

SENSORES EM FIBRA ÓTICA PARA ÁREA DO PETRÓLEO: USANDO UMA NOVA TÉCNICA DE INTERROGAÇÃO PARA MEDIR CONCENTRAÇÃO DE ÁLCOOL EM GASOLINA E A CARACTERIZAÇÃO DE SENSORES DE HIDROGÊNIO

Aleksander S. Paterno¹ (UTFPR), Nilton Haramoni²(UTFPR), Hypolito J. Kalinowski² (UTFPR/Universidade de Aveiro - Portugal)

¹Av. Alberto Carazzai, 1640 - Cornélio Procópio/PR - 86300-000, aspaterno@utfpr.edu.br

²Av. Sete de Setembro, 3165 - Curitiba/PR - 80230-901, hjkalin@cpgei.cefetpr.br

Este trabalho apresenta os resultados da utilização de um novo sistema de interrogação para vários sensores em fibra ótica em redes de Bragg (FBG). O sistema é feito por um laser em fibra dopada com Érbio e opera como um laser sintonizável que vai ter seu comprimento de onda central varrido ao longo do intervalo espectral em que operam os sensores a FBG. Dado que a extremidade de sua cavidade é feita por uma rede de Bragg especial de alta resistência (DTG), ao ser esticada por um sistema mecânico ela permite a sintonia do laser ao longo do intervalo em comprimento de onda em que estão funcionando até quatro sensores a FBG. O sinal foto-detectado do laser, após ser refletido pelos sensores, é coletado por um sistema de aquisição. Os dados adquiridos serão processados por algoritmos que emulam as técnicas de espectroscopia de varredura em comprimento de onda. Os sensores a FBG funcionarão como as amostras em espectroscopia analisadas por um laser sintonizável, mas de uma forma automatizada. A aplicação desse sistema demonstrada aqui consiste na leitura de dois sensores a FBG com diâmetro reduzido por corrosão para medição da concentração de álcool em gasolina. Um dos sensores serve como referência de temperatura, já que a FBG é um sensor intrínseco de temperatura. O outro sensor foi imerso em gasolina com diferentes concentrações de álcool, pois é sensível ao índice de refração do ambiente, já que seu diâmetro foi reduzido até que essa sensibilidade se mostrasse suficientemente alta. A variação da concentração de álcool altera o índice de refração e conseqüentemente o comprimento de onda de Bragg que está sendo monitorado pela interrogação. Além disso, com dois sensores a operação do sistema permite que seja minimamente influenciado por temperatura. Outros resultados tratando de sensores em fibra ótica são relatados para demonstrar os aparatos de caracterização de um sensor de Hidrogênio fabricado em fibra ótica com diâmetro reduzido. O sistema de caracterização desenvolvido permite a caracterização dinâmica do sensor e os resultados demonstrados mostram a caracterização temporal do sensor. Neste caso, uma câmara para mistura dos gases e um sistema de controle de fluxo foram montados e que permitiam o controle de concentração de Hidrogênio em Nitrogênio dentro da câmara onde estava instalado o sensor de campo evanescente em fibra ótica. O sensor foi fabricado em uma fibra ótica mono-modo padrão cujo diâmetro foi diminuído pela técnica do pincel-de-chama aplicada até que o diâmetro permitisse máxima sensibilidade do sensor. Após esse processo, evaporou-se um filme fino de Paládio. Sensores com duas espessuras do filme fino tiveram respostas estáticas determinadas e a resposta dinâmica dos sensores em função da velocidade de exposição ao Hidrogênio foi determinada para uma dada temperatura.

