



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ROGÉRIO DA SILVA MARQUES

SENSOR DE TEMPERATURA EM FIBRA ÓPTICA
QUASI-DISTRIBUIDO BASEADO EM GRADES DE BRAGG

VITÓRIA - ES
Dezembro/2015

Rogério da Silva Marques

**SENSOR DE TEMPERATURA EM FIBRA ÓPTICA QUASI-DISTRIBUIDO
BASEADO EM GRADES DE BRAGG**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na linha de pesquisa em Telecomunicações.

Orientadora: Profa. Dra. Maria José Pontes
Co-orientador: Prof. Dr. Moisés Renato Nunes Ribeiro

VITÓRIA - ES
Dezembro/2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica, Universidade Federal do Espírito Santo, ES,
Brasil)

Marques, Rogério da Silva, 1967-
M357s Sensor de temperatura em fibra óptica quasi-distribuído baseado em
grades de Bragg / Rogério da Silva Marques. – 2015. 79 f. : il.

Orientadora: Maria José Pontes.
Coorientador: Moisés Renato Ribeiro Nunes.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do
Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Grades de Bragg. 2. Fibras ópticas. 3. Detectores. 4. Petróleo. 5. Temperatura.
I. Pontes, Maria José. II. Nunes. Moisés Renato Ribeiro. III. Universidade
Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. VI. Título.

CDU: 621.3

ROGÉRIO DA SILVA MARQUES

**SENSOR DE TEMPERATURA EM FIBRA ÓPTICA
QUASI-DISTRIBUIDO BASEADO EM GRADES DE BRAGG**

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof^a Dr^a Maria José Pontes
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientadora

Prof. Dr. Moisés Renato Nunes Ribeiro
Universidade Federal do Espírito Santo
Co-orientador

Prof^a Dr^a Shirley Peroni Neves Cani
Instituto Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Anselmo Frizera Neto
Universidade Federal do Espírito Santo

Vitória-ES, 18 de Dezembro de 2015

DEDICATÓRIA

À minha esposa, ao meu filho e aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a professora Maria José Pontes pela orientação, incentivo e confiança passados no decorrer deste trabalho.

Ao meu co-orientador Moisés Renato Nunes Ribeiro e ao professor Anselmo Frierza Neto pelos conhecimentos e sugestões passados, o que contribuiu muito para a realização deste trabalho.

Aos colegas do Instituto de Telecomunicações, Universidade de Aveiro, pela interação durante este trabalho.

Ao Labpetro, que permitiu a realização de vários experimentos relacionados com este trabalho.

Aos colegas do Labtel pelos momentos agradáveis passados, em especial a aqueles que contribuíram de alguma forma para este trabalho. Ao colega Adilson Prado pelos trabalhos relacionados com a área de química, pontuados nesta dissertação. Agradeço também ao Rodolfo Landislau e Hosianna Ximenes pela ajuda dada em vários experimentos.

À Deus pela permissão desta obra, a Ele toda a honra.

Finalmente à minha esposa Viviane, ao meu filho Matheus, a meus pais Manoel e Maria Marques pelo apoio dado durante todo o tempo passado na realização deste trabalho.

Lista de Figuras

2.1	Conceito de distribuição espacial: (a) medida pontual; (b) integrada; (c) distribuída; (d) quasi-distribuída.	14
2.2	Método de máscara de fase para gravação da FBG.	16
2.3	Método holográfico para gravação da FBG [24].	17
2.4	Princípio de funcionamento da FBG.	18
2.5	Espectro de uma FBG, obtido do analisador de espectro óptico.	19
2.6	Conceito geral de interrogação.	20
2.7	Circulador óptico: acoplamento de luz em um circulador de quatro portas.	21
3.1	Monitoramento da temperatura em tanque de petróleo com sensor de 6 FBGs.	24
3.2	(a) Protótipo com um elemento sensor; (b) detalhe do elemento sensor.	26
3.3	Elemento sensor desmontado.	27
3.4	Protótipo de 1 metro de comprimento com 6 FBGs.	27
4.1	Espectroscopia infravermelha para amostras imersas em petróleo.	31
4.2	Espectroscopia infravermelha: referência.	32
4.3	Espectroscopia infravermelha para amostras imersas em petróleo por 90 dias.	33
5.1	Protótipo com 1 FBG.	35

5.2	Montagem experimental.	36
5.3	Caracterização do protótipo contendo uma FBG a partir da observação do espectro óptico em função da temperatura.	37
5.4	Curva de calibração do sensor.	37
5.5	Tempo de resposta do protótipo.	39
6.1	Segmento do sensor desmontado.	42
6.2	Sensor completo de 1m de comprimento.	43
6.3	(a) Cabeçote do protótipo; (b) âncora do protótipo.	43
6.4	(a) Estufa convencional; (b) multímetro de precisão.	44
6.5	<i>Setup</i> para caracterização do espectro do sensor de seis FBGs.	44
6.6	Moi-Enlight - espectro óptico do sensor.	45
6.7	Calibração das seis FBGs.	45
6.8	Calibração das 6 FBGs em estufa.	46
6.9	Calibração das seis FBGs.	47
6.10	Calibração das seis FBGs.	48
6.11	Calibração das 6 FBGs em banho térmico.	48
6.12	Tempo de resposta do protótipo.	50
6.13	Detalhe sobre a medida do tempo de resposta do protótipo.	50
6.14	Comparação de dados experimentais com modelo matemático.	51
6.15	Segmentos do sensor para serem tracionados.	52
6.16	Máquina de tração AMSLER.	53
6.17	Segmento do sensor sendo tracionado.	53
6.18	Montagem para teste de estanqueidade.	54
7.1	Foto da planta utilizada no teste piloto do sensor com seis FBGs.	56

7.2	Teste piloto das seis FBGs com: (a) ilustração do sensor de 1 metro no tanque da planta piloto e (b) mapeamento das temperaturas medidas com o sensor com 6 FBGs em função do tempo.	58
7.3	Evolução da temperatura durante aquecimento e resfriamento do sensor quasi-distribuído.	58
1	Tela MOI-Enlight: aba <i>Acquisition</i>	73
2	Tela MOI-Enlight: aba <i>Sensors</i>	74

Lista de Tabelas

6.1	Propriedades do interrogador Sm125	41
-----	--	----

Conteúdo

1	Introdução	10
2	Fundamentos das Redes de Bragg	13
2.1	Sensores em Fibras Ópticas	13
2.2	Sensores Ópticos Baseados em FBGs	15
2.3	Técnicas de Interrogação	20
2.4	Aplicações de Sensores Baseados em Grades de Bragg	21
3	Descrição Construtiva do Elemento Sensor	24
4	Testes de Resistência a Corrosão em Petróleo de Alta Salinidade	29
4.1	Análise por Espectroscopia de Infravermelho (IR)	30
4.2	Avaliação por Microscopia Eletrônica	31
5	Protótipo com Um Elemento Sensor	34
5.1	Protótipo do sensor e calibração - 1 FBG	35
5.2	Tempo de Resposta	38
6	Protótipos com Seis Elementos Sensores	40
6.1	Protótipo do Sensor e Calibração - 6 FBGs	41
6.2	Calibração em Banho Térmico	47

6.3	Caracterização do Tempo de Resposta	49
6.4	Teste de Resistência Mecânica e Estanqueidade do Protótipo	52
6.5	Protótipo do Sensor de quatro metros com 6 FBGs	54
7	Testes Piloto na Planta	56
7.1	Descrição da Planta Automatizada	56
7.2	Resultados Obtidos nas Medições de Temperatura	57
8	Conclusões e Trabalhos Futuros	59

Resumo

O monitoramento de temperatura é uma atividade crítica para a indústria de petróleo e gás. Os desafios envolvidos no armazenamento de petróleo nos locais de produção abrem oportunidades para novos sistemas de monitoramento capazes de realizar medidas de perfis de temperatura com segurança.

Este trabalho apresenta um sensor de temperatura em fibra óptica baseado em grades de Bragg, resistente a corrosão, de fácil manuseio e intrinsecamente seguro.

O sensor apresentado é baseado em múltiplas FBGs inscritas em um segmento de fibra monomodo. O sensor apresenta uma sensibilidade térmica média de $8,82 \pm 0,09$ pm/°C resultando em uma resolução de temperatura típica de $\sim 0,1$ °C e uma constante de tempo de $6,25 \pm 0,08$ s.

Politetrafluoretileno (PTFE) foi utilizado para, simultaneamente, isolar a fibra óptica do meio corrosivo e evitar tensões mecânicas indesejáveis sobre as FBGs. O PTFE provê também robustez para o sensor, sem interferir em suas propriedades.

A resistência a corrosão e degradação do PTFE foram verificadas por espectroscopia infravermelha e microscopia por escaneamento eletrônico em amostras expostas durante 90 dias ao petróleo de alta salinidade.

O sensor desenvolvido foi experimentado em um teste piloto feito em planta, reproduzindo a operação de um tanque de petróleo em terra, mostrando capacidade para monitorar perfis de temperatura dinamicamente.

Abstract

Temperature monitoring is a critical activity for the whole oil & gas industry. The challenges involved in crude oil storage at hazardous production sites open opportunities for new sensing systems capable of safely performing dynamic temperature tank profiling. This article presents a corrosion resistant, maneuverable, and intrinsically safe temperature optical sensor based on fiber Bragg grating (FBG). The presented sensor head is based on multiple FBG inscribed in a lengthy single mode fiber. The sensor presents an average thermal sensitivity of 8.82 ± 0.09 pm/°C, resulting in a typical temperature resolution of ~ 0.1 °C and an average time constant value of 6.25 ± 0.08 s.

Polytetrafluoroethylene (PTFE) was proposed as a means of simultaneously isolating the optical fiber from the corrosive environment and avoiding undesirable mechanical tensions over FBGs. PTFE also improves the overall sensor robustness without impairing its handling features.

Corrosion and degradation resistance were verified by infrared spectroscopy and scanning electron microscopy along 90 days exposition to high salinity crude oil samples. The developed sensor was tested in a field pilot test, reproducing the operation of an in land crude tank, demonstrating its abilities to dynamically monitor temperature profile.

Capítulo 1

Introdução

A indústria de petróleo e gás é uma das mais importantes e ativas na economia mundial. O monitoramento da temperatura é um problema fundamental na indústria, especialmente em relação ao petróleo, dado que a eficiência volumétrica, viscosidade e densidade dependem diretamente da temperatura do fluido. Portanto, medidas de temperatura precisas e confiáveis são necessárias ao longo de toda a cadeia de produção, nomeadamente durante a extração do petróleo, transporte, armazenamento e refino [1, 2].

Há também importantes procedimentos operacionais e econômicos que dependem fortemente de medidas de temperaturas precisas.

Para as operações de produção e transporte, padrões globais impõem que, para registro oficial, para transferência de custódia, para comercialização, e para fins de tributação, o volume de petróleo deve ser convertido em seu equivalente a 20 °C [3].

Temperaturas imprecisas nestes estágios refletirão em danos monetários e políticos para as companhias e governos. Além disso, é amplamente conhecido que toda a área de produção de petróleo (ambiente, equipamentos e processos) impõe severas restrições operacionais devido a sua natureza explosiva, tóxica e corrosiva, sem mencionar ainda a exploração em campos distantes.

Por outro lado, estes desafios trazem oportunidades, uma vez que pequenas inovações na indústria do petróleo trazem grande retorno econômico [4].

Qualquer sistema de medida de temperatura designado para esta indústria deverá se submeter a critérios como: i) longa durabilidade em ambientes quimicamente agressivos e perigosos; ii) calibração simples; iii) fácil operação; iv) tempo

de resposta reduzido; e v) intrinsecamente seguro. Medidas de temperatura podem ser feitas através de várias técnicas, como, por exemplo, sistemas termográficos infravermelho [5], termômetros baseados em filme semicondutor [6] e métodos de medida acústicos [7]. Contudo, processos industriais na produção de petróleo têm usado largamente o detector de temperatura baseado em resistência de platina, conhecido como Pt100, com resistência típica de 100Ω a 0°C [8].

O sensor industrial Pt100 é composto por três componentes: o elemento sensor ou detector, o tubo de proteção e a conexão elétrica. O elemento sensor é um fio de poucos milímetros de comprimento. Este elemento é muito frágil, possuindo uma fração de milímetro de espessura, precisando, portanto, de uma proteção hermeticamente selada permitindo sensoriamento com baixa histerese, alta estabilidade, e tolerância a vibrações mecânicas. Um tubo de proteção adicional previne que o sensor tenha contato direto com elementos corrosivos, o que é fundamental no caso do petróleo. Finalmente, a conexão elétrica completa o sistema de monitoramento de temperatura.

O sensor Pt100 adaptado para medição de temperatura em petróleo deverá ser à prova de explosões, o que leva, conseqüentemente, a alta massa, comprometendo o tempo de resposta e manuseio do dispositivo [9, 10].

Para o uso específico em tanques de petróleo, a segurança intrínseca fica de alguma forma comprometida devido aos fios elétricos na parte superior do tanque, justamente onde há acúmulo de vapores inflamáveis. Além disto, calibrações frequentes são requeridas para medidas fiscais. Então operações de campo são necessárias para remover e transportar o sensor para laboratórios de calibração e trazer de volta ao tanque sendo frequentemente demorado, trabalhoso e custoso.

Uma solução interessante para cenários onde sensores elétricos tradicionais apresentam fragilidades ou deficiência é o sensor baseado em fibra óptica. Os sensores ópticos, de baixo peso podem ficar em ambientes agressivos e, mais importante, são intrinsecamente seguros devido a não terem partes elétricas ou conexões. Além de prover medições altamente confiáveis, a unidade de interrogação pode estar muito distante (dezenas de km, por exemplo) do ponto de detecção e pode reunir leitura de múltiplos sensores através de métodos de sensoriamento óptico distribuído [11] ou concentrado [12].

Um aumento no número de publicações a respeito de sensores em fibra óptica baseado em grades de Bragg em fibra (FBG) ou cavidades de Fabry-Perot [13] tem sido relatado ultimamente para diferentes aplicações [14, 15, 16].

A melhoria no desempenho dos sensores baseados em FBGs para monitorar parâmetros tais como pressão e temperatura aumentam suas aplicações na indústria do petróleo e gás.

Este trabalho explora a capacidade de um sensor baseado em FBG para sensoriamento multiponto em uma única fibra óptica. A proposta de um *design* inovador para o sensor permite sua operação em contato direto com o petróleo, para medição de temperatura em tanques de armazenamento em terra.

O Capítulo 2 apresenta os fundamentos das redes de Bragg. O Capítulo 3 é uma descrição do projeto e montagem do elemento sensor. No Capítulo 4 são apresentados os testes de resistência a corrosão em petróleo de alta salinidade referente ao PTFE. O Capítulo 5 mostra a produção e caracterização do protótipo com um elemento sensor. O Capítulo 6 mostra a produção e caracterização do protótipo com seis elementos sensores. O Capítulo 7 mostra testes piloto feitos na planta. Finalmente, o Capítulo 8 apresenta as conclusões para este trabalho.

Este trabalho contribuiu para o projeto de sensores, fruto de convênio entre a Petrobrás e a Ufes. Este trabalho foi financiado no âmbito do projeto PVE/CNPq407093/2013-3, UID/ EEE /50008/2013, pela FCT/ MEC e parcialmente financiado pela Petrobras SA, CNPq, e FAPES. Como resultado da montagem e caracterização dos protótipos dos sensores de temperatura em fibra óptica foi publicado o seguinte artigo:

R. S. Marques, A. R. Prado, P. F. C. Antunes, P. S. B. Andre, M. R. N. Ribeiro, A. F. Neto, and M. J. Pontes, "Corrosion resistant FBG-based quasi-distributed sensor for crude oil tank dynamic temperature profile monitoring," *Sensors*, pp. 30693–30703, 2015.

Capítulo 2

Fundamentos das Redes de Bragg

Este capítulo apresenta os conceitos básicos envolvendo sensores ópticos baseados em FBGs para medidas de temperatura.

2.1 Sensores em Fibras Ópticas

Um sistema para sensoriamento óptico consiste, em geral, de um transdutor, um canal de comunicação óptico e de uma unidade optoeletrônica. Os sensores podem ser classificados de acordo com o tipo de grandeza a ser medida sendo aplicados para medições mecânicas (vibrações, velocidade, aceleração, força e pressão), térmicas, eletromagnéticas, radiações, composições química, fluxo e turbulência de líquidos e medições na área biomédica [17].

Os sensores ópticos podem ainda ser divididos conforme a distribuição dos elementos sensores e pontos de medida. Medições pontuais são feitas em um único ponto para cada canal de transmissão. A medição integrada fornece um único valor para vários valores da variável objeto. O sensoriamento distribuído monitora todos os pontos ao longo de uma linha espacial. Finalmente, o sistema com medição quasi-distribuída também faz medições ao longo de uma linha espacial, porém somente em alguns pontos pré determinados [17]. A Figura 2.1 mostra o conceito de distribuição espacial: (a) medida pontual, (b) integrada (c) distribuída e (d) quasi-distribuída.

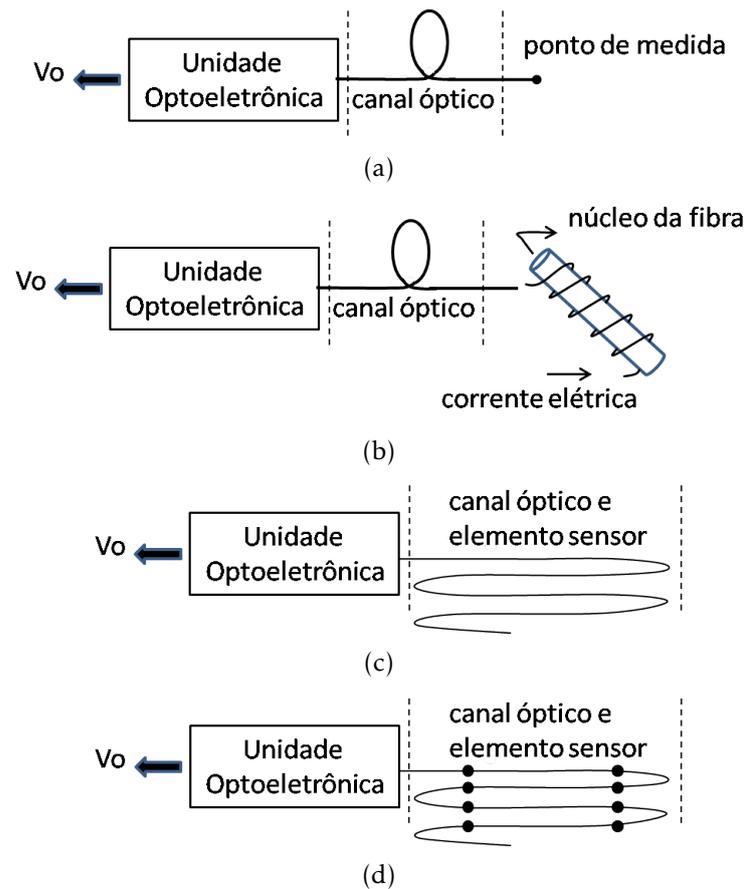


Figura 2.1: Conceito de distribuição espacial: (a) medida pontual; (b) integrada; (c) distribuída; (d) quasi-distribuída.

