma fibra óptica, já que a FBG pode ser fabricada para funcionar em diferentes comprimentos de onda.

2.4 – Multiplexação Óptica

Uma forma de aumentar a capacidade de transferência de uma única fibra óptica é utilizar-se de mais de um feixe de luz para se modular as informações a serem enviadas. Para que não haja interferência entre esses diferentes feixes, é possível delimitá-los pelo espectro da luz, da mesma forma que um sinal de rádio é multiplexado em diferentes bandas de frequências. Essa tecnologia de multiplexação óptica baseada nos comprimentos de onda da luz denomina-se WDM (Wavelength Division Multiplexing) que consiste em reunir diversos sinais luminosos, com diferentes comprimentos de onda, em uma fibra óptica.

O CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) é uma tecnologia baseada no WDM que tem como característica principal a baixa densidade na utilização dos comprimentos de onda, em outra palavras, os comprimentos de onda dos diversos sinais ficam bastante afastados. A União Internacional de Telecomunicações (ITU em inglês International Telecommunication Union) recomenda o uso desta técnica utilizando-se até 18 canais entre os comprimentos de onda de 1270 nm até 1610 nm, de forma que haja pelo menos o espaçamento de 20 nm entre as comprimentos de onda centrais. A Figura 2.3 apresenta os comprimentos de onda centrais para cada um dos canais estabelecidos pela ITU.

Nominal central wavelengths (nm) for spacing of 20 nm
1271
1291
1311
1331
1351
1371
1391
1411
1431
1451
1471
1491
1511
1531
1551
1571
1591
1611
NOTE – The endpoints of this table are illustrative only.

Figura 2.3 – Comprimentos de onda centrais no CWDM
Fonte: Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid [6]

Capítulo 3

Fibra Óptica Como Medidor de Temperatura

3.1 – Interrogador Óptico

Conforme apresentado no capítulo anterior, uma fibra óptica com Rede de Bragg pode ser usada como um sensor de temperatura. Mas, para isso é necessário que se conheça a relação entre a variação do comprimento de onda refletido pela FBG em função da variação de temperatura e também que seja possível medir esse comprimento de onda.

O interrogador óptico é um equipamento que emite um feixe de luz com uma larga banda de espectro e mede o espectro que foi refletido de volta, possibilitando assim, a medição do comprimento de onda refletido pela FBG.

Para este trabalho foi utilizado o interrogador óptico modelo FBG-Scan 708 do fabricante FOS&S. Na Figura 3.1 é possível ver o equipamento, que tem 8 canais, mostrando os picos de duas FBG's e o comprimento de onda em que ocorrem:

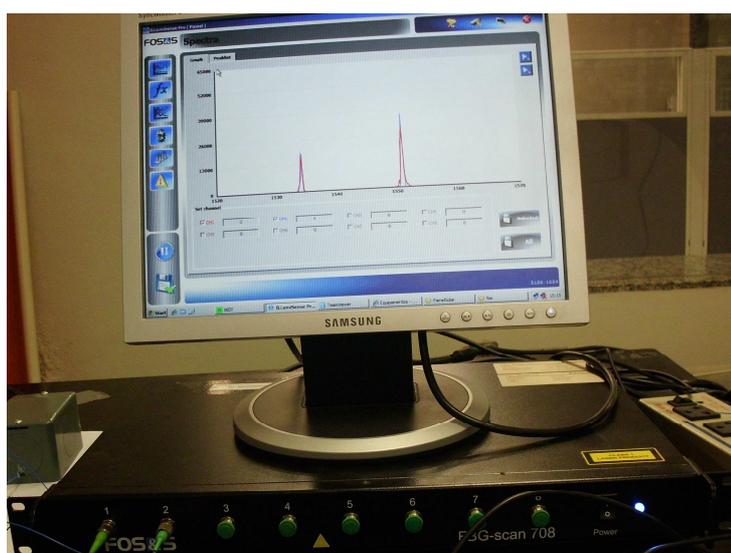


Figura 3.1 – Interrogador Óptico (FOS).

Este equipamento mede a intensidade do espectro de luz refletido entre 1520nm e 1570nm e detecta o comprimento de onda onde ocorre o pico máximo de refletividade. Se houver algum ruído de baixa intensidade no espectro refletido o interrogador permite que o ruído seja filtrado para não ser detectado como um pico. O interrogador registra um log, de período pré-determinado, em arquivo no formato texto com o valor do comprimento de onda de pico, a intensidade, a data e a hora da medição, conforme exemplo abaixo:

Measurements Channel 1

+++++

Date	Time	Wavelength1	Power1
5/24/2013	14:45:47.984	1534.110	30898
5/24/2013	14:47:11.312	1534.111	35659
5/24/2013	14:48:34.640	1534.114	34883
5/24/2013	14:49:57.968	1534.122	34780

3.2 – Calibração das FBG's

Como forma de se obter a relação entre a variação do comprimento de onda da FGB com a temperatura, foi conduzido um experimento que consiste em registrar o valor do comprimento de onda de pico da FBG para cada valor de temperatura.

Para realizar esse experimento foi utilizado um béquer com água no qual foram mergulhadas as quatro FBG's, a serem utilizadas como sensor e com um agitador térmico elevou-se gradativamente a temperatura (da temperatura ambiente, em torno de 25°C, até 90°C). Através de um termômetro, que também disponibiliza um log em formato texto, com o seu sensor também mergulhado na água e do interrogador óptico, registrou-se a temperatura e os comprimentos de onda para cada instante de tempo. A Figura 3.2 mostra a fotografia do experimento.

