

Sensores de Fibras Óticas

Edmundo Antonio Soares

Apresenta-se aqui uma pequena revisão do estado atual de desenvolvimento de sensores de fibras óticas. Apresentam-se também alguns trabalhos realizados nesta área no Departamento de Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, dando-se enfoque especial aos sensores de temperatura, vibração e corrente elétrica.

1. Introdução

Desde o seu aparecimento, no início dos anos 70 [1], e durante quase uma década, as fibras óticas foram usadas e estudadas exclusivamente como elementos de sistemas de comunicações. A partir de 1977 [2], começaram a aparecer as primeiras pesquisas sobre o uso de fibras para a construção de elementos capazes de medir diferentes parâmetros físicos, chamados de sensores de fibras óticas. Os sensores vêm sendo desenvolvidos desde então, tendo recebido crescente atenção neste curto período de tempo e já se constituindo em ativo ramo de pesquisa básica e aplicada, bem como gerando um mercado de vários milhões de dólares.

Em 1982 foram publicadas duas excelentes revisões [3] e [4] sobre sensores de maneira geral e que até hoje continuam sendo leitura obrigatória, pois tratam de princípios básicos sobre os quais deve se apoiar a tecnologia de fabricação de sensores de fibras óticas.

Deve-se citar também o livro de Culshaw [5], publicado em 1984, que sistematizou o estudo do assunto, incluindo algumas previsões para o futuro, várias delas confirmadas hoje em dia. Aplicações industriais de sensores podem ser encontradas em Jones [6] ou Medlock [7].

Naturalmente, existem vários laboratórios e indústrias no mundo inteiro que contribuem para o desenvolvimento de sensores e seria uma tarefa impossível catalogar todos os autores individuais. As referências [1] até [7] e todas as outras nelas contidas cobrem de maneira razoável o assunto.

O autor é Professor do Departamento de Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, Rua Passos da Pátria, 156, 24210, Niterói, RJ.

2. Vantagens de Sensores de Fibras Óticas

O sensor de fibra ótica é simplesmente um pedaço de fibra que modula de maneira conhecida a luz que o atravessa e é detectada na outra extremidade. A maioria dos sensores atuais ainda é baseada na modulação de amplitude da luz que pode ser feita diretamente (ou internamente), quando a própria fibra é o elemento transdutor que vai transformar o parâmetro a ser medido em informação luminosa para o detector. Estes sensores são usados na medida de campos magnéticos, correntes elétricas, campos elétricos etc. Existe ainda a modulação indireta (ou externa), onde o elemento transdutor é externo à fibra. Entre outros, há sensores de temperatura, pressão e vibração que empregam esse método. A classificação aqui apresentada é mais ou menos arbitrária e nada impede que a temperatura, por exemplo, seja medida por um arranjo do tipo interno levando em conta a dilatação da fibra. Existe ainda um tipo de sensor que pode ser colocado em uma classe isolada: o sensor interferométrico.

Há vários tipos de interferômetros a fibras óticas que podem ser usados em sensores capazes de medir praticamente qualquer grandeza com grande sensibilidade, em geral maior do que a obtida por outras técnicas. Os mais conhecidos são os de Mach-Zehnder e o de Sagnac, esquematizados nas **figuras 1 e 2**, respectivamente.

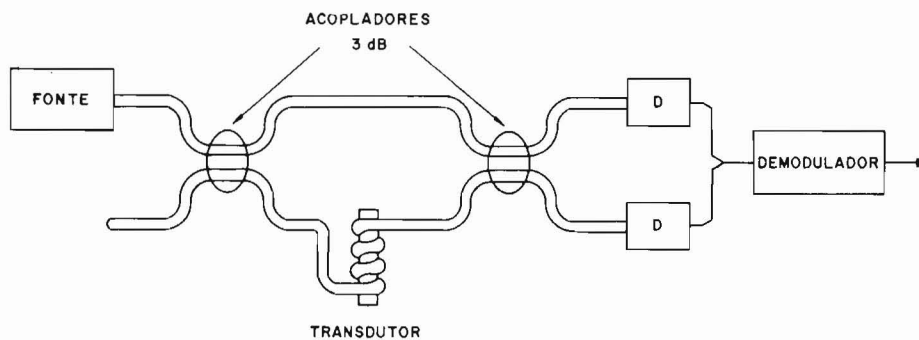


Figura 1. Interferômetro de Mach-Zehnder.

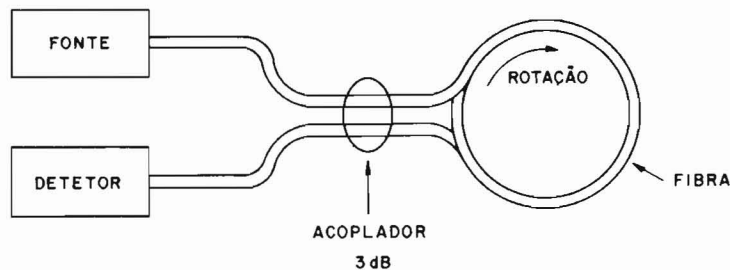


Figura 2. Interferômetro de Sagnac.

O Interferômetro de Mach-Zehnder é relativamente simples de construir e consiste de dois braços, sendo um de referência e outro o sensor propriamente dito. O braço de referência fica isolado do efeito a ser medido enquanto o braço do sensor é exposto ao mesmo, geralmente com a adição de um transdutor particularmente sensível ao efeito. Este produz uma defasagem entre a luz que se propaga no braço sensor e aquela no braço de referência, defasagem essa que pode ser relacionada à magnitude do efeito.

Um exemplo típico de transdutor é a colocação de uma jaqueta envolvendo parte da fibra. A jaqueta sofre a influência do parâmetro a ser medido, contraindo-se ou expandindo-se, induzindo tensões na fibra que mudam o índice de refração, o que por sua vez muda a relação entre as fases nos dois braços.

O sinal luminoso é convertido em elétrico por um ou mais fotodetectores e depois processado eletronicamente. A sensibilidade de um sensor desse tipo é muito grande e pode ser estimada pelo seguinte cálculo: 1 microradiano de defasagem corresponde a uma variação de comprimento na fibra $D = (\lambda/2\pi) \cdot 10^{-6}$, onde λ é o comprimento de onda da luz (1 micron, para a luz usualmente utilizada em fibras) resultando deste modo que D é da ordem de 10^{-13} m. É possível, então, medir defasagens correspondentes a variações daquela ordem, que equivalem a distâncias nucleares. Teoricamente, pode-se medir qualquer efeito (pressão, temperatura, campo magnético etc) que se manifeste provocando a variação de comprimento óptico efetivo do braço sensor, mesmo que essa variação seja tão pequena quanto 10^{-13} m.