O uso de fibra óptica em sensoriamento apresenta diversas vantagens. Devido ao fato da fibra ser feita totalmente com material dielétrico e quimicamente inerte, confere ao sistema passividade elétrica e química, favorecendo seu uso em ambientes hostis sujeitos inclusive ao risco de explosão e em ambientes contaminados do ponto de vista eletromagnético.

Estas características permitem o uso de sensores em fibra óptica na área biomédica, considerando a bio-compatibilidade. O fator não intrusivo da fibra e a possibilidade de implementar interfaces simples e pequenas entre o sensor e o ponto de medição são outros pontos favoráveis à utilização destes sensores [17].

O sensor em fibra pode também ser utilizado em altas temperaturas, dado o alto ponto de fusão da fibra óptica, permitindo o uso até a temperatura de 1200 °C [18].

Devido também as características físicas da fibra, transdutores pequenos e leves favorecem a integração eletro-óptico [17].

A distância do ponto de medida pode ser grande (quilômetros) devida as características do canal de transmissão feito em fibra óptica, considerando ainda que a excelente característica de transmissão da fibra permite a integração de diversos sensores usando técnicas de multiplexagem e interrogação no domínio da fotônica.

A existência de técnicas de interrogação que fornecem informação do estado da fibra óptica em todo o seu comprimento e o uso da própria fibra como transdutor distribuído permitem a fabricação de sensores ópticos distribuídos e quasi-distribuídos, o que é dificilmente alcançado com eficiência com outras tecnologias. Estes sensores ópticos podem ainda ter a sensibilidade, faixa dinâmica e resolução potencialmente superiores aos sensores convencionais [17].

Entre as desvantagens do uso da fibra óptica em sensores pode-se mencionar, por exemplo, a alta sensibilidade da fibra como elemento sensor que permite capturar e refletir a influência de outros parâmetros que não são de interesse da medição. Contudo, este problema também existe para os sensores convencionais [17]. Como exemplo, em [19] é apresentado um sensor de pressão onde é necessário compensar os efeitos da temperatura sobre o sensor proposto.

O uso da fibra óptica não é favorável em alguns casos, principalmente por ser uma tecnologia que exige desenvolvimento para ser aplicada, devido aos custos necessários que é correntemente e em muitos casos, maiores que os custos dos sensores feitos com tecnologias tradicionais [17].

2.2 Sensores Ópticos Baseados em FBGs

As grades em fibra foram obtidas pela primeira vez em 1978 [20]. A grade de Bragg é gravada no núcleo de uma fibra óptica monomodo, através da modulação periódica em seu índice de refração [21].

Os principais métodos de gravação das FBGs em fibra óptica são o método de máscara de fase, descrito em [22, 23] e o processo holográfico, descrito por Meltz [24]. Os dois métodos utilizam incidência de luz UV com potência suficiente para gravação da grade na fibra. Lemaire [25] descreveu o processo de hidrogenação para aumentar a foto-sensibilidade da fibra com a finalidade de facilitar e agilizar a gravação da grade.

A Figura 2.2 mostra o esquema de gravação da FBG com máscara de fase.

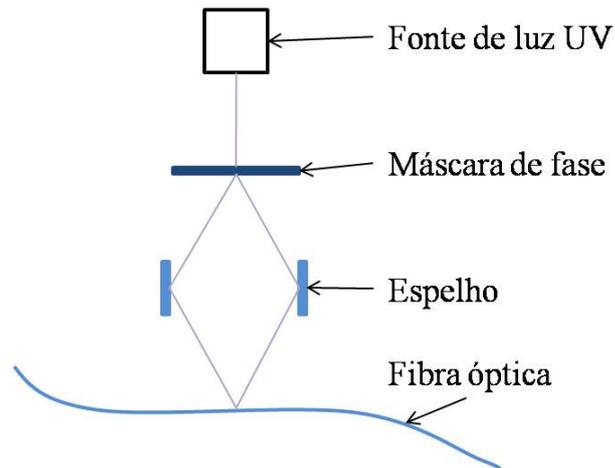


Figura 2.2: Método de máscara de fase para gravação da FBG.

No processo de gravação com máscara de fase, um laser de Argônio com um dobrador de frequência intra-cavidade gera um feixe ultravioleta que é utilizado neste processo [23].

Uma grade com um período predeterminado é colocada em frente da saída da fonte do laser. Quando o feixe atravessa a grade é dividido em dois outros feixes de igual potência devido ao efeito de difração.

Através de dois espelhos estes feixes são direcionados para o ponto da fibra óptica onde será feita a gravação da FBG. A recombinação dos dois feixes no plano da fibra óptica gera um padrão de interferência periódica que é gravada no núcleo da fibra.

A caracterização espectral da FBG pode ser feita durante o processo de gravação.

No processo holográfico, o índice de modulação, que pode ser selecionado para corresponder ao comprimento de onda de Bragg desejado, é gravado no interior do núcleo expondo-o a interferência de dois feixes padrão. O período da grade é determinado pelo comprimento de onda incidente e o ângulo entre os feixes que sofrem interferência.

Grades formadas por esta técnica não tem o comprimento limitado. Além disto podem ser adaptadas para uma transmissão determinada ou característica de filtragem por reflexão moldando e inclinando o padrão de escrita através de controle do ângulo interno e divergência dos feixes.

O aparato experimental de gravação das FBGs é mostrado na Figura 2.3.

O feixe de luz UV incide em um divisor gerando dois feixes. Estes feixes são direcionados para um ponto na fibra, onde ocorrerá a gravação da grade. Duas lentes são usadas para focalizar os feixes na fibra.

A caracterização da FBG é feita durante a gravação. A fonte de luz de arco de mercúrio passa por um filtro amarelo e é inserido na fibra através da lente objetiva de microscópio. Após passar pelo monocromador, a caracterização é então registrada no gravador xy.

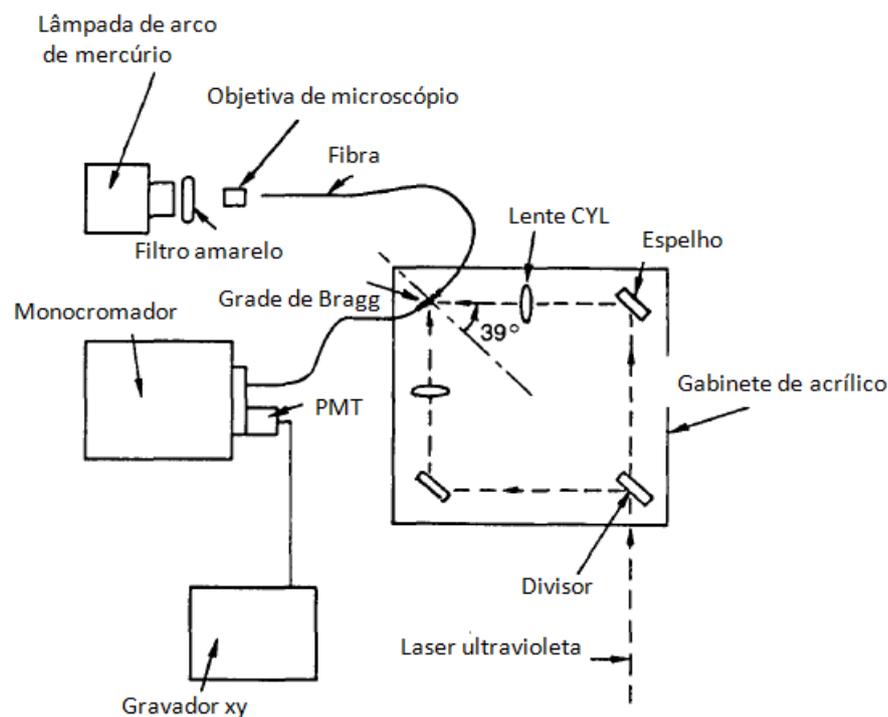


Figura 2.3: Método holográfico para gravação da FBG [24].

O processo holográfico produz uma FBG com qualidade dependente das características da fonte laser utilizada. O processo de máscara de fase, que é o processo mais utilizado, possui a vantagem de não depender das características da fonte de luz para garantir boa qualidade da FBG.

Após uma primeira demonstração em 1990 [26] sobre a utilização de FBG em fibra embutida em um material composto de fibra-epoxy e outra aplicação feita em 1992 [27] em uma coluna de concreto, várias outras aplicações foram demonstradas, como as desenvolvidas para pontes, minas, veículos marinhos e aéreos [28].

A grade de Bragg em fibra passou por um rápido progresso na área de sensoriamento com aplicações para grandes construções, estruturas de concreto, energia elétrica industrial, medicina e química [28].

A grade de Bragg permite a transmissão de ondas eletromagnéticas em diferentes comprimentos de onda, exceto em um comprimento de onda específico definido como comprimento de onda de Bragg, para o qual a grade foi projetada [17]. Assim, a onda no comprimento de Bragg é fortemente refletida de volta pelo mesmo caminho de ida através da fibra óptica.

Portanto a grade de Bragg atua como um filtro rejeita faixa, deixando passar apenas os comprimentos de onda que não estão em ressonância com a grade, e o comprimento de onda de Bragg é construtivamente refletido em cada plano da grade formando um pico de reflexão, conforme pode ser observado na Figura 2.4.

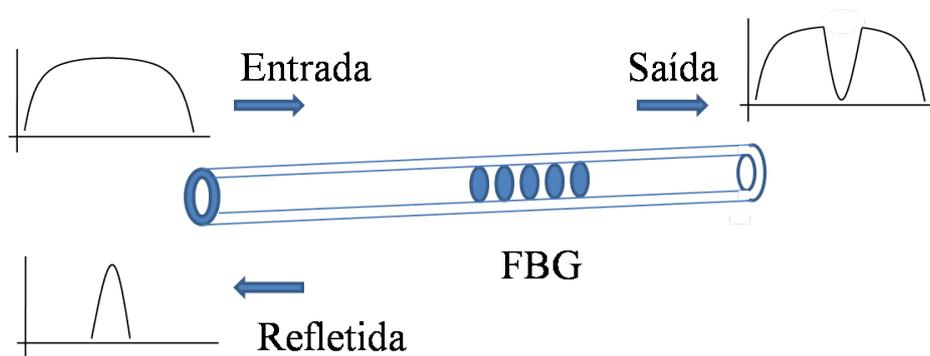


Figura 2.4: Princípio de funcionamento da FBG.

O princípio de funcionamento da grade de Bragg para fins de sensoriamento de grandezas físicas é baseado no fato do comprimento de onda de Bragg sofrer variação devido a alteração do período da grade causada pela temperatura ou deformação da fibra [29].

A condição necessária para o comprimento de onda de Bragg é dada pela equação 2.1 [30].

$$\lambda = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.1)$$

onde:

λ é comprimento de onda central no espaço livre da luz de entrada a ser refletida

n_{eff} é o índice de refração efetivo do núcleo no comprimento de onda a ser refletido

Λ é o período da variação no índice de refração

A deformação da fibra óptica causada por pressão ou temperatura, por exemplo, altera o período da grade, alterando, portanto, o comprimento de onda central da

luz refletida. Este deslocamento permite então o sensoriamento do fenômeno físico que o provocou. Este deslocamento é dado pela equação 2.2.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 + p_e)\Delta\epsilon + (\alpha_n + \alpha_\wedge)\Delta T \quad (2.2)$$

onde:

p_e é uma constante de deslocamento óptico efetivo, tipicamente 1,2 pm/ μ strain para λ igual a 1550 nm [31].

$\alpha_\wedge = [1/\wedge][\delta \wedge/\delta T]$ é o coeficiente de expansão térmica da fibra, aproximadamente 0.55×10^{-6} para a Sílica [21].

$\alpha_n = [1/n][\delta n/\delta T]$ é o coeficiente termo óptico, aproximadamente 8.6×10^{-6} para o núcleo da fibra de Silício dopada com Germânio [21].

O deslocamento no comprimento de onda de Bragg devido a mudança no espaçamento da grade causada pela expansão térmica e devido a mudanças no índice de refração é dado então pela equação 2.3.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B[\alpha_n + \alpha_\wedge]\Delta T \quad (2.3)$$

Uma das propriedades da grade de Bragg que a torna interessante para sensoriamento é o fato de que o comprimento de onda é a grandeza utilizada na aferição. Portanto, as flutuações na intensidade da luz não interferem na precisão das medições.

A Figura 2.5 mostra o espectro correspondente a uma grade de Bragg. Pode-se observar que o comprimento de onda central da FBG é próximo de 1544,3 nm, neste caso.

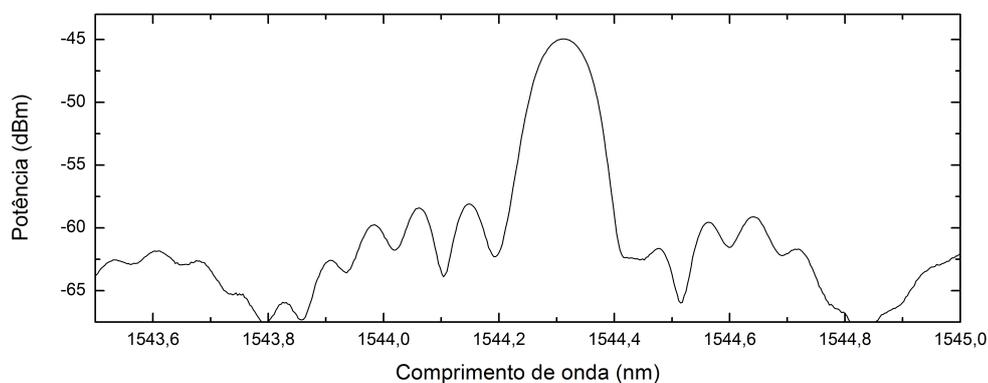


Figura 2.5: Espectro de uma FBG, obtido do analisador de espectro óptico.

2.3 Técnicas de Interrogação

Quando a FBG é iluminada com uma fonte de luz banda larga uma assinatura espectral de retorno é obtida, possuindo um formato aproximadamente gaussiano centrado no comprimento de onda de Bragg. Quando há mudanças no espaçamento da grade devido a ação de algum fenômeno físico que se está mensurando, esta assinatura desloca-se no eixo espectral. Portanto em princípio, a determinação do comprimento de onda central permite quantificar uma particular medida. Para fazer isto, conceitos de interrogação são desenvolvidos para que quando implementados, permitam encontrar o comprimento de onda de Bragg de forma eficiente e preferencialmente com baixo custo. Um conceito geral de interrogação é mostrado na Figura 2.6.

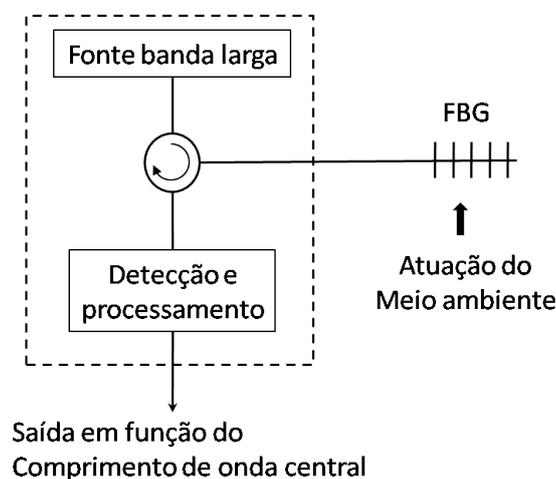


Figura 2.6: Conceito geral de interrogação.

Como pode ser observado, uma fonte de luz banda larga é direcionada para a FBG através de um circulator. A FBG recebe atuação do ambiente e reflete a onda no comprimento de Bragg. A onda refletida retorna então ao circulator que direciona a mesma para detecção e processamento que fornece uma saída em função do comprimento de onda de Bragg.

O componente óptico utilizado neste trabalho para interligar o OSA ao sensor de temperatura é o circulator óptico.

A Figura 2.7 mostra o acoplamento de luz em um circulator em fibra de quatro portas.

A onda refletida pela FBG precisa passar pelo interrogador para que este detecte o comprimento de onda central. Este comprimento de onda varia ao longo de uma

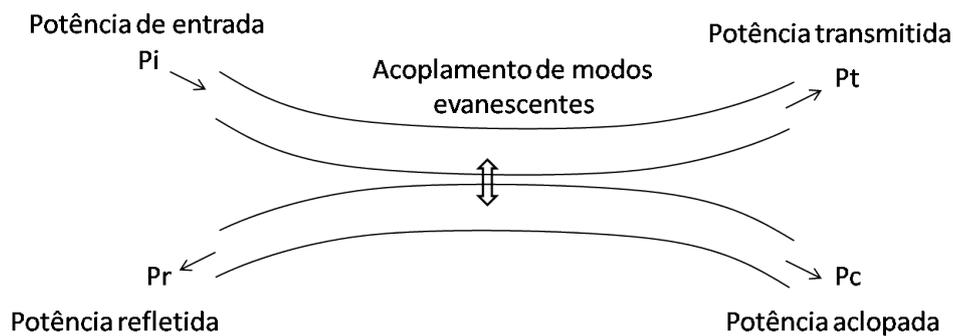


Figura 2.7: Circulador óptico: acoplamento de luz em um circulador de quatro portas.

faixa do espectro óptico devido a atuação da grandeza que está sendo medida.

A detecção do comprimento de onda de Bragg pode ser feita através de um analisador de espectro óptico (OSA) [23], pelo cálculo do centróide de massa do espectro [31], utilização de redes gêmeas, sendo uma delas a referência [32], filtro óptico sintonizável [33], filtro óptico eletricamente sintonizável [34], ou interrogadores de FBGs comerciais [35].

Uma fibra pode conter mais de uma FBG espaçadamente distribuída, com comprimentos de onda de Bragg diferentes entre elas. Neste caso é possível monitorar vários pontos distintos do sistema através de multiplexação [36].

2.4 Aplicações de Sensores Baseados em Grades de Bragg

Um aumento do número de publicações relativas a sensores de fibra baseados em FBG que exploram diferentes aplicações têm sido relatados ultimamente na literatura [14, 15, 16, 37].

Um exemplo é um sistema de medição de temperatura baseado em FBG em que os sensores foram fabricados por montagem de uma fibra com FBGs colada com epóxi sobre uma ficha de PTFE. Foi obtida uma boa sensibilidade de 6,8 pm/K para temperaturas que variam de 4,2 K a 12 K que permite uma resolução do sistema melhor do que 10 mK [14]. Isto é uma alternativa viável para o mapeamento de temperatura criogênica.

Outro exemplo de aplicação eficaz com elemento sensor FBG é observado no acompanhamento das condições estruturais das construções [15]. Neste caso, edifícios, pontes, barragens, torres e túneis, entre muitas outras construções podem

ser monitoradas. O monitoramento estrutural acompanha o estado de uma estrutura, mesclando sensores e sistemas de monitoramento com detecção de dano, para garantir a segurança e longevidade das mesmas.

Há também sensores baseados em FBG que foram desenvolvidos para monitorar pressão [16], onde uma superfície de detecção em duas dimensões (2D) é construída pela combinação de uma matriz de sensores FBG com material elástico e flexível a base de polímero. As características físicas e de operação de tal sensor e particularmente sua alta resolução espacial e portabilidade são adequadas para aplicações biomédicas incluindo sensores portáteis, sensores de cadeira de rodas, sistemas de assentos e de outros sensores voltados para ergonomia.

