

AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE UM SENSOR DE PRESSÃO A FIBRA ÓTICA UTILIZADO EM POÇOS DE PETRÓLEO

Luiz Henrique Paraguassú de Oliveira¹, Paulo Roberto Guimarães Couto¹, Arthur M. B. Braga²

¹ Inmetro, Rio de Janeiro, Brasil, paraguassu@inmetro.gov.br, prcouth@inmetro.gov.br

² PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, abraca@mec.puc-rio.br

Resumo: Este artigo descreve o estudo metrológico relacionado a um sensor de pressão e temperatura à fibra ótica, o qual pode ser aplicado em poços de petróleo. O sensor foi desenvolvido pelo Laboratório de Sensores a Fibra Ótica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio e os testes de desempenho foram realizados no Laboratório de Pressão do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO.

São apresentadas as curvas das diferentes calibrações realizadas ao longo de seis meses de coleta de dados e também, o estudo do comportamento dos sensores em função das suas características metrológicas de projeto.

Para este estudo inicial, de acordo com os dados obtidos, os sensores se mostraram bastantes robustos e confiáveis nas medições de pressão, evidenciando grandes possibilidades de aplicação cada vez maiores na indústria de petróleo e gás.

Palavras chave: pressão, sensores, fibra ótica, redes de Bragg.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, sensores de pressão e temperatura baseados na tecnologia de rede de Bragg em fibras ópticas são cada vez mais empregados em aplicações industriais e com grande aceitação na indústria de petróleo, por causa das suas características vantajosas em relação às tecnologias tradicionais. Isto se deve ao fato de que normalmente a produção de petróleo ocorre muitas das vezes em ambientes hostis e agressivos e a longas distâncias.

O princípio de medição dos sensores de fibra ótica se dá através da interpretação de uma das propriedades da radiação guiada (luz), que no caso dos sensores do experimento empregam a tecnologia de redes de Bragg.

Esta tecnologia correlaciona a deformação aplicada em uma fibra ótica com um valor de pressão estática aplicada ao sensor, por meio de uma balança de peso morto de fabricação DH-BUDENBERG, na faixa de 0 a 600 psi.

Sensores de pressão a redes de Bragg (FBG) representam uma alternativa viável e econômica para diversos problemas de sensoriamento remoto em países como o Brasil, onde se necessita medir com maior exatidão

possível, grandezas tais como pressão e temperatura, principalmente na produção de petróleo.

Com isso, abre-se um leque de oportunidades para aperfeiçoar os materiais e técnicas de fabricação para estes tipos de sensores e ampliando-se as possibilidades de se empregar a metrologia como ferramenta de avaliação das características de desempenho destes tipos de instrumentos.

2. OBJETIVO

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram fabricados dois protótipos de sensores de pressão e temperatura à rede de Bragg, que foram projetados para operar numa faixa de pressão de 0 a 600 psi e de temperatura de 50 a 90 °C. A idéia é simular, em menor escala, um “set up” que reproduza as condições de trabalho em um ambiente de fundo do poço.

Medições de pressão e temperatura foram efetuadas continuamente num total de 24 calibrações realizadas ao longo de seis meses, inicialmente a temperatura de 90 °C. Estes testes tiveram como objetivo avaliar o desempenho dos sensores no momento das calibrações, assim como o seu comportamento a longo prazo.

Desta forma, o foco principal deste trabalho é estudar todos os fenômenos físicos que possam ocorrer nestes tipos de sensores, de forma a assegurar suas características técnicas. Além de levantar e quantificar todas as demais grandezas de influência que venham a alterar os valores obtidos para o mensurando (pressão). Com isto, será possível aperfeiçoar todo o processo de calibração e consequentemente estabelecer um procedimento de qualificação de instrumentos desta natureza.

Os resultados obtidos se aproximaram muito das características metrológicas desejadas no projeto original. Confirmando assim, a potencialidade desta nova tecnologia para utilização no campo do sensoriamento remoto, com grandes possibilidades de aplicação na indústria de extração de hidrocarbonetos.