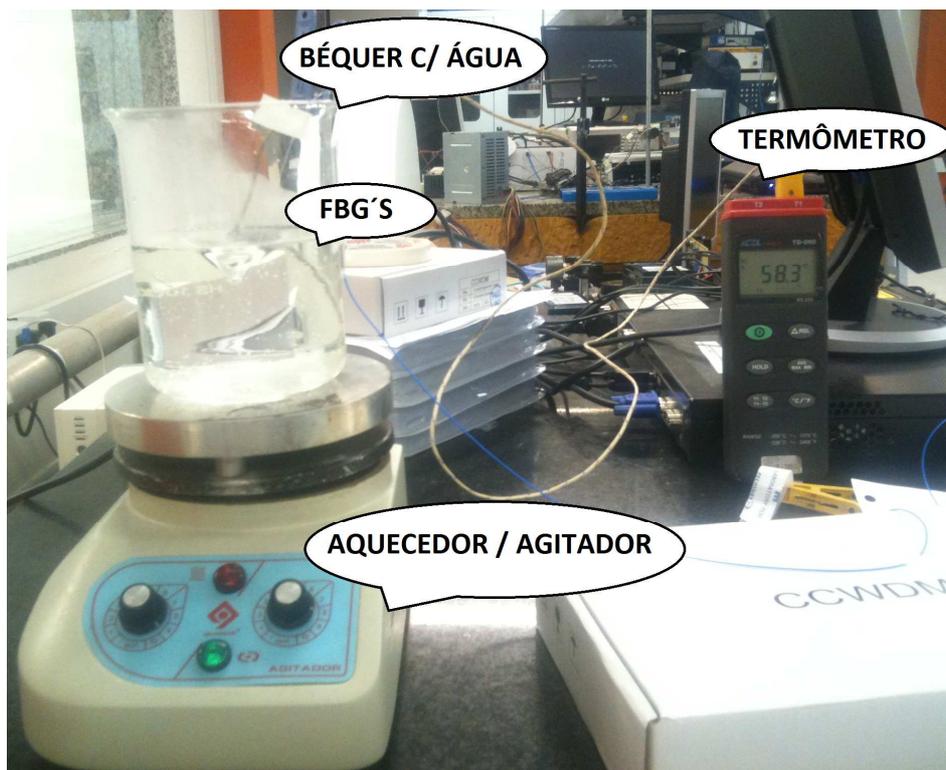


Figura 3.2 – Experimento de calibração das FBG's.

A seguir os registros foram comparados para se estabelecer a relação entre comprimento de onda e temperatura na FBG. Os resultados confirmam a teoria de que essa relação é aproximadamente linear para as quatro FBG's utilizadas. A Tabela 3.1 apresenta alguns dos pontos registrados e a Figura 3.3 os gráficos da temperatura e de comprimento de onda de uma FBG conforme a duração do experimento.

Tabela 3.1 – Algumas observações dos registros de temperatura e comprimento de onda das FBG's

Hora	Temp. (°C)	λ_1 (pm)	λ_2 (pm)	λ_3 (pm)	λ_4 (pm)
13:31:33	30	1.534.187	1.550.796	1.534.125	1.550.795
13:47:23	40,1	1.534.296	1.550.921	1.534.235	1.550.918
14:08:12	50,1	1.534.411	1.551.020	1.534.353	1.551.022
14:34:27	59,9	1.534.518	1.551.127	1.534.462	1.551.131
14:49:26	70,1	1.534.640	1.551.263	1.534.574	1.551.254
15:07:46	80	1.534.759	1.551.375	1.534.688	1.551.371
15:22:46	90,1	1.534.871	1.551.483	1.534.809	1.551.485

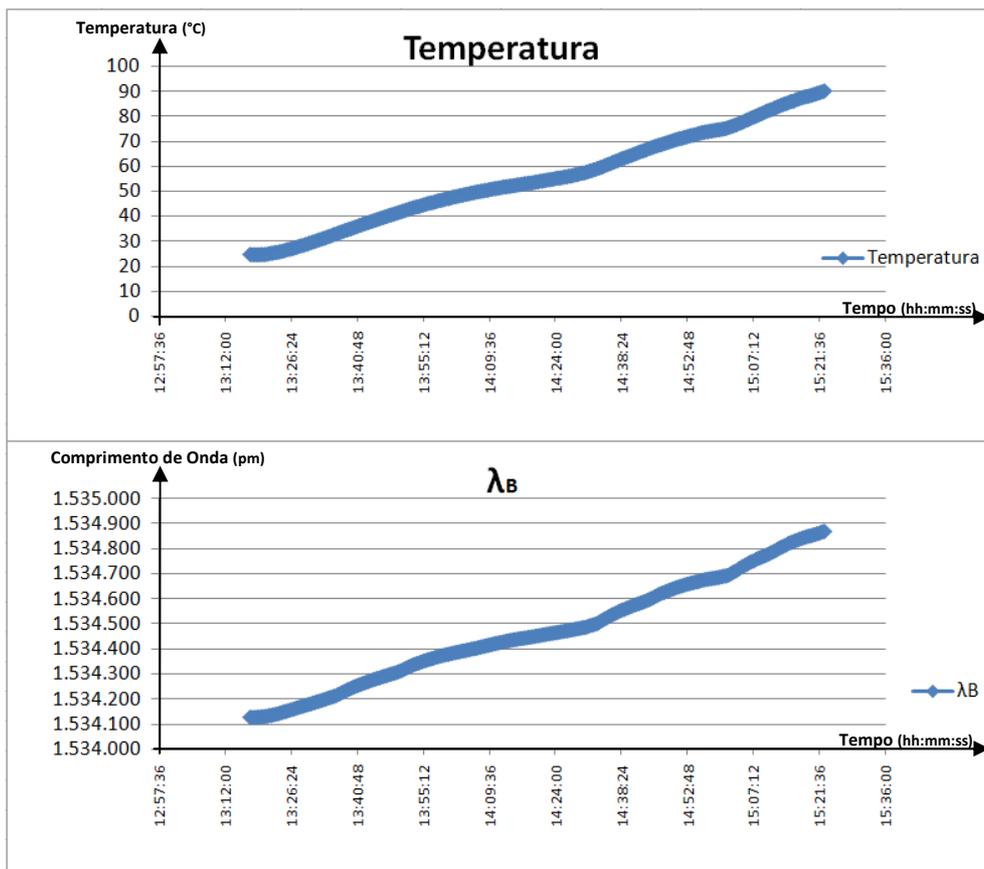


Figura 3.3 – Variação da temperatura e do comprimento de onda no tempo.