Sensores em fibra ótica, Sensores de hidrogênio, Adulterantes de gasolina, Técnicas de interrogação

1. INTRODUÇÃO

Uma rede de Bragg em fibra ótica pode funcionar como um filtro rejeita faixa com a banda espectral centrada em comprimentos de onda na região do espectro utilizado para comunicações óticas. Esse fato torna os dispositivos interessantes para diferentes aplicações que compreendem até o seu uso como sensores multiplexados e codificados em comprimento de onda, onde o parâmetro a ser medido do sensor é o pico da banda espectral de rejeição do filtro/refletor chamado rede de Bragg em fibra ótica (FBG). O filtro rejeita os comprimentos de onda centrados no comprimento de onda de Bragg e os reflete. Sabe-se que esse comprimento de onda de Bragg, λ_B , varia de forma diretamente proporcional à temperatura e à deformação mecânica tornando o dispositivo um sensor intrínseco para medidas de deformação e temperatura. As formas de interrogação desse sensor consistem em monitorar alterações no comprimento de onda de Bragg causadas por perturbações mecânicas ou de temperatura. Caso o sensor tenha seu diâmetro diminuído dos 125 μ m padrão de uma fibra ótica mono-modo para valores da ordem de 20 μ m, o comprimento de onda de Bragg vai depender agora não somente da temperatura ou deformação, mas também do índice de refração do meio em que o sensor está inserido. Assim, as técnicas de interrogação poderiam então monitorar uma variação no comprimento de onda de Bragg, $\Delta\lambda_B$, e associá-la a uma variação de temperatura, índice de refração do meio ou deformação. Entretanto, o sensor tem o problema da sensibilidade cruzada, caso tenha sua temperatura de operação variada durante a medida de índice

ou deformação, e aí não se sabe qual das perturbações causou $\Delta\lambda_B$. Para a solução desse problema necessitar-se-ia de um sistema de interrogação que permitisse a monitoração de pelo menos dois sensores simultaneamente, onde um deles estaria monitorando somente a temperatura de operação do meio monitorado, enquanto o outro monitoraria o mensurando de interesse, tendo seu valor assim compensado.

Problemas de interesse na área de sensores a fibra ótica para monitoração de processos na área do petróleo e gás compreenderiam aqui o uso de um sensor a rede de Bragg em fibra com diâmetro reduzido para monitoração do índice de refração de uma solução de álcool em gasolina. Como diferentes proporções de álcool variariam o índice da solução, pode-se inferir a sua concentração na gasolina, a qual seria monitorada por sensores a redes de Bragg com o sistema de interrogação proposto. Nesse sistema de interrogação, um laser sintonizável com comprimento de onda central variável ao longo do intervalo de operação dos sensores foi montado, onde o elemento de sintonia é uma rede de Bragg de alta resistência, sendo ela a responsável pela sintonia do laser. A convolução do sinal do laser sintonizável com a função de transferência (refletividade) da FBG produz um sinal donde se pode inferir a posição do pico da banda espectral do sensor. O sistema permite com isso a monitoração de vários sensores a FBG.

As outras aplicações de sensores descritas no trabalho consistem na implementação de um sensor para Hidrogênio gasoso em uma fibra mono-modo padrão com diâmetro reduzido e recoberto com um filme fino de Paládio que tem seu índice de refração alterado na presença de Hidrogênio. Com isso, o sensor é baseado em intensidade, e qualquer variação do índice alterará a atenuação que o sensor produz no sinal de luz que o atravessa. O comportamento dinâmico desse sensor foi avaliado sob exposições a diferentes concentrações de Hidrogênio, mostrando que tem um tempo de resposta muito rápido, e uma sensibilidade relativamente alta. Neste caso, utilizou-se para a interrogação do sensor apenas um fotodetector que monitorava a intensidade do sinal que atravessava o sensor. Caso ocorressem variações de intensidade, elas seriam relacionadas à variação de concentração de Hidrogênio em uma atmosfera de Nitrogênio.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Métodos de interrogação para redes de Bragg de baixo custo que permitam a interrogação de sensores multiplexados já foram muito estudados nos últimos anos. Com o uso de uma FBG de alta resistência que funcione como um filtro de forma a sintonizar o dispositivo de interesse, no caso, um laser no qual a FBG forma a extremidade da sua cavidade, foi possível implementar tal sistema com a capacidade de interrogar mais de 3 sensores simultaneamente[PATERNIO, PATERNIO, OLIVEIRA *et al.*, PATERNIO, N. HARAMONI *et al.*]. A implementação de sensores a FBG para monitoração do índice de refração permitindo a monitoração de concentrações de etanol na gasolina já havia sido proposta recentemente, mas sua interrogação tinha sido mostrada apenas em equipamentos de laboratório[PATERNIO, MILCZEWSKI *et al.*]. Aqui demonstra-se a utilização do sistema de interrogação de baixo custo para monitoração dos sensores que detectam as concentrações de etanol em gasolina. Neste caso, os sensores são iluminados com um laser sintonizável cujo espectro vai convoluir com os espectros da luz refletida pelos sensores a FBG e produzir um sinal fotodetectado o qual é adquirido por um computador, sendo então processado e as variações de índice de refração determinadas, e conseqüentemente as concentrações da porcentagem de etanol[PATERNIO].