3. METODOLOGIA

O tipo de sensoriamento utilizado no experimento empregou um sensor com características intrínsecas, onde a

fibra ótica se presta a ser o próprio sensor. Desta forma, o mensurando atua diretamente com a fibra, alterando uma ou mais propriedades da luz guiada. Essa é uma forma indireta, porém intrínseca de medir uma determinada grandeza.

Os sensores de fibra ótica com características intrínsecas operam a partir da modulação de uma ou mais propriedades da luz guiada: intensidade, fase, polarização e frequência ou comprimento de onda. Então, a partir dessas propriedades da radiação guiada, é possível utilizar diferentes métodos de medição, de tal forma que se adaptem mais adequadamente as diferentes grandezas.

No caso deste trabalho, a propriedade da luz avaliada foi a variação do comprimento de onda em relação pressão estática, aplicada a partir de uma balança de peso morto de fabricação DH-BUDENBERG usada como o padrão de referência em pressão.

Os sensores foram fabricados com a tecnologia de redes de Bragg, onde o núcleo de uma fibra ótica dopada com um elemento químico específico (germânio) foi foto sensibilizado por um laser pulsado, que produz defeitos periódicos no núcleo e refletindo um determinado comprimento de onda característico.

Logo, a construção de uma rede de Bragg, baseia-se em gerar uma modulação periódica no índice de refração da fibra que satisfaz a condição de Bragg para uma incidência do feixe luminoso perpendicular à rede. E que reflete de forma eficiente o comprimento de onda de ressonância do filtro, atualmente chamado de comprimento da onda de Bragg, definida pela equação 1.

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

Equação 1: Cálculo do comprimento de onda de Bragg (λ_b)

Onde:

n_{eff} = índice de refração efetiva da fibra ótica para o modo fundamental

Λ = período espacial da modulação do índice (perturbação induzida na fibra)

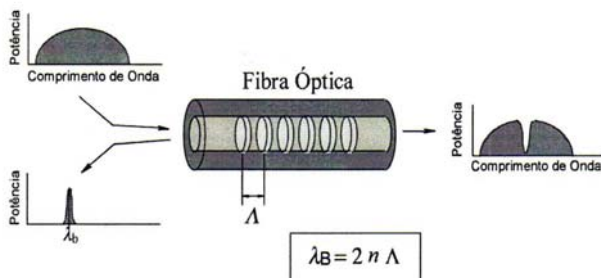


Figura 1: Espectro de onda transmitido e refletido numa FBG

A capacidade de sensoriamento das redes de Bragg está relacionada ao fato de que λ_b pode ser alterado por esforços mecânicos que modificam a periodicidade da estrutura, Λ , ou através de variação de temperatura que modifica o índice de refração n . Estas correlações podem ser apresentadas de forma linear, de acordo com a equação 2:

$$\Delta\lambda_b/\lambda_b = 9 \times 10^{-6} \Delta T + 0,78 \varepsilon \quad (2)$$

Equação 2: Cálculo da correlação entre deformação e temperatura em função do comprimento de onda de Bragg ($\Delta\lambda_b/\lambda_b$)

Onde:

ΔT = variação da temperatura em °C

ε = deformação em m/m

As constantes numéricas são características do material que compõem a fibra ótica. Sendo que a grande vantagem de medições com esta tecnologia é que a informação sobre o mensurando esta contida no espectro, significando uma medição absoluta além de poder ser multiplexada.

A fim de realizar as calibrações dos sensores a rede de Bragg, foi desenvolvido um sistema de medição com as seguintes características: banho termostático de temperatura controlada na faixa de 0 °C a 200 °C, um acoplador ótico, multímetro digital de 6 ½ (Fluke), analisador de espectro ótico (Micron Optics), termômetro de resistência de platina (Pt 100), termômetro líquido em vidro, medidor de umidade relativa do ar (Vaisala), balança de peso morto (DH-Budenberg), coleção de pesos-morto (DH-Budenberg), computador.



