

Transdutor ótico para medição de salinidade em água doce

Marianne Sumie Kawano¹, Gustavo Rafael Collere Possetti¹, Francelli Klemba Coradin^{1,2},

Marcia Muller¹, José Luís Fabris¹

¹Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil

²Faculdade Estácio de Curitiba, Curitiba, Brasil
marcia.muller.br@gmail.com

Resumo— Neste trabalho é apresentado um transdutor ótico em fibra capaz de detectar o teor total de sais dissolvidos em água doce. Para tanto, a estrutura de uma rede de período longo, o sistema de interrogação e o procedimento de análise foram otimizados para maximizar a sensibilidade do dispositivo em fibra ao índice de refração do meio sob análise. Nesse sentido, constituiu-se um interferômetro de Michelson em fibra e utilizou-se um interrogador ótico com resolução em comprimento de onda menor que 0,5 pm. Esses dispositivos foram empregados para avaliar amostras de água ultra-pura acrescidas de cloreto de sódio (NaCl) em concentrações variando entre 0 e 45 g/L, as quais foram sistematicamente diluídas em glicerina na proporção de 1:1. Os resultados preliminares obtidos indicam que o transdutor ótico é capaz de detectar salinidade em níveis inferiores a 43 mg/L (ou 43 ppm). Esses níveis são, pelo menos, dez vezes menores que aqueles tipicamente detectados por outros transdutores em fibra não modificados.

Palavras chave- Transdutor ótico, rede de período longo, salinidade, índice de refração.

I. INTRODUÇÃO

A salinidade de corpos d'água é um importante parâmetro a ser monitorado, pois pode influenciar na perpetuação de espécies animais e vegetais, causar impactos econômico-sociais na agroindústria, prejudicar a saúde pública e alterar a dinâmica espaço-temporal de oceanos e de estuários. A magnitude da salinidade pode influenciar direta ou indiretamente alguns dos usos múltiplos da água, chegando até, em casos extremos, a inviabilizá-los. Águas com elevada concentração de sais dissolvidos podem causar a salinização de solos em que se pratica a cultura irrigada, reduzir a produtividade em projetos de piscicultura, interferir em processos industriais, além de causar não aceitação pelos consumidores por conferir gosto indesejável, podendo, inclusive, provocar endemias de hipertensão arterial [1,2].

A salinidade é ainda um parâmetro de grande importância no monitoramento de águas marinhas porque, a partir de sua determinação, é possível realizar previsões climáticas sazonais, planejar atividades de pesca e orientar ações relacionadas à indústria do petróleo. As medições de salinidade também são importantes na área da construção civil sobretudo na detecção preventiva de íons cloreto, que podem reagir quimicamente com o concreto armado de forma a degradá-lo [3].

Além disso, a salinidade é parâmetro fundamental para classificação de corpos d'água. Em território brasileiro,

definem-se águas doces como aquelas que possuem salinidade igual ou inferior a 0,5 g/L, águas salobras como aquelas que apresentam salinidade superior a 0,5 g/L e inferior a 30 g/L e águas salinas como águas com teor de sais igual ou superior a 30 g/L [4]. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS) [5], para que a água não apresente nenhum risco para a saúde humana, ela deve possuir no máximo 200 mg/L de sódio.

Sensores refratométricos em fibra ótica podem ser utilizados para medir salinidade. Dentre suas principais características destacam-se as reduzidas dimensões físicas, a possibilidade de monitoramento in-situ e em tempo real, a imunidade a interferências eletromagnéticas e a passividade elétrica. Nos últimos anos, diversos trabalhos foram reportados indicando que os seguintes dispositivos podem ser utilizados

para mensurar salinidade: transdutor a fibra ótica com ressonância plasmônica de superfície (Surface Plasmon Resonance – SPR) [1,6], rede de Bragg em fibra (Fiber Bragg Grating – FBG) corroída [7], rede de Bragg em fibra revestida com hidrogel [8], redes de período longo (Long Period Grating - LPG) [3,9] e redes de período longo em cascata (Cascaded Long Period Grating - CLPG) [2,10]. Nesse sentido, foram reportados resultados de medição de salinidade na ordem de centenas de ppm, com a necessidade do uso de técnicas de deposição de películas finas metálicas ou de hidrogel para aumentar a sensibilidade ou agregar seletividade ao transdutor. Sem a modificação do transdutor, a resolução dos dispositivos para detecção de teor de sais é da ordem de g/L, inviabilizando a medição de salinidade em água doce.