Com o auxílio do algoritmo de regressão linear do software Microsoft Excel, dos registros do experimento, foram obtidas as equações lineares que modelam matematicamente a relação entre a temperatura e o comprimento de onda da FBG, definindo assim os parâmetros de um sensor que mede a temperatura indiretamente. A equação é da seguinte forma:

$$\text{Temperatura}(\text{°C}) = \alpha \cdot \text{Comprimento de onda}(\text{pm}) + \beta \quad (4)$$

onde α é sensibilidade do sensor (°C/pm), e β (°C) um parâmetro que representa a temperatura na situação puramente teórica em que o comprimento de onda de Bragg seria nulo.

O experimento foi repetido três vezes, como forma de garantir a consistência dos resultados, variando o período de amostragem, e conseqüentemente o número de observações. A Tabela 3.2 apresenta os resultados obtidos na regressão linear, como os parâmetro da equação linear (α e β) e o coeficiente de determinação (R^2), dos 3 experimentos.

Tabela 3.2 – Resultados obtidos com a regressão linear nos três experimentos:

Exp.	Período de Amostragem	Nº de Obs.	Sensor	α (°C/pm)	β (°C)	R ²	Erro Padrão (°C)	Resíduo Máximo(°C)
1	30 segundos	271	1	0,090418	-138688,7	99,931%	0,5	1,1
			2	0,087633	-135871,6	99,849%	0,7	2,0
			3	0,089003	-136523,3	99,930%	0,5	1,1
			4	0,087572	-135776,8	99,930%	0,5	1,3
2	45 segundos	156	1	0,087965	-134923,8	99,957%	0,4	1,1
			2	0,086990	-134873,4	99,865%	0,6	1,8
			3	0,088612	-135911,1	99,960%	0,4	0,9
			4	0,087680	-135944,5	99,950%	0,4	1,2
3	1 minuto	96	1	0,087514	-134232,5	99,968%	0,4	0,7
			2	0,086554	-134197,2	99,877%	0,7	1,2
			3	0,087994	-134963,5	99,974%	0,3	1,0
			4	0,087385	-135486,8	99,957%	0,4	0,6

O coeficiente de determinação (R²) determina o quanto o modelo consegue descrever os valores observados. Logo o modelo obtido no experimento 3, que tem o maior R², é o que melhor descreve os sensores, portando será deste modelo que serão adotados os parâmetros α e β para os sensores. Os sensores 1 e 3 possuem comprimento de onda variando em torno de 1530nm, enquanto que os sensores 2 e 4 1550nm.

Conforme discutido no capítulo 2, a relação teórica entre a variação do comprimento de onda de Bragg e a variação da temperatura é 14,18pm/°C (3). Essa relação é o inverso da sensibilidade do sensor, então a sensibilidade teórica é aproximadamente 0,071 °C/pm (14,18⁻¹). Este valor teórico é coerente com os valores experimentais obtidos com a regressão linear, que ficaram entre 0,087 e 0,090°C/pm, que conforme já mencionado varia para cada FBG devido ao material empregado na sua fabricação.

Uma questão importante observada nestes resultados é referente aos resíduos da regressão linear que representam o erro na medida de temperatura obtida pelo sensor. Considerando que o termômetro usado para calibração tem uma precisão de 0,1°C, o erro médio de 0,3°C a 0,7°C e o erro máximo entre 0,6°C e 1,2°C podem ser considerados alto em comparação ao erro de medição do termômetro. Porém a consideração do erro de medição depende da aplicação e a precisão que se deseja medir. Essa questão será re-discutida no capítulo 5.

Capítulo 4

Metodologia

4.1 – Sistema de Medição

Conforme estabelecido no capítulo 1, este trabalho tem por objetivo final instrumentar um painel solar fotovoltaico - que gera energia para as luzes de emergência do LIF e está instalado no terraço do CT - de forma a se medir a temperatura em quatro pontos diferentes usando quatro FBG's e apenas um cabo óptico, com duas fibras, para interligar as fibras ao laboratório, onde serão medidas e tratadas as informações das FBG's (no interrogador óptico, também denominado neste trabalho de FOS) de forma a se obter as temperaturas. Posteriormente, as temperaturas obtidas devem ser disponibilizadas no website do LIF através do sistema LIF-Remoto.

Como dos quatro sensores de FBG a serem utilizados, dois têm comprimento de onda de Bragg no espectro de 1530nm e os outros dois em 1550nm (conforme capítulo anterior), é necessário utilizar dois multiplexadores ópticos e as duas fibras do cabo óptico que interliga o terraço ao laboratório.

A Figura 4.1 ilustra uma representação do sistema como um todo para um melhor entendimento.