O interferômetro de Sagnac [8] utiliza uma única fibra sendo muito usado na construção de giroscópios. Neste aparelho, dois feixes de luz propagam-se em sentidos opostos ao longo de um anel bastante extenso de fibra óptica. A rotação do anel produz uma diferença de fase entre os dois feixes que é convertida em modulação de intensidade por um acoplador de 3dB e depois detectada eletricamente por um fotodetector. Para maiores informações sobre o princípio de funcionamento dos já citados e de outros tipos de interferômetros, recomenda-se o livro de Hecht e Zajac [9].

Os sensores de fibras ópticas também têm sido muito usados em medicina que, na verdade, constitui o campo onde foram aplicados pela primeira vez de maneira sistemática e intensa (o aparelho de endoscopia digestiva é um exemplo clássico). Existem vários artigos de revisão sobre a aplicação de sensores em medicina, dos quais podem-se destacar dois de Scheggi [10] e [11].

As maiores vantagens dos sensores de fibras ópticas residem em sua sensibilidade (já comentada), imunidade à interferência eletromagnética, versatilidade geométrica e possibilidade de obtenção de altas taxas de transmissão associadas a uma larga banda de passagem.

A imunidade à interferência permite o uso de cabos de fibras óticas para transmissão de dados de parâmetros sensoreados a longa distância com baixíssima interferência entre canais e é particularmente importante ao se medirem parâmetros onde é necessário um isolamento elétrico (corrente em linha de alta tensão, por exemplo). A necessidade de uma grande banda de passagem que permite o emprego de altas taxas de transmissão é evidenciada em sensores de radiação [12] ou mesmo em computação. A versatilidade geométrica permite o uso de várias configurações diferentes, cada qual mais conveniente para um dado caso e um dado parâmetro. Em Giallorenzi et al [13] podem ser encontradas tabelas de comparação de vários sensores, parâmetros medidos, suas vantagens, bem como o estado de desenvolvimento de cada um deles.

3. Sensores de Fibras Óticas na Universidade Federal Fluminense

No Brasil, a TELEBRÁS, inicialmente através de contrato mantido com a UNICAMP e posteriormente através de seu próprio Centro de Pesquisas (CPqD) em Campinas foi a pioneira na exploração de fibras óticas, tendo começado a investir recursos no princípio da década de 70 e até hoje lidera as pesquisas na área. No entanto, seu principal objetivo ainda está voltado para a fibra como elemento de um sistema de comunicações e, embora sejam estudados e construídos LED's ("Light Emission Diodes"), díodos lasers, acopladores direcionais, fibras especiais, não há um esforço direcionado para o estudo de sensores. Do mesmo modo se comportam outros grupos no país, em sua maioria concentrados no Estado de São Paulo.

Do conhecimento do autor, só há três grupos em São Paulo com esforço concentrado e direcionado para sensores de fibras óticas, dois deles em Departamentos de Engenharia Elétrica de Universidades (USP e UNICAMP) e o terceiro no CTA (Centro Tecnológico Aeroespacial) de São José dos Campos. No Rio de Janeiro, existe um grupo no Departamento de Física da PUC, que atua na área de fibras óticas, mas não inclui o estudo de sensores como prioritário.

O Departamento de Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense (TET-UFF) possui um grupo cujo principal interesse reside no estudo e desenvolvimento de sensores de fibras óticas e, juntamente com o CEPEL (Centro de Pesquisas da ELETROBRÁS), são os únicos ativos nessa área dentro do Grande Rio. O interesse do TET em sensores é muito recente, datando de 1986, e se justifica por ser este um setor ainda pouco explorado a nível nacional, o que obriga, por exemplo, que sejam adquiridos no exterior elementos já montados e preparados para medidas de parâmetros como tensão elétrica, campo elétrico, corrente elétrica, pressão, temperatura, vibrações etc.

A área de sensores de fibras óticas pode ser classificada como de tecnologia de ponta e apresenta problemas técnicos não resolvidos mesmo a nível internacional. Isso aconselha fortemente a entrada de países em desenvolvimento na competição, uma vez que o domínio da tecnologia permitirá grande economia de divisas. Por outro lado, o problema de sensores é importante do ponto de vista técnico-científico, o que pode ser comprovado pelo vasto número de publicações sobre o assunto.

Isoladamente e em convênio com o CEPTEL, o TET desenvolve estudos sistemáticos sobre a viabilidade de várias concepções de sensores à base de fibras óticas, destacando-se entre estes os sensores de temperatura, vibração e corrente elétrica. A interação entre os pesquisadores surgiu de maneira natural, através dos objetivos comuns, levando ao estudo de sensores com uso potencial em linhas de transmissão de potência do sistema ELETRO-BRÁS. Os sensores atualmente utilizados são do tipo convencional e custam caro por serem importados. Os projetos contam também com o apoio do CNPq e FAPERJ através de auxílios individuais.

3.1 Sensores de Temperatura

A medida de temperatura é essencial para controle de processos, monitoramento de aeronaves e motores, instrumentação médica e outras áreas. Entre essas se incluem medidas da temperatura em pontos energizados de transformadores de potência e linhas de transmissão, para as quais os sensores de fibras óticas são bastante apropriados [3], [5], [13] e [14].

Existem vários fenômenos físicos que podem ser utilizados para a construção de um sensor de temperatura. Em geral, qualquer sensor apresenta alguma dependência com a temperatura, o que pode levar a se pensar que é muito fácil construir um sensor desse tipo. No entanto, existem problemas sérios em sua construção, pois é complicado fazer um sensor de temperatura que não seja influenciado por outros parâmetros, assim como saber distinguir o efeito da temperatura em sensores projetados para a medida de outras grandezas. Entre os processos normalmente usados para a construção de sensores de temperatura, podem ser citados aqueles baseados na variação (que depende da temperatura) das propriedades de transmissão, fluorescência, emissão ou índice de refração de um dado elemento sensor. Tais sensores são classificados como incoerentes, pois detectam variações da intensidade da luz. Os sensores classificados como coerentes detectam variação da fase ótica e entre eles estão os interferométricos. Para uma revisão desse tipo de sensores é recomendável a leitura de [15] e de todas as referências ali mencionadas.

Até o momento, foram realizados esforços que resultaram em dois tipos de sensores de temperatura, os quais se encontram em estágios diferentes

de desenvolvimento. Ambos são baseados na modulação de amplitude da luz pelo método externo à fibra e podem ser classificados como incoerentes. O primeiro deles [16] – [19] se apóia no princípio da variação com a temperatura das propriedades de absorção ótica de um filme de silício hidrogenado amorfo depositado diretamente na extremidade da fibra. A temperatura é medida indiretamente através da leitura da luz refletida pelo filme que se encontra em contato com o meio do qual se deseja medir a temperatura, por intermédio da construção de uma ponta sensora adequada. O filme de a-Si:H é depositado pela decomposição de gás silano (SiH_4) por uma descarga de RF (rádio frequência). Este método permite o controle de vários parâmetros da deposição que influenciam nas características do filme, tais como: temperatura do substrato, fluxo e pressão do gás e densidade de potência de RF. A espessura do filme é medida por reflectometria e os espectros de transmissão por um espectrofotômetro Cary 17D. Por este método, é possível obter o índice de refração em função do comprimento de onda e o "gap" ótico. A ponta sensora é construída depositando-se uma camada refletora de alumínio sobre o filme de a-Si:H por meio de evaporação em alto vácuo. Na **Fig. 3** é mostrado o arranjo experimental utilizado. Para se obter uma boa razão sinal-ruído (SNR), modula-se a fonte em 1 kHz e usam-se filtros passa faixa na detecção do sinal. Com isso, consegue-se uma SNR de cerca de 1.500. Se necessário, pode-se utilizar um sistema de detecção em fase, que aumenta o grau de complexidade e encarece o sistema, porém melhora significativamente a SNR. Todos os componentes usados no aparelho são facilmente encontrados no comércio e normalmente utilizados em sistemas de comunicações, o que barateia o equipamento e torna simples sua manutenção.