Neste texto também se relata a implementação de um sensor de Hidrogênio, o qual havia sido proposto na literatura[VILLATORO *et al.*], mas para o qual a análise do comportamento dinâmico do sensor ainda estava obscura. Obtiveram-se então as curvas do comportamento dinâmico do sensor para diferentes concentrações de Hidrogênio muito acima do limite explosivo, sendo que esses resultados também mostram uma certa incompatibilidade com os dados da literatura, que mostram tempos de resposta diferentes dos obtidos aqui.

3. METODOLOGIA

A interrogação de sensores com lasers sintonizáveis é uma técnica que tem estreita relação com a espectroscopia a laser com modulação em comprimento de onda (*Wavelength Modulation Spectroscopy* -WMS). As técnicas de WMS se baseiam na modulação do comprimento de onda da emissão do laser por meio da modulação de sua corrente de injeção e utilizam freqüências de modulação muito menores do que a largura de banda do espectro a ser analisado. A luz modulada do laser ao interagir com uma amostra vai produzir um sinal que varia na mesma freqüência da modulação. O sinal pode ser detectado coerentemente com eletrônica de detecção de sinais sensível a fase e freqüência [SUPPLEE]. Em espectroscopia, analisam-se diferentes harmônicos desse sinal. Na interrogação de sensores, utiliza-se normalmente o primeiro harmônico, que é proporcional à derivada do espectro de reflexão da FBG, mas há também a possibilidade de utilização do segundo harmônico como feito por Ferreira em [FERREIRA]. A aplicação dessas técnicas de modulação na interrogação de sensores a redes de Bragg utilizando lasers sintonizáveis acarretaria desempenho análogo. As expressões matemáticas para os sinais detectados serão também praticamente as mesmas, considerando que o espectro associado à amostra seja gaussiano e que a largura de banda do laser seja muito menor que a da FBG interrogada. Aqui vai se propor a

interrogação em varredura de comprimento de onda onde o comprimento de onda central do laser vai percorrer o intervalo espectral em que os sensores a FBG vão operar. O sinal adquirido será o perfil dos espectros de reflexão dos sensores em função do tempo de aquisição. Assim pode-se derivar o espectro com filtros digitais e obter o ponto de cruzamento de zero que está associado ao comprimento de onda de Bragg. Se utilizarmos mais de um sensor, a distância temporal entre os pontos de cruzamento de zero associados a cada sensor será proporcional à distância espectral entre os comprimentos de onda de Bragg dos sensores, se se garantir que o sensor de referência mantenha seu comprimento de onda de Bragg estático ou o sensor de referência sem perturbações. O gráfico da fig. 1 ilustra os sinais obtidos, filtrados e processados durante a varredura de um ciclo do comprimento de onda do laser. O que será medido no sistema de interrogação é a distância temporal, Δt , entre os picos do espectro dos sinais obtidos (segundo gráfico) obtida pelo processamento da primeira derivada (quarto gráfico) desses espectros filtrados (terceiro gráfico). Essa distância temporal será correspondente a um valor em comprimento de onda previamente calibrado, de forma a se obterem as medidas de temperatura, deformação ou de variação de índice de refração de interesse.