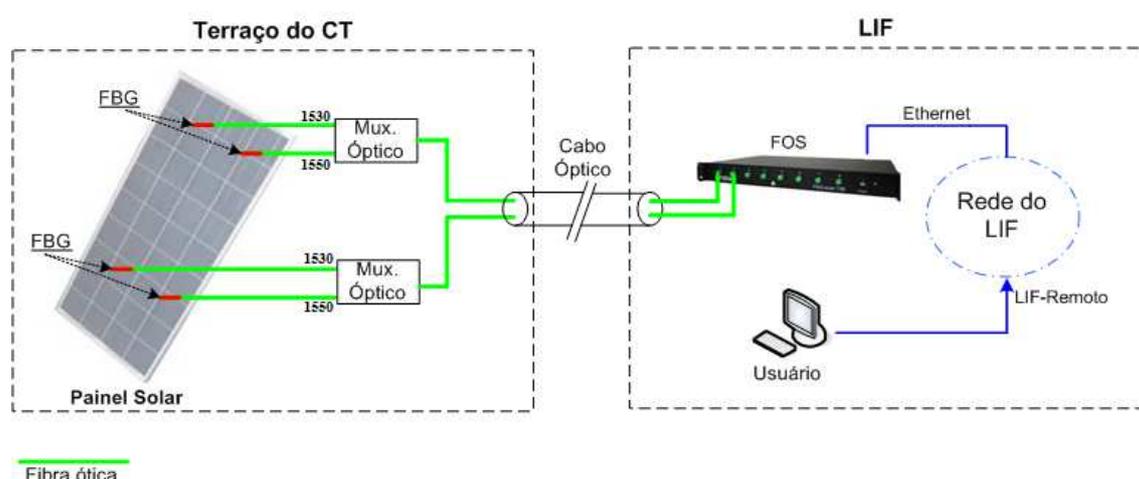


Figura 4.1 – Diagrama Geral do Projeto.

4.2 – Instalação e Acomodação das Fibras

A seguir serão apresentados os recursos utilizados para a instalação e acomodação das fibras ópticas do sistema, visando a proteção delas dado a sua fragilidade e as condições que foram submetidas.

Como o painel solar fica exposto a um ambiente externo, foi utilizado um tubo de cobre (usado para o gás de refrigeração em geladeiras) para proteger as fibras com as FBG's e de modo que não haja muita interferência na tomada de temperatura dos pontos desejados no painel pelas FBG's. A Figura 4.2 mostra o tubo de cobre usado.



Figura 4.2 – Tubo de cobre para proteger a FBG

Para proteger as emendas das fibras ópticas foram utilizadas caixas de passagem normalmente usadas em instalações elétricas, as fibras foram fixadas com cola quente e a caixa, depois de fechada, selada com silicone para evitar a entrada de umidade. A Figura 4.3 apresenta a caixa de passagem utilizada.

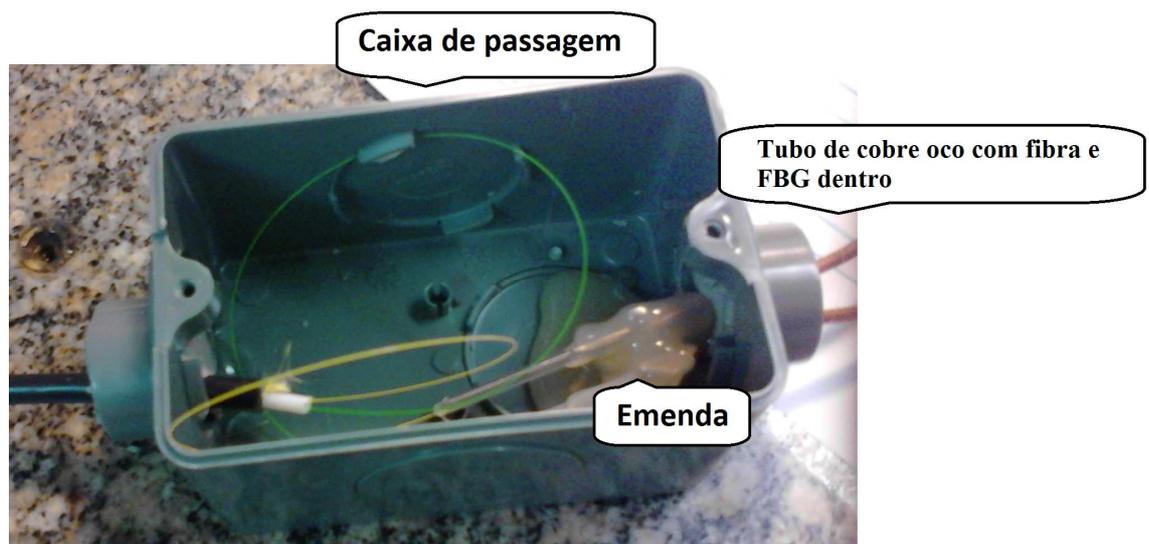


Figura 4.3 – Caixa de passagem para proteger as emendas

Os sensores foram instalados na traseira do painel solar, de forma a cobrir pontos distintos para a tomada de temperatura. A Figura 4.4 abaixo mostra a posição em que ficaram fixados os sensores e as caixas de passagem utilizadas para proteger a emenda de cada par de sensor.

