



## TÉCNICA EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÕES SIMULTÂNEAS DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO DE MEIOS FLUIDOS, EM TEMPO REAL

Cleyton Senior Stampa

Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia Mecânica

CEP: 24210-240 – Niterói, RJ, Brasil

Moises H. Szwarcman

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica

CEP: 22453-900 – Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Christiano J. S. Matos

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Física

CEP: 22453-900 – Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Luis C. Guedes Valente

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Física

CEP: 22453-900 – Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Sergio Leal Braga

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica

CEP: 22453-900 – Rio de Janeiro, RJ, Brasil

*Resumo: O presente trabalho apresenta uma técnica de medição do índice de refração em fluidos, através da utilização de fibras ópticas. Medidas em diferentes locais podem ser realizadas simultaneamente, em tempo real, causando mínima perturbação no meio. A flexibilidade da fibra óptica é aproveitada para a construção de um refratômetro óptico, portátil, com possibilidade de múltipla capacidade de medição. As variações do índice de refração do fluido, associadas a variações simultâneas de outras propriedades físicas como, por exemplo, temperatura, permitem correlações que, indiretamente, determinam grandezas de grande interesse como densidade e concentração. Esta técnica é baseada na determinação da reflexão de Fresnel, a partir do conhecimento do índice de refração da fibra e do meio a ser medido. A luz refletida na interface fibra-fluido é captada por um fotodetector, cujo sinal elétrico resultante é amplificado e lido por um voltímetro. Neste trabalho é apresentado ainda, um estudo de estabilidade da leitura do índice de refração e, também, um exemplo de aplicação desta técnica.*

*Palavras-chave: Sensor, Fibra óptica, Índice de refração, Tempo real.*

## 1. INTRODUÇÃO

Em vários experimentos realizados em meios fluidos, o conhecimento do índice de refração pode ser extremamente útil na determinação indireta de outras grandezas. Isto pode ser conseguido desde que o índice de refração seja também função destas outras grandezas. Como exemplo, algumas soluções apresentam variações de índice de refração com a concentração e com a temperatura, que podem ser correlacionadas, de modo que um valor local de concentração no fluido possa ser obtido através da medição simultânea da temperatura e do índice de refração. Normalmente, as medições de concentração em meios fluidos são obtidas também, por correlações experimentais tal qual descrito acima. Porém, amostras de fluido são retiradas do meio através de agulhas hipodérmicas, para terem seus índices de refração determinados num refratômetro óptico convencional, que é pré-calibrado para a faixa de concentração em análise. Apesar do cuidado tomado ao aplicar-se este método, é inevitável a ocorrência de distúrbios no fluido, afetando significativamente o campo de concentração. Além disso, existe a desvantagem de que apenas uma amostra pode ser retirada de cada vez. Verifica-se ainda que a amostra assim examinada, estaria sendo medida numa temperatura completamente diferente da que ela possuía quando pertencia a massa fluida. Uma desvantagem adicional é a de que só se poderia medir o índice de refração de uma amostra de cada vez. Tentativas foram feitas quanto a utilização de um refratômetro em miniatura, a base de fibra óptica, para medição local do índice de refração. Porém, seu funcionamento foi inadequado, proporcionando resultados incoerentes (Bergman et al., 1985) e (Christenson, 1988).

O presente trabalho apresenta uma técnica de medição do índice de refração em meios fluidos, através da utilização de fibras ópticas. Com esta técnica, diversas medidas, em diferentes locais, podem ser efetuadas paralelamente, em tempo real, causando mínima perturbação no meio. A flexibilidade da fibra óptica é aproveitada para a construção de um refratômetro óptico, portátil, podendo ser construído com múltipla capacidade de medição. Este dispositivo pode ser acoplado a um sistema de aquisição de dados, significando um uso contínuo e versátil em trabalhos experimentais.