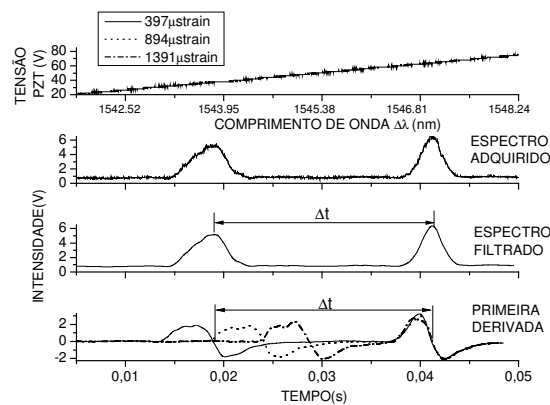


Fig. 1. Sinais obtidos durante a varredura do laser sintonizável interrogando FBGs. No primeiro gráfico, a tensão de rampa aplicada à sintonia do laser em função do tempo/comprimento de onda. O segundo gráfico, o espectro adquirido; no terceiro, o espectro filtrado; no quarto, o sinal da primeira derivada. Linhas tracejadas e pontilhadas correspondem a deformações mecânicas que ocorrem no sensor associado ao primeiro .

Para o sensor de hidrogênio estudado, ilumina-se uma ponta do sensor com um sinal ótico e observa-se o sinal na saída do sensor. Caso haja alguma variação no índice de refração do filme metálico sobre o sensor, provocada pela presença de hidrogênio, o sinal na ponta de saída terá sua intensidade variada. O interesse aqui está na observação do comportamento dinâmico do sensor ao ser submetido a variações rápidas de hidrogênio em concentrações acima do limite explosivo, pois isso ainda não foi completamente estudado na literatura.

3.1 Aparato Experimental

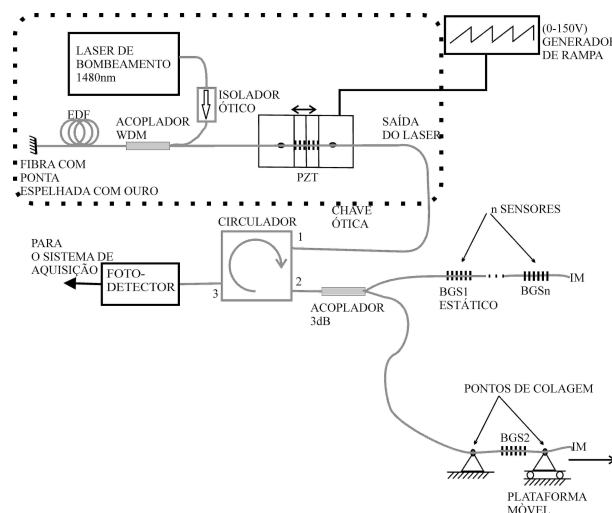


Fig. 2. Diagrama ilustrando sistema de interrogação com laser sintonizável a EDF.

Na fig. 2, o esquema do sistema de interrogação com laser sintonizável é mostrado. As linhas em cinza no desenho representam o circuito óptico e as linhas pretas o circuito elétrico do sistema implementado com uma FBG de alta resistência fabricada na torre de puxamento da fibra (DTG) colada ao PZT. Pode-se dividir o sistema em duas partes, cada uma delas ligada a uma das portas do circulador óptico. A primeira parte é o laser sintonizável, mostrado na fig. 2 dentro da caixa pontilhada, com comprimento total da cavidade linear de aproximadamente 12 metros. A fibra dopada com Érbio (EDF) possui concentração de 330 ppm de érbio, 880 nm de comprimento de onda de corte, abertura numérica de 0,21 e 7 metros de comprimento. Numa das extremidades da EDF foi emendada uma seção de fibra com ponta espelhada com refletividade de 70 % na faixa de comprimento de onda de operação do sistema. À outra extremidade da EDF foi ligado um acoplador WDM (TB-W4X Telebrás). A função desse componente é permitir que o sinal do laser de bombeamento em 1480 nm injetado em uma de suas entradas seja lançado na fibra dopada e que a emissão em torno de 1550 nm seja retirada em uma das saídas. O diodo laser de bombeamento (Princeton Lightwave WavePower Series) é protegido contra reflexões e emissão da cavidade via um isolador óptico (JDS Fitel). A saída do WDM é ligada a DTG (FBGS Technologies) com refletividade de 30 %, comprimento de onda de Bragg de 1540,2 nm e largura de banda de 0,10 nm. Sabe-se que o comprimento de onda central do laser coincide com o comprimento de pico do espectro de reflexão da DTG. Além disso, sabe-se que a DTG tem seu comprimento de onda de Bragg sintonizável ao ser estirada mecanicamente e tem-se aí o princípio de funcionamento da sintonizabilidade do laser. Ao ser estirada por um arranjo mecânico com um piezoelétrico que a estica, o laser é sintonizado. A DTG é fixada sobre o centro das lâminas móveis de um conjunto mecânico acionado pelo PZT com cola a base de cianoacrilato gel(superbonder).