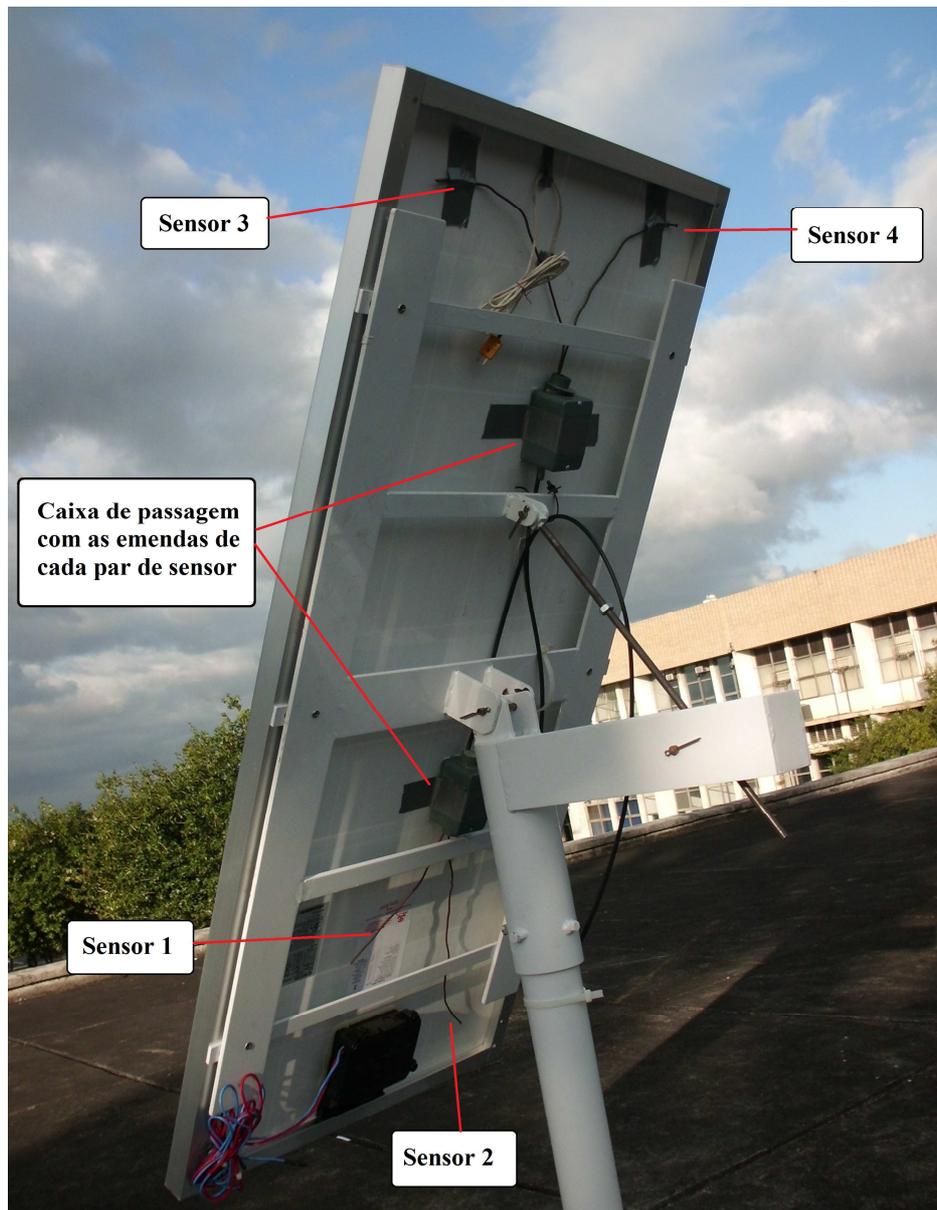


Figura 4.4 – Fixação dos sensores (FBG) e caixas de passagens

Os multiplexadores ópticos foram instalados em um armário do LIF que também está instalado no terraço do CT perto do painel solar. Para conectá-los às fibras com FBG, instaladas no painel, foi utilizado o mesmo tipo de cabo que faz a ligação terraço-LIF. Como cada cabo tem um par fibra, foi necessário o uso de apenas dois cabos já que se tem quatro sensores. As Figuras 4.5 e 4.6 mostram a ligação dos sensores no painel solar com os multiplexadores ópticos dentro do armário.



Figura 4.5 – Ligação dos sensores no painel solar com os multiplexadores ópticos instalados dentro do armário.



Figura 4.6 – Interior do armário

A fibras da outra extremidade do cabo óptico que sai do terraço e chega no LIF, foram conectadas ao interrogador óptico (FOS), nos canais 1 e 2. De forma que as informações dos sensores 1 e 2 estão multiplexadas na fibra ligada ao canal 1, e a fibra com as informações dos sensores 3 e 4 ao canal 2. Novamente foi utilizado a caixa de passagem para proteger as emendas do cabo óptico com os conectores que ligam no FOS. A Figura 4.7 apresenta o FOS conectado aos sensores.

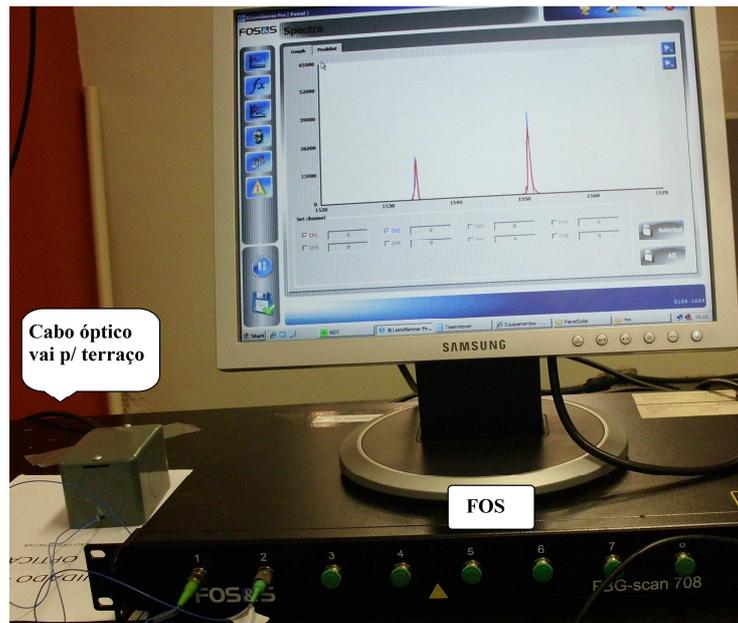


Figura 4.7 – FOS conectado aos sensores

4.3 – Multiplexador Óptico

Os multiplexadores ópticos utilizados funcionam conforme a tecnologia CWDM. Possuem 8 canais de 1470nm a 1610nm com espaçamento de 20nm entre cada comprimento de onda central do canal. Como os quatro sensores são de comprimento de onda de 1530nm (sensor 1 e 3) e 1550nm (sensor 2 e 4) foi necessário utilizar dois CWDM usando apenas dois canais de cada. O desenho a seguir ilustra as conexões feitas entre os CWDM's, as fibras com FBG's (sensores) provenientes do painel solar e as fibras com destino ao LIF. A Figura 4.8 mostra o desenho esquemático de ligação do CWDM.