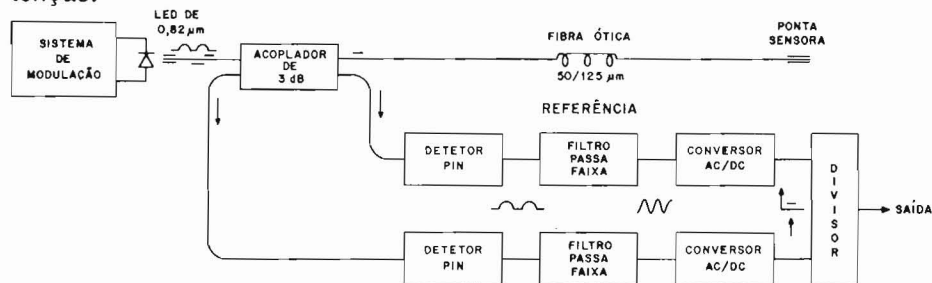


Figura 3. Montagem do sensor de temperatura de a-Si:H.

Os espectros de transmissão de um filme de a-Si:H para duas temperaturas diferentes são mostrados na **Fig. 4**, onde se pode observar a grande variação de transmitância devida ao limiar de absorção, modulada pela interferência entre as reflexões provenientes de ambas as extremidades do filme. A região ideal de utilização deve ser tal que o espectro não apresente extremos de modo a se obter resposta unívoca de temperatura em função da intensidade de luz. Na **Fig. 4**, esta região se encontra entre 550 e 700nm, aproximadamente. Um filme com tais características é ideal para ser utilizado com

um laser de He-Ne como fonte. O gráfico da Fig. 5 foi levantado nessas condições. Ali é mostrada uma curva típica do sinal em função da temperatura e pode-se observar uma variação linear de 50% para uma variação correspondente da temperatura entre 50C e 200C.

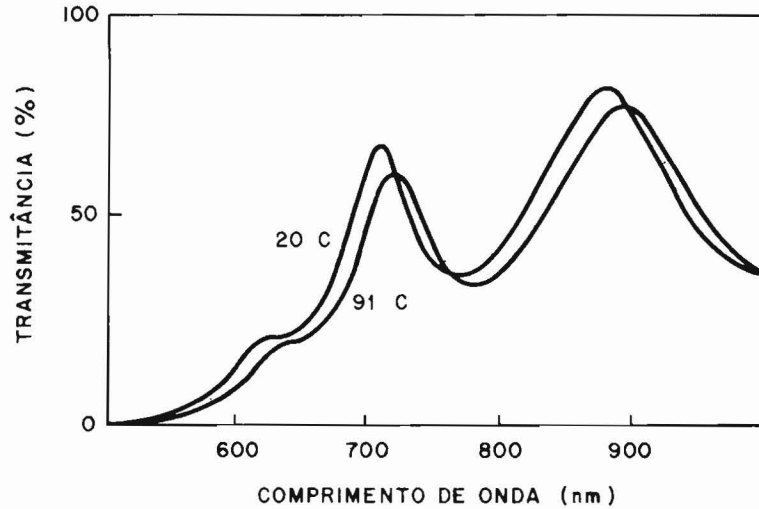


Figura 4. Espectros de transmissão do filme de a-Si:H para duas temperaturas distintas.

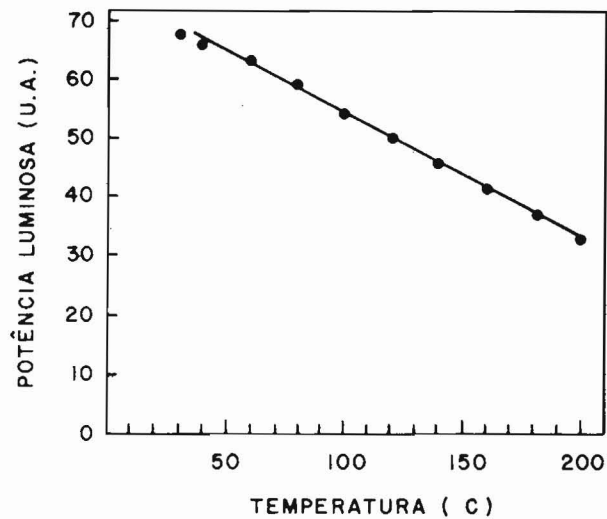


Figura 5. Curva típica de potência luminosa em função da temperatura para o sensor de a-Si:H.

Para tornar o sistema mais compacto e econômico é melhor usar como fonte um LED de GaAs, sendo necessário mudar as características do filme de modo que a região de transmissão linear se situe em torno do comprimento de onda de emissão do LED, ou seja, 0,82 micron. Esse objetivo é conseguido facilmente através de um tratamento térmico do filme, que produz efusão do hidrogênio do a-Si:H diminuindo o "gap" ótico. Na **Fig. 6** mostra-se o efeito de um tratamento térmico a 500C por 30 minutos no limiar de absorção de um filme depositado a 250C.

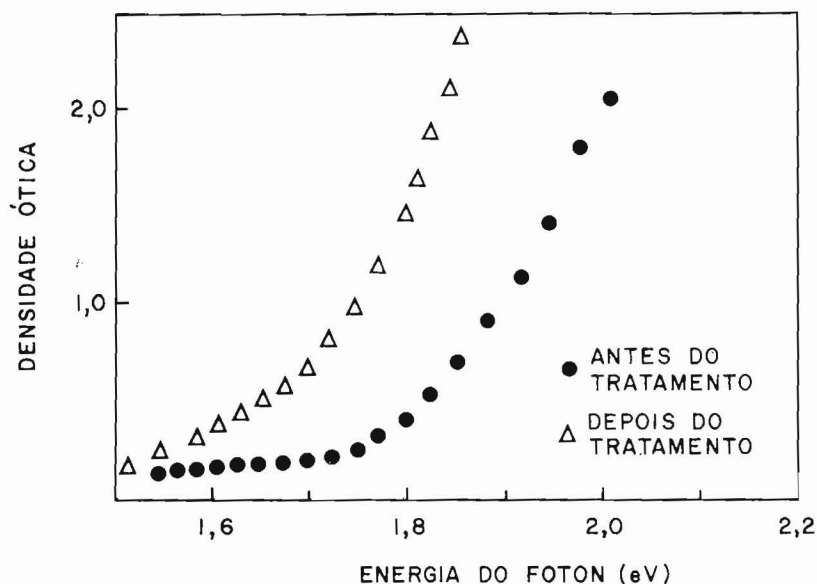


Figura 6. Densidade ótica em função da energia para filme antes e depois de tratamento térmico.