Os sensores baseados em LPG têm sido amplamente utilizados na determinação de parâmetros físico-químicos [11]. Com o intuito de melhorar a resolução e a sensibilidade ao índice de refração desses dispositivos, algumas técnicas já foram empregadas, tais como a redução do diâmetro da casca da fibra [12], o recobrimento da casca da fibra com filmes metálicos [6] e a construção de interferômetros [13-16]. A sensibilidade ao índice de refração desses dispositivos é não-linear e aumenta à medida que o índice de refração do meio externo se aproxima do índice de refração da casca da fibra que os contém [17]. Portanto, pode-se otimizar as propriedades sensoras de uma LPG por meio da diluição sistemática das amostras líquidas sob análise em uma substância padrão, desde que o índice de refração da mistura não seja superior ao índice de refração da casca da fibra.

Neste trabalho são apresentados resultados da aplicação de um transdutor ótico em fibra para determinação da concentração de NaCl em água, em níveis compatíveis com a salinidade de água doce. Como transdutor foi empregado um interferômetro de Michelson a fibra ótica interrogado em comprimento de onda. O interrogador utilizado apresenta resolução menor que 0,5 pm e as amostras de calibração foram diluídas em glicerina na proporção de 1:1 para aumento da sensibilidade do transdutor.

II. METODOLOGIA

O interferômetro de Michelson em fibra foi obtido por meio da gravação de uma LPG em um segmento de fibra contendo uma das extremidades espelhada, a cinco centímetros do local onde a rede foi gravada [15]. Nesse dispositivo, parte da potência ótica que se propaga no modo fundamental do núcleo da fibra é acoplada para modos de casca co-propagantes ao atingir a LPG. A potência ótica que se propaga nos modos de casca apresenta um atraso de fase em relação àquela que se propaga no núcleo, devido às diferentes constantes de propagação nos meios. Após a reflexão na extremidade espelhada, o sinal ótico atinge novamente a LPG e a potência ótica propagada na casca é re-acoplada para o modo fundamental de núcleo, onde se recombina com o sinal ótico remanescente e confinado no núcleo, o qual também é refletido na extremidade espelhada. A recombinação das duas componentes resulta em uma série de franjas de interferência no espectro de reflexão do dispositivo, como mostra a Figura 1.

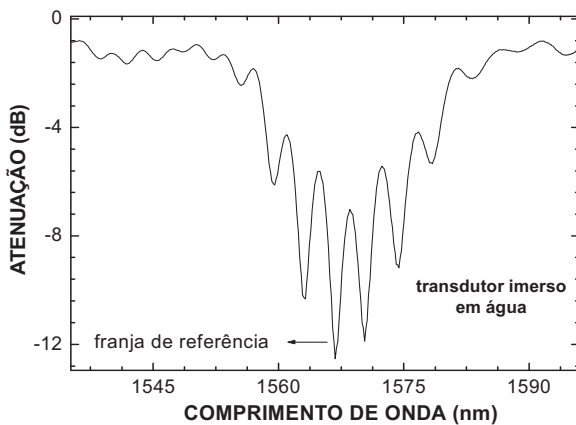


Figura 1. Espectro de reflexão do interferômetro de Michelson em fibra quando imerso em água ultra-pura a $(20,0 \pm 0,5)$ °C.