A segunda parte é formada pela eletrônica do sistema, utilizada na foto-deteção do sinal, controle de corrente e temperatura do laser de bombeamento e controle do PZT, bem como o processamento dos sinais adquiridos. O PZT utilizado é acionado pelo sinal triangular de um gerador de sinais (Tektronix CFG280) via um controlador/amplificador próprio para atuadores piezoelétricos (E-610 LVPZT). O PZT pode operar com tensões entre -10 e 150 volts, porém o amplificador utilizado opera numa faixa um pouco menor, de 0 a 120 volts. O sinal das redes interrogadas é aplicado a um foto-detector de arseneto de gálio-índio (InGaAs) (ETX75 FJS) de alta velocidade e adquirido por um computador onde é processado. O diodo laser de bombeamento é controlado por uma fonte de corrente especialmente desenvolvida para este fim, com corrente máxima de 945 mA, embora o laser suporte valores até 1600 mA. A estabilização da temperatura do laser de bombeamento é feita por um controlador de temperatura (Thorlabs TED200).

O sistema com uma DTG interroga as FBG sensoras pela varredura contínua do sinal laser, tanto durante o período de subida da rampa (que promove a abertura das lâminas do PZT, esticando a DTG e deslocando o sinal laser para maiores comprimentos de onda) quanto na rampa de descida do sinal no PZT (quando ocorre o contrário). Como no processamento do sinal foto-detectado apenas os dados obtidos durante a rampa de subida são considerados, e são mostrados na fig. 1.

3.2.1 A monitoração de etanol em gasolina: caracterização do sistema

O objetivo da interrogação é monitorar o comportamento de um sensor mergulhado em uma concentração de etanol em gasolina obtidos da refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR) em Araucária, Paraná. Para esse fim, dois sensores foram utilizados, como os mostrados na fig. 1, e a cada um deles, picos em bandas espectrais serão monitoradas, sendo então filtrados e derivados, onde se obtêm os pontos de cruzamento de zero e uma determinação mais exata da posição dos picos do espectro. A variação da distância entre os picos mostrará quando ocorre uma variação da concentração de etanol em gasolina. O sensor será então mergulhado em uma solução de gasolina pura, sendo então acrescentados a ela pequenos volumes de etanol. A cada variação de concentração, os dados associados a distância entre o sensor estático e o sensor de índice de refração serão mostrados e associados à porcentagem de álcool na concentração. A fig. 3 mostra a curva obtida ponto a ponto para esse experimento.

Demonstra-se na fig. 3 que a resposta do sensor obtida com o novo sistema de interrogação é não-linear, sendo então ajustada por uma curva exponencial, mostrada por uma linha contínua no gráfico. A maior concentração de pontos está na região em torno do valor considerado legal em porcentagem de álcool em gasolina em torno de 20% de etanol em gasolina. Mostra-se aí que o sistema é capaz de detectar variações em torno desses valores e que o sensor é suficientemente sensível para operar com o sistema de interrogação proposto. O sistema de medição de concentração de etanol em gasolina tem uma compensação de temperatura, já que o sistema usa uma rede de Bragg de referência que é afetada apenas por variações de temperatura, mas não por variações de índice de refração. Essa compensação de temperatura foi proposta anteriormente para medições de deformações mecânicas[PATERNIO, PATERNIO, OLIVEIRA *et al.*, PATERNIO, N. HARAMONI *at al.*].