O filme foi depositado sobre a ponta da fibra de modo a obter-se boa rigidez mecânica e pequenas dimensões, atributos importantes para um bom sensor. Esta solução leva a outras vantagens tais como menor inércia térmica e grande intensidade de luz. Os efeitos de interferência podem ser reduzidos pela deposição adicional de uma camada anti-refletora entre a ponta da fibra e o filme propriamente dito. Essa camada pode ser constituída de um filme de nitreto de silício hidrogenado amorfo (a-Si N:H) que permite, usando-se uma concentração adequada de nitrogênio, realizar um casamento perfeito entre os índices de refração dos dois filmes.

O sensor se encontra em fase final de elaboração no CEPEL, a um passo de se transformar em um produto pronto para uso, o que deve acontecer em curto prazo.

O outro sensor de temperatura que vem sendo desenvolvido baseia-se na variação do índice de refração de líquidos com a temperatura [20] – [22], sendo extremamente simples em sua concepção, porém bastante eficiente.

Uma fibra comum de 50/125 é descascada ao longo de uma pequena região e colocada em contato com um líquido cujo índice de refração é função da temperatura. O conjunto fibra-líquido é encapsulado em um tubo de vidro. Este arranjo é a ponta sensora. A variação da temperatura provoca a mudança do índice de refração do líquido em relação ao núcleo da fibra, modulando a intensidade de luz que chega ao detector trazendo a informação da temperatura. A **Fig. 7** mostra o esquema do sensor e pode-se notar sua grande simplicidade.



Figura 7. Montagem do sensor de temperatura baseado na variação do índice de refração de um líquido (a ponta sensora é uma fibra descascada e encapsulada junto com o líquido).

No estágio atual, a detecção é feita em DC (“Direct Current”), sem a modulação, e o sinal de referência é usado para monitorar a potência do LED de GaAs. Cabe lembrar que todo sensor incoerente baseado em modulação de intensidade de luz precisa utilizar um sinal de referência a ser comparado com a informação. Tal procedimento evita erros que adviriam da variação de potência da fonte ou de mudanças normais provocadas por envelhecimento de componentes.

A **Fig. 8** mostra duas curvas típicas deste sensor obtidas com dois líquidos de índices de refração diferentes. Pode-se notar que a mudança do líquido permite medir temperaturas em regiões diferentes. Usando-se o óleo 1, mede-se a temperatura na faixa de 64,5°C a 77°C, aproveitando-se uma boa região linear da curva. Já o óleo 2 permite medidas na faixa de 50°C a 70°C. As possibilidades de uso são limitadas apenas pela descoberta do óleo com índice de refração conveniente para uma dada faixa de temperatura e obtenção de uma determinada precisão.

O presente sensor possui algumas vantagens em relação a outros similares utilizando o mesmo princípio [20], pois aqui a luz é detectada por transmissão,

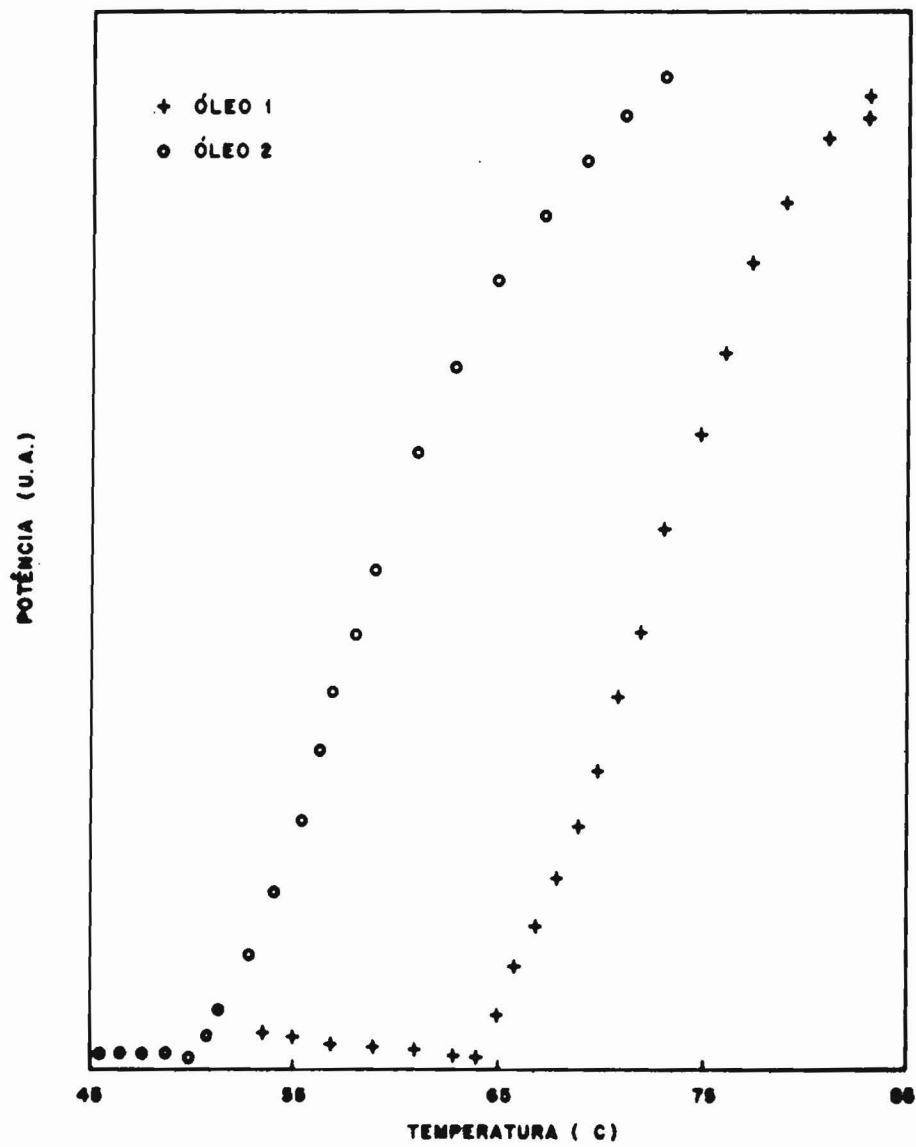


Figura 8. Potência luminosa em função da temperatura para dois óleos diferentes.

simplificando algumas características da detecção por reflexão, tais como a necessidade de superfícies refletoras e acopladores. O sensor ainda se encontra em fase de montagem de laboratório e, apesar da existência de

problemas a serem resolvidos, os resultados aqui descritos indicam que o mesmo é viável e poderá ser desenvolvido.