Em [37], um sensor de campo magnético com base em grade de Bragg em fibra óptica inclinada e revestida com fluido magnético foi relatada. O fluido magnético é um tipo de colóide estável, que consiste tipicamente de nano partículas magnéticas (ou seja, Fe_3O_4) revestidas com surfactante e altamente dispersa em um meio líquido que possui excelentes propriedades ópticas, apresenta efeito de Faraday, possui índice de refração sintonizável, campo dependente da transmissão e birrefringência. Tais sensores representam avanços em termos de pequeno tamanho, alta resolução, e grande precisão dos sensores de fibra com base em FBG.

Uma FBG pode ser montada sobre uma tira bimetálica para aumentar a sensibilidade de um sensor de temperatura. Assim, a sensibilidade de 10 pm/°C para um sensor sem a tira bimetálica passa para 14 pm/°C com a tira bimetálica. No entanto, o aumento da sensibilidade é dividido em três regiões de temperatura de forma não linear. A melhor sensibilidade, de 14pm/°C, foi percebida para a faixa de 41 °C a 90 °C [38].

A detecção de vazamento de água em tubulações pode ser feita com a utilização de FBG como sensor de temperatura, já que o vazamento implica na mudança de temperatura do líquido. Uma sensibilidade de 9,8 pm/°C pode ser alcançada com boa linearidade [21].

Explorando as características das FBGs dadas pela equação 2, pode-se usar as FBGs para a medição de mais de uma grandeza física simultaneamente, como o índice de refração e a temperatura, por exemplo. Áreas da biomédica, química e monitoramento ambiental têm sido atraídas para aplicações com sensores de índice de refração em fibra óptica devido a seu baixo peso, alta sensibilidade e imunidade a interferência eletromagnética. Para este caso foi feito um estudo com uma FBG, onde a parte anterior da FBG está em um segmento normal de fibra óptica (FBG1) e a parte posterior (final do sensor) está em um segmento de fibra de forma cônica

(FBG2), possuindo toda a FBG o mesmo período. FBG1 é sensível apenas a temperatura. O núcleo de FBG2 fica sensível ao índice de refração do meio devido a redução da casca da fibra. Assim é possível mapear o índice de refração do meio e a temperatura simultaneamente [39].

Pode-se também gravar FBGs em fibras dopadas com terras raras. É o caso da fibra dopada com érbio, usada para detectar deformação e temperatura simultaneamente [40]. Estes sensores exploram o fato do ganho para pequenos sinais de um amplificador em fibra dopada com érbio (EDFA) apresentar variação linear com a temperatura. Medindo a variação da potência transmitida na FBG e a variação no comprimento de onda de Bragg é possível determinar a deformação e a temperatura. As sensibilidades alcançada para a deformação e para a temperatura foram de 0,8 pm/ue e 12 pm/°C respectivamente [40].

Capítulo 3

Descrição Construtiva do Elemento Sensor

Este trabalho apresenta a construção de um sensor utilizado para a medição de temperatura em processos na indústria do petróleo, podendo operar diretamente em contato com o óleo e com baixo tempo de resposta, um fator decisivo para operações de produção, transporte e armazenamento de petróleo. A Figura 3.1 ilustra a utilização deste sensor para monitorar a temperatura em tanque de petróleo. Observe que a interrogação das FBGs é feita remotamente.

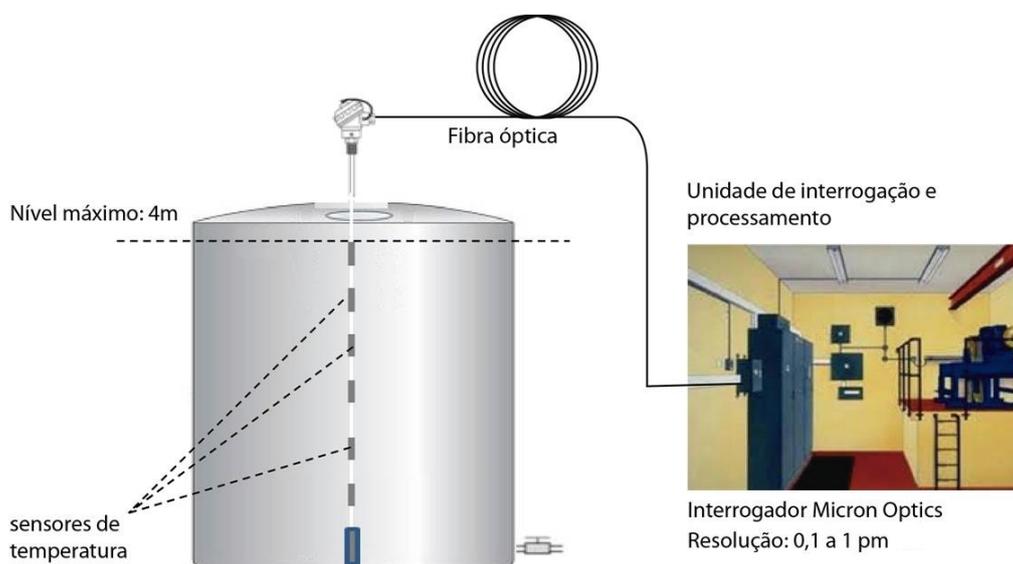


Figura 3.1: Monitoramento da temperatura em tanque de petróleo com sensor de 6 FBGs.

Com a finalidade de melhorar as características desejáveis da FBG e aumentar a

sua utilização na indústria do petróleo, a construção de um sensor FBG com revestimento de PTFE adequado para a indústria de petróleo foi desenvolvido. O polímero escolhido apresenta uma grande resistência à corrosão, uma excelente resistência mecânica e funciona em alta temperatura. O sensor com revestimento de polímero inerte opera com sub miliwatt de potência óptica, portanto, é plenamente aplicável em ambientes explosivos industriais.

O uso deste polímero no sistema é um reforço para a FBG, que é frágil, tornando-a própria para utilização em situações práticas que envolvam a produção de petróleo. Isso significa tornar possível utilizar o sensor em direta imersão no petróleo, apresentando um bom desempenho para monitorar a temperatura.

O dispositivo desenvolvido visa atender a todas as características dos sistemas convencionais de medição usados tradicionalmente e corrigir os seus problemas como alta massa, baixa mobilidade, grande volume e moderada resistência à característica corrosiva do petróleo.

A temperatura de medição é muito importante na indústria de petróleo e afeta todas as ações que dependem do volume de petróleo, como o controle da produção, transporte e armazenamento.

Para este trabalho foram construídos três protótipos. O primeiro com apenas uma FBG foi desenvolvido para testes de medição de temperatura em forno de calibração.

O segundo protótipo possui um metro de comprimento e contém seis FBGs. Este protótipo foi utilizado para testes em banho térmico e foi utilizado em teste piloto na planta, descrito no Capítulo 7.

Finalmente, o terceiro protótipo é o sensor de 4 metros de comprimento, contendo seis FBGs. Este sensor deverá ser utilizado para testes de monitoração de temperatura em tanque de petróleo.

O protótipo do sensor com 1 FBG é estudado no Capítulo 5.

O proposto sensor quasi-distribuído é baseado em múltiplas FBGs, igualmente espaçadas, inscritas em uma fibra óptica monomodo, conforme descrito no Capítulo 6.

Os três protótipos são construídos através da combinação de um ou mais módulos, que são os elementos sensores. Estes elementos sensores são idênticos para os três protótipos, conforme descrito a seguir.

O elemento sensor proposto é constituído de uma fibra óptica com a FBG inscrita inserida em dois tubos concêntricos de PTFE, o primeiro com 0,5 mm e o segundo com 6,35 mm de diâmetro externo. Isto é feito para conferir resistência química e mecânica ao sensor, e, considerando que a fibra fica solta dentro destes tubos, tensões mecânicas indesejáveis sobre a FBG são também evitadas. Observe que toda a fibra óptica é encapsulada com o PTFE de 6,35 mm, exceto na seção onde está localizada a FBG.

O PTFE atua como isolante térmico. Então para diminuir o tempo de resposta do sensor, um tubo de aço inox é usado apenas na seção que contém a FBG aumentando a condutividade térmica entre o elemento sensor e o meio externo.

A Figura 3.2 (a) apresenta o protótipo com apenas um elemento sensor e o esquema detalhado deste elemento sensor é mostrado na Figura 3.1 (b).

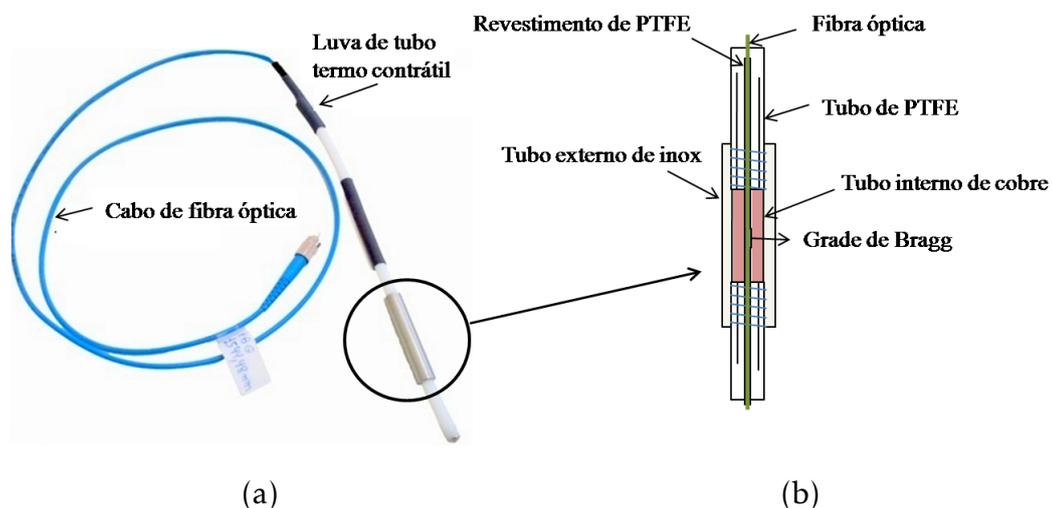


Figura 3.2: (a) Protótipo com um elemento sensor; (b) detalhe do elemento sensor.

Na intenção de diminuir ainda mais o tempo de resposta do sensor, foi adicionado um tubo interno de cobre, concêntrico ao tubo de aço inox, para aumentar a condutividade térmica entre a FBG e o ambiente. O Capítulo 5 apresenta um estudo relacionado ao tempo de resposta do sensor para validar o uso do tubo de cobre. A Figura 3.3 apresenta o protótipo de uma FBG desmontado, mostrando os elementos acima citados.

As conexões mecânicas entre o PTFE e os tubos de aço inox são feitas através de roscas feitas diretamente nestes materiais e são seladas com o veda roscas a base de PTFE *LOCTITETM 5113*.

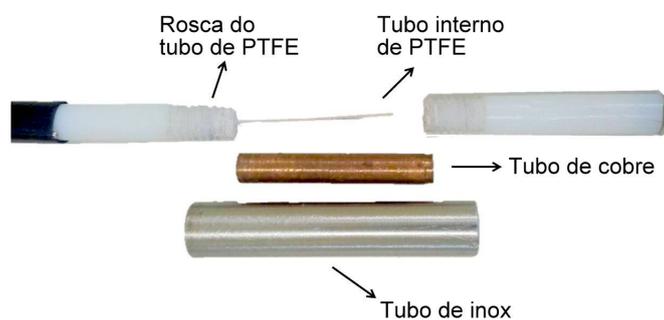


Figura 3.3: Elemento sensor desmontado.

A mesma estrutura do elemento sensor descrito na Figura 3.3 é utilizada para os protótipos de 1 e 4 metros. A Figura 3.4 apresenta o sensor de 1 metro com seis elementos sensores. Este sensor é idêntico ao sensor de 4 metros, exceto pelo comprimento. Para estes dois protótipos é acoplada uma âncora ao último elemento. A âncora previne, ou minimiza, o movimento do sensor devido a eventual movimentação do líquido dentro do tanque.

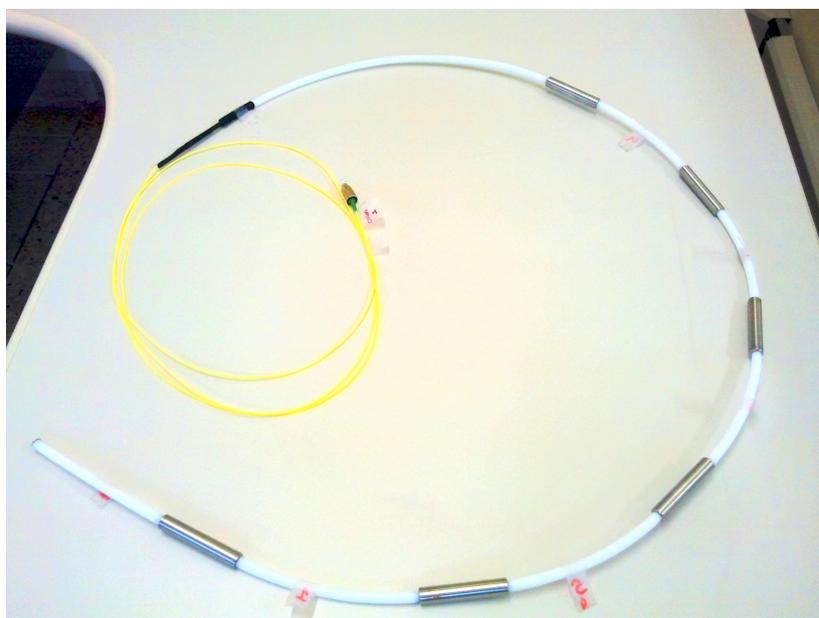


Figura 3.4: Protótipo de 1 metro de comprimento com 6 FBGs.

Conforme os requerimentos operacionais da indústria do petróleo, as medidas

de temperatura nos tanques de petróleo devem ser aferidas em três pontos, em diferentes alturas [3].

O sensor proposto permite o monitoramento do gradiente de temperatura dentro do tanque de petróleo em seis pontos, com alta resolução. Porém, a montagem permite facilmente aumentar o número de pontos de monitoração.

Observe que toda a fibra óptica que será imersa no petróleo é protegida pelos tubos de PTFE e pelo tubo de inox. Portanto, o PTFE é o elemento crítico em relação a proteção da fibra óptica, considerando-se a ação corrosiva do petróleo. O Capítulo 4 apresenta os testes de corrosão efetuados sobre o PTFE a fim de validar sua resistência quando imerso em petróleo.

Capítulo 4

Testes de Resistência a Corrosão em Petróleo de Alta Salinidade

O sensor em fibra óptica com seis FBGs foi projetado para monitorar a temperatura em tanque de petróleo. O sensor em fibra óptica deve, então, ser protegido por encapsulamento com material resistente a ação corrosiva do petróleo. Para este encapsulamento o PTFE foi o material escolhido por suas propriedades químicas, praticamente inerte.

Sensores em fibra óptica com FBGs são conhecidos e utilizados, portanto, a inovação deste trabalho é o uso do PTFE, adequando o sensor para uso em ambiente corrosivo.

Para validar o uso do PTFE em ambiente corrosivo, testes de corrosão em petróleo foram feitos através de uma análise por espectroscopia de infravermelho e por avaliação por microscopia eletrônica.

Os estudos de corrosão e difusão do PTFE foram realizados mergulhando-se amostras deste material em petróleo. Sabe-se que a alta salinidade de petróleo acelera o processo de corrosão dos materiais imersos no mesmo. A natural salinidade deste óleo solvente promove a degradação de materiais feitos de polímeros, como é mostrado em [41, 42].

O experimento para análise química foi feito deixando amostras de PTFE em contato constante com o petróleo durante várias semanas. A análise de corrosão química feita para este trabalho fornece informação confiável sobre a durabilidade do PTFE imerso no petróleo.

Ao contrário do processo usado para monitoramento eletroquímico dos metais, a ação da corrosão em polímeros deve ser feita do ponto de vista da degradação química, portanto a espectrometria infravermelha é a principal ferramenta usada nesta análise. A corrosão do PTFE ou sua degradação química aplicando a técnica de espectrometria infravermelha é explorada em [43, 44].

Em adição a espectroscopia de infravermelho (IR - *Infra Red*), a técnica de microscopia de varredura eletrônica permite avaliar as condições da superfície do material depois do contato com o óleo.

Processos biológicos também podem promover a degradação de polímeros. Resultados interessantes podem ser vistos em [45, 46].

Os parâmetros acidez e quantidade de água e sedimentos básicos são fatores importantes na caracterização de amostras de óleo. A amostra de óleo com alta salinidade apresentou água e sedimentos básicos menores que 0,05% e acidez de 0,31 mg KOH/g.

4.1 Análise por Espectroscopia de Infravermelho (IR)

A espectroscopia de infravermelho é muito eficiente nos estudos relacionados a estabilidade e degradação [43].

A análise é feita através da incidência de luz infravermelha no material analisado, observando o espectro refletido pelo mesmo. Este espectro apresenta bandas de absorção características, conforme compostos presentes no material observado [41]. Variações nestas bandas de absorção indicam mudança nos componentes químicos do material analisado, indicando, portanto, ocorrência de degradação.

Um tubo de PTFE foi exposto ao petróleo durante um período de noventa dias. Durante quarenta e dois dias, uma amostra foi retirada a cada sete dias para análise, resultando em seis amostras analisadas. Como nenhuma alteração foi percebida, durante outros quarenta e dois dias, uma amostra foi retirada a cada quatorze dias, resultando em mais três análises. Finalmente, após seis dias, mais uma amostra foi retirada para análise, completando assim noventa dias de experimento.

O intervalo de 90 dias foi convenientemente escolhido considerando que esta janela de tempo é usada no monitoramento químico em sistemas de armazenamento de óleo, principal referência nestes casos. Todo o procedimento foi rigorosamente repetido.

Cada amostra retirada para análise foi lavada com uma pequena quantidade de tolueno usado apenas para remover o excesso de óleo que ficou aderido ao PTFE. Em seguida a amostra foi lavada com grande quantidade de surfactante e água. A amostra foi, então, submetida a análise de espectroscopia infravermelha. A Figura 4.1 mostra a transmitância em função do comprimento de onda para amostras de PTFE conservadas imersas em petróleo por diferentes períodos de tempo.

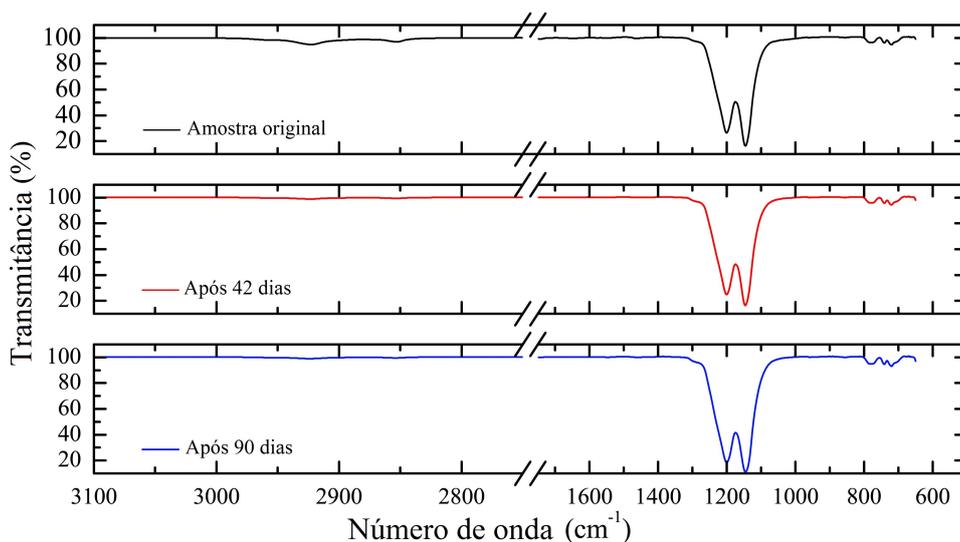


Figura 4.1: Espectroscopia infravermelha para amostras imersas em petróleo.