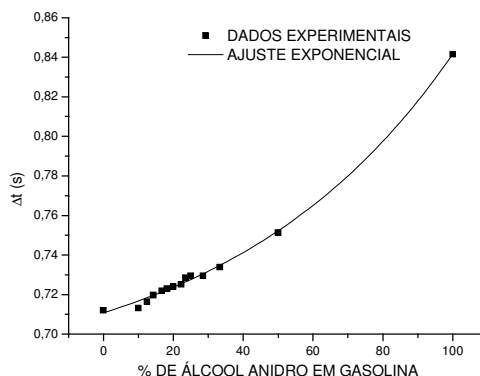


Fig. 3. Curva obtida medindo-se a distância temporal entre o pico do sensor estático de referência e do sensor de índice de refração, mostrando uma relação linear entre concentração e valores medidos.

3.3 O aparato experimental para monitoração de Hidrogênio

Aqui obtiveram-se resultados sobre o comportamento dinâmico de um sensor em uma fibra ótica com diâmetro diminuído até que o campo eletromagnético confinado no núcleo ficasse evanescente a ponto de interagir perceptivelmente com o filme metálico depositado sobre o dispositivo. Utilizou-se um sensor de diâmetro 20 μ m onde se depositou um filme fino de paládio de espessura de 40nm. Mais detalhes sobre o processo de fabricação pode ser encontrado em um trabalho recente[PATERNI, CREMONA *et al.*]. Para se monitorar a operação do sensor montou-se uma câmara por onde fluxos de gases Nitrogênio e Hidrogênio passariam de forma controlada, de forma que a atmosfera na câmara fosse de Nitrogênio e Hidrogênio unicamente. O sensor foi instalado no interior dessa câmara. Concentrações de Hidrogênio de 1% a 30% foram criadas e o sensor foi submetido a elas, permitindo a análise do comportamento do filme fino do dispositivo. A aquisição da intensidade da luz que atravessava o sensor foi processada durante a exposição do sensor às diferentes concentrações de hidrogênio. O tempo de resposta do sensor após um fluxo de alta vazão de hidrogênio percorrendo a câmara produziu as variações mostradas na fig. 4. Nessa figura, mostra-se com uma linha tracejada o início da exposição ao hidrogênio e o fim dessa exposição. Percebe-se o tempo de resposta como função a diferentes concentrações.

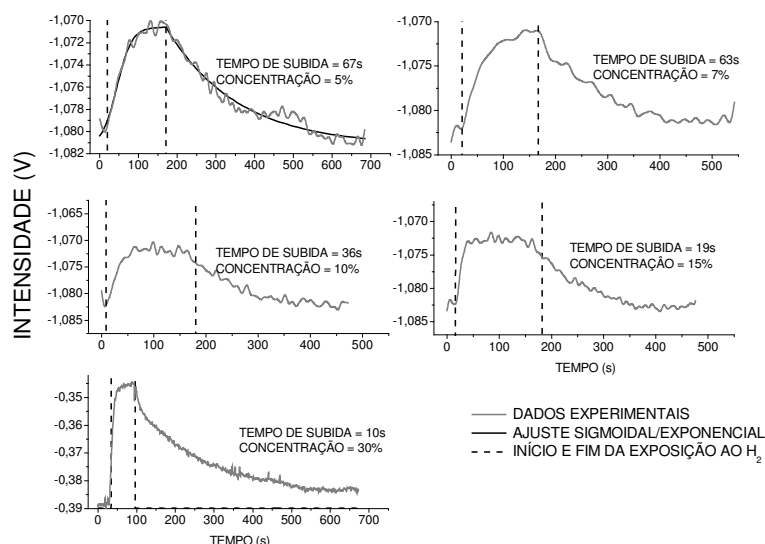


Fig. 4. Curvas de resposta e tempos de subida do sinal do sensor de hidrogênio a exposições de 5%, 7%, 10%, 15% e 30% de hidrogênio em nitrogênio.