3.2 Sensor de Vibração

O sensor de vibração [23] – [25] adapta ao caso presente um método descrito por Culshaw [5], chamado de modulação com distanciamento direto. Tal método consiste em colocar duas fibras uma em frente à outra, com os eixos colineares, e separadas por uma distância D conforme indicado na Fig. 9.

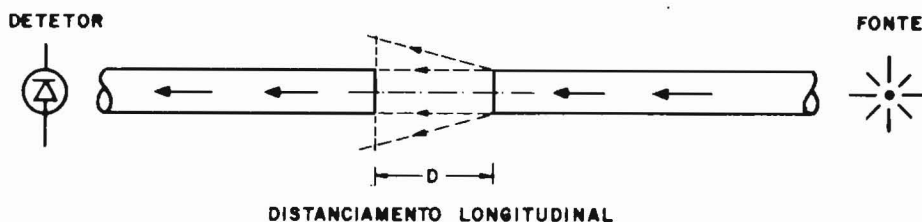


Figura 9. Princípio de funcionamento do sensor de vibração.

A luz é injetada por uma fibra e coletada na outra, já modulada pelo deslocamento relativo entre as fibras devido à vibração. A intensidade de luz medida é proporcional à área que o cone de luz emitido por uma fibra cobre na fibra oposta (ver Fig. 10). Esta área pode ser calculada de maneira simples, seguindo-se a geometria indicada na Fig. 11.

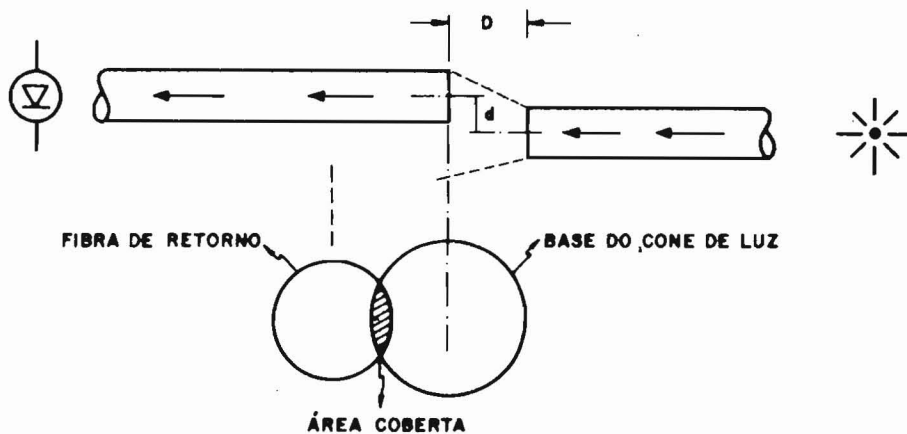


Figura 10. Parâmetros do sensor de vibração.

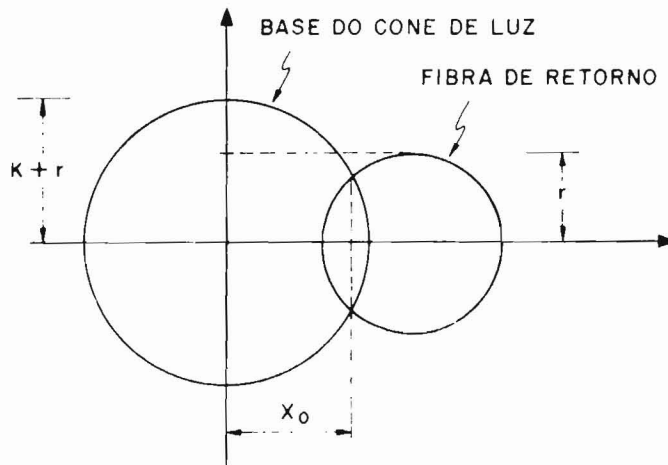


Figura 11. Geometria usada para cálculo da área coberta pelo cone de luz de uma fibra sobre a outra no sensor de vibração.

O cone de luz tem como seção reta

$$K = \frac{nD}{\sqrt{1-n^2}}$$

sendo n a abertura numérica da fibra e D a distância entre as duas fibras. A área coberta pode ser expressa como:

$$A = n^2 \left[\pi - \arccos \left(\frac{X_0 - d}{r} \right) \right] + (X_0 - d) \cdot \sqrt{r^2 - (X_0 - d)^2} +$$

$$+ (K + r)^2 \arccos \left(\frac{X_0}{K + r} \right) - X_0 \sqrt{(K + r)^2 - X_0^2}$$

onde

$$X_0 = \frac{K(K + 2r) + d^2}{2d}$$

e d é a distância lateral entre as fibras, como indicado na **Fig. 10**. Na **Fig. 12**, mostra-se o gráfico teórico de A .

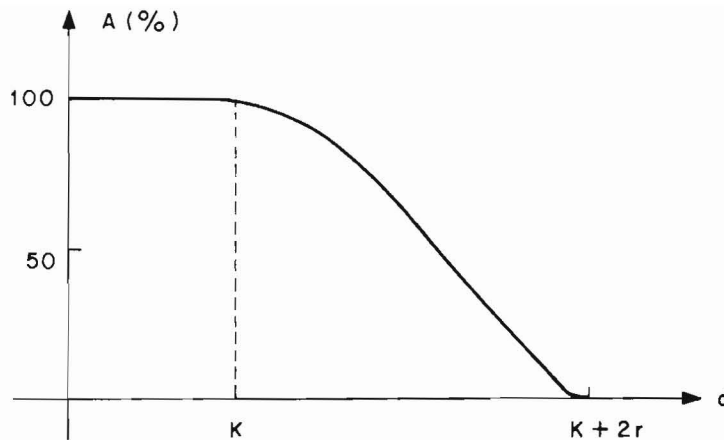


Figura 12. Gráfico teórico da área coberta A em função do distanciamento lateral d .

As medidas foram feitas com fibras multimodo de índice gradual e diâmetro de 150 microns. Para a fonte de luz, utilizou-se um LED TIL 31B e como detector, um fototransistor TIL 81B. Na **Fig. 13**, mostra-se um gráfico típico obtido, representando a quantidade de luz que alcança o detector (medida em termos da tensão na resistência de carga do fototransistor) em função do espaçamento lateral d entre as fibras. A comparação entre as **figuras 12 e 13** mostra que o sensor reproduz na prática os resultados teóricos.