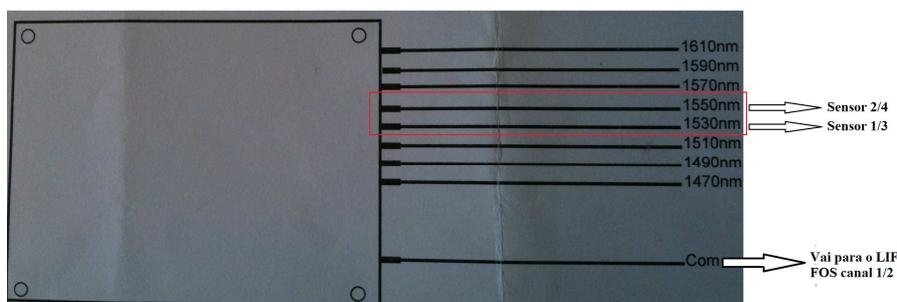


Figura 4.8 – Esquema de ligação do CWDM

Para se determinar a influência do multiplexador na potência luminosa que percorre as fibras do sistema, foi conduzido um experimento que consiste em conectar uma fonte de luz com banda larga de espectro na entrada do CWDM e medir a potência luminosa que sai nos canais de interesse (1530nm e 1550nm). Medindo a potência original da fonte de luz é possível obter a perda de potência com a inserção do CWDM.

Foi utilizado o equipamento analisador de espectro, AQ6470c, Optical Spectrum Analyzer, da empresa Yokogawa, para se determinar as potências da luz da fonte no espectro de interesse com e sem a inserção dos dois CWDM utilizados. A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.1 – Resultados obtidos com a medição de potência óptica:

Comprimento de onda	Fonte de Luz	Com CWDM 1		Com CWDM 2	
	Potência (μW)	Potência (μW)	Perda (dB)	Potência (μW)	Perda (dB)
1530nm	15,1	11,1	1,3	10,84	1,4
1550nm	4,629	3,781	0,9	3,134	1,7

Considerando que também há perdas nos conectores do CWDM, as perdas obtidas neste experimento se aproximam ao que o fabricante do CWDM especifica: No CWDM 1 para o canal de 1530nm perdas de 1,03dB e para o canal de 1550nm perdas de 1,14dB, enquanto que no CWDM 2 para o canal de 1530nm perdas de 1,26dB e no canal 1550nm perdas de 1,36dB.

É importante notar que essa perda afeta em duas vezes o sistema, já que o feixe de luz emitida pelo interrogador óptico percorre todo o sistema até a FBG onde é refletido (somente no espectro do FBG) e volta até o interrogador, passando assim duas vezes pelo CWDM. Considerando a maior perda obtida experimentalmente (1,7dB obtido no CWDM 2 para o canal de 1550nm), a perda total seria de 2,4dB que é equivalente a 57% do sinal original que retorna ao FOS. Porém essa perda não afeta a medição do comprimento de onda e não tem influência significativa no sistema.

4.4 – Programa para Transferência de Banco de Dados

O website do LIF contém uma aplicação chamada LIF-Remoto que possibilita a gestão e monitoração de equipamentos de medição, disponibilizando visualização gráfica de informações provenientes de medidores e a comparação entres os registros dos equipamentos.

Para disponibilizar as temperaturas medidas no interrogador óptico (FOS) no LIF-Remoto, foi desenvolvido um software em linguagem de programação C++ para sistemas operacionais baseados em Windows. O software atua basicamente capturando as temperaturas provenientes dos quatro sensores e a data/hora em que foram medidas, que o FOS registra em um arquivo em formato texto e escrevendo essas informações no arquivo de banco de dados do LIF-Remoto em uma pasta no servidor acessível pela rede.

O programa executa uma rotina de busca a cada uma hora (período que coincide com o de registro do FOS) e lê a data/hora da última medição de temperatura comparando com última capturada. Se a data/hora for diferente armazena os registros de temperatura e inicia o procedimento de escrita, se a data/hora for igual inicia novamente a contagem. Se o arquivo texto gerado pelo FOS não for encontrado ou não puder ser lido, o programa imprime na tela uma mensagem de erro e reinicia a contagem sem interromper a sua execução.

No procedimento de escrita, o programa tenta abrir o arquivo em formato texto do banco de dados, referente ao sistema deste trabalho, que se encontra em uma pasta no servidor do LIF-Remoto e está acessível pela rede, e insere o registro das informações de data/hora e temperatura de acordo com a formatação estabelecida no desenvolvimento do LIF-Remoto [7]. Para disponibilizar essas informações de medição, o LIF-Remoto lê o arquivo no seu banco de dados e depois apaga-o, portanto, se o programa não encontrar o arquivo, irá criar outro com o mesmo nome. Se não for possível acessar a pasta na rede ou escrever no arquivo, o programa novamente exibirá uma mensagem de erro e reiniciará o ciclo de busca, mas tentará realizar a gravação no arquivo até conseguir.

A Figura 4.9 mostra a tela do programa em execução. O código-fonte do programa está disponível no Apêndice A.

```

C:\Documents and Settings\Administrador\Desktop\LifRemoto\LifRemoto.exe
Projeto Fazenda Solar
Medição em 4 pontos da temperatura do painel solar.
Programa de transferência do banco de dados do FOS para o Lif-Remoto.

Ultima medida: 21:59:41 18/08/2013

Temperatura no Sensor 1 = 20.627
Temperatura no Sensor 2 = 20.27
Temperatura no Sensor 3 = 20.616
Temperatura no Sensor 4 = 19.459

Próxima busca em: 3533 segundos
ERRO AO ACESSAR O FTP DO LIF REMOTO

Pressione qualquer tecla para encerrar o programa.

```

Figura 4.9 – Tela do programa em execução

Capítulo 5

Resultados e Discussão

A Figura 5.1 mostra um gráfico comparativo, gerado pelo LIF-Remoto, que mostra as temperaturas registradas pelos sensores 1 e 2 no período de um dia. Pode-se observar que a temperatura apresenta uma elevação no período do dia com picos às 12 horas, como era de se esperar em um ambiente externo aberto submetido ao sol.