Figura 2: “set up” de calibração dos sensores

Cada sensor de pressão foi calibrado em dez pontos nominais de pressão, nos sentido ascendente e descendente, com a intenção de avaliar se os mesmos estão sujeitos a histereses, iniciando com 10% e indo até 100% da faixa de de escala de medição.

Cada valor nominal de pressão na calibração dos instrumentos foi determinado a partir da pressão de referência, conforme equação 3.

$$P = \frac{\left[m_p \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mp}} \right) + \sum m \cdot \left(\frac{\rho_a}{\rho_m} \right) \right] \cdot g_l + \sigma C}{A_{0,20} \cdot [1 + (\alpha_c + \alpha_p) \cdot (t - 20)] \cdot (1 + \lambda P_n)} \quad (3)$$

Equação 3: Cálculo da pressão por uma balança de pressão

Onde:

g_n e g_l = aceleração da gravidade normal e aceleração da gravidade local (m/s^2);

t , α_c e α_p = temperatura de trabalho ($^{\circ}C$), coeficiente de dilatação térmica do cilindro e do pistão ($^{\circ}C^{-1}$) respectivamente;

σ e C = tensão superficial do fluido (N/m) e comprimento da circunferência do pistão (m);

ρ_a , ρ_{mp} e ρ_m = massa específica do ar ambiente ($1,2 \text{ kg/m}^3$), massa específica do material do pistão e das massas (8000 kg/m^3);

Para interrogar os sensores a rede de Bragg foi utilizado um sistema de leitura comercial baseado em laser sintonizável, fornecendo as posições espectrais dos picos de reflexão das redes sensoras. Todo o controle e aquisição dos dados foram feitos de forma automática via computador, através de um programa desenvolvido em Lab View.

4. RESULTADOS

De posse da pressão de referência calculada a partir da equação (3) e dos valores de comprimento de onda obtidos com o sistema de interrogação para os sensores 1 e 2, é possível correlacionar estas duas grandezas e com isso se obter modelos de curvas de desempenho, conforme figura (3).

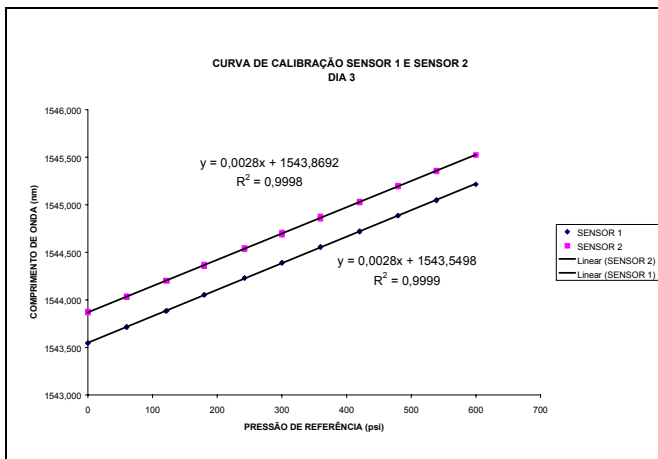


Figura 3 - Modelos de curvas de desempenho dos sensores

Com a curva da figura 3 pode-se determinar a sensibilidade dos sensores através da inclinação e o seu zero através da interseção. Desta forma, foram realizadas 12 calibrações inicialmente, avaliando estas características e posteriormente mais 12 calibrações totalizando 24 calibrações que foram realizadas num período de 6 meses para a temperatura de trabalho de $90^{\circ}C$. Deste modo, pode-se plotar no gráfico da figura 4 as intercepções para os dois sensores ao longo do tempo. Adicionalmente, é apresentado na figura 4, em barras verticais, o intervalo referente a dois

desvios padrão (s) cujos valores de interseção estão contidos ao longo do tempo.