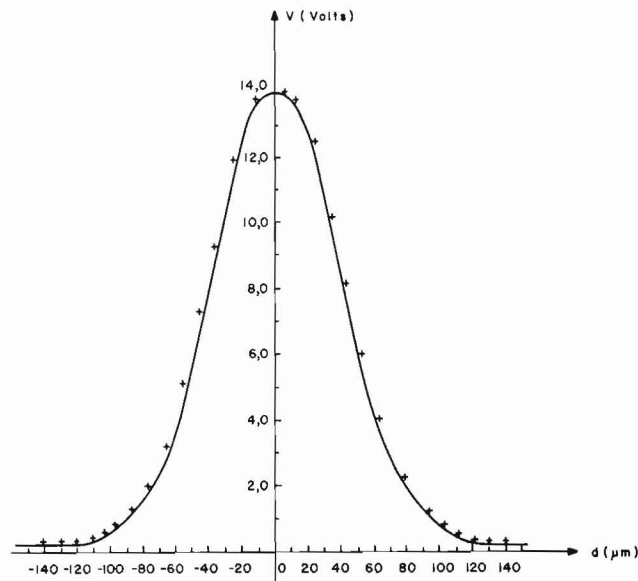


Figura 13. Curva experimental obtida para a área A .

Para verificar o comportamento do sensor em um caso prático, simulou-se uma vibração ligando uma haste solidária ao cone de um alto-falante a uma das fibras, como indicando na **Fig. 14**. Alimentando-se o alto-falante com o gerador de funções, obtém-se a curva apresentada na **Fig. 15**, que mostra a viabilidade do sensor. A amplitude da vibração pode ser medida pela retificação do sinal de saída e uma calibração adequada; a frequência é lida diretamente no osciloscópio ou através de um freqüencímetro. O presente sensor foi desenvolvido até o estágio de protótipo de laboratório, ficando demonstrada a possibilidade de utilização do mesmo como aparelho de medida em um projeto futuro.

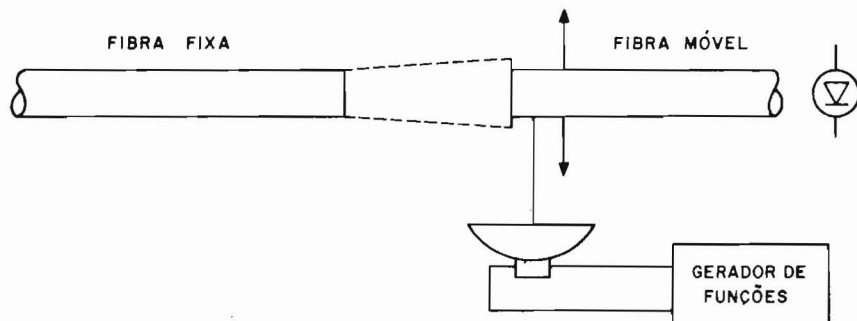


Figura 14. Montagem usada para simular vibração.

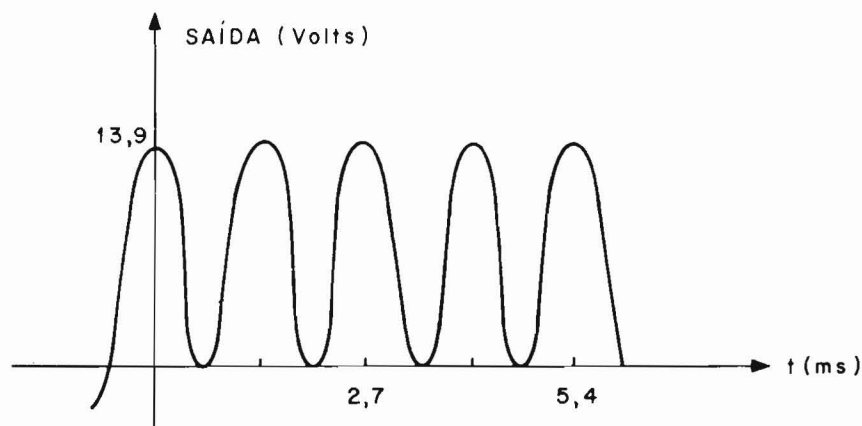


Figura 15. Curva obtida com a montagem apresentada na **Fig. 14**.

3.3. Sensor de Corrente Elétrica

O sensor de corrente elétrica foi, em grande parte, pesquisado em conjunto com o CEPEL, tentando-se estudar características complementares em cada lugar. Existem vários métodos [5] e [13] para a medida de corrente elétrica.

No entanto, dois são mais populares, sendo usados indistintamente, na dependência apenas da faixa de valores de corrente a serem medidos e dos objetivos a serem alcançados.

O primeiro deles consiste em recobrir parte da fibra com uma jaqueta de material magnetostritivo que detectará a corrente por intermédio do campo magnético por ela gerado. O campo atua sobre o material, comprimindo-o ou dilatando-o e esse efeito se faz sentir sobre a fibra, modificando suas propriedades e modulando a luz por ela transmitida. O método funciona com muita precisão se a fibra for colocada em um braço de interferômetro, podendo medir correntes e campos magnéticos muito baixos.

O segundo método é baseado no efeito Faraday, pelo qual o plano de polarização da luz, ao atravessar um meio ótico, sofre uma rotação proporcional a um campo magnético aplicado ao longo da direção de propagação. O referido campo pode ser produzido por uma corrente elétrica que flui em uma direção perpendicular ao meio ótico condutor de luz, no caso a fibra ótica. A rotação é proporcional à integral do campo magnético H ao longo do percurso de propagação. A constante de proporcionalidade V é conhecida como constante de Verdet [9], sendo característica do meio onde a luz se propaga. Este segundo método vem sendo utilizado por ser mais acessível, necessitando de componentes mais baratos e que por vários motivos puderam ser obtidos de maneira simples. Naturalmente, o método se aplica muito bem ao tipo de medida no qual o sensor deverá ser utilizado, qual seja, a corrente elétrica em linhas de transmissão de alta-tensão [26] e [27].

Normalmente, a geometria do sensor é tal que a fibra ótica deve ser enrolada em torno do condutor, ao longo de um certo número de voltas igual a N . Certas precauções precisam ser tomadas, pois este procedimento aumenta a birefringência linear intrínseca de fibras comerciais, mascarando a rotação devida puramente ao efeito Faraday. Uma dessas precauções consiste em usar fibras de baixa birefringência, já disponíveis comercialmente. Aqui é preciso ressaltar um ponto importante na construção desse tipo de sensor, que é a caracterização da fibra utilizada, ou seja, a determinação da constante de Verdet V e da birefringência linear BL . Além disso, a fibra deve ser monomodo para que se possa observar a rotação da polarização de um dado modo.

Para a construção do protótipo [28]–[31], foi utilizada a montagem que aparece na **Fig. 16** a qual permite, ao mesmo tempo, mostrar a viabilidade do sensor e determinar as características da fibra. A fibra empregada foi cedida pelo CPqD e tem a denominação MO-785. Normalmente, as correntes em linhas de alta-tensão são da ordem de 1000 A e como não se dispunham de meios para gerar correntes de tal magnitude no laboratório, optou-se por uma montagem ligeiramente diferente da usual, passando-se a fibra reta pelo eixo oco de um solenóide percorrido por uma corrente elétrica. Tal

arranjo permite obter um campo magnético suficiente para a experiência. Deve-se observar também o emprego de modulação da luz por um "chopper", o que permite o uso de um amplificador "lock-in" na detecção, aumentando-se assim a eficiência da mesma.