A primeira curva da fig. 4. foi obtida para concentração de 5% de hidrogênio e o tempo de subida após a exposição ao gás foi de 67 segundos até atingir 90% de seu máximo de variação. O tempo de relaxamento após o corte da vazão de hidrogênio foi da mesma ordem de grandeza para todas as exposições, da ordem de 350

segundos, a uma temperatura de 28°C. Para o aumento da concentração o sensor diminui o tempo de subida e a variação de intensidade aumenta nesses casos. Uma curva mostrando o comportamento dos tempos de subida para as diferentes concentrações é mostrado na fig. 5.

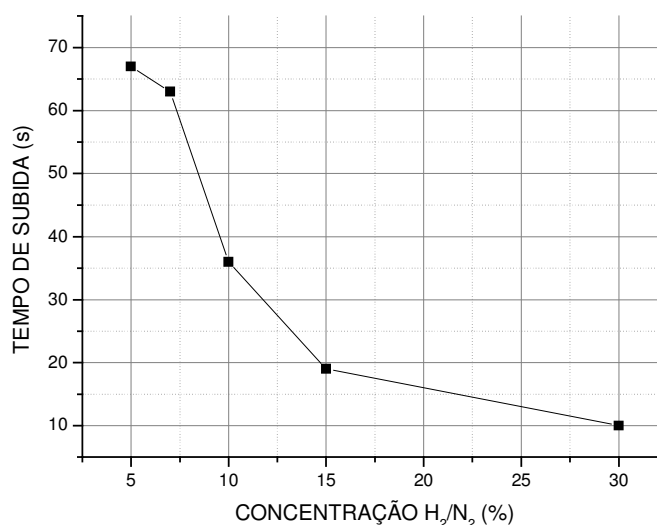


Fig. 5. Tempos de subida do sinal do sensor de hidrogênio a exposições de hidrogênio e nitrogênio, em função da concentração de H_2 em N_2 .

A curva da fig. 5. demonstra o comportamento da dinâmica da difusão do hidrogênio no sensor. Dado que a concentração aumenta, a difusão do gás no metal aumenta, já que é diretamente proporcional à concentração do gás e o processo de difusão é aparentemente dominante neste caso. Já o processo de relaxação do sensor, após o corte do fluxo de H_2 é aproximadamente o mesmo para o fim das diferentes exposições ao gás. Isso indica que o processo de difusão para fora do filme metálico também está relacionado às concentrações do gás fora do sensor e do gás que foi adsorvido e reagiu com o filme. Na concentração do gás dissolvido ou adsorvido física ou quimicamente, o sinal volta ao início da situação sem exposição do gás após mostrar valores de resposta da mesma ordem de grandeza, começando a aumentar para valores maiores que 350s para concentrações acima de 20% de H_2 . Outros processos de reação do H_2 com o metal, provavelmente de natureza irreversível, acontecem e isso requereria uma análise sob o ponto de vista de ciências dos materiais mais profunda. Entretanto, o método para avaliá-la seria o mesmo proposto aqui. A irreversibilidade está também associada a certo grau de histerese no sensor, cuja resposta não volta ao estado inicial de intensidade ótica antes da exposição ao gás. Essa histerese tem valores mais pronunciados para exposições a concentrações acima de 10%. Entretanto, o comportamento de histerese também ocorre para concentrações menores ou para variações de temperatura no experimento, o que não pôde ser totalmente controlado no experimento. Uma foto da câmara projetada e montada para teste do sensor com o sistema de rotâmetros para controle de fluxos é mostrado na fig. 6.

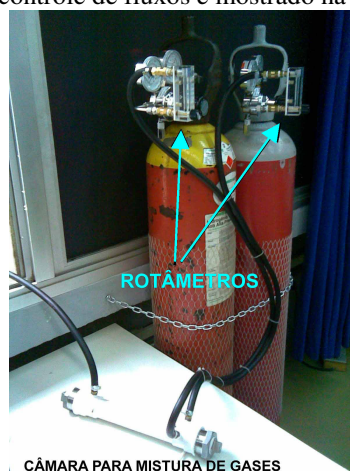


Fig. 6. Foto mostrando o sistema para testes dos sensores de hidrogênio onde na câmara gerava-se uma atmosfera controlada de H_2 e N_2 .