## 2. TÉCNICA EXPERIMENTAL DE MEDIÇÃO DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO.

O método elaborado para a medição do índice de refração considera a reflexão de Fresnel na extremidade de uma fibra óptica, imersa no fluido de interesse. Assume-se que para uma fibra do tipo monomodo (com um só modo de propagação da luz), a luz refletida é o resultado de uma incidência normal à interface fibra-meio. Portanto, o coeficiente de reflexão do meio,  $R_m$ , é dado por:

$$R_m = \left( n_m - n_f \right)^2 / \left( n_m + n_f \right)^2 \quad (1)$$

onde  $n_m$  e  $n_f$  são os índices de refração do meio e da fibra, respectivamente.

O circuito básico utilizado é o mostrado na Fig. 1. A luz emitida por LED (Light Emitting Diode), de potência  $P_0$  (conhecida), é dirigida a um acoplador de duas entradas e duas saídas. Por uma dessas saídas, uma parte da luz, de potência  $P_R$ , chega a um fotodetector, dito de referência do circuito óptico, e o restante da luz chega à extremidade da fibra que se encontra imersa no meio fluido. Deve-se garantir, experimentalmente, que a interface fibra-meio corresponda à uma superfície o mais perpendicular possível ao eixo axial da fibra, para se obter um retorno máximo de luz refletida. As características desta fibra são tais que, caso

haja uma variação na perpendicularidade superior a um ângulo de  $5^\circ$ , nenhuma luz é mais

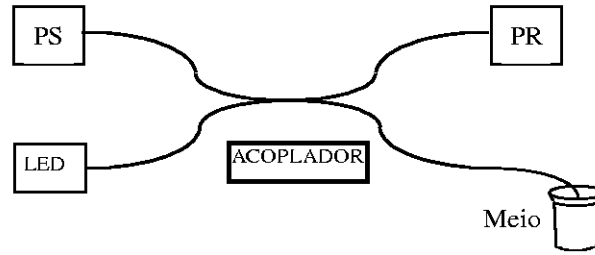


Figura 1- Circuito óptico básico.

guiada de volta pela fibra. A obtenção de uma superfície adequada pode ser conseguida através de uma boa clivagem (corte transversal da fibra). A luz refletida, vinda da fibra em contato com o meio, corresponde à intensidade do sinal,  $P_S$ , detectado por outro fotodetector. As relações entre estas grandezas são definidas pelas seguintes expressões:

$$P_S = C_1 R_m P_0 \quad (2)$$

$$P_R = C_2 P_0 \quad (3)$$

onde  $C_1$  e  $C_2$  são constantes que incluem perdas e razões de acoplamento existentes no acoplador óptico. Dividindo-se a Eq. (2) pela Eq. (3), e definindo-se um novo coeficiente  $C_3$  como a razão entre os coeficientes  $C_1$  e  $C_2$ , obtém-se a seguinte expressão:

$$C_3 = (P_S/P_0)/R_m \quad (4)$$

O coeficiente  $C_3$  é obtido experimentalmente através da calibração da sonda óptica, descrita mais adiante.

Para demonstrar a aplicabilidade da técnica, considere-se uma faixa de variação do índice de refração de um meio fluido, ocorrendo entre 1,3 e 1,4. A fibra óptica é feita de sílica e o índice de refração deste material é de 1,47 (Sterling & Donald, 1987), sendo a terceira casa decimal, dependente da qualidade do material. Assim sendo, através da Eq. (1), o coeficiente de reflexão pode ser estimado como sendo um valor situado entre  $4 \times 10^{-3}$  e  $6 \times 10^{-4}$ . Embora esta faixa de variação da refletividade seja estreita, pequenas variações no índice de refração do fluido podem ser facilmente captadas pela aparelhagem de medição.