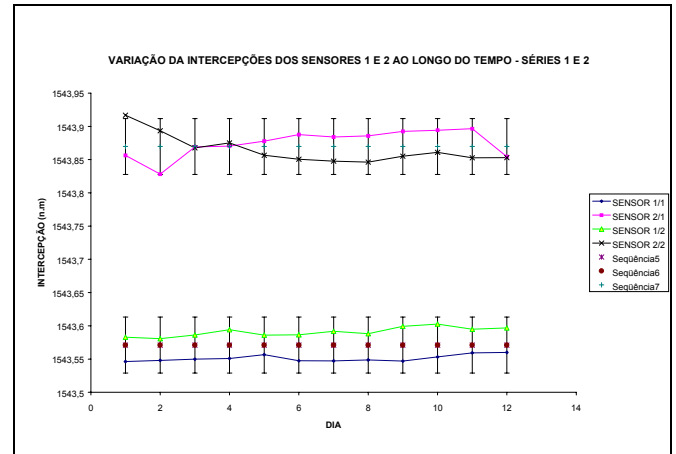


Figura 4 - Intercepções dos dois sensores ao longo de seis meses de calibração, com o intervalo de dispersão igual a 2 desvios padrão

Já o gráfico da figura 5 apresenta as inclinações do sensor 1 ao longo de seis meses de calibração. Adicionalmente, é apresentado na figura 5, em barras verticais, o intervalo referente a dois desvios padrão (s) cujos valores de inclinação estão contidos ao longo do tempo.

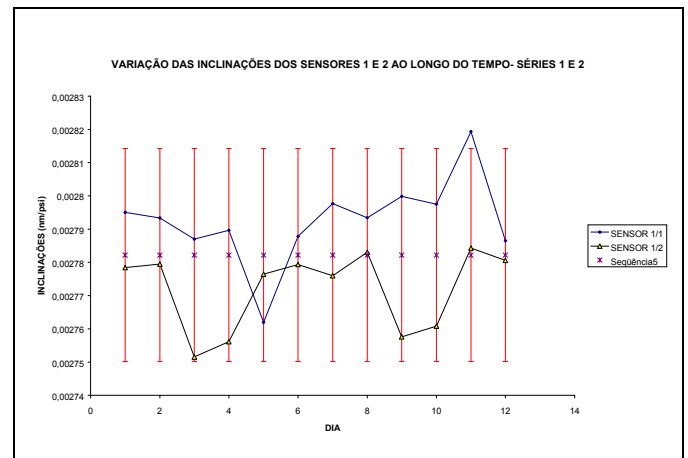


Figura 5 - Inclinação do sensor 1 ao longo de seis meses de calibração, com o intervalo de dispersão igual a 2 desvios padrão

O gráfico da figura 6 apresenta as inclinações do sensor 2 ao longo de seis meses de calibração. Adicionalmente, é apresentado na figura 6, em barras verticais, o intervalo referente a dois desvios padrão (s) cujos valores de inclinação estão contidos ao longo do tempo.

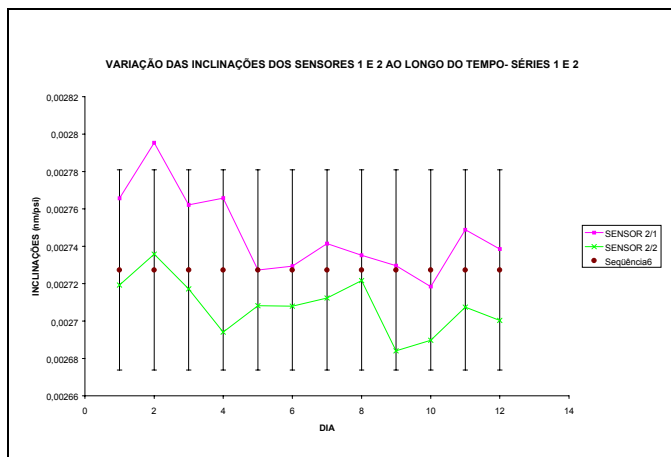


Figura 6 – Inclinação do sensor 2 ao longo de seis meses de calibração, com o intervalo de dispersão igual a 2 desvios padrão

A tabela 1 apresenta os valores das características metrológicas mais significativas para os dois sensores de pressão a redes de Bragg, obtidas ao longo do tempo.