O atraso de fase depende do índice de refração efetivo dos modos de casca da fibra e, conseqüentemente, a posição espectral das franjas está relacionada com o índice de refração do meio externo à fibra. Além disso, alterações no índice de refração do meio externo modificam a condição de casamento de fase entre os modos de casca e o modo fundamental de núcleo, o que também resulta em deslocamentos das franjas, sendo possível a utilização do dispositivo como transdutor refratométrico para substâncias líquidas [18].

Para a realização dos experimentos, o transdutor interferométrico foi posicionado verticalmente em um suporte

metálico, mantendo-o em regime de estabilidade mecânica e de forma que tanto a LPG quanto a cavidade do interferômetro ficassem livres para imersão nas substâncias líquidas. Um LED superluminescente (MRV Communications, centrado em 1547,1 nm e com 54,8 nm de largura de banda a meia altura), um interrogador de espectros óticos (I-MON E, Ibsen Photonics, com resolução menor que 0,5 pm) e um circulador ótico com 3 portas foram utilizados para efetuar a leitura dos espectros de reflexão do dispositivo ótico imerso nas amostras de calibração.

Para a calibração do transdutor, foram preparadas amostras líquidas de cloreto de sódio (NaCl) dissolvido em água ultra-pura, nas concentrações de 0, 5, 15, 30 e 45 g/L. Para tanto, mediu-se a massa pertinente de NaCl com uma balança analítica (Marte-Shimadzu, AY 220, com resolução de $\pm 0,0001$ g), incorporando-a, na seqüência, em 200 mL de água ultra-pura. Em seguida, adicionaram-se 100 mL de glicerina em 100 mL de cada amostra salina (proporção de diluição de 1:1).

Dessa maneira, avaliou-se o comportamento das franjas de interferência dos espectros de reflexão do dispositivo quando em contato com as amostras salinas antes e depois da adição de glicerina. Os índices de refração das soluções salinas diluídas e não-diluídas em glicerina foram medidos com um refratômetro de Abbe convencional (Atago, DR-A1, com resolução de $\pm 0,00005$ UIR – unidades de índice de refração, operando em 589,3 nm). Todas as medições foram repetidas cinco vezes em condições de repetitividade e três vezes em condições de reprodutibilidade. Após a medição de cada amostra de calibração, limpou-se o transdutor, inicialmente, com álcool isopropílico e, na seqüência, com água ultra-pura. Os experimentos foram realizados a $(20,0 \pm 0,5)$ °C.

III. RESULTADOS

A Figura 2 apresenta os índices de refração das amostras líquidas salinas de calibração diluídas e não-diluídas em glicerina.

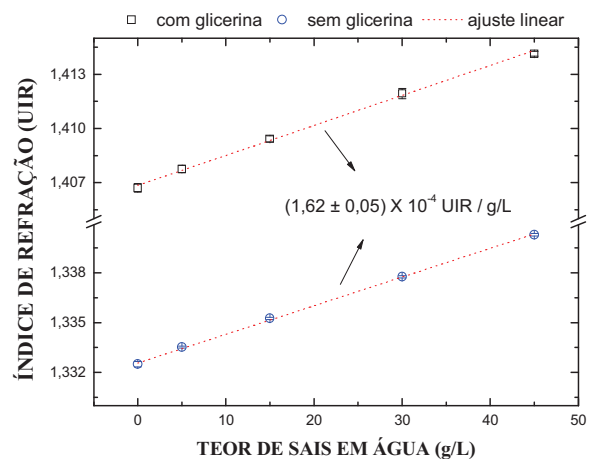


Figura 2. Índices de refração, a $(20,0 \pm 0,5)$ °C e em 589,3 nm, das amostras líquidas salinas de calibração diluídas e não-diluídas em glicerina.