Para ilustrar o acima exposto, caso o índice de refração do fluido varie de 1,300 para 1,301, a variação percentual resultante ( $\Delta R/R$ ) será de 1,3%. Por outro lado, caso o índice varie de 1,400 para 1,401, tem-se uma variação percentual correspondente de 2,9%. Desprezando-se as perdas, por questões de simplicidade, para um emissor de baixa potência, por exemplo de  $10 \mu\text{W}$ , através do circuito da Fig. 1 observa-se que chega à ponta da fibra imersa no fluido uma potência de luz de  $5 \mu\text{W}$ , dado que o acoplador divide igualmente a quantidade de luz que passa por ele. A luz refletida, ao retornar pelo acoplador, é novamente dividida e, através da Eq. (2), verifica-se que a potência de luz refletida,  $P_S$ , estará entre 1,5 e 10 nW, para valores do índice do meio de 1,4 e 1,3, respectivamente. Devido a potência emitida  $P_0$  ser fixa, através da Eq. (2) nota-se que uma variação de 1,3% na refletividade, causada por uma variação de  $1 \times 10^{-3}$  no índice de refração do fluido, representa uma variação de 0,117 nW em  $P_S$ . Utilizando-se um medidor de potência de luz (powermeter) com resolução de 1 pW, verifica-se que a variação acima referida, 117 pW, é mensurável, mesmo contabilizando-se as perdas inerentes ao arranjo óptico. Portanto, através do dimensionamento

correto de componentes ópticos, pode-se construir um circuito capaz de realizar estas medições.

Como visto, é necessário conhecer-se o valor do índice de refração da fibra com uma precisão muito alta a fim de se obter boas medições absolutas do índice de refração no meio fluido. Para tal, assumiu-se o valor do índice de refração da água, na temperatura ambiente de 20 °C, como sendo igual a 1,333 (CRC, 1975) e o índice de refração do ar como 1,000 (CRC, 1975). Substituindo-se estes valores nas Eqs. (1), (2) e (3), chega-se ao valor de 1,476 para  $n_f$ . A partir daí, a expressão para o cálculo do índice de refração é estabelecida, inclusive incluindo-se nesta a influência da variação do índice da fibra óptica como função da temperatura do meio no qual esta esteja imersa (Jackson & al., 1966). Explicitando-se  $n_m$  na Eq. (1) e substituindo-se o valor de  $n_f$ , tem-se as expressões para a determinação do índice de refração do meio fluido, dadas por:

$$R_m = (P_s / P_R) / C_3 \quad (5)$$

$$n_m = \left[ 1,2 \times 10^{-5} (T - 21) + 1,476 \right] \cdot \left[ (1 - R_m^{1/2}) / (1 + R_m^{1/2}) \right] \quad (6)$$

onde  $T$  é o valor da temperatura onde a fibra óptica está posicionada no meio fluido, sendo colhida por um termopar a ela atrelado.

### 3. ANÁLISE DOS SINAIS ELÉTRICOS E ÓPTICOS.

A luz refletida, de potência  $P_s$ , assim como a de referência,  $P_R$ , podem ou serem lidas diretamente por um medidor de potência de luz (powermeter), ou os sinais elétricos resultantes da amplificação dos sinais ópticos podem ser lidos por um voltímetro digital. De qualquer forma, a potência óptica é proporcional à tensão elétrica gerada. Desta forma, para fins práticos, deve ser utilizado um sistema de aquisição de dados, acoplado a um micro-computador para facilitar o processamento dos mesmos.

De grande importância, é a resolução tanto do powermeter como do voltímetro, que está associada a captação das variações ópticas do meio. Quanto maior a resolução destes medidores, menores incrementos ópticos serão identificados. Por outro lado, no caso do uso de voltímetros, a relação sinal/ruído deve ser a maior possível. Isto pode ser implementado otimizando-se os filtros ativos dos circuitos amplificadores e aumentando-se a potência óptica.

Considerando-se a determinação do índice de refração do meio com três casas decimais, foram realizados testes experimentais com o circuito óptico descrito na Fig. 1. O objetivo foi o de se avaliar, graficamente, não só a estabilidade de leitura da sonda, mas também, a faixa de variação deste índice associada ao ruído gerado em toda a aparelhagem. A Fig. 2 apresenta um gráfico típico deste estudo. Neste ensaio, utilizou-se um sistema de aquisição de dados da marca Hewlett Packard, modelo HP3852A. A sonda óptica foi imersa numa solução de índice de refração conhecido (CRC, 1975). Durante o experimento, a temperatura da solução foi mantida constante com o auxílio de um banho termostático. O período de observação da leitura foi de aproximadamente 10 minutos. A variação observada no índice, ao longo do tempo, reflete o ruído elétrico presente em toda a aparelhagem. Verifica-se que a flutuação observada é menor que  $1,25 \times 10^{-3}$ . Pelo acima exposto, nota-se que qualquer variação num

valor do índice de refração do meio, menor ou igual a flutuação observada na Fig. 2, está associada ao ruído elétrico.