Figura 5.1 – Comparativo dos registros de temperatura dos sensores 1 e 2 na interface do LIF-Remoto

Na Figura 5.2 está sendo comparada a temperatura obtida pelo sensor 1 com a temperatura obtida por um termopar de um equipamento de outro projeto do LIF que registra a temperatura externa do armário no terraço do CT e que também disponibiliza os registros no LIF-Remoto. As temperaturas seguem os mesmos padrões de oscilação e as diferenças nas medições se devem a fato dos sensores medirem a temperatura em locais diferentes do terraço, o sensor 1 mede a temperatura do painel solar que intuitivamente aquece mais durante o dia do que o armário, onde o termopar mede. Através dessa comparação concluímos que os sensor 1 está medindo a temperatura na escala correta.



Figura 5.2 – Comparativo temperatura registrada pelo sensor 1 e por um termopar.

Comparando os registros de temperatura dos quatro sensores, é possível notar uma diferença de até 2°C em alguns registros. Essa discordância não pode ser explicada somente pelas diferentes posições dos sensores, portanto confirma-se o erro teórico de medição estabelecido na calibração (conforme capítulo 3). Este erro pode estar associado ao método de calibração, à imprecisão da leitura do comprimento de onda no FOS, à qualidade de fabricação das FBG's, ou até mesmo um fator não estabelecido na teoria de FBG.

Entretanto este erro de precisão pode ser desprezado em determinadas aplicações, como por exemplo no setor elétrico onde a medição de temperatura é usada apenas para se monitorar se a temperatura alcança um patamar anormal.

O sistema se encontrava em funcionamento, registrando as temperaturas a cada uma hora e disponibilizando os registros no LIF-Remoto, cumprindo assim os objetivos estabelecidos para este projeto.

Capítulo 6

Trabalhos Futuros

Uma restrição que limita a capacidade do sistema deste trabalho é o fato das quatro FBG's estarem centradas somente em dois comprimentos de onda, e o espectro de leitura do FOS se limitar a dos canais do CWDM. Se as FBG's fossem cada uma de um comprimento de onda diferente, seria possível multiplexar até oito sensores em uma única fibra utilizando o mesmo multiplexador óptico CWDM, desde que o FOS tivesse a largura de espectro de medição compatível com o CWDM.

Os resultados obtidos neste trabalho comprovam a viabilidade do uso de fibras ópticas como sensor de temperatura, mais há outras grandezas que podem ser medidas como por exemplo tensão e corrente elétrica. Tomando como exemplo novamente o setor elétrico, seria possível utilizar o mesmo equipamento deste trabalho (FOS), que tem oito canais, para se medir temperaturas, correntes e tensões com qualquer combinação que totalize oito medições. Esta aplicação dispensaria a necessidade de transdutores e transformadores, que servem para reduzir a magnitude das grandezas, possibilitando a sua medição, utilizados por medidores convencionais. E ainda disporia das vantagens já mencionadas anteriormente, como a isolamento elétrica e a imunidade a interferência eletromagnética, extremamente importante neste caso. Entretanto, para estar disponível como um produto industrial, é necessário que o FOS estabeleça comunicação com outros equipamentos utilizados para a automação industrial, como por exemplo SCADA e CLP, sendo necessário dar suporte a protocolos de comunicação comerciais (por exemplo MODBUS, DNP, IEC61850, etc).

Bibliografia

- [1] YOUNG, HUGH D., FREEDMAN, ROGER A., *Física IV*, capítulo 34 - Natureza e Propagação da Luz, Pearson, pp. 8–10, 2004.
- [2] Werneck, M.M. and Allil, R.C.A. "Optical Fiber Sensors" In Modern Telemetry as a Way to Get a Knowledge of Remote World, Ondrej Krejcar, Ph.D. (Ed.), ISBN: 978-953-307-415-3, Published by InTech - Open Access Publisher, University Campus STeP Ri, Slavka Krautzeka 83/A, 51000 Rijeka, pp. 3- 40, Croatia, 2011.
- [3] Allil, R.C.S.B, Werneck, M.M, Ribeiro, B.A and Nazaré, F.V, "Application of Fiber Bragg Grating Sensors in Power Industry", in: "CURRENT TRENDS IN SHORT- AND LONG-PERIOD FIBER GRATINGS", Cuadrado-Laborde C (ed.), ISBN 980-953-307-470-7, Rijeka: InTech; 2013.
- [4] Werneck, M.M., Allil, R.C.S.B, Ribeiro, B.A. and Nazaré, F.V, "A Guide to Fiber Bragg Grating Sensors", in: "CURRENT TRENDS IN SHORT- AND LONG-PERIOD FIBER GRATINGS", Cuadrado-Laborde C (ed.), ISBN 980-953-307-470-7, Rijeka: InTech; 2013.
- [5] Werneck, M. M., Allil, R. C., Ribeiro, B. A., "Calibration and Operation of a Fiber Bragg Grating Temperature Sensing System in a Grid-Connected Hydrogenerator", accepted for publication in IET Science, Measurement & Technology, 2013.
- [6] ITU TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR, "Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid.", 2003.
- [7] Tepedino, Marcelo C. G., "SISTEMA WEB PARA AQUISIÇÃO DE MEDIDAS REMOTAS E GESTÃO DE INFORMAÇÕES DE PROJETOS DE PESQUISA", UFRJ, 2009.