Cada ponto representa a média aritmética das medições experimentais em condições de repetitividade e reprodutibilidade. Por sua vez, as barras de erros são as incertezas padrão combinadas, as quais foram calculadas com base nos desvios padrão experimentais e nas incertezas inerentes à resolução do refratômetro de Abbe e às amostras de calibração. As linhas vermelhas pontilhadas representam os ajustes lineares (curvas de calibração) aos pontos experimentais, sendo que os coeficientes de correlação obtidos foram maiores que 0,99. Os coeficientes angulares dos ajustes são aproximadamente iguais a $(1,62 \pm 0,05) \times 10^{-4}$ UIR/g/L e, portanto, indicam que a sensibilidade do refratômetro à concentração de sal na água não é modificada pela presença sistemática de glicerina nas amostras salinas. Nesse sentido, o aumento do teor de NaCl dissolvido na água ultra-pura induz o aumento monotônico dos índices de refração das soluções. Esse comportamento é verificado tanto para as amostras diluídas em glicerina quanto para as amostras não-diluídas em glicerina. A diluição das amostras de calibração em glicerina na proporção de 1:1 apenas promoveu o aumento sistemático de seus índices de refração em aproximadamente 0,074 UIR (deslocamento do coeficiente linear da reta).

As Figuras 3 (a) e (b) apresentam os espectros de reflexão do interferômetro de Michelson quando imerso nas soluções salinas contendo 45 g/L de NaCl, diluídas e não-diluídas em glicerina (linhas sólidas), e quando em contato com água ultra-pura (linhas tracejadas).

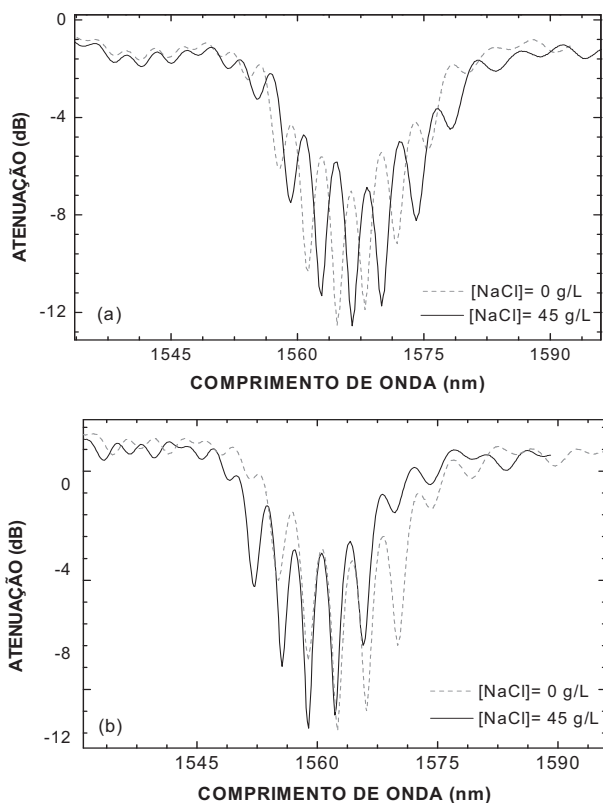


Figura 3. Espectros do transdutor em fibra quando em contato com água e com a amostra de maior concentração de NaCl: (a) sem adição da glicerina; (b) com adição da glicerina

Observa-se que os deslocamentos em comprimento de onda da franja de referência (ver Figura 1) com respeito à sua posição inerente ao contato com água ultra-pura, foram, respectivamente, $\sim 0,31$ nm e $\sim 0,73$ nm, para o interferômetro imerso nas amostras salinas não-diluída e diluída em glicerina. Isso indica que a sensibilidade do dispositivo ótico ao índice de refração é aproximadamente duplicada por conta da inserção da glicerina.

A Figura 4 apresenta os deslocamentos espectrais da franja de referência quando o interferômetro de Michelson em fibra foi imerso nas amostras líquidas salinas de calibração diluídas em glicerina. Os pontos são as médias aritméticas das medições experimentais em condições de repetitividade e reprodutibilidade. Por sua vez, as barras de erros são as incertezas padrão combinadas, as quais foram calculadas com base nos desvios padrão experimentais e nas incertezas inerentes à resolução do interrogador, às amostras de calibração e ao método de determinação da posição do comprimento de onda central da franja de referência.