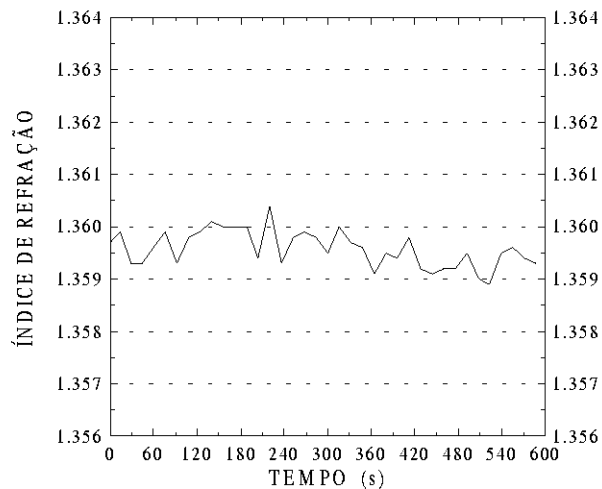


Figura 2. Estabilidade de leitura do índice de refração.

As incertezas de resultados experimentais estão vinculadas a aparelhagem de leitura ou do sinal óptico ou do sinal elétrico amplificado., e dependem do tipo de medição a ser realizada. No caso da Fig. 2 acima, trata-se de medição de um valor fixo de índice de refração no tempo, o que equivale a um processo repetitivo. Daí, a leitura do índice foi de  $1,3597 \pm 6,25 \times 10^{-4}$ .

#### 4. CALIBRAÇÃO DA Sonda Óptica..

A calibração de uma sonda óptica é efetuada imergindo-a num meio fluido, cuja refletividade seja conhecida da literatura. Assim, as potências  $P_S$  e  $P_R$  podem ser lidas por um powermeter ou voltímetro digital, determinando-se o valor de  $C_3$  através da Eq. (4). Nota-se que quanto mais próximo do índice de refração a ser medido, for o índice do meio em que é feita a calibração, maior será a exatidão da leitura. Assim, a calibração da sonda para medições de variação temporal de índices de refração conhecidos são triviais, ao passo que torna-se necessário um procedimento experimental de aproximação do índice do meio a ser calibrado com aquele a ser medido, quando este é desconhecido.

#### 5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.

Para ilustrar a aplicação desta técnica, realizou-se um experimento onde se mediu o índice de refração de soluções de água-álcool, de diferentes concentrações. A aparelhagem utilizada e o procedimento experimental adotado foram os mesmos que os descritos no item 3, A Fig. 3 mostra um gráfico do índice de refração x concentração, com valores experimentais sendo comparados com dados constantes da literatura (CRC, 1975), ditos de referência.

Verifica-se que a maior diferença absoluta para o índice de refração entre valores experimentais e de referência, correspondente à 0,17%, ocorre para a concentração de álcool de 50%. Todavia, o erro relativo, neste caso, corresponde à 6,9% em concentração. Nota-se ainda que a partir da concentração de 70% de álcool, o índice de refração passa por um máximo, decrescendo até a solução de álcool puro. Isto significa que esta técnica só pode ser

aplicada à meios fluidos, cujo índice de refração apresente uma variação monotonicamente crescente ou decrescente. Caso contrário, como nas soluções de água-álcool, poder-se-á obter ou medidas experimentais de índice de refração associada à dois ou mais valores de concentração, ou medidas sem possibilidade de avaliação de erro relativo em concentração.