Conforme observado na Figura 4.1, a transmitância das amostras de PTFE não foram afetadas significativamente pela exposição ao óleo, mesmo para aquelas mantidas imersas no óleo por noventa dias.

Concluimos, portanto, pela análise de espectroscopia infravermelha, que o PTFE não sofre degradação quando exposto ao petróleo.

4.2 Avaliação por Microscopia Eletrônica

Deve-se notar que há a possibilidade do PTFE passar por um processo de dissolução quando em contato com o petróleo, imperceptível na análise de espectroscopia infravermelha. Nenhuma mudança nos dados IR pode ser observada se o PTFE é dissolvido no petróleo e não apresenta qualquer tipo de impregnação pelos componentes do óleo.

Com o objetivo de investigar processos de dissolução do PTFE no petróleo, amostras mantidas imersas em petróleo por noventa dias foram escaneadas por microscopia eletrônica para verificar alguma irregularidade em sua superfície. A presença de

lacunas no material, inexistentes antes da exposição ao petróleo, indicam dissolução do mesmo neste ambiente.

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um aparelho que fornece informações sobre a morfologia e identificação de elementos químicos em amostras sólidas. É muito utilizado nas áreas de biologia, odontologia, farmácia, engenharia, química, metalurgia, física, medicina e geologia. O MEV é um instrumento versátil útil na observação e análise de características microestruturais de objetos sólidos. Sua principal característica é a alta resolução que pode ser obtida quando as amostras são observadas, valores da ordem de 2 a 5 nanômetros são geralmente apresentados por instrumentos comerciais, enquanto instrumentos de pesquisa avançada são capazes de alcançar uma resolução melhor que 1 nm. Outra característica importante do MEV é a aparência tridimensional da imagem das amostras, resultado direto da grande profundidade de campo. Permite, também, o exame em pequenos aumentos e com grande profundidade de foco, o que é extremamente útil, pois a imagem eletrônica complementa a informação dada pela imagem óptica [47].

Os resultados obtidos do MEV para as amostras de PTFE são apresentados na Figura 4.2 e na Figura 4.3.

Uma amostra de PTFE que não esteve em contato com o óleo foi tomada como padrão e referência. Os resultados da microscopia eletrônica para a amostra de referência em diferentes resoluções, considerando magnificações de x250, x1000 e x2500, respectivamente são mostrados nas Figuras 4.2(a), (b) e (c).

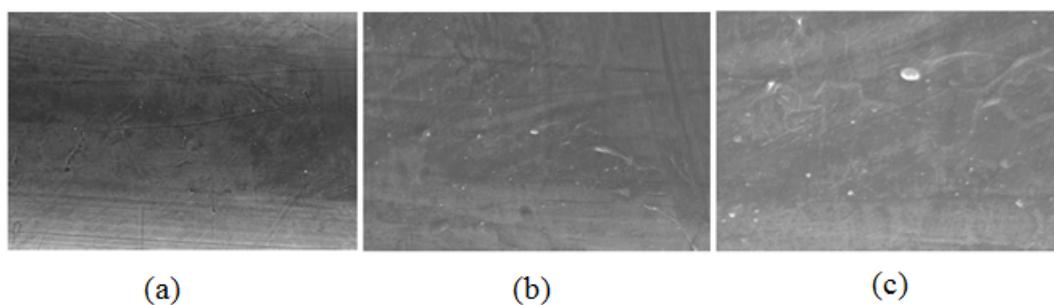


Figura 4.2: Espectroscopia infravermelha: referência.

As mesmas magnificações foram usadas para observar as amostras imersas em petróleo, conforme observado na Figura 4.3.

Todos os quadros apresentam texturas e aparências similares o que indica mesma banda de absorção. Isto é uma indicação de alta resistência apresentada pelo PTFE ao meio de exposição, considerando os diferentes períodos de exposição. A análise

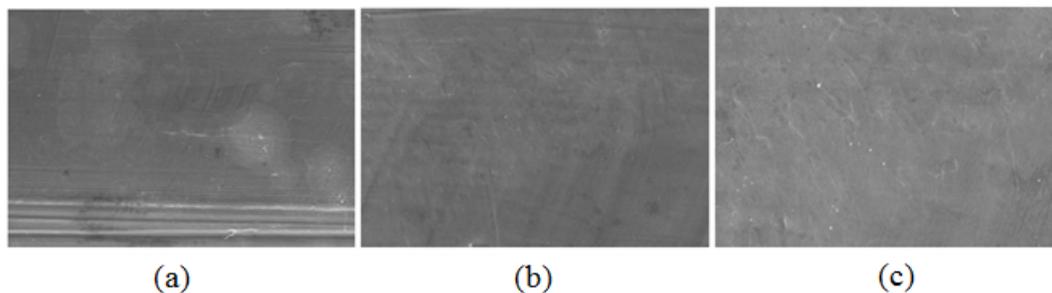


Figura 4.3: Espectroscopia infravermelha para amostras imersas em petróleo por 90 dias.

não mostrou qualquer evidência de degradação química sofrida pelo PTFE. Os mesmos resultados mostram a baixa capacidade de difusão química do PTFE, já que nenhuma outra banda do espectro foi observada nas amostras expostas ao óleo em relação a amostra de referência.

Observa-se claramente, independentemente da magnificação usada nas imagens, que a amostra deixada por noventa dias em contato com o óleo apresentou características idênticas a da amostra usada como referência. Pequenas diferenças morfológicas aparecem nas amostras, mas isto pode ser atribuído ao processo de fabricação dos tubos de PTFE.

Concluimos que o PTFE possui resistência a ação de corrosão e dissolução do petróleo, sendo adequado para proteção da fibra óptica utilizada no protótipo do sensor de temperatura proposto neste trabalho.

Em adição ao processo químico, alguns processos biológicos causam degradação de polímeros em contato com o óleo. Estudos recentes relatam a diversidade de sistemas biológicos presentes no petróleo Brasileiro [48], aumentando a complexidade e agravando as condições operacionais de medidas *in situ*.

Capítulo 5

Protótipo com Um Elemento Sensor

Neste trabalho foram desenvolvidos três protótipos para estudos. O primeiro contém somente uma FBG e é apresentado neste capítulo. O segundo e o terceiro, apresentados no Capítulo 6, contém seis FBGs, possuindo 1 e 4 metros de comprimento, respectivamente.

Os três protótipos foram construídos no Laboratório de Telecomunicações da Ufes (LabTel), porém as FBGs foram gravadas na Universidade de Aveiro (Portugal), mediante cooperação entre estas universidades.

Como citado anteriormente, o objetivo deste trabalho é a construção de um sensor de temperatura com múltiplas FBGs. Desenvolvemos, porém, um protótipo de apenas um elemento para estudar suas características e estender a análise para os protótipos de múltiplas FBGs. Isto foi necessário porque o forno de precisão usado nas medições apresenta dimensões que comporta somente o protótipo com uma FBG.

As montagens e experimentos foram realizados no Laboratório de Telecomunicações (LabTel) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFES e no Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Metodologias para Caracterização de Óleos Pesados (LabPetro), Ufes.

A descrição construtiva do protótipo de 1 FBG é apresentada no Capítulo 3.

O protótipo com uma FBG é mostrado na Figura 5.1.



Figura 5.1: Protótipo com 1 FBG.

Este capítulo está dividido em três seções. A Seção 5.1 apresenta a calibração do sensor de uma FBG. A Seção 5.2 apresenta a caracterização do tempo de resposta do sensor para definir o tipo de construção do protótipo.

5.1 Protótipo do sensor e calibração - 1 FBG

O sensor desenvolvido neste trabalho apresenta como inovação a adequação realizada para que possa ser imerso em petróleo sem afetar as características já conhecidas das FBGs. Todo o trabalho de caracterização e calibração das FBGs foi feito então para analisar se suas características seriam afetadas pela introdução de novos elementos e também para possibilitar a utilização do sensor para aferição de temperatura.

O estudo do protótipo de uma FBG utilizou o analisador de espectro óptico (OSA) para obter os dados do espectro óptico que foram processados no programa Matlab (Apêndice 1) para encontrar o comprimento de onda central refletido pela FBG.

A calibração do protótipo de uma FBG foi feita utilizando o OSA, um forno de calibração e um super termômetro. A Figura 5.2 mostra a montagem utilizada na caracterização do sensor. A saída óptica do OSA, modelo MS9740A, é uma fonte banda larga com comprimento de onda na faixa de 1530 nm a 1570 nm e tem uma potência máxima de 10 dBm. Esta saída óptica é conectada a um circulador que acopla a fonte banda larga ao sensor. O sinal refletido pela FBG retorna ao circulador

onde se propaga pela porta 3 do circulador e é acoplado na entrada do OSA para visualização do espectro óptico. A resolução selecionada no OSA é de 30 pm.

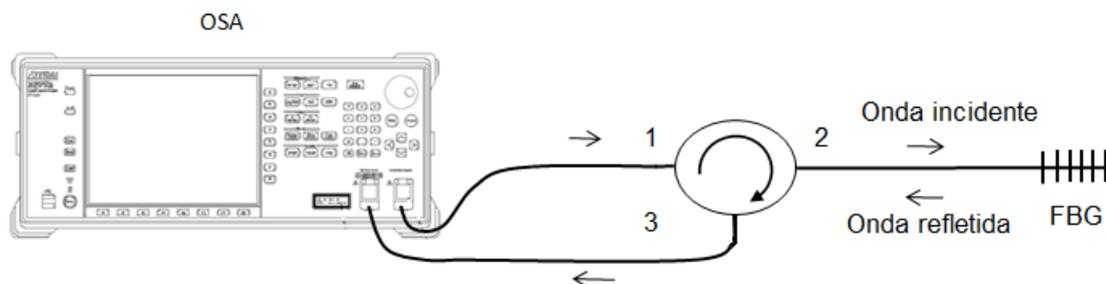


Figura 5.2: Montagem experimental.

Os dados contendo os pontos referentes ao comprimento de onda refletida e sua potência em mW são então salvos em arquivo de formato csv a cada medida para processamento e análise posterior.

O procedimento aplicado na caracterização do espectro do sensor de uma FBG para levantamento da variação do comprimento de onda refletido da grade em função da temperatura aplicada a mesma é mostrado no Apêndice 2.

O forno utilizado para caracterização foi o modelo T-25N Presys, sendo possível a medição de apenas um sensor com uma grade de Bragg devido a sua dimensão. Este forno é usado na indústria para calibração de medidores de temperatura.

A faixa com variação de temperatura é de 0 °C a 100 °C com passo de 15 °C. A referência de temperatura foi tomada através do super termômetro ST-501 Presys.

Os dados fornecidos pelo OSA são processados no programa Matlab para detectar os comprimentos de onda de cada medida, correspondente a uma determinada temperatura sendo possível então traçar uma curva de temperatura versus comprimento de onda.

Os comprimentos de onda de Bragg em função da temperatura são tratados no programa Matlab (Apêndice 1) para obter a curva de calibração do sensor. O programa desenvolvido no Matlab analisa o sinal de entrada e encontra o ponto de pico de potência. Em seguida são encontrados os dois valores de comprimentos de onda (laterais ao central) para os quais a potência do sinal está 3 dB abaixo da potência máxima. O comprimento de onda central é dado pela média dos dois comprimentos de onda laterais.

A Figura 5.3 mostra o resultado da caracterização do protótipo contendo uma FBG a partir da observação do espectro óptico em função da variação de temperatura.

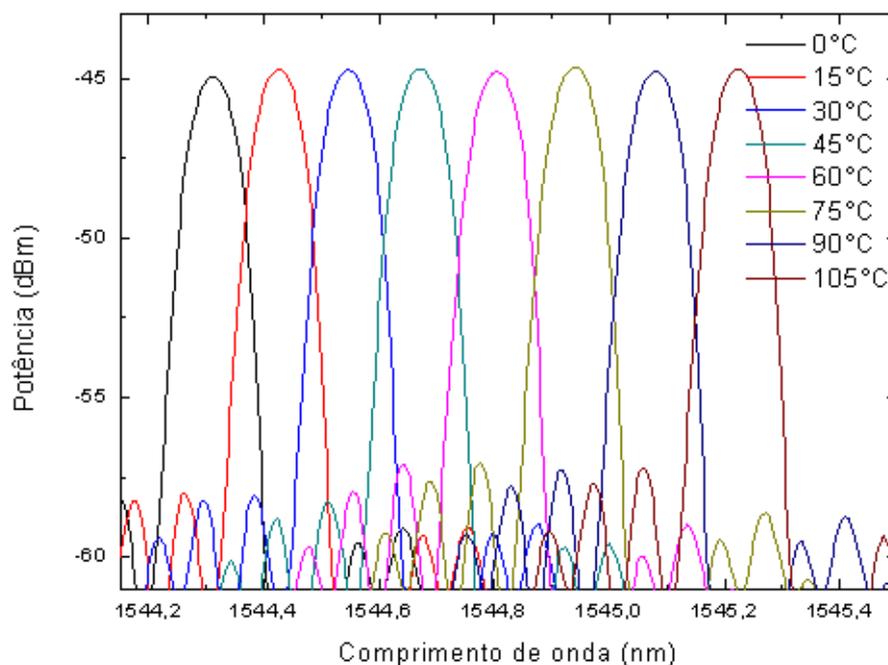


Figura 5.3: Caracterização do protótipo contendo uma FBG a partir da observação do espectro óptico em função da temperatura.

A Figura 5.4 mostra parâmetros da curva de calibração do sensor.

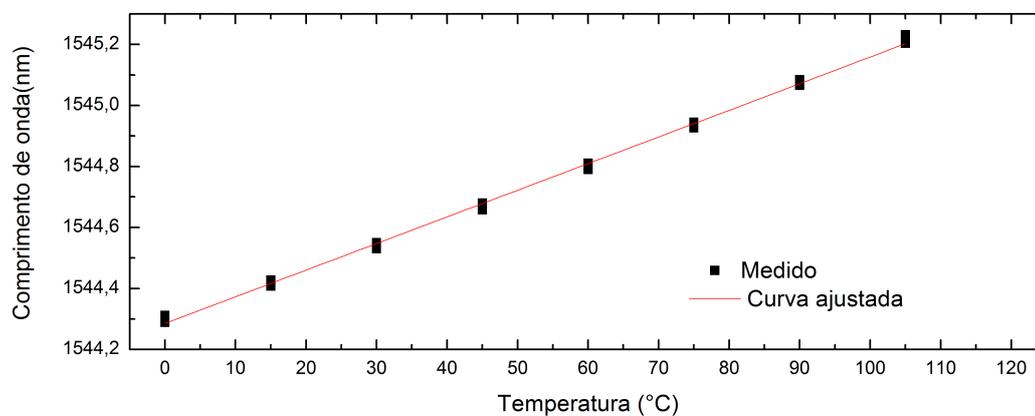


Figura 5.4: Curva de calibração do sensor.

A curva ajustada é dada por

$$\lambda = \alpha T + \lambda_c \quad (5.1)$$

onde:

λ é o comprimento de onda,

α é a sensibilidade da FBG, igual a $8,73 \pm 0,027$ pm/°C,

T é a temperatura medida em °C,

λ_c é o comprimento de onda em 0 °C, igual a $1544,29$ nm \pm $0,0017$ nm.

Foram feitas variações de temperatura crescentes e decrescentes. Pode-se observar que não há histerese na curva para a medição feita com estes equipamentos.

Os resultados obtidos permitem afirmar que as características da FBG não foram afetadas pelos elementos envolvidos na construção do protótipo.

5.2 Tempo de Resposta

O Capítulo 3 apresentou dois tipos de montagem possíveis para o elemento sensor. O diferencial entre estes dois modelos é a inserção de um tubo de cobre para aumentar a condutividade térmica entre a FBG e o meio externo. Nesta seção aferimos o tempo de resposta para estes dois modelos, para validar qual deles será utilizado na montagem final.

A montagem utilizada para aferir a velocidade de resposta é a mesma usada para a calibração do sensor, conforme mostrado na Figura 5.3. Aplicando-se uma variação de 10 °C na temperatura do forno, mediu-se a resposta do sensor no intervalo de 25 °C a 35 °C. Testou-se então a velocidade de resposta em três situações:

- A FBG exposta diretamente a fonte de calor, estando apenas com o PTFE de encapsulamento, que não interfere significativamente na medida.
- O sensor formado pela FBG, o tubo de inox, e os tubos de PTFE.
- O sensor formado pela FBG, tubo de inox com tubo interno de cobre, e os tubos de PTFE.

O sensor de referência é um PT100, monitorado pelo super termômetro. Os resultados são mostrados na Figura 5.5.

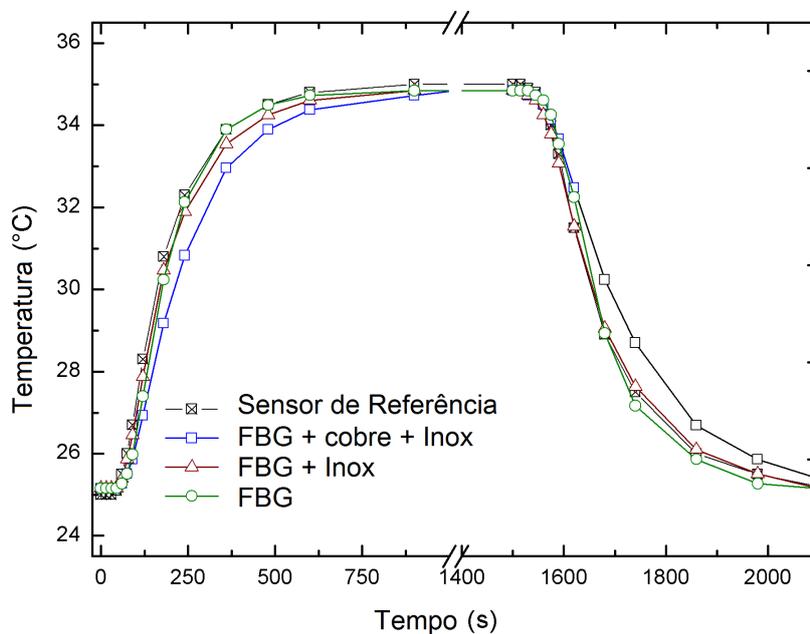


Figura 5.5: Tempo de resposta do protótipo.

Pode-se observar que a FBG em contato direto com o meio tem uma resposta bastante próxima a resposta do sensor de referência. A resposta do sensor com FBG e tubo de inox também se aproxima da resposta do sensor de referência, porém com pequeno atraso. Finalmente, o sensor com FBG, tubo de inox e tubo de cobre apresenta o maior atraso em resposta em relação as três montagens.