Apêndice A

Código Fonte do Programa de Transferência de Banco de Dados para o LIF-Remoto

```
/*  
Programa de transferência do banco de dados do FOS para o Lif-Remoto  
Desenvolvido para Windows  
Autor: Eric Jones - eric.ivor@gmail.com  
15/08/2013  
*/  
  
#include <iostream>  
#include <conio.h>  
#include <windows.h>  
#include <iomanip>  
  
using namespace std;  
  
#define IDEquip 24 // ID do equipamento FOS=24  
#define IDtipo 3 // ID do tipo de medida, temperatura=3  
#define IDcanal1 123  
#define IDcanal2 124  
#define IDcanal3 125  
#define IDcanal4 126  
#define NomeArquivoOUT "Z:/LIF-PainelSolar.DAT"  
#define NomeArquivoFOS "Sensor_PainelSolar.txt"  
#define PeríodoDeBusca 3600 // Em segundos >0
```

```

// Var global

int dia,mes,ano,hora, minu,seg;
float temp1,temp2,temp3,temp4;
bool ErroAbrir;

bool Buscar(void)
{
    FILE *arquivoIn;
    char linha[255];
    char *token,*data,*horario;
    int diaA=dia;
    int mesA=mes;
    int anoA=ano;
    int horaA=hora;
    int minA=minu;
    int segA=seg;

    arquivoIn = fopen(NomeArquivoFOS,"rb");
    if(!arquivoIn)
    {
        ErroAbrir=true;
        return(false);
    }

    while(!feof(arquivoIn))
        fgets(linha,255,arquivoIn);

    fclose(arquivoIn);
    ErroAbrir=false;

    data=token = strtok (linha," ");
    horario = token = strtok (NULL," ");
    token = strtok (NULL," ");

```

```
temp1=atof(token);
token = strtok (NULL," ");
temp2=atof(token);
token = strtok (NULL," ");
temp3=atof(token);
token = strtok (NULL," ");
temp4=atof(token);
```

```
token = strtok (data,"/");
mes=atoi(token);
token = strtok (NULL,"/");
dia=atoi(token);
token = strtok (NULL,"/");
ano=atoi(token);
```

```
token = strtok (horario,":");
hora=atoi(token);
token = strtok (NULL,":");
minu=atoi(token);
token = strtok (NULL,":");
seg=atoi(token);
```

```
if ( diaA!=dia || mesA!=mes || anoA!=ano || horaA!=hora || minA!=minu ||
segA!=seg)
```

```
return(true);
```

```
return(false);
```

```
}
```

```
bool Escrever(void)
```

```
{
```

```
FILE *arquivoOUT;
```

```
arquivoOUT = fopen(NomeArquivoOUT,"rb");
```

```

if(!arquivoOUT)
{
    arquivoOUT = fopen(NomeArquivoOUT,"w");
    if(!arquivoOUT)
        return(false);

    fprintf(arquivoOUT,"LIF-PainelSolar.DAT;%i-%02i-%02i
%02i:%02i:%02i;%i\n",ano,mes,dia,hora, minu,seg,IDEquip);
}
fclose(arquivoOUT);

arquivoOUT = fopen(NomeArquivoOUT,"a");

if(!arquivoOUT)
    return(false);

fprintf(arquivoOUT,"%i;%i;%i-%02i-%02i
%02i:%02i:%02i;%f\n",IDtipo,IDcanal1,ano,mes,dia,hora, minu,seg,temp1);
fprintf(arquivoOUT,"%i;%i;%i-%02i-%02i
%02i:%02i:%02i;%f\n",IDtipo,IDcanal2,ano,mes,dia,hora, minu,seg,temp2);
fprintf(arquivoOUT,"%i;%i;%i-%02i-%02i
%02i:%02i:%02i;%f\n",IDtipo,IDcanal3,ano,mes,dia,hora, minu,seg,temp3);
fprintf(arquivoOUT,"%i;%i;%i-%02i-%02i
%02i:%02i:%02i;%f\n",IDtipo,IDcanal4,ano,mes,dia,hora, minu,seg,temp4);
fclose(arquivoOUT);
return(true);
}

int main(void)
{
    temp1=temp2=temp3=temp4=dia=mes=ano=hora=minu=seg=0;
    ErroAbrir=false;

```

```

int tempo=PeriodoDeBusca;
bool NovaMedida=true;

// Ciclo de varredura
while(1)
{
    system("cls");
    cout<<"Projeto Fazenda Solar"<<endl<<"Medição em 4 pontos da
temperatura do painel solar."<<endl
    <<"Programa de transferência do banco de dados do FOS para o Lif-
Remoto."<<endl<<endl
    <<endl<<"Ultima medida:
"<<setw(2)<<setfill('0')<<hora<<":"<<setw(2)<<setfill('0')<<minu<<":"<<setw(2)<<set
fill('0')<<seg<<" "

<<setw(2)<<setfill('0')<<dia<<"/"<<setw(2)<<setfill('0')<<mes<<"/"<<ano<<endl<<en
dl
    <<"Temperatura no Sensor 1 = "<<temp1<<endl<<"Temperatura no
Sensor 2 = "<<temp2<<endl
    <<"Temperatura no Sensor 3 = "<<temp3<<endl<<"Temperatura no
Sensor 4 = "<<temp4<<endl<<endl<<endl;

    if (ErroAbrir==true)
        cout<<"ERRO AO ABRIR O ARQUIVO DO FOS!"<<endl;
    else
        cout<<endl;

    if (tempo==PeriodoDeBusca)
    {
        cout<<"Buscando nova medida"<<endl;
        NovaMedida=Buscar();
        tempo=0;
    }
}

```

```

else
    cout<<"Próxima busca em: "<< PeríodoDeBusca-tempo<<"
segundos"<<endl;

if (NovaMedida == true)
{
    if (Escrever())
    {
        NovaMedida = false;
        cout<<endl;
    }
    else
        cout<<"ERRO AO ACESSAR O FTP DO LIF REMOTO"<<endl;
}
else
    cout<<endl;

    cout<<endl<<endl<<endl<<endl<<endl<<"Pressione qualquer tecla para
encerrar o programa."<<endl<<endl;
    Sleep(1000); //1 segundo
    tempo++;
    if(kbhit())
        break;

}

// Fim
system("cls");
cout<<"Programa finalizado!"<<endl;
cout<<"Pressione Enter para fechar essa janela."<<endl<<endl;
getchar();
return (0);
}

```