Características	Sensor 1	Sensor 2
Intercepção (nm)	1543,571	1543,870
Inclinação(nm/bar)	0.002782	0.002727
2 s (intercepção)	0.042	0.042
2 s (inclinação)	0.000032	0.000054
Resolução (nm)	0.001	0.001
Resolução (psi)	0.4	0.4
Resolução (%)	0,06	0.06

Tabela 1 - Valores das características metrológicas mais significativas dos dois sensores obtidas ao longo do tempo

5. CONCLUSÕES

As curvas da figura 3 representam valores de indicação de pressões ascendentes e descendentes para os sensores 1 e 2, em que é possível notar que os sensores possuem baixíssima histerese, visto que não aparece nenhuma diferença significativa entre as curvas, fato este que se repetiu nas demais calibrações. Também se pode afirmar que os sensores ao longo do tempo apresentaram sensibilidades semelhantes, visto que as suas respectivas curvas de calibração são paralelas.

Analisando-se o gráfico da figura 4 em conjunto com os valores apresentados na tabela 1, conclui-se que os dois sensores apresentaram intercepções médias diferentes, contudo os desvios padrão das intercepções são semelhantes.

A variação dos valores das intercepções dos dois sensores ao longo dos seis meses, está contida no intervalo cuja amplitude é 0,042 nm (2 s). Este intervalo define a

resolução de indicação para os dois sensores através do sistema de interrogação utilizado que possui resolução da ordem de 0,001 nm representando um valor correspondente em pressão de 0,4 psi ou 0,06 % para os sensores. Cabe ressaltar que este valor da resolução irá depender do sistema de interrogação utilizado.

Analisando-se o gráfico da figura 5 em conjunto com os dados da tabela 1, conclui-se que os valores das inclinações do sensor 1 ao longo dos seis meses, estão contidos no intervalo cuja amplitude é 0,000032 nm/bar (2s).

Já se analisando o gráfico da figura 6 em conjunto com os dados da tabela 1, conclui-se que os valores das inclinações do sensor 2 ao longo dos seis meses, estão contidos no intervalo cuja amplitude é 0,000054 nm/bar (2s).

Com os resultados obtidos para os dois sensores, observou-se que o sensor 1 possui um desempenho melhor que o do sensor 2. Entretanto, verificou-se também que a tecnologia de fabricação de sensores de pressão e temperatura a redes de Bragg é consistente e está sob controle.

REFERENCES

- [1] KUZYK, M. G., *Polymer Fiber Optics – Materials, Physics and Applications*, ed. Taylor & Francis group, Ilc, 2007.
- [2] PATERNO, A. S., “*Sistemas de Sensoriamento em Fibra Ótica*”, tese de doutorado, UTFPR-PR, Curitiba, Dezembro 2006.
- [3] SHENG, H. J., FU, M. Y., CHEN, T. C., LIU, W. F., BOR, S. S., “*A Lateral Pressure Sensor using a Fiber Bragg Grating*”, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 16, no. 4, April 2004.
- [4] LLERENA, R. W. A., “*Desenvolvimento de Transdutores a Fibra Ótica para Completação Inteligente de Poços*”, tese de doutorado, PUC-RJ, Rio de Janeiro, 2004.
- [5] BRAGA, A. M. B., VALENTE, L. C. C., REGAZZI, R. D., SILVA, L. C. N., TRIQUES, A., “*Técnicas de Leitura para Sensores a Fibra Ótica Baseados em Redes de Bragg*”, 6ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, Salvador, Agosto 2002.
- [6] WRIGHT, P. J., “*The Future of Fiber Optics in the Off Shore Oil Industry*”, Off Shore Magazine, May 2000.