Após várias repetições das medidas conclui-se que, apesar da boa condutividade térmica do tubo de cobre, o tempo de resposta é maior devido a maior capacidade térmica adicionada ao sistema, isto é, gasta-se mais tempo para aquecimento e resfriamento devido a massa de cobre. Escolheu-se, portanto, para a montagem dos protótipos de 6 FBGs, o modelo sem os tubos internos de cobre. Os protótipos de 6 FBGs são apresentados no Capítulo 6.

Capítulo 6

Protótipos com Seis Elementos Sensores

Este capítulo apresenta a montagem do protótipo de um metro de comprimento com seis FBGs. Os resultados e conclusões feitos para este protótipo são aplicáveis ao sensor final de quatro metros de comprimento com seis FBGs para monitoração de temperatura em tanques de petróleo.

Para o estudo do sensor de seis FBGs foi adquirido o interrogador óptico modelo Sm125-500, fabricado pela Micron Optics. Como este interrogador fornece o comprimento de onda central com precisão de 1 pm, o processamento no programa Matlab foi dispensado.

Conforme manual deste aparelho, o uso em ambientes com risco de explosão é certificado pelo fabricante conforme padrões de segurança [35]. Este interrogador possui o laser de saída de classe 1, possuindo potência de saída (CW) entre 0,06 mW e 0,25 mW. O comprimento de onda de varredura varia de 1510 nm a 1590 nm. O Sm125 possui baixo ruído no laser de varredura e sua construção é baseada em tecnologia de filtro Fabry-Perot sintonizável de patente da Micron Optics. Neste tipo de interrogador, um sinal de pequena amplitude é aplicado em um filtro na intenção de varrer uma faixa espectral onde atua a grade de Bragg. A análise das características do sinal gerado quando o bloco detecção/processamento está em sintonia com a frequência do sinal recebido da grade permite determinar o comprimento de onda de Bragg. A Tabela 6.1 lista algumas características deste interrogador.

Tabela 6.1: Propriedades do interrogador Sm125

Propriedade	
Quantidade de canais	4, podendo chegar a 16 com módulo adicional
Frequência de varredura	2 Hz
Faixa de varredura	1510 - 1590 nm
Precisão	1 pm
Repetibilidade	0,5 pm a 1 Hz e 0,2 pm a 0,1 Hz
Faixa dinâmica	50 dB
Quantidade de FBG	80
Conector óptico	FC/APC
Interface de comunicação	Ethernet
Temperatura de operação	0 a 50°C
Dimensões	117 mm x 234 mm x 135 mm
Peso	2 Kg

Este capítulo está dividido em três seções. A Seção 6.1 apresenta a montagem e calibração do sensor de seis FBGs. A Seção 6.2 apresenta a calibração do sensor de seis FBGs em banho térmico. A Seção 6.3 apresenta estudo do tempo de resposta do sensor.

6.1 Protótipo do Sensor e Calibração - 6 FBGs

O sensor proposto para testes na planta foi construído com seis segmentos, cada um contendo uma grade de Bragg. Cada segmento foi encapsulado por um tubo externo de aço inox. Os tubos externos de aço inox foram interligados através de tubos de PTFE com sistema de roscas. Note que cada segmento é construído de forma idêntica ao protótipo de uma FBG apresentado no Capítulo 3.

O protótipo possui seis grades, igualmente espaçadas em 1 metro de fibra óptica. Uma das extremidades da fibra é conectorizada com conector FC/APC (*Angled Physical Contact*) e todo o restante inserido em um tubo fino de PTFE para aumento da resistência mecânica da fibra óptica contendo as FBGs. Este revestimento não interfere significativamente no processo de medição devido a sua pequena espessura.

Esta fibra óptica com revestimento de PTFE é inserida posteriormente em outro tubo de PTFE, de maior diâmetro que, além de oferecer resistência mecânica a todo o

conjunto, oferece proteção contra a ação corrosiva do petróleo. Além disto, os tubos de PTFE intercalados entre os tubos de inox, isto é, entre cada módulo sensor, isola termicamente estes elementos, para que não haja troca de calor entre eles afetando assim a aferição da temperatura. Observe que o tubo de PTFE cobre toda a fibra, exceto nos locais onde estão localizadas as FBGs, que são cobertas, então, pelos tubos de inox.

O efeito de temperatura no comprimento de onda refletido pela FBG, em uma condição onde não há deformação devido a outros fenômenos, é diretamente dependente da temperatura do meio, pela característica termo-óptico da sílica que contribui com 95% do efeito total [17]. A grade de Bragg pode atuar, então, como um medidor de temperatura de alta resolução, característica importante no setor de petróleo. Vale ressaltar que neste trabalho considera-se que o efeito de deformação deve-se somente à ação da temperatura sobre a fibra óptica porque ela está completamente solta e estática dentro do tubo de PTFE sem sofrer nenhum tipo de deformação. Além disso, o tempo esperado para estabilização térmica necessária a medição de temperatura é suficiente para a total acomodação da fibra. O fato de que o sensor é ancorado no fundo do tanque também contribui para evitar qualquer movimentação do sensor durante a medição.

A Figura 6.1 mostra um módulo do sensor desmontado em primeiro plano e outros dois módulos montados ao fundo.

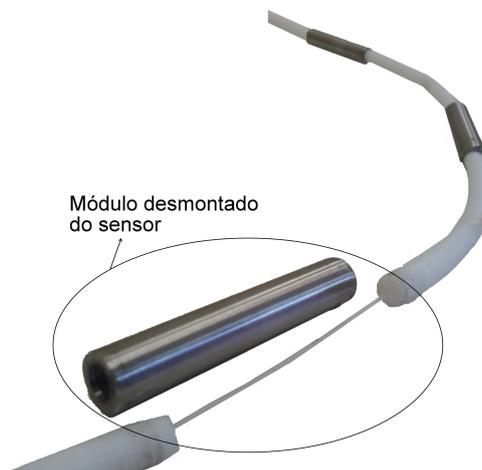


Figura 6.1: Segmento do sensor desmontado.

A Figura 6.2 apresenta o sensor de 1 m de comprimento, mostrando os seis tubos de inox que contém as FBGs e o cabo de fibra óptica conectorizado.

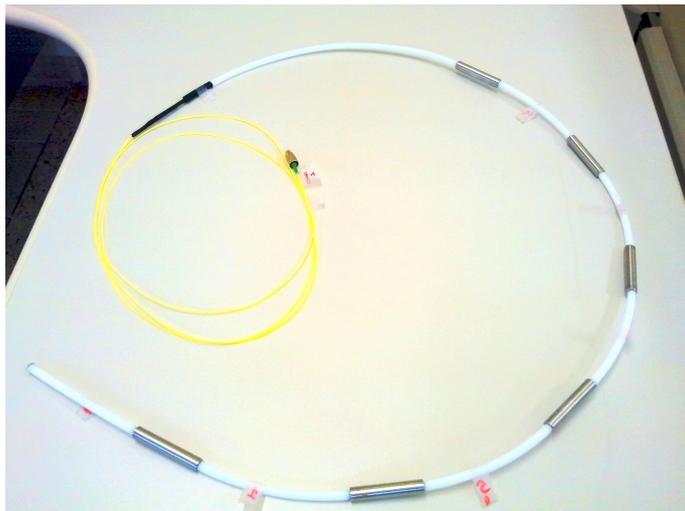


Figura 6.2: Sensor completo de 1m de comprimento.

Um cabeçote usado para sensores PT100 foi adaptado ao sensor de fibra óptica para permitir fixação na estrutura de tanques.

A Figura 6.3 mostra (a) o cabeçote de PT100 adaptado ao protótipo e (b) a âncora do protótipo.



Figura 6.3: (a) Cabeçote do protótipo; (b) âncora do protótipo.

O procedimento adotado para a caracterização do protótipo com uma FBG é adotado também para caracterização do protótipo com seis FBGs. Porém, para a caracterização do protótipo com seis FBGs utilizou-se o interrogador Sm125-500 (MicronOptics), uma estufa convencional para permitir a variação da temperatura para o sensor e um multímetro de precisão 2701 (Keithley) com termopar para aferir a temperatura.

O interrogador emite uma fonte de luz banda larga no canal em que está acoplado o protótipo. A onda refletida pela FBG é encaminhada ao interrogador para detecção pelo mesmo canal.

A Figura 6.4 mostra (a) a estufa utilizada para a variação de temperatura e (b) o multímetro de precisão contendo 6 dígitos.



Figura 6.4: (a) Estufa convencional; (b) multímetro de precisão.

O interrogador possui um circulador interno, dispensando o uso do circulador externo. A Figura 6.5 mostra o arranjo experimental, onde o sensor é conectado diretamente em uma das entradas do interrogador.

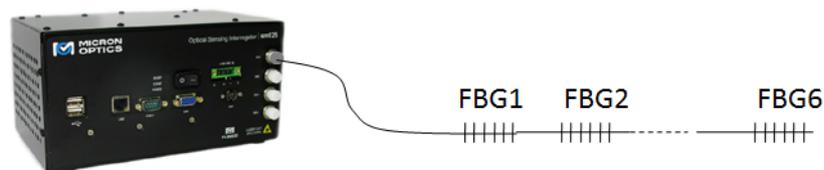


Figura 6.5: *Setup* para caracterização do espectro do sensor de seis FBGs.

Este interrogador possui uma interface de comunicação e operação (software *Moi-Enlight*) que permite realizar medições e explorar as funcionalidades deste equipamento.

O Apêndice 3 mostra as principais abas disponíveis no software que facilita as medições e aquisição dos dados. Os primeiros parâmetros a serem configurados estão na aba "Acquisition". Este software detecta o pico do espectro usando um limite relativo determinado de referência que foi selecionado em -8 dB (caixa "Rel. threshold"). Caso a potência de pico seja baixa de forma que o limite relativo de referência seja dominado por ruído, é utilizado então o limite absoluto de referência, cujo valor foi selecionado em -38 dB (caixa "threshold"). O Software possui ainda dois parâmetros para reconhecimento de picos no espectro óptico. Isto é feito para evitar que lóbulos laterais sejam reconhecidos como picos. O parâmetro "Width Level (dB)" indica que valor abaixo do pico será feita a comparação com a largura escolhida em "Width (nm)". Caso o pico encontrado tenha uma largura inferior a selecionada não será reconhecido. Os valores selecionados são "Width Level (dB)"

igual a 3 dB e "Width (nm)" igual a 0,01 nm o que permitiu o reconhecimento dos seis picos correspondentes às seis FBGs.

A Figura 6.6 apresenta o espectro óptico do sensor mostrado pelo interrogador.

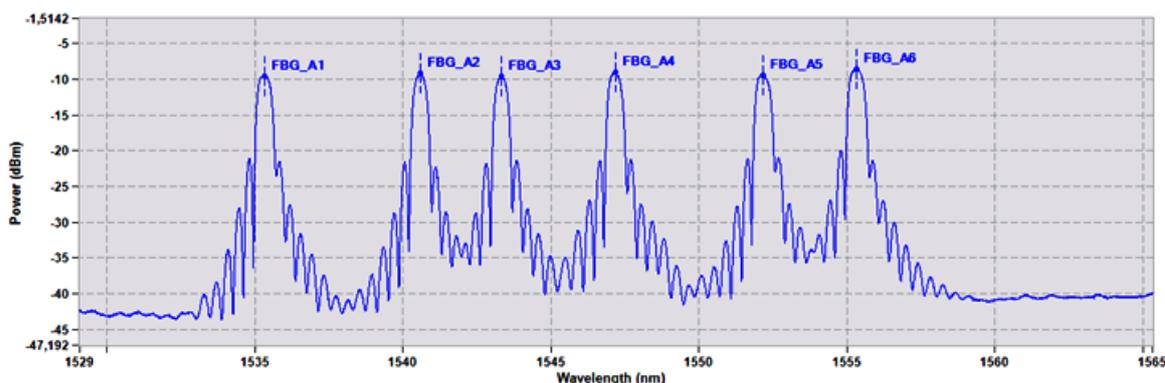


Figura 6.6: Moi-Enlight - espectro óptico do sensor.

A medição foi repetida quatro vezes. Em cada medição, a temperatura foi variada, de forma crescente e decrescente, em uma faixa de 20 °C a 100 °C, em passos de 10 °C. O comprimento de onda central de cada FBG foi registrado manualmente através do "MOI-Enlight" para cada ponto de temperatura. O valor final para o comprimento de onda por ponto medido de temperatura de cada FBG foi obtido então pelas médias das medições.

A Figura 6.7 apresenta o resultado da calibração em função da variação de temperatura para as seis FBG's multiplexadas neste sensor em fibra óptica. Pode-se observar que as leituras dos comprimentos de onda refletidas pelas FBGs são independentes, isto é, as faixas de leitura de comprimentos de onda das FBGs não se misturam.

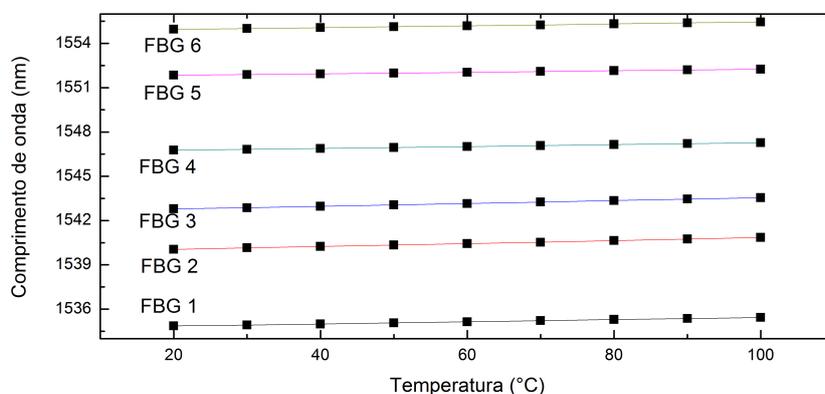


Figura 6.7: Calibração das seis FBGs.

A Figura 6.8 apresenta as curvas de calibração de cada FBG individualmente.

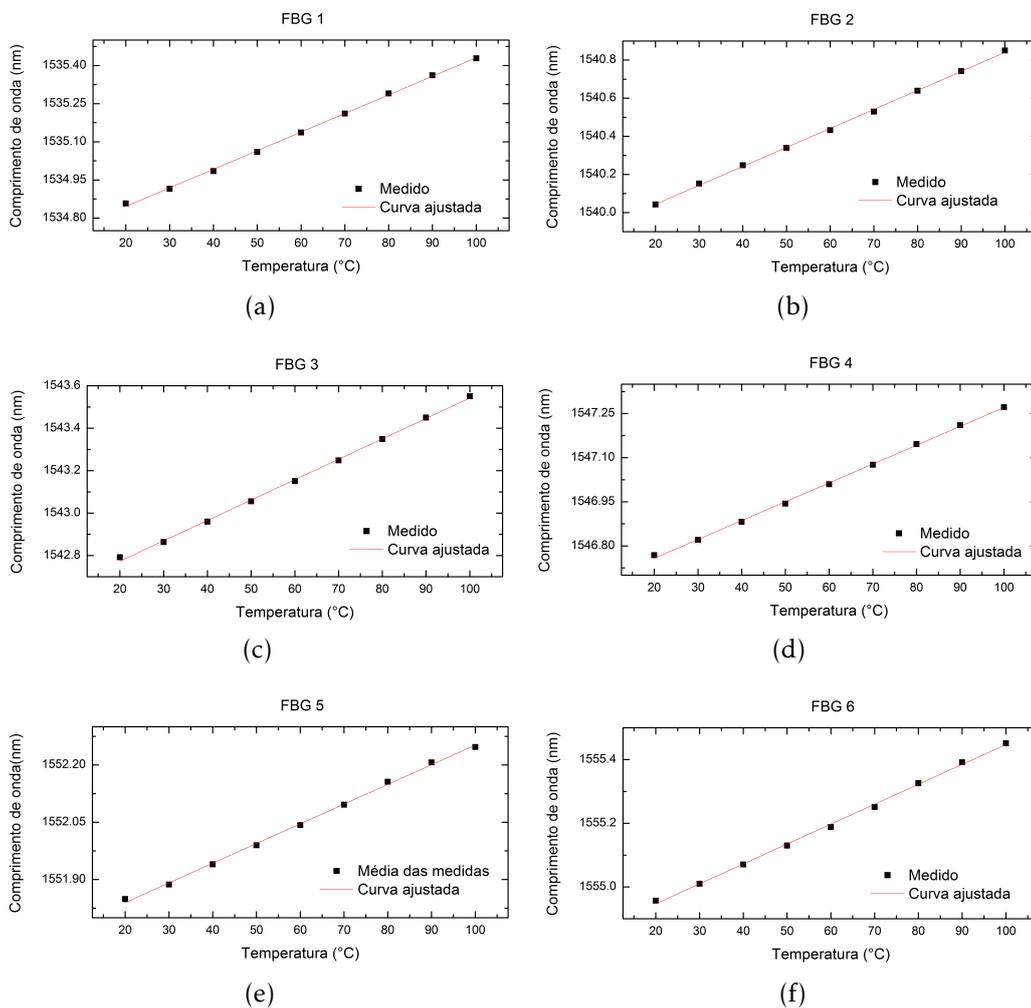


Figura 6.8: Calibração das 6 FBGs em estufa.

Pode-se observar que as seis FBGs possuem um comportamento linear com a variação da temperatura, porém com diferenças significativas na inclinação da curva, que é a sensibilidade de cada elemento sensor.

As diferenças observadas nos valores da sensibilidade térmica entre grades podem ser justificadas pela variação de temperatura em pontos diferentes no interior da estufa para cada temperatura selecionada.

Isto ocorre devido as correntes de convecção e principalmente porque a estufa não estabiliza à temperatura selecionada. Observou-se uma oscilação de ± 10 °C em torno da temperatura selecionada na estufa.

6.2 Calibração em Banho Térmico

Conforme visto na Seção 6.1, a estufa apresenta uma oscilação em torno do ponto da temperatura selecionado. Observa-se que a estufa não é um equipamento apropriado para calibração, sendo indicada para esterilização de material de laboratório.

Para obter melhor precisão na calibração do sensor de seis FBGs com a variação da temperatura, repetiu-se o procedimento em banho térmico. Utilizou-se o mesmo interrogador que foi usado na calibração em estufa. A montagem do experimento é a mesma a da Figura 6.6.

Devido as dimensões da cuba térmica os elementos sensores foram mergulhados de 3 em 3, conforme apresentado na Figura 6.9.



Figura 6.9: Calibração das seis FBGs.

A cuba térmica utilizada apresenta estabilidade térmica superior a da estufa, oscilando $\pm 0,5$ °C em torno da temperatura ajustada.

Conforme visto na seção 5.1, o módulo sensor não apresenta histerese. Então a temperatura foi variada apenas de forma crescente na faixa de 20 °C a 80°C em passos de 15°C. Para cada ponto de temperatura, os módulos sensores foram mergulhados duas vezes na cuba térmica, de 3 em 3.

A Figura 6.10 apresenta o resultado da calibração em função da variação de temperatura para as seis FBG's multiplexadas neste sensor em fibra óptica.