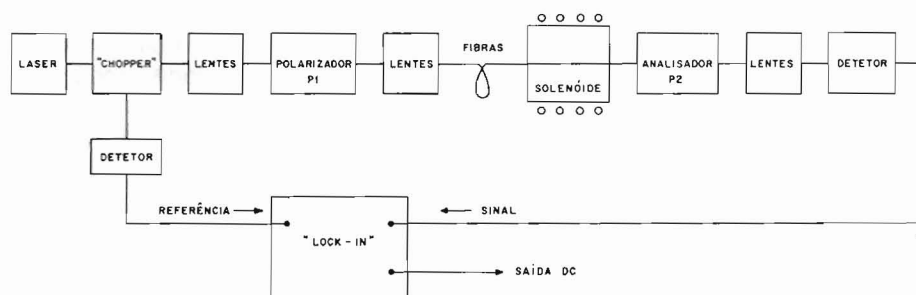


Figura 16. Montagem do sensor de corrente elétrica.

Já foram medidas a constante de Verdet e a birefringência linear da fibra MO-785, obtendo-se os valores $V=0,016$ min/A. espira e $BL=3,2^\circ/m$, ambas à temperatura ambiente. Para medir essas grandezas, utilizou-se o método descrito em [30]. O gráfico que aparece na **Fig. 17** indica os valores do ângulo de rotação em função da corrente. O gráfico é essencialmente uma linha reta com inclinação $0,8$ graus/A. Sabendo-se que a bobina utilizada possui 3.000 espiras efetivas, pode-se calcular o valor da constante de Verdet indicado acima. Não foi observada variação de V para temperaturas até 75°C .

4. Perspectivas

O esforço desenvolvido até aqui tem sido compensador, pois o balanço mostra um sensor de temperatura em vias de se tornar um produto utilizável na prática, um sensor de vibração cuja viabilidade foi demonstrada, e dois outros sensores, um de temperatura e outro de corrente elétrica em processo de estudo com amplas chances de se tornarem também produtos acabados.

Nos próximos anos, deveremos continuar desenvolvendo os atuais sensores de temperatura e corrente, bem como tentar a construção de sensores interferométricos, devido à sua grande sensibilidade. Parte da pesquisa deverá se voltar para os interferômetros à fibra ótica, prevendo sua futura utilização em sensores de tensão, campo elétrico e, eventualmente, giroscópios. Outra área de interesse futuro será a de sensores distribuídos, nos quais as pontas sensoras são descentralizadas, facilitando-se a multiplexação de sinais e

a conseqüente monitoração de vários pontos à distância, muito importante em diversos processos produtivos.

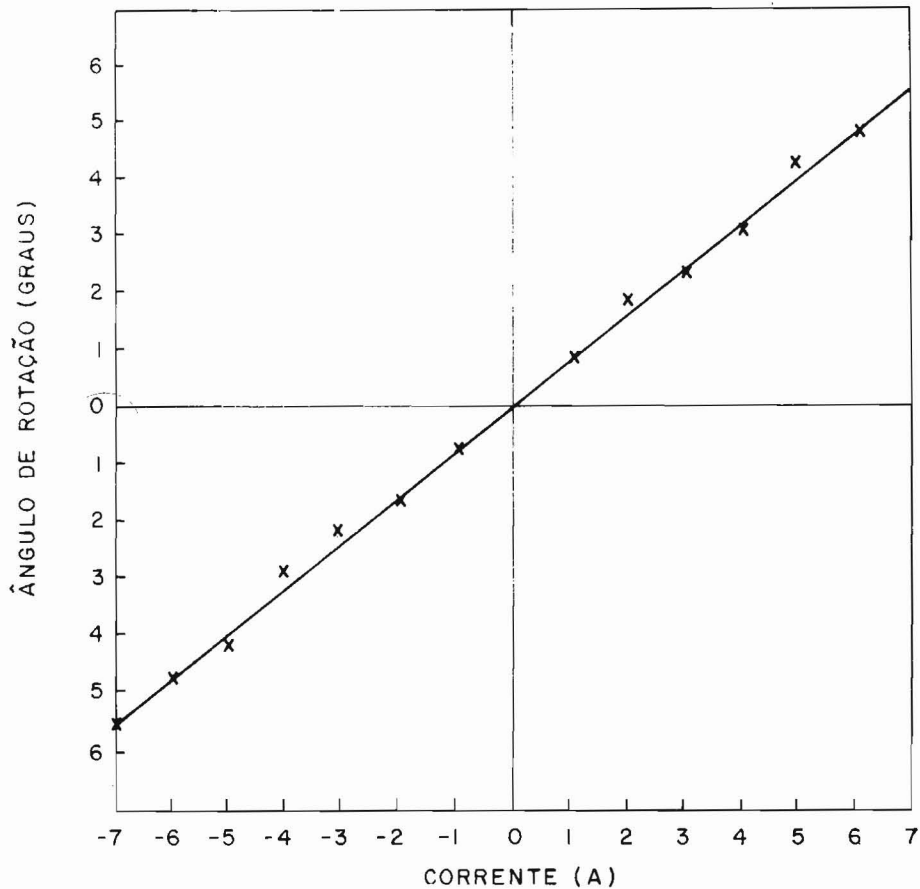


Figura 17. Gráfico do ângulo de rotação da polarização da luz em função da corrente no solenóide.

Agradecimentos

O autor gostaria de expressar seus agradecimentos a toda a equipe envolvida no projeto, em especial ao professor Luiz Carlos Guedes Valente e aos alunos Tarcísio Martins Dantas, Andrés Pablo Lopez Barbero, Sebastião Ricardo Mascarenhas Carneiro, Bianca Chinelli, Tieko Hiraga e Luiz Eduardo Fontes Mello Almeida que trabalharam no estudo e desenvolvimento dos sensores aqui descritos. Os agradecimentos se estendem ao CNPq, FAPERJ, UFF e ELETROBRÁS pelos auxílios concedidos aos projetos do grupo.