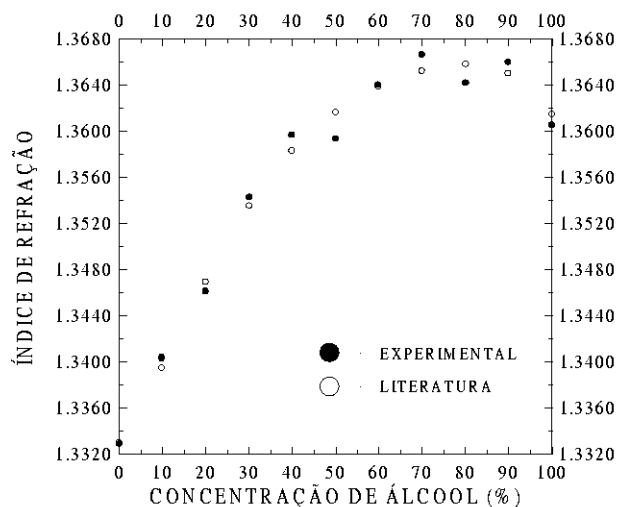


Figura 3. Índices de refração de soluções água-álcool.

## 6. CONCLUSÃO

Uma nova técnica para a medição do índice de refração de meios fluidos foi desenvolvida. Esta envolve a utilização de fibras ópticas como sensores, que devido à flexibilidade e facilidade de manuseio destas, proporciona medições em diferentes locais, simultaneamente e em tempo real. Esta técnica é baseada na determinação da reflexão de Fresnel, a partir do conhecimento do índice de refração da fibra e do meio a ser medido.

Foi verificado que variações da ordem de  $10^{-3}$  no índice de refração do fluido, podem ser facilmente captadas pela aparelhagem de medição. Um estudo de estabilidade da leitura do índice de refração revelou que, tipicamente, a flutuação observada é menor que  $1,25 \times 10^{-3}$ . Na determinação indireta de outras grandezas, observa-se que esta técnica só pode ser aplicada à meios fluidos, cujo índice de refração apresente uma variação monotonicamente crescente ou decrescente com estas grandezas. Através da multiplexação do circuito óptico básico, é possível a construção de um refratômetro óptico, portátil, com possibilidade de múltipla capacidade de medição.

### *Agradecimentos*

O autor Cleyton Senior Stampa agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ pelo suporte financeiro concedido através de uma bolsa de fixação de pesquisador, que viabiliza a sua participação em pesquisas como a do presente trabalho.

### REFERÊNCIAS

CRC, 1975, Handbook of Chemistry and Physics, 56<sup>th</sup> Edition, CRC Press.

- Bergman, T. L., Incropera, F. P., e Stevenson, W. H., 1985, Miniature fiber-optic refractometer for measurement of salinity in double-diffusive thermohaline systems, Ver. Sci. Instrum., vol. 56, pp. 291-296.
- Christenson, M. S., 1988, Solidification of binary substances in rectangular and cylindrical cavities., Phd. Thesis, Purdue University.
- Jackson, K. A. , Hunt, J. D. , Uhlmann, D. R. e Seward, T. P., 1966, On the origin of the equiaxed zone in castings, Trans. Met. Soc. AIME, vol. 236, n. III, pp. 149-158.
- Sterling, H. , Donald, J., 1987, Technician's guide to fiber optics, Delmar Publishers Inc.

Title

AN EXPERIMENTAL THECNIQUE FOR SIMULTANEOUS MEASUREMENTS OF THE REFRACTION INDEX OF FLUIDS, IN REAL TIME.

*Abstract: In this work, a technique for measurement of the refraction index of fluids, utilizing optical fibers, is presented. Measurements in different places can be taken, simultaneously, in real time, causing minimal perturbation in the medium. It is taken advantage of the optical fiber flexibility in building an optical refractometer, portable, capable of taking many measurements. Refraction index variations, associated with simultaneous changes in other physical properties such as, for example, temperature, allow correlations that can indirectly yield to important properties like density and concentration. This technique is based on the determination of the Fresnel reflection, starting from the knowledge of both the optical fiber and medium refraction indexes. The reflected light in the fiber-medium interface strikes in a photo-detector, in which its resultant electrical signal is amplified and read by a voltmeter. Further, it is showed in this work, a study about the stability of the refraction index with time, as well as an example of practical use of this technique.*

*Key words: Sensor, Optical fiber, Refraction index, Real time.*