A Figura 6.11 apresenta as curvas de calibração de cada FBG individualmente.

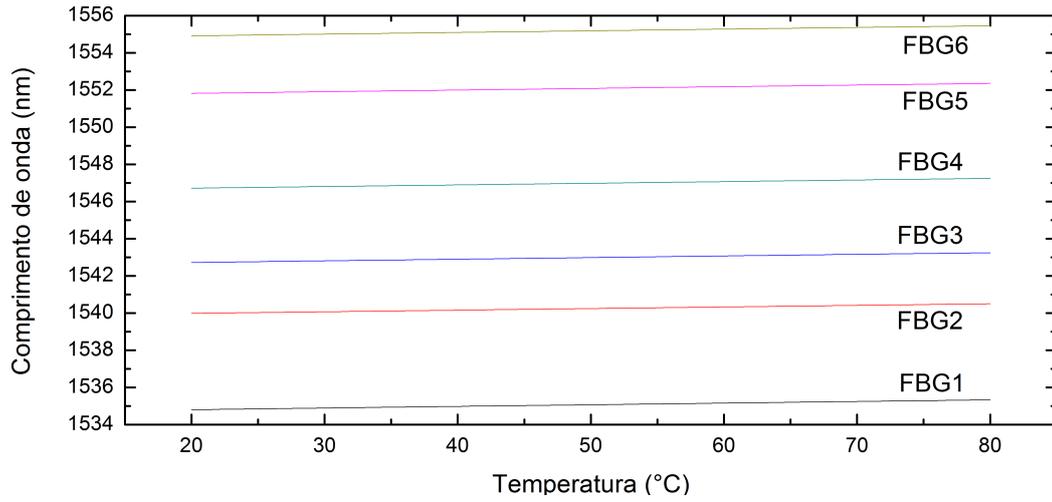


Figura 6.10: Calibração das seis FBGs.

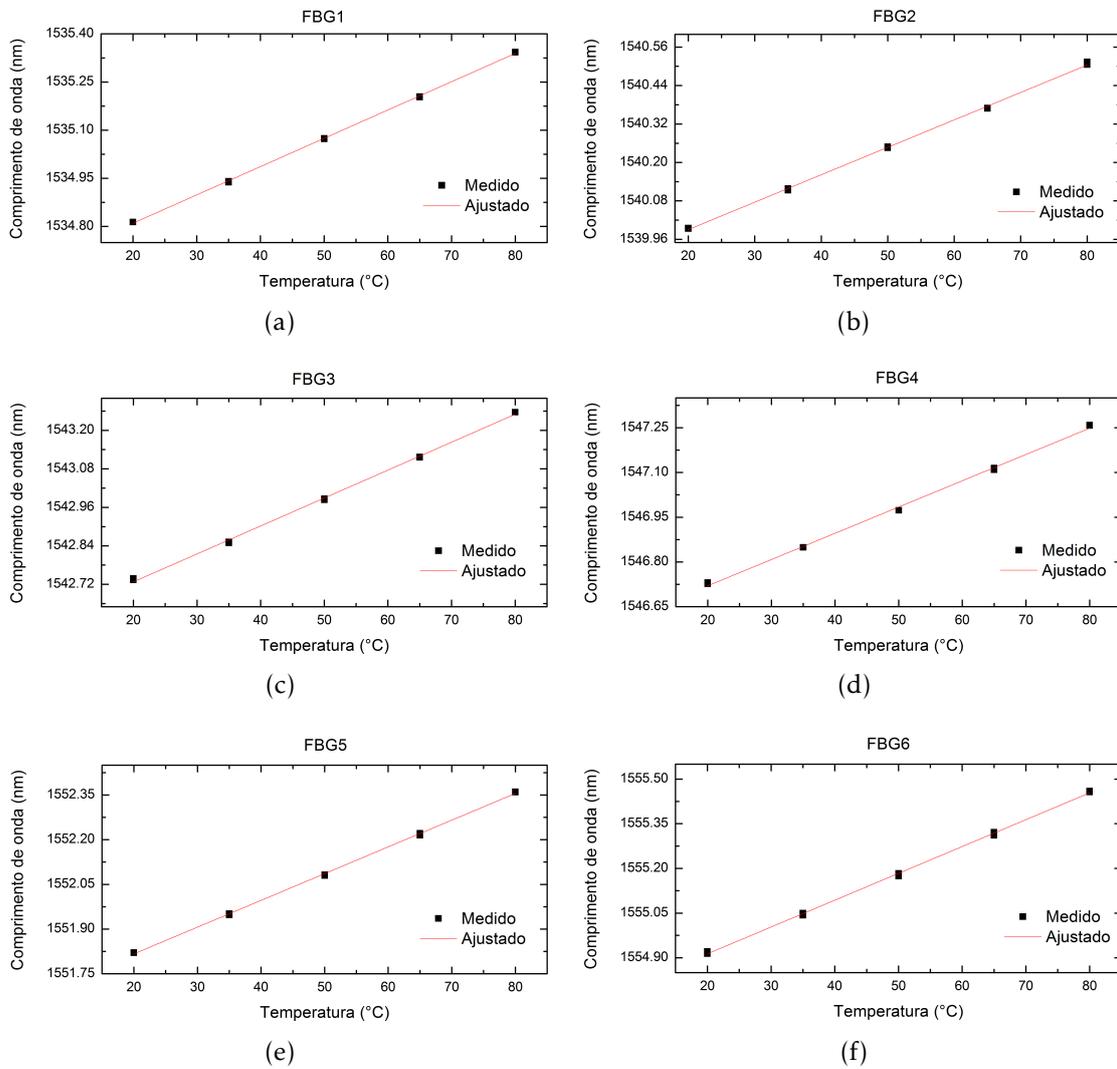


Figura 6.11: Calibração das 6 FBGs em banho térmico.

Pode-se observar que as seis FBGs mantêm um comportamento linear com a variação da temperatura possuindo inclinação da curva próxima uma das outras. A sensibilidade das FBGs 1, 2, 3, 4, 5 e 6 são, respectivamente, 8,82 pm/°C, 8,56 pm/°C, 8,71 pm/°C, 8,81 pm/°C, 8,98 pm/°C e 9,01 pm/°C.

A calibração de cada elemento sensor é dada pelas equações 6.1 a 6.6.

$$\lambda_1 = 0,00882xT + 1534,633 \quad (6.1)$$

$$\lambda_2 = 0,00856xT + 1538,819 \quad (6.2)$$

$$\lambda_3 = 0,00871xT + 1542,553 \quad (6.3)$$

$$\lambda_4 = 0,00881xT + 1546,543 \quad (6.4)$$

$$\lambda_5 = 0,00898xT + 1551,637 \quad (6.5)$$

$$\lambda_6 = 0,00901xT + 1554,732 \quad (6.6)$$

onde:

λ_n é o comprimento de onda em nm para a FBG n, onde n = 1, 2, 3, 4, 5 e 6 e

T é a temperatura em °C

Os parâmetros das equações 6.1 a 6.6 são usados para configurar o interrogador para obter respostas de medidas em temperatura (°C) em vez de comprimento de onda (nm).

6.3 Caracterização do Tempo de Resposta

O sensor desenvolvido neste trabalho é proposto como uma alternativa aos sensores convencionais na medição de temperatura em tanques de petróleo. Portanto, é importante verificar se o tempo de resposta do deste sensor é aceitável, tomando-se como referência o tempo de resposta de sensores convencionais.

A montagem utilizada para aferir o tempo de resposta é a mesma usada para a calibração do sensor em banho térmico.

A cuba térmica foi ajustada para uma temperatura de 40 °C e dois dos seis elementos sensores foram mergulhados. A temperatura ambiente é de 22 °C, o degrau de temperatura então é de 18 °C.

O interrogador está configurado para leitura do comprimento de onda, portanto da temperatura, a cada segundo, tanto para o aquecimento quanto para o esfriamento.

O esfriamento foi feito retirando o elemento sensor da cuba térmica e deixando-o em repouso no ambiente externo, isto porque não havia outro cuba térmica disponível para estabilização na temperatura inferior. Desta forma, o tempo de esfriamento é maior porque os meios de imersão são diferentes para ambos, água no aquecimento e ar no esfriamento. Consideramos o aquecimento para análise do tempo de resposta porque o meio de imersão tem a temperatura controlada.

A Figura 6.12 apresenta o resultado das medidas de temperatura.

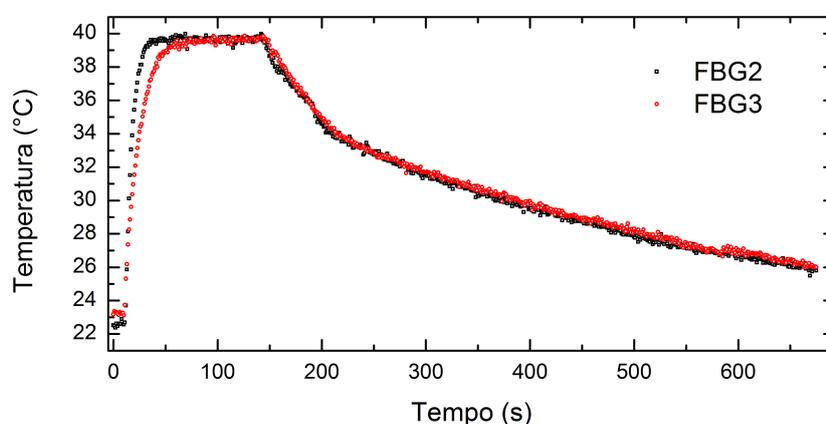


Figura 6.12: Tempo de resposta do protótipo.

A Figura 6.13 apresenta o resultado para o aquecimento dos elementos sensores para a faixa de tempo de 0 s a 80 s.

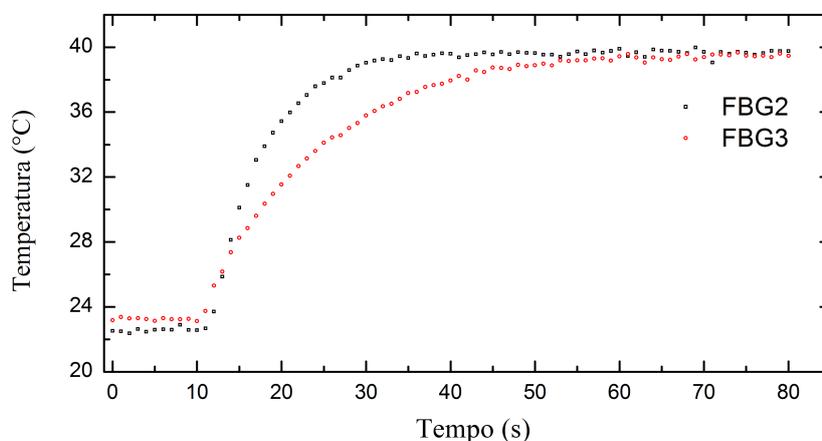


Figura 6.13: Detalhe sobre a medida do tempo de resposta do protótipo.

A diferença nos tempos de resposta das duas FBGs é atribuída a diferenças construtivas entre os elementos sensores. Os tubos de inox não são idênticos, por exemplo.

Um modelo matemático foi utilizado para comparar a curva esperada com o resultado obtido sendo utilizado como modelo a lei de resfriamento de Newton [49] dada por

$$T(t) = T_e + (T_0 - T_e)e^{-k \cdot (t-t_0)} \quad (6.7)$$

onde:

T_0 é a temperatura inicial no tubo de inox;

T_e é a temperatura final selecionada na cuba térmica;

k é a constante de proporcionalidade.

A equação 6.7 permite a modelagem da variação da temperatura em função de resposta do elemento sensor "FBG3".

O ajuste dos dados obtidos permite obter o valor de $k = 0,0732 \text{ s}^{-1} \pm 0,0008 \text{ s}^{-1}$. O valor de k indica que a constante de tempo do sensor é de $13,66 \text{ s} \pm 0,13 \text{ s}$.

A Figura 6.14 apresenta a curva obtida a partir do modelo matemático e os pontos de medida experimental. Observa-se um bom acordo entre as curvas medida e simulada.

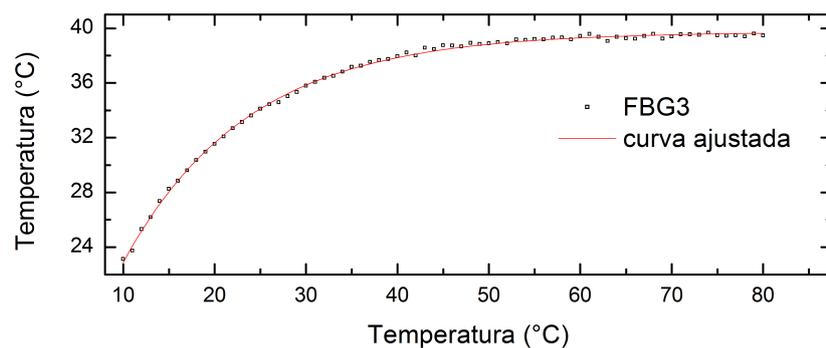


Figura 6.14: Comparação de dados experimentais com modelo matemático.

Concluimos então que o tempo de resposta do protótipo é aceitável, considerando-se que sensores comerciais, como o PT100 com tubo de proteção de 3,2 mm, possuem tempo de resposta de dezenas de segundos [50].

6.4 Teste de Resistência Mecânica e Estanqueidade do Protótipo

Dois segmentos do sensor foram construídos adicionalmente, sem a fibra óptica, para testes de tração mecânica, conforme mostra a Figura 6.15.

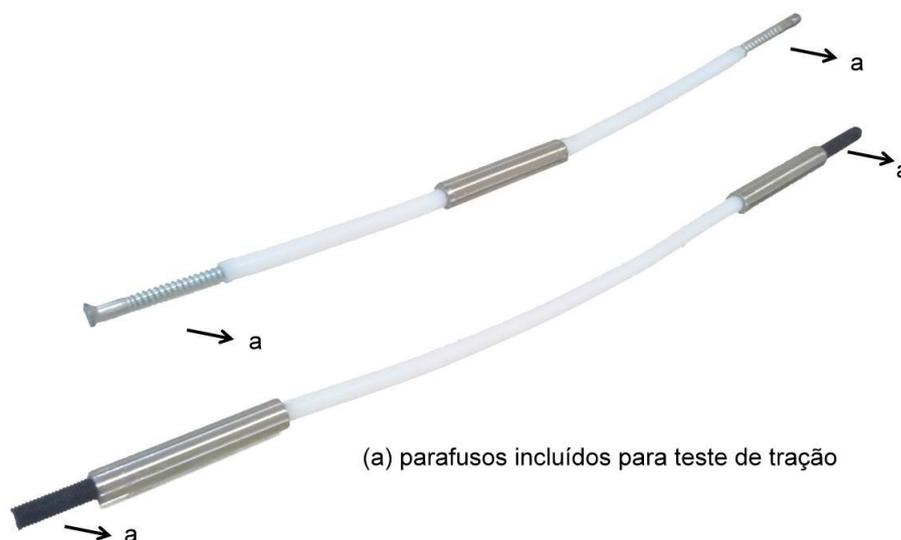


Figura 6.15: Segmentos do sensor para serem tracionados.

Os parafusos nas pontas foram adicionados, conforme indicado na Figura 6.15, para adaptação do segmento na máquina de tração. Este teste é necessário porque é preciso ancorar o sensor para evitar deslocamentos laterais causados por fluxo do líquido dentro do tanque e para garantir que o sensor esteja esticado para aferição nos pontos pré-determinados ao longo da fibra de 1 m, onde estão gravadas as FBGs.

A âncora é constituída por um cilindro de inox de 2,0 kg presa a parte inferior do sensor de seis FBGs.

O interesse é estimar a resistência mecânica do conjunto, tendo como ponto crítico a conexão feita entre o PTFE e o tubo de aço inox. Esta conexão é feita através de roscas, externa no PTFE e interna no tubo de inox.

O teste de tração foi realizado em uma máquina de teste universal AMSLER que tem uma escala mínima de 5 toneladas com precisão de 10 kg, mostrada na Figura 6.16.

A Figura 6.17 mostra um dos segmentos sendo tracionado pela máquina.

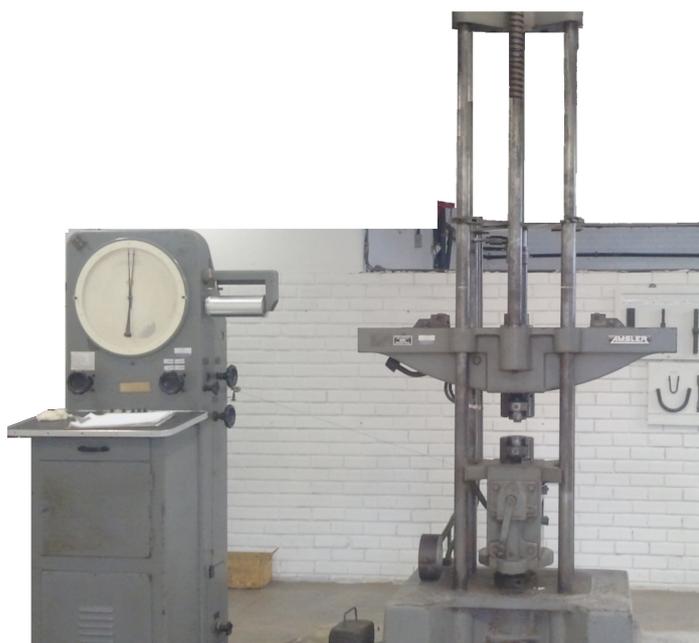


Figura 6.16: Máquina de tração AMSLER.



Figura 6.17: Segmento do sensor sendo tracionado.

Este teste indicou uma resistência de aproximadamente 20 kg e o rompimento ocorreu exatamente na rosca feita na conexão PTFE/inox, conforme esperado. Esta resistência é mais do que suficiente, visto que a âncora tem um peso de 2 kg.

Além do teste de tração, outro teste também necessário foi o de estanqueidade. Este teste foi realizado através de uma mangueira de 25 cm de comprimento com uma das pontas fechadas. A mangueira, contendo um módulo do sensor sem fibra,

foi conectada a uma torneira. Este módulo do sensor foi preenchido com papel em seu interior para verificação de entrada de água. A vedação nos tubos de PTFE foi feita com parafusos em suas extremidades e com pasta de vedação na junção PTFE-tubo de inox, conforme ilustrado na Figura 6.18.

O conjunto foi deixado por 20 minutos conectado a torneira aberta, sob uma pressão de coluna d'água de aproximadamente 4 metros. Após este período verificou-se que não houve entrada de água no interior do PTFE e do tubo de inox.

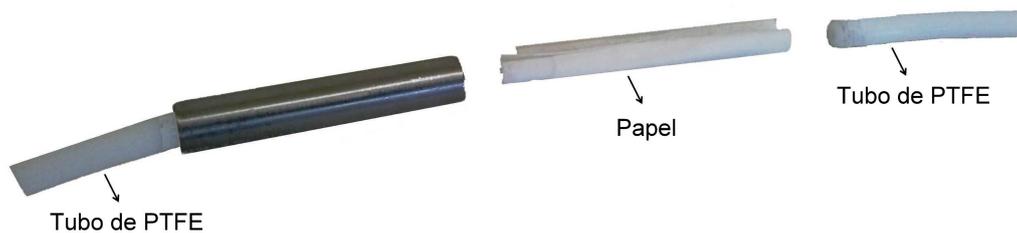


Figura 6.18: Montagem para teste de estanqueidade.