Referências

- [1] C.K. Kao e G.A. Hockham, "Dielectric Fibre Surface Waveguides For Optical Frequencies", Proceedings of the IEE, vol. 113, n.º 7, Julho 1966, pp. 1151-1158.
- [2] J.A. Bucaro et al, "Fiber Optic Hydrophone", Journal of The Acoustical Society of America, vol. 62, n.º 5, Maio 1977, pp. 1302-1304.
- [3] S. Ezekiel e H.J. Arditty, "Fiberoptic Rotation Sensors and Related Technologies", Springer-Verlag, 1982.
- [4] T.G. Giallorenzi et al, "Optical Fiber Sensor Technology", IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. QE-18, n.º 4, Abril 1982, pp. 626-665.
- [5] B. Culshaw, "Optical Fibre Sensing and Signal Processing", Peter Peregrinus, Londres, 1984.
- [6] B.E. Jones, "Optical Fiber Sensors and Systems for Industry", Journal of Physics E: Scientific Instruments, vol. 18, n.º 2, Fevereiro 1985, pp. 770-781.
- [7] R.S. Medlock, "The Present and Future Status of Fibre Optic Sensors in Industry", em "Optical Fiber Sensors", editado por A.N. Chester et al, Martinus Nijhoff, 1987, pp. 419-427.
- [8] G. Sagnac, "L'ether Lumineux Démontré par L' effet du Vent Relatif D' ether Dans un Interferometer en Rotation Uniforme", Comptes Rendues Pour l' Académie de Sciences, vol. 95, n.º 3, Março 1913, pp. 708-710.
- [9] E. Hecht e A. Zajac, "Optics", Addison Wesley, 1973.
- [10] A.M. Scheggi, "Optical Fibers in Medicine", Proceedings of the Second International Optical Fiber Sensor Conference, Berlim, Setembro 1984, pp. 93-106.
- [11] A.M. Scheggi, "Optical Fiber Sensors in Medicine", em "Optical Fiber Sensors", editado por A.N. Chester et al, Martinus Nijhoff, 1987, pp. 407-418.
- [12] P.B. Lyons, "Review of High Bandwidth Fiber Optic Radiation Sensors", Proceedings of the SPIE n.º 566, 1985, pp. 424-428.
- [13] T.G. Giallorenzi et al, "Optical Fiber Sensors Challenge The Competition", IEEE Spectrum, vol. 23, n.º 9, Setembro 1986, pp. 44-49.

- [14] A.J. Rogers, "An Optical Temperature Sensor for High Voltage Applications", *Applied Optics*, vol. 21, n.º 2, Fevereiro 1982, pp. 882-885.
- [15] W. Glenn, "Fiber Optic Temperature Sensors", em "Optical Fiber Sensors", editado por A.N. Chester et al, Martinus Nijhoff, 1987, pp. 185-199.
- [16] L.C.G. Valente e E.A. Soares, "Temperature Measurement Utilizing Amorphous Hydrogenated Silicon Films", *Proceedings of the SPIE* n.º 838, 1987, pp. 247-251.
- [17] L.C.A. Martins, L.C.G. Valente e E.A. Soares, "Termômetro de Fibras Óticas", XXXIX Reunião Anual da SBPC, Brasília, Julho 1987.
- [18] L.C.A. Martins, L.C.G. Valente e E.A. Soares, "Sensores de Temperatura por Fibras Óticas Utilizando Filmes de Silício Hidrogenado Amorfo", X Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, São Lourenço, Minas Gerais, Maio 1987.
- [19] L.C.A. Martins, L.C.G. Valente, E.A. Soares e H.J. Kalinowski, "Termômetro a Fibra Ótica Utilizando Filme Fino de Silício Hidrogenado Amorfo Como Material Sensor", X Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, São Lourenço, Minas Gerais, Maio 1988.
- [20] A.M. Scheggi et al, "Optical Fiber Thermometer For Medical Use", *Proceedings of The First International Conference on Optical Fibre Sensors*, Londres, Abril 1983, pp. 13-16.
- [21] T.M. Dantas e E.A. Soares, "Sensor de Temperatura Usando Fibra Ótica", II Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, Rio de Janeiro, Novembro 1988.
- [22] T.M. Dantas e E.A. Soares, "A Utilização de Líquidos na Medida de Temperatura Por Fibras Óticas", VII Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, São Carlos, SP, Dezembro 1988.
- [23] A.P.L. Barbero, T.M. Dantas e E.A. Soares, "Sensor de Vibração Utilizando Fibras Óticas", VI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, São Carlos, SP, Dezembro 1987.
- [24] A.P.L. Barbero, T.M. Dantas, L.C.G. Valente, H.J. Kalinowski e E.A. Soares, "Fibras Óticas Como Sensores de Oscilações Mecânicas", XI Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, São Lourenço, Minas Gerais, Maio 1988.
- [25] A.P.L. Barbero, T.M. Dantas, L.C.G. Valente, H.J. Kalinowski e E.A. Soares, "O Uso de Fibras Óticas no Monitoramento de Vibrações", XL Reunião Anual da SBPC, São Paulo, SP, Julho 1988.

- [26] "Optical Power Line Voltage and Current Measurement Systems, vol. I—Limits to The Precision of Electro-Optic and Magneto-Optic Sensors", Relatório EPRI EL-5431, Project 2748, Setembro 1987.
- [27] "Optical Power Line Voltage and Current Measurement Systems, vol. II—Assessment of Future Optical Measurements of Voltage and Current in Electric Power Systems", Relatório EPRI EL-5431, Projeto 2748, Setembro 1987.
- [28] L.C.G. Valente e L.R. Kawase, "Computer Simulation of a New Fiber Optic Current Sensor", Proceedings of the SPIE n.º 985, 1988, pp. 22-30.
- [29] A.P.L. Barbero, S.R.M. Carneiro e E.A. Soares, "Sensoreamento Ótico de Corrente Elétrica Baseado no Efeito Faraday", II Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Novembro 1988.
- [30] H.J. Kalinowski e E.A. Soares, "Método de Medida Para a Determinação da Birefringência Linear, Grau de Polarização e Constante de Verdet Para Fibras Óticas Monomodo", Relatório Técnico n.º 1, Convênio TET-CEPEL, Dezembro 1988.
- [31] A.P.L. Barbero, S.R.M. Carneiro, E.A. Soares e H.J. Kalinowski, "Sensor de Corrente por Fibras Óticas", VII Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, São Carlos, SP, Dezembro 1988.



EDMUNDO ANTONIO SOARES formou-se em Engenharia Elétrica pela PUC/Rio em 1967. Obteve o grau de Mestre em Ciências em Física pela mesma Universidade em 1970. De 1970 a 1971 trabalhou como Professor Assistente no Departamento de Física da PUC/Rio. Em 1971 foi para o Departamento de Física da Universidade Federal de Pernambuco onde ajudou a estabelecer um grupo de pesquisa em Física do Estado Sólido ao mesmo tempo que desenvolvia sua tese de Doutorado, concluída em 1975, quando obteve o grau de Doutor em Física pela PUC/Rio, através de convênio entre as duas Universidades. De 1975 a 1977 realizou o Pós-Doutorado na University of California at Santa Barbara, retornando a Recife onde permaneceu atuando nas áreas de Ressonância Magnética e Ótica até fins de 1985, quando se transferiu para o Departamento de Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense (TET – UFF) para novamente colaborar na formação de um grupo de pesquisa, desta vez em Sensores de Fibras Óticas. Atualmente é Professor Titular por concurso (realizado em 1986) do TET – UFF. É sócio efetivo da Sociedade Brasileira de Física, da Sociedade Brasileira de Telecomunicações e da Society for Photo Instrumentation Engineers (SPIE).