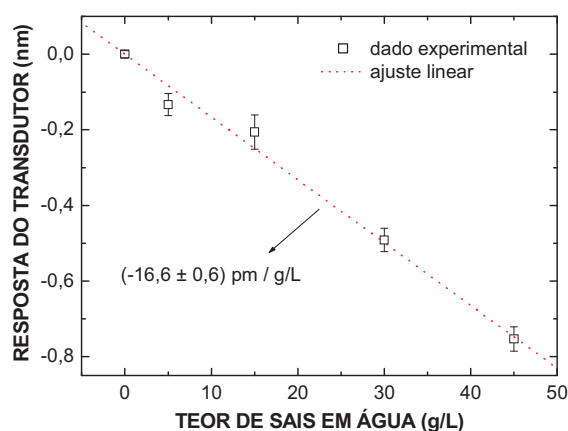


Figura 4. Curva de resposta do transdutor em relação à concentração de NaCl em água ultra-pura acrescida de glicerina na proporção de 1:1.

A linha vermelha pontilhada representa o ajuste linear aos pontos experimentais, considerando as barras de erros. O coeficiente de correlação desse ajuste é maior que 0,95. Por sua vez, o coeficiente angular de $(-16,6 \pm 0,6)$ pm/g/L representa a sensibilidade do interferômetro em fibra na detecção do teor de sais em água. O aumento da salinidade, na faixa entre 0 e 45 g/L induz deslocamentos monotônicos e aproximadamente lineares da franja de referência. Além disso, considerando que a resolução do interrogador é menor que 0,5 pm, a resolução do transdutor ótico na medição de salinidade é menor que 43 mg/L (ou 43 ppm). Esse valor, se comparado com resultados obtidos em trabalhos realizados anteriormente [2,10] é, pelo menos, dez vezes menor. Adicionalmente, a resolução obtida com o uso do interferômetro de Michelson é cerca de sete vezes menor que aquela referente à medição com o refratômetro de Abbe, cujo valor é aproximadamente 309 mg/L (ou 309 ppm).

A Tabela I sumariza as sensibilidades e as resoluções obtidas nas medições com o interferômetro de Michelson em fibra e com o refratômetro de Abbe.

TABELA I. SENSIBILIDADES E RESOLUÇÕES DO INTERFERÔMETRO DE MICHELSON EM FIBRA E DO REFRAATÔMETRO DE ABBE QUANDO USADOS PARA MEDIR SALINIDADE EM MEIO AQUOSO

Sistema de Medição	Característica Metrológica	NaCl
Refratômetro de Abbe	Sensibilidade (UIR / g/L).10 ⁻⁴	1,62 ± 0,05
	Resolução (mg/L = ppm)	309
Interferômetro de Michelson em fibra	Sensibilidade (pm / g/L)	-16,6 ± 0,6
	Resolução (mg/L = ppm)	< 43

IV. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados nesse trabalho indicam que um transdutor refratométrico baseado em uma LPG, quando configurado como um interferômetro de Michelson e interrogado por um equipamento com resolução em comprimento de onda menor que 0,5 pm, é capaz de detectar teores de sais menores que 43 mg/L (ou 43 ppm), se as amostras líquidas sob análise forem previamente diluídas em glicerina na proporção de 1:1. Esse valor é cerca de sete vezes menor que aquele encontrado para as medições com o refratômetro de Abbe, e pelo menos dez vezes menor que aqueles até então reportados na literatura para transdutores refratométricos em fibra não modificados. Os resultados apresentados indicam a viabilidade do emprego da técnica proposta, que aplica um transdutor em fibra ótica, para a medição da salinidade da água doce.

REFERÊNCIAS

[1] D. J. Gentleman e K. S. Booksh, "Determining salinity using a multimode fiber optic surface plasmon resonance dip-probe," *Talanta*, vol. 68, pp. 504-515, 2006.