Este teste mostra que o sensor é adequado para uso imerso em líquidos dado a sua vedação.

6.5 Protótipo do Sensor de quatro metros com 6 FBGs

O protótipo do sensor final de quatro metros de comprimento segue o mesmo processo de montagem e calibração do protótipo de 1 metro de comprimento, variando apenas o espaçamento entre os elementos sensores e sua sensibilidade.

A calibração deste protótipo foi feita em banho térmico, conforme procedimento descrito na Seção 6.2, portanto o mesmo procedimento feito para o protótipo de 1 metro de comprimento.

A calibração de cada elemento sensor é dada pelas equações 6.8 a 6.13.

$$\lambda_1 = 0,00882xT + 1537,161 \quad (6.8)$$

$$\lambda_2 = 0,00883xT + 1541,380 \quad (6.9)$$

$$\lambda_3 = 0,00880xT + 1544,822 \quad (6.10)$$

$$\lambda_4 = 0,00861xT + 1548,298 \quad (6.11)$$

$$\lambda_5 = 0,00793xT + 1552,976 \quad (6.12)$$

$$\lambda_6 = 0,00795xT + 1556,977 \quad (6.13)$$

onde:

λ_n é o comprimento de onda em nm para a FBG n, onde n = 1, 2, 3, 4, 5 e 6 e

T é a temperatura em °C.

Capítulo 7

Testes Piloto na Planta

Este capítulo apresenta o teste piloto do sensor, feito na planta, para validar se o mesmo é capaz de monitorar perfis de temperatura de forma dinâmica.

O interrogador Sm125 foi configurado com os parâmetros de calibração de cada elemento sensor, dados pelas equações 6.1 a 6.6 do Capítulo 6. O sensor de seis FBGs foi usado então na medição de temperatura em tanque de água como teste piloto. Este tanque de água faz parte da planta descrita na Seção 7.1.

7.1 Descrição da Planta Automatizada

A planta automatizada usada no teste piloto do sensor de seis FBGs é apresentada na Figura 7.1.



Figura 7.1: Foto da planta utilizada no teste piloto do sensor com seis FBGs.

Pode-se observar que a planta possui dois tanques. Estes tanques possuem diâmetro de 40 cm, altura de 80 cm e volume de 100 l.

É possível controlar o fluxo de líquido entre os tanques, assim como o nível em cada um deles, através de sistema supervisorio.

O aquecimento do líquido é feito no tanque superior através de uma resistência de 6000 W, localizada na parte inferior do tanque. A temperatura do líquido é obtida através de um termopar situado na parte inferior do tanque.

Até a conclusão deste trabalho, não havia ainda sistema automatizado para controle de temperatura assim como não havia sistema de homogeneização do líquido, estando os mesmo em fase de desenvolvimento.

7.2 Resultados Obtidos nas Medições de Temperatura

O sensor de seis FBGs tem um comprimento de 1 m e o tanque altura de 80 cm. Então, o sensor foi inserido no tanque de forma que os dois primeiros elementos sensores (FBG1 e FBG2) ficaram mais próximos do fundo do tanque.

Como o tanque não possui elemento elétrico de homogeneização do líquido, para manter um padrão no experimento, adotamos o aquecimento do líquido sem homogeneização manual. O único fluxo existente no líquido é devido as correntes de convecção.

Na falta de um sistema automatizado de controle de temperatura, adotamos o procedimento de energizar a resistência de aquecimento e monitorar a temperatura até um valor máximo de 60 °C, indicada no interrogador. Quando o líquido atingiu 60 °C desligou-se a alimentação da resistência e aguardou-se o resfriamento por um período de 6 horas.

A Figura 7.2 apresenta os resultados obtidos nesta medição.

O padrão de temperatura apresentado mostra que o fundo do tanque sofreu pequeno aquecimento. Isto se deve ao fato do aquecedor estar localizado cerca de 10 cm acima do fundo do tanque, na posição horizontal.

A camada de água próxima a superfície também está em uma temperatura ligeiramente inferior a da camada abaixo. Isto ocorre devido a troca de calor na superfície do líquido.

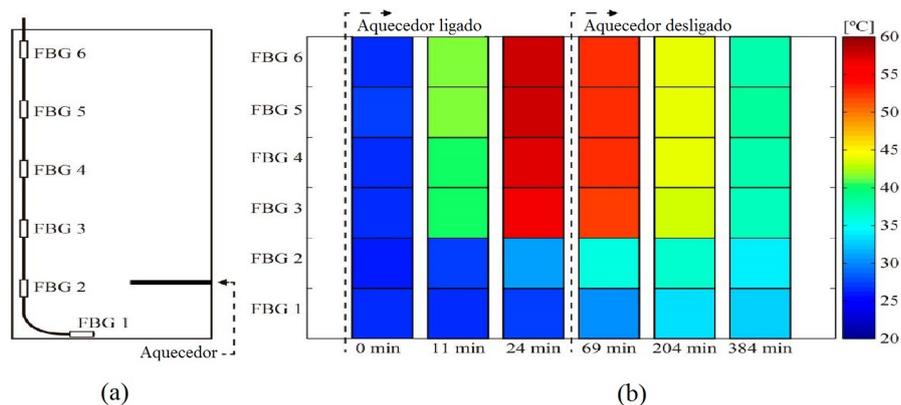


Figura 7.2: Teste piloto das seis FBGs com: (a) ilustração do sensor de 1 metro no tanque da planta piloto e (b) mapeamento das temperaturas medidas com o sensor com 6 FBGs em função do tempo.

Para uma melhor perspectiva da dinâmica de aquecimento do fluido, a Figura 7.3 mostra o perfil de temperatura na água no decorrer do tempo. A FBG1 está localizada abaixo do elemento de aquecimento no reservatório de água, portanto passa por menor incremento de temperatura do que as outras FBG2, que estão acima do elemento de aquecimento. Isto ocorre devido as correntes de convecção presentes na água durante o aquecimento.

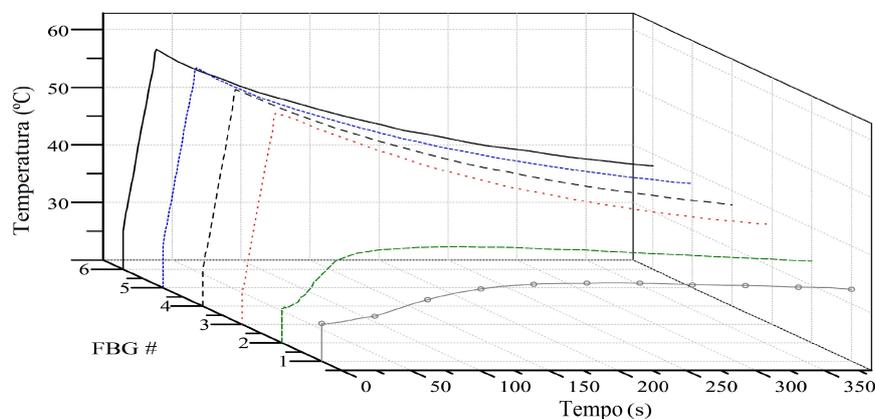


Figura 7.3: Evolução da temperatura durante aquecimento e resfriamento do sensor quasi-distribuído.

O padrão de temperatura mostrado na Figura 7.3 possui características esperadas para o aquecimento e esfriamento de um líquido em um reservatório, que é determinado de acordo com a dinâmica das correntes de convecção em líquidos.

Este sensor tem mostrado, portanto, capacidade para monitoramento dinâmico de perfis de temperatura.

Capítulo 8

Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou um sensor de temperatura com seis grades de Bragg para operar imerso em tanques de petróleo. Múltiplas sessões de FBG foram inscritas em um segmento de fibra óptica monomodo e inseridas em tubos de aço inox para melhorar a condutividade térmica e proteger da ação corrosiva do ambiente.

O sensor contém seis FBGs, com sensibilidade térmica média de 8,82 pm/°C. O interrogador possui precisão de 1pm, portanto, o sensor apresenta precisão de $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

O sensor opera com sub miliwatt de potência óptica sendo, portanto, completamente aplicável em ambientes industriais onde há risco de explosões.

A inovação deste trabalho consiste na adequação feita no sensor, para possibilitar medições em tanque de petróleo. Esta adequação foi feita pelo uso do polímero PTFE como proteção do sistema contra a ação corrosiva do petróleo.

O polímero (PTFE) escolhido para proteção da FBG é inerte, oferecendo resistência a corrosão e excelente resistência mecânica sendo aplicável em ambientes com altas temperaturas. Isto o torna o sensor adequado para imersão em petróleo.

Nenhuma degradação foi detectada por espectroscopia infravermelha e microscopia por escaneamento eletrônico para amostras imersas em petróleo durante 90 dias.

Finalmente, em teste piloto, o sensor mostrou grande potencial para uso em contato direto com o petróleo para monitoração de perfis de temperatura de forma dinâmica.

Trabalhos futuros poderão combinar distribuição espacial e espectral para uma melhor montagem do sensor com diferentes materiais de encapsulamento na intenção de melhorar o seu tempo de resposta.

Este trabalho contribuiu para o projeto de sensores, fruto de convênio entre a Petrobrás e a Ufes. Este trabalho foi financiado no âmbito do projeto PVE/CNPq407093/2013-3, UID/EEE/50008/2013, pela FCT/MEC e parcialmente financiado pela Petrobras SA, CNPq, e FAPES. Como resultado da montagem e caracterização dos protótipos dos sensores de temperatura em fibra óptica foi publicado o seguinte artigo:

R. S. Marques, A. R. Prado, P. F. C. Antunes, P. S. B. Andre, M. R. N. Ribeiro, A. F. Neto, and M. J. Pontes, "Corrosion resistant FBG-based quasi-distributed sensor for crude oil tank dynamic temperature profile monitoring," *Sensors*, pp. 30693–30703, 2015.

Bibliografia

- [1] K. Kashe, A. Chapoy, K. Bell, and B. Tohidi, "Viscosity of binary and multicomponent hydrocarbon fluids at high pressure and high temperature conditions : Measurements and predictions," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, 112, 153-160.
- [2] A. Werner, J. C. Hemptinne, F. Behar, E. Behar, and C. Boned, "A new viscosity model for petroleum fluids with high asphaltenes content.," *Fluid Phase Equilibria* 1998, 147, 319-341.
- [3] I. 4266-1/02, "Petroleum and liquid petroleum products - measurement of level and temperature in storage tanks by automatic methods - part 1: Measurement of level in atmospheric tanks," 2002 18p.
- [4] Lyons, W. C.; Plisga, G. S. *In Standard Handbook of Petroleum e Natural Gas Engineering*. 2nd ed, Elsevier, Inc.: Burlington, MA, USA, 2005; Chapter 7.
- [5] S. Bagavathiappan, B. B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, and T. Jayakumar, "Infrared physics & technology infrared thermography for condition monitoring – a review," *Infrared Physics and Technology*. 2013, 60, 35-55.
- [6] V. D. Blank, S. G. Buga, V. S. Bormashov, S. A. Terentiev, M. S. Kuznetsov, S. A. Nosukhin, and E. G. Pel, "Pulse thermometers based on synthetic single crystal boron-doped diamonds," *Diamond and Related Materials*, 2007, 16, 970-973.
- [7] V. F. Mitin, P. C. McDonald, F. Pavese, N. S. Boltovets, V. V. Kholevchuk, I. Y. Nemish, V. V. Basanets, V. K. Dugaev, P. V. Sorokin, R. V. Konakova, E. F. Venger, and E. V. Mitin, "Ge-on-gaas film resistance thermometers for cryogenic applications," *Cryogenics*, 2007, 474-482. 47.
- [8] "The art of tank gauging. enraf publication. available online on: http://enraf.ru/userfiles/file/4416650_rev4.pdf(accessed on 26 july 2015),"

- [9] F. Cimerman, B. Blagojevic, and I. Bajsic, "Identification of the dynamic properties of temperature-sensors in natural and petroleum gas," *Sensors and Actuators A: Physical* 2002, 96, 1-13.
- [10] K. Rupnik and I. Bajsi, "Identification and prediction of the dynamic properties of resistance temperature sensors," *Sensors and Actuators A: Physical* 2013, 197, 69-75.
- [11] X. Bao and L. Chen, "Recent progress in distributed fiber optic sensors," *Review. Sensors2012*, no. 8601-8639.
- [12] K. O. Hill and G. Meltz, "Fiber bragg grating technology fundamentals and overview," *J. Light. Techn.*, no. 1263-1276, 1997.
- [13] P. Domingues, M. F. and Antunes, N. Alberto, A. R. Frias, A. R. Bastos, R. A. S. Ferreira, and P. S. André, "Enhanced sensitivity high temperature optical fiber fpi sensor created with the catastrophic fuse effect," *Microw. Opt. Techn. Lett.* 2015, 57, 972-974.
- [14] M. Zaynetdinov, E. M. See, B. Geist, G. Ciovati, H. D. Robinson, and V. Kochergin, "A fiber bragg grating temperature sensor for 2 – 400 k," *IEEE Sensors J.* 2014, 15, 1908-1912.
- [15] P. Antunes, H. Rodrigues, R. Travanca, L. Ferreira, H. Varum, and P. André, "Structural health monitoring of different geometry structures with optical fiber sensors," *Photonic Sensors* 2012, 2, 357-365.
- [16] G. T. Kanellos, G. Papaioannou, D. Tsiokos, G. Nianios, and N. Pleros, "Two dimensional polymer-embedded quasi-distributed fbg pressure sensor for biomedical applications," *Opt. Exp.* 2010, 18, 1, 179-186.
- [17] *Handbook of optical fibre sensing technology*. López-Higuera, J.M. Wiley, March 2002.
- [18] S. J. Mihailov, "Fiber bragg grating sensors for harsh environments," *Sensors* 2012, 12, 1898-1918.
- [19] J. Huang, Z. Zhou, X. Wen, and D. Zhang, "A diaphragm-type fiber bragg grating pressure sensor with temperature compensation," *Measurement*, Apr. 2013, 46, 1041-1046.
- [20] G. P. Agrawal, *Non linear fiber optics*. Elsevier, fifth ed., 2013.

- [21] S. N. M. Ghazali, N. a. M. Yahya, and S. Sulaiman, "Characterization of fiber bragg grating as optical temperature sensor for pipeline water leakage inspection," *2013 IEEE 3rd International Conference on System Engineering and Technology*, pp. 173–177, Aug. 2013.
- [22] R. Kashyap, "Photosensitive optical fibers: Devices and applications." *Opt. Fiber Technology*, 1, 17-34, 1994.
- [23] C. L. Barbosa, R. C. Rabelo, O. Lisbôa, H. T. Hattori, and R. M. Cazo, "Fabricação e caracterização de grades de bragg através do uso da técnica da máscara de fase," *Revista Telecomunicações*, Vol. 3, 2, Dezembro 2000.
- [24] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method.," *Opt. Lett.* 14, 15, 823-825, 1989.
- [25] P. J. Lemaire, R. M. Atkins, V. Mizrahi, and W. a. Reed, "High pressure h2 loading as a technique for acheiving ultrahigh uv photosensitivity and thermal sensivity in geo2 doped optical fibres," *Elect. Lett.* 29, 13, 1191-1193, 1993.
- [26] J. R. Dunphy, M. Gerald, L. F. P, and W. W. Morey, "Multi-function, distributed optical fibre sensor for composite cure and response monitoring," *Proc. Spie* 1370, Dec. 1990.
- [27] J. D. Prohaska, E. Snitzer, B. Chen, M. H. Maher, E. G. Nawy, and W. W. Morey, "Fibre optic bragg grating strain sensor in large scale concrete structures," *Proc. Spie* 1798, March 26,1993.
- [28] Y. J. Rao, "Recent progress in applications of in fibre bragg grating sensors," Elsevier, *Optics and Lasers in Engineering* 31 (1999) 297-324.
- [29] M. Leblanc, S. Y. Huang, M. Ohn, R. M. Measures, A. Guemes, and A. Othonos, "Distributed strain measurement based on a fiber bragg grating and its reflection spectrum analysis.," *Opt. Lett.* 21, 17, 1405-1407, 1996.
- [30] H. J. Kalinowski, "Approximation methods of optical spectra : an analysis of the application of constructive rbf networks in fiber optic sensing," *Learning*, 3, 2, 60-71, 2005.
- [31] A. S. Paterno, L. V. R. Arruda, and H. j. Kalinowski, "Approximation methods of optical spectra: an analysis of the application of constructive rbf networks in fiber optic sensing," *Revista da Sociedade Brasileira de Redes Neurais (SBRN)*, vol. 3, pp. 61–70, 2005.

- [32] R. M. Cazo, "Sistemas interrogadores de sensores baseados em grade de bragg," *Tese de mestrado/Divisão de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica-ITA, São José dos Campos*, 2001.
- [33] S. R. K. Morikawa, A. S. Ribeiro, R. D. Regazzi, L. C. G. Valente, and A. M. B. Braga, "Triaxial bragg grating accelerometer," *2002 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest. OFS 2002(Cat. No.02EX533)*, pp. 95–98, 2002.
- [34] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele, "Fiber grating sensors," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1442–1463, 1997.
- [35] *Manual pdf. Disponível em www.micronoptics.com/download/manual-pdf (acessado em 15 de Outubro de 2015).*
- [36] Y. J. Rao, D. a. Jackson, L. Zhang, and I. Bennion, "Strain sensing of modern composite materials with a spatial/wavelength-division multiplexed fiber grating network," *Optics letters*, vol. 21, no. 9, pp. 683–685, 1996.
- [37] D. Yang, L. Du, Z. Xu, Y. Jiang, J. Xu, M. Wang, Y. Bai, and H. Wang, "Magnetic field sensing based on tilted fiber bragg grating coated with nanoparticle magnetic fluid," *Applied Physics Letters* 104, 061903 (2014).
- [38] M. A. Ismail, N. Tamchek, M. R. A. Hassan, K. D. Dambul, J. Selvaraj, N. A. Rahim, R. Sandoghchi, and F. R. M. Adikan, "A fiber bragg grating bimetal temperature sensor for solar panel inverters," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 11, pp. 8665–73, Jan. 2011.
- [39] C.-L. Zhao, L. Qi, S. Zhang, Y. Jin, and S. Jin, "Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on a partial cone-shaped fbg," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 178, pp. 96–100, Mar. 2013.
- [40] U. Tiwari, K. Thyagarajan, and M. R. Shenoy, "Strain and temperature discrimination technique by use of a fbg written in erbium doped fiber," *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 125, pp. 235–237, Jan. 2014.
- [41] J. Lamontagne, F. Durrieu, J. P. Planche, V. Mouillet, and J. Kister, "Direct and continuous methodological approach to study the ageing of fossil organic material by infrared microspectrometry imaging : application to polymer modified bitumen," *Analytica Chimica Acta* 2001,444, 241-250.