4. CONCLUSÃO

Um novo sistema com laser sintonizável de baixo custo de interrogação de sensores a redes de Bragg foi proposto para monitoração de concentrações de etanol em gasolina. O sensor para esse fim foi feito a partir de uma rede de Bragg de diâmetro reduzido para monitorar variações de índice de refração na solução. Mostrou-se que o sistema é passível de ser implementado visando a monitoração da concentração de etanol em gasolina. Outro sensor a Hidrogênio que havia sido proposto na literatura, bem como seus métodos otimizados de fabricação, foi aqui analisado sob o ponto de vista de sua dinâmica da resposta ao se expor o sensor a atmosferas de hidrogênio. Verificou-se que há forte dependência da temperatura neste caso, bem como incompatibilidade com dados publicados em outros trabalhos de outros autores. Além disso, permitiu-se propor um novo método para ciências dos materiais analisar o sistema Pd-H com esse sensor.

5. AGRADECIMENTOS

Apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo - ANP - e da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP - por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás - PRH-ANP/MCT (PRH10-CEFET-PR).

6. REFERÊNCIAS

- A. S. PATERNO. Sistemas de sensoriamento em fibras óticas. Tese de doutorado. **Universidade Tecnológica Federal do Paraná**. Curitiba: UTFPR, Dezembro, 2006.
- D. A. PEREIRA, O. FRAZÃO, J. L. SANTOS. Fiber Bragg grating sensing system for simultaneous measurement of salinity and temperature **Optical Engineering**. v. 43, n. 1, p. 299–304, 2004.
- J. VILLATORO, A. DIEZ, J. L. CRUZ, and M. V. ANDRES. In-Line Highly Sensitive Hydrogen Sensor Based on Palladium-Coated Single-Mode Tapered Fibers. **IEEE Sensors Journal**. v. 3, p. 533-538, 2003.
- A. S. PATERNO, V. de OLIVEIRA, T. S. FIGUEREDO, H. J. KALINOWSKI. Multiplexed Fiber Bragg Grating Interrogation System Using a Modulated Fiber Bragg Grating and the Tunable-Filter Method. **IEEE Sensors Journal**. v. 6, p. 1662-1668, 2006.
- A. S. PATERNO, N. HARAMONI, J.C.C. SILVA, H. J. KALINOWSKI. Highly reliable strain-tuning of an Erbium-doped fiber laser for the interrogation of multiplexed Bragg grating sensors. **Optics Communications**, v.273, p. 187–192, 2007.
- A. S. PATERNO, T. S. FIGUEREDO, M. S. MILCZEWSKI, H. J. KALINOWSKI. Sistema com sensor a FBG de campo evanescente: aplicações na detecção gasolina adulterada e desenvolvimento de sensor de Hidrogênio. **3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás**. Salvador, Bahia, 2005.
- A. S. PATERNO, C. LEGNANI, M. CREMONA, H. J. KALINOWSKI. Highly sensitive tapered fiber-optic sensor to detect gaseous hydrogen in low concentrations and the proposal to use it as a hydrogen embrittlement detector. **Rio Oil and Gas**. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- L. A. FERREIRA, E. V. DIATZIKIS, J. L. SANTOS, F. FARAH, Demodulation of fiber Bragg grating sensors based on dynamic tuning of a multimode laser diode. **Applied Optics**. v. 38, p. 4751 - 4759, 1999.
- J. M. SUPPLEE, E. A. WHITTAKER, W. LENTH. Theoretical description of frequency modulation and wavelength modulation spectroscopy. **Applied Optics**. v. 33, p. 6294 - 6302, 1994.

PAPER TITLE

Fiber optic sensors in the oil and gas sector: using a new technique to interrogate FBG sensors that measure ethanol concentration in gasoline and the characterization of Hydrogen sensors.

fiber optic sensors, interrogation techniques, fiber Bragg grating sensors, evanescent field sensors

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.