[2] G. R. C. Possetti, R. C. Kamikawachi, C. L. Prevedello, M. Muller, J. L. Fabris, "Salinity measurement in water environment with long period grating based interferometer," *Measurement Science and Technology*, vol. 20, 34033, 2009.

[3] J. L. Tang, T. Y. Chiang, H. P. Chang, J. N. Wang, "Studies on measurement of ion concentration in concrete structures with long-period grating sensors," *Smart Structures and Materials: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, Proc. of SPIE, n. 6174R, 2006.

[4] Brasil, Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente, "Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências," Resolução n.357, 2005.

[5] Organização Mundial da Saúde, "Guia para a qualidade da água potável," [recurso eletrônico]: inclui o primeiro apêndice com recomendações, vol. 1, 3ª edição, 2006.

[6] N. Días-Herrera, O. Esteban, M. Navarrete, M. Le Haitre, A. Gonzalez-Cano, "In situ salinity measurements in seawater with a fibre-optic probe," *Measurement Science and Technology*, vol. 17, pp. 2227-2232, 2006.

[7] X. Sang, C. Yu, T. Mayteevarunyoo, K. Wang, Q. Zhang, P. L. Chu, "Temperature-insensitive chemical sensor based on fiber Bragg grating," *Sensors and Actuators B*, vol. 120, pp. 754-757, 2007.

[8] J. Cong, X. Zhang, K. Chen, J. Xu, "Fiber optic Bragg grating sensor based on hydrogels for measurement salinity," *Sensors and Actuators B*, vol. 87, pp. 487-490, 2002.

[9] R. Falciai, A. G. Mignani, A. Vannini, "Long period gratings as solution concentration sensors," *Sensors and Actuators B*, vol. 74, pp. 74-77, 2001.

[10] C. C. C. Lam, R. Mandampanambil, T. Sun, K. T. V. Grattam, S. V. Nanukuttan, S. E. Taylor, P. A. M. Basheer, "Optical fiber refractive index sensor for chloride ion monitoring," *IEEE Sensors Journal*, vol. 9, n. 5, 2009.

[11] R. Falate, R. C. Kamikawachi, J. L. Fabris, M. Muller, H. J. Kalinowski, "Fiber optic hydrocarbon sensors based on long period gratings," *Journal of Microwaves and Optoelectronics*, vol.3, n. 5, pp. 47-55, 2004.

[12] A. N. Chrissis, S. S. Saini, S. M. Lee, M. Dagenais, "Increase sensitivity and parametric discrimination using higher order modes of etched-core fiber bragg grating sensors," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 18, pp. 1/8-180, 2006.

[13] P. L. Swart, "Long-period grating Michelson refractometric sensor," *Measurement Science and Technology*, vol. 15, pp. 1576-1580, 2004.

[14] Y. Liu, A. R. Williams, L. Zhang, I. Bennion, "Phase shifted and cascaded long period fiber gratings," *Optics Communications*, vol. 164, pp. 27-31, 1999.

[15] M. S. Kawano, G. R. C. Possetti, R. C. Kamikawachi, J. L. Fabris, M. Muller, "Transdutor ótico com estruturas de redes de período longo para análise refratométrica de líquidos," 14º SBMO – Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 9º CBMag – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, pp. 748-751, 2010.

[16] R. C. Kamikawachi, G. R. C. Possetti, M. Muller, J. L. Fabris, "Influence of the surrounding refractive index on the thermal and strain sensitivities of a cascaded long period grating," *Measurement Science and Technology*, vol. 18, pp. 3111-3116, 2007.

[17] K. S. Chiang, Y. Liu, M. N. Ng, X. Dong, "Analysis of etched long-period fibre grating and its response to external refractive index," *Electronics Letters*, vol. 36, pp. 966-967, 2000.

[18] W. S. James, R. P. Tatan, "Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application," *Measurement Science and Technology*, vol. 14, pp. R49-61, 2003.