- [42] X. Lu and U. Isacsson, "Chemical and rheological evaluation of ageing properties of sbs polymer modified bitumens," *Fuel* 1998, 77, 961-972.
- [43] L. Odochian, C. Moldoveanu, A. Mihaela, and G. Carja, "Thermochemical contributions to the thermal degradation mechanism under nitrogen atmosphere of ptfe by tg-ftir analysis . influence of the additive nature," *Thermochemical Acta*, vol. 526, no. 1-2, pp. 205–212, 2011.
- [44] A. Basile, G. Cacciola, C. Colella, J. F. L. Mercadante, M. Pansini, C. N. R. Istituto, V. S. S. Lucia, and S. Lucia, "Thermal conductivity of natural zeolite-ptfe composites," *Heat Recovery Systems & Clip* Vol. 12, No. 6, pp. 497-503, 1992.
- [45] M. Conte, B. Pinedo, and A. Igartua, "Role of crystallinity on wear behavior of ptfe composites," *Wear*, vol. 307, no. 1-2, pp. 81–86, 2013.
- [46] S. Pantaroto, D. Vasconcellos, E. Crespim, G. Feitosa, D. Barbosa, K. Christina, M. Simioni, E. Vaz, A. Jocelyne, V. Maia, and D. Oliveira, "Organic geochemistry isolation , biodegradation ability and molecular detection of hydrocarbon degrading bacteria in petroleum samples from a brazilian offshore basin," *Organic Geochemistry*, vol. 40, no. 5, pp. 574–588, 2009.
- [47] B. A. Dedavid, C. I. Gomes, and G. Machado, *Microscopia eletrônica de varredura : aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores*. EDIPUCRS, 2007. 60 p.
- [48] T. R. Silva, L. C. L. Verde, E. V. S. Neto, and V. M. Oliveira, "International biodeterioration & biodegradation diversity analyses of microbial communities in petroleum samples from brazilian oil fields," *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 81, pp. 57–70, 2013.
- [49] W. Pereira, W. Precker, C. M. D. P. S. Silva, D. P. S. Diogo, and D. P. S. Cleiton, "Medida de calor específico e lei de resfriamento de newton: Um refinamento na análise dos dados experimentais," *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Vol. 25, no. 4, Dezembro, 2003.
- [50] 5622 Fast Response Platinum Resistance Thermometers (PRTs). Available online on <http://us.flukecal.com/products/temperature-calibration/probessensors/5622-fast-response-platinum-resistance-thermometers-p> (accessed on 26 July 2015).

Apêndice 1

Programa Matlab: Tratamento de dados fornecidos pelo OSA para determinar comprimento de onda central. Os resultados são importados no programa Origin para gerar os gráficos.

Módulo 1:

```
clear all
format long g
% entrada do arquivo de dados gerados no OSA
load medidas_prototipo_V1.txt ;
med = medidas_prototipo_V1;
% matriz com valores de temperatura
load medidas_prototipo_V1_temperat.txt ;
temp = medidas_prototipo_V1_temperat;
% executar programa para encontrar comprimento de onda dos picos
[medida_media,lambd_fit,lambd_central,taxa] = CALC_MEDIDA(med,temp);
% lambd_central contém os comprimentos de onda central para ser tratado no Orange
% para gerar gráficos
```

Módulo 2:

```
function [medida_media,lambd_fit,lambd_central,taxa] = CALC_MEDIDA(med,temp)
% temp: vetor de temperatura. ex.: temp=[20 30 40 50 60 70 60 50 40 30 20]
% med: matriz de medidas contendo dados do OSA, onde:
% - primeira coluna: comprimento de onda em nm
% - as demais colunas: ganho. uma coluna para cada medida. O valor
% fornecido pelo OSA é em mW.
```

% ESTE PROGRAMA CALCULA O VALOR MÉDIO DO COMPRIMENTO DE ONDA DAS MEDIÇÕES

% Definições:

```
% medição:ex.: 1 medição = 8 pontos de temperatura de subida e
% 8 pontos de temperatura de descida. Cada ponto
% corresponde a um arquivo do OSA contendo 1001 pontos
% do gráfico dBm x lambda.( o valor salvo é em mW
%
% medida: 1 medida = um gráfico do OSA para uma temperatura
```

% específica. Um ponto de temperatura.

medidas = length(temp) % total de pontos de subida e descida de temperatura
faixa_temper = *medidas*/2; % quantidade de pontos de excursão da temperatura. Só de subida, por exemplo.

% LEITURA DOS DADOS

% esta matriz contém vetor de lambda na primeira coluna

% e vetores de medidas nas demais colunas.

% Considerar que todas as medições utilizam a mesma

% configuração do OSA, gerando, portanto, o mesmo

% vetor de lambda para todas as medidas.

% matriz de medidas

medicoes = (length(*med*(1,:)) - 1)/*medidas*

% DETERMINAÇÃO DOS VALOR DE LAMBDA PARA CADA MEDIDA

% Comprimento de onda central da faixa de 3 dB

% GERA MATRIZ "*lambd_central*(MEDIÇÃO,MEDIDA,SENSOR)"

for *aux1* = 1:*medicoes* % total de medições

aux3 = 1;

for *aux2* = (2+(*aux1*-1)**faixa_temper**2) : (*faixa_temper*+1+(*aux1*-1)**faixa_temper**

2) % intervalo de medidas de subida de temperatura

cont = 0; % para varredura de todos os pontos fornecidos pelo OSA para uma medição

meddB = 10*log10(*med*(:*aux2*)); % passa valores de mW para dB

cont_sensor = 1; % para detectar quantidade de sensores (picos).

for *t*=1:length(*med*(:,1))-2 % varrer cada coluna

if *meddB*(*t*) > max(real(*meddB*))-3 & *cont* ==0 % Quando entra na faixa de 3 dB

cont=*cont*+1;

wave_in = *med*(*t*,1);

end

if *meddB*(*t*) < max(real(*meddB*))-3 & *meddB*(*t*+1) < max(real(*meddB*))-3 & *meddB*(*t*+2) < max(real(*meddB*))-3 & *cont* ==1 % quando sair da faixa de 3 dB

wave_out = *med*(*t*,1);

lambd_central(*aux1*,*aux3*,*cont_sensor*)= (*wave_out* + *wave_in*)/2;

```

lambda_central(aux1,aux3,cont_sensor) = lambda_central(aux1,aux3,cont_sensor); %
Comprimento de onda central da faixa de 3 dB
cont_sensor = cont_sensor + 1; % sensor detectado
cont=0;
end
end
aux3=aux3+1;
end
% fim subida

% inicio descida
for aux2 = (faixa_temper + 2 + (aux1 - 1) * faixa_temper * 2) : (2 * faixa_temper + 1 +
(aux1 - 1) * faixa_temper * 2) % medidas de descida de temperatura
cont = 0;
cont_sensor = 1;
meddB = 10*log10(med(:,aux2));
for t=1:length(med(:,1))-2
if meddB(t) > max(real(meddB))-3 & cont ==0 % Quando entra na faixa de 3 dB
cont=cont+1;
wave_in = med(t,1);
end

if meddB(t) < max(real(meddB))-3 & meddB(t+1) < max(real(meddB))-3 & meddB(t+2)
< max(real(meddB))-3 & cont ==1 % quando sai da faixa de 3 dB
wave_out = med(t,1);
lambda_central(aux1,aux3,cont_sensor)= (wave_out + wave_in)/2;
lambda_central(aux1,aux3,cont_sensor) = lambda_central(aux1,aux3,cont_sensor); %
Comprimento de onda central da faixa de 3 dB
cont_sensor = cont_sensor+1;
cont=0;
end
end
aux3=aux3+1;
end
end

% calcula medida média para cada ponto de temperatura por sensor

```

```

%
if medicoes == 1
    medida_media = lambda_central;
erro=0;
else
for aux=1:cont_sensor - 1 % calcula média ente as medidas, ponto a ponto
    medida_medial(:,aux) = sum(lambda_central(:,aux),1);
end
    medida_medial = medida_medial ./ medicoes; % medidas médias das subidas e des-
    cidas

    for aux=1:cont_sensor - 1 % calcula máximo e mínimo de cada medida, para cal-
    cular erro
for cont=1:faixa_temper
    medida_media(:,cont,aux) = (medida_medial(:,cont,aux) + medida_medial(:,2*faixa_temper-
    cont + 1,aux))/2;
end
end
end

% Gráfico com de temperatura x Lambda Central

figure(1);
hold
lambda2=min(med(:,1)):(max(med(:,1))-min(med(:,1)))/(length(med(:,1))-1):max(med(:,1));
plot(lambda2,10*log10(med(:,2)));
plot(lambda2,10*log10(med(:,faixa_temper+1)),'r');

    taxa = (max(medida_media)-min(medida_media))/((max(temp)-min(temp)));

% fit
% aproximação para uma reta
for aux=1:cont_sensor - 1
x=temp(1:faixa_temper)';
y=medida_media(:,aux);
p=polyfit(x,y,1);
    lambda_fit(:,aux) = polyval(p,temp(1 : faixa_temper)); % pontos para plotar

```

end

```
    % plota graficos de lambda por temperatura para cada sensor
figure (2);
hold;
for aux=1:cont_sensor - 1
plot(temp(1:faixa_temper),lambd_fit(:,aux),'-*')
xlabel('Temperature[°C]')
ylabel('Central wavelength [nm]')
title('Temperature variation ')
end
```

Apêndice 2

O procedimento aplicado na caracterização do espectro do sensor de uma FBG.

- 1 - Ligar o analisador de espectro óptico (OSA). Manter a saída óptica desligada.
- 2 - Conectar o circulador à saída óptica do OSA, ao sensor a ser aferido e à entrada óptica do OSA, conforme Figura 5.2. Observar a ordem das conexões do circulador.
- 3 - Ligar a saída óptica do OSA. Ajustar o parâmetro VBW do OSA para 100Hz e escala para medidas em dB. O nível de referência e o span devem ser ajustados para que se tenha o sinal centralizado na tela do OSA.
- 4 - Inserir o sensor no forno, tendo cuidado com as curvas feitas na fibra óptica.
- 5 - Inserir sensor eletrônico de referência no forno para aferição da temperatura. Este sensor deverá estar o mais próximo possível do sensor a ser caracterizado.
- 6 - Ligar o forno e ajustar a temperatura inicial. Se o forno permitir esfriamento, ajustar temperatura inicial para 0°C, se não, iniciar aferição com valor da temperatura ambiente.
- 7 - Aguardar a estabilização da temperatura. Ativar função single no OSA.
- 8 - Anotar no formulário o valor da temperatura indicada no forno, a temperatura indicada no termômetro externo e o comprimento de onda central refletido fornecido pelo OSA. Os pontos do gráfico gerados no OSA deverão ser salvos em formato CSV, bem como a tela gerada no mesmo.
- 9 - Ativar função Repeat no OSA.
- 10 - Ajustar a temperatura do forno para o próximo ponto e repetir os itens 7,8 e 9. Deve-se ajustar a temperatura para leitura a cada 10°C até ao máximo de 100°C. Caso o forno não permita esfriamento, o ponto seguinte ao inicial será em 30°C.
- 11 - Ajustar a temperatura para 105°C. Aguardar estabilização.
- 12 - Ajustar a temperatura para 100°C. Repetir itens 7,8 e 9.
- 13 - Ajustar a temperatura para próximo ponto (esfriamento). Repetir itens 7,8 e 9. Os pontos de ajuste da temperatura deverão ser os mesmos feitos no item 8, até atingir o ponto inicial de medida.
- 14 - Desligar o forno.

15 - Obter os dados gravados no OSA via rede.

16 - Desligar o OSA.

17 - Desfazer a montagem guardando todo o material em local apropriado.

Apêndice 3

Tela do software MOI-Enlight: aba *Acquisition*

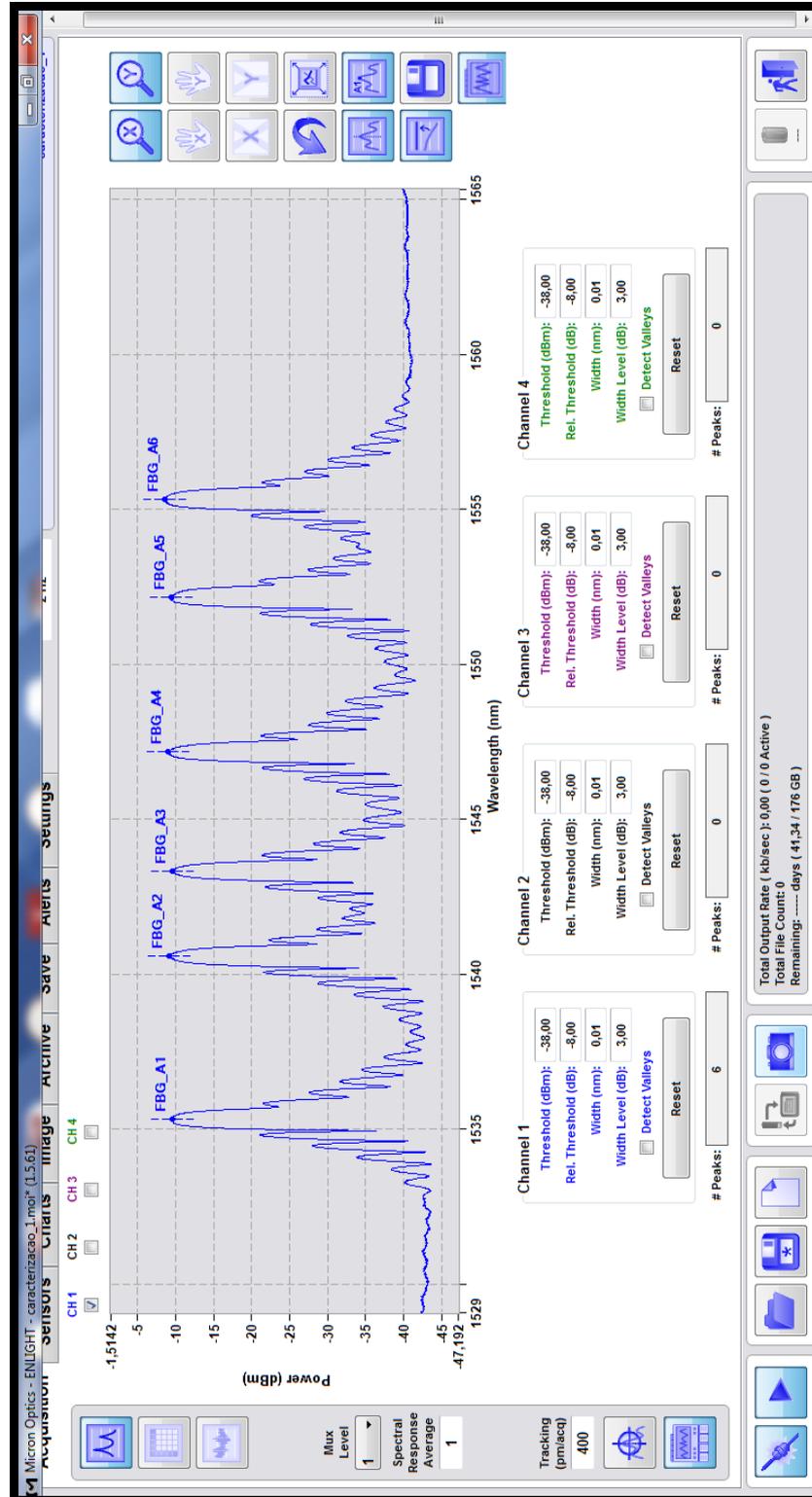


Figura 1: Tela MOI-Enlight: aba *Acquisition*.

Tela do software MOI-Enlight: aba *Sensors*

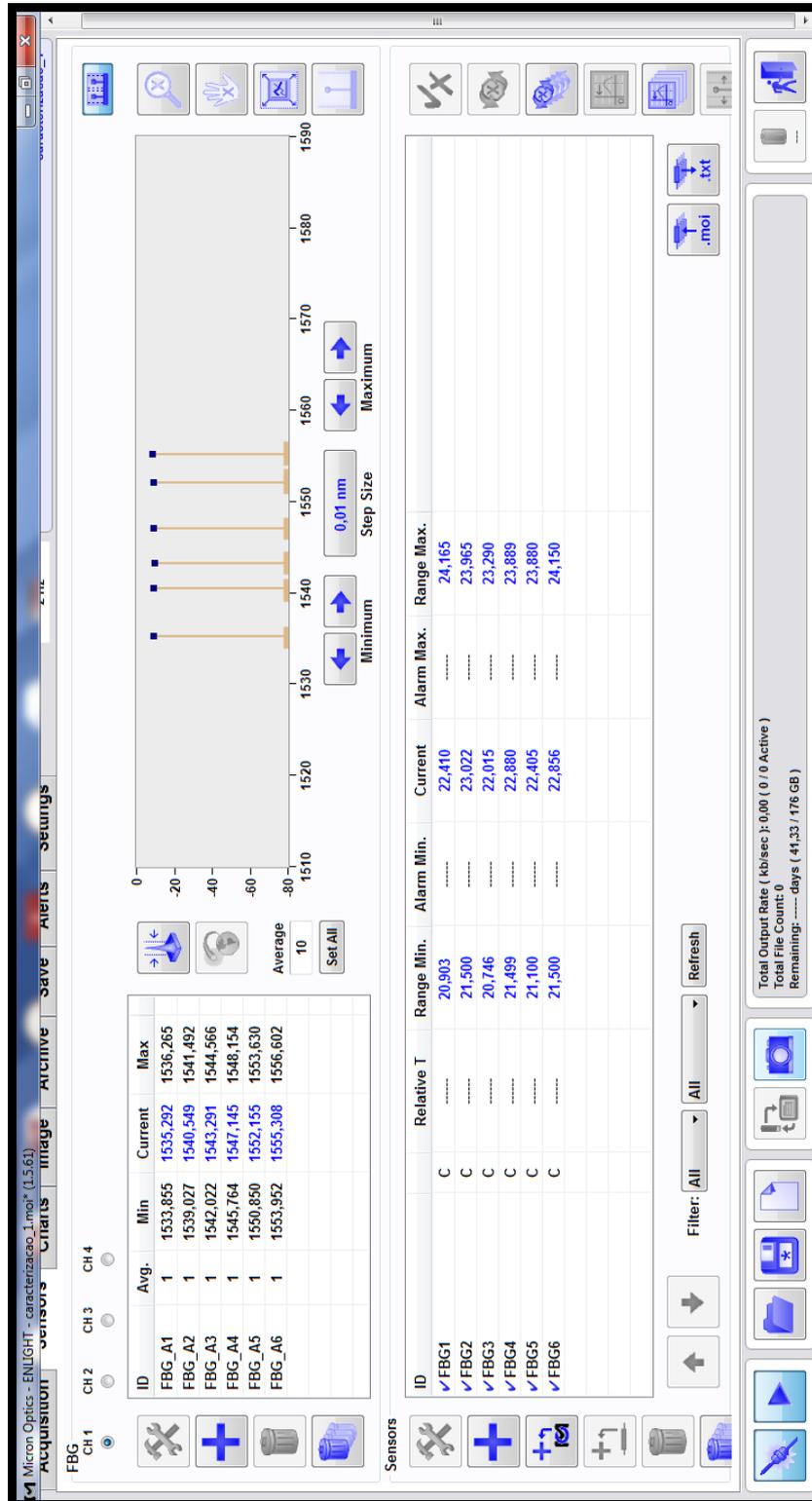


Figura 2: Tela MOI-Enlight: aba *Sensors*.