

# Sensor Óptico de Proximidade à Fibra com Grade de Bragg baseado na Atuação de Força Magnética

Claudio Floridia, Angela C. S. Brígida, Flávio Borin, João Batista M. Ayres Neto, Rogério L. Leite, Eduardo F. Costa, Danilo C. Dini, Petrus Alcantara Junior, Norberto Bramatti

**Resumo** –Um novo sensor óptico de proximidade independente da variação de temperatura é proposto. A idéia consiste no uso de um magneto (ímã) fixado em uma fibra com grade de Bragg (FBG). As deformações na FBG vão depender assim da proximidade ímã em relação a um alvo metálico ferromagnético. Essa deformação resulta na variação do período da grade de Bragg e do comprimento de onda refletido provenientes de uma fonte de banda larga, como um LED. A variação em comprimento de onda pode ser facilmente convertida em variações de potência óptica utilizando-se uma segunda FBG, que também compensa a temperatura ambiente. O dispositivo obtido é de baixo custo devido ao sistema simplificado de interrogação.

**Palavras-chave** – Fibra óptica, força magnética, grade de Bragg, hidrogerador, sensor de proximidade.

## I. INTRODUÇÃO

Esforços nas pesquisas em sensores com fibras ópticas baseadas na tecnologia de fibras com grades de Bragg (FBG) têm atraído interesses consideráveis [1]. Vários efeitos têm sido medidos usando essa tecnologia, tal como temperatura, deformação, pressão e campo magnético [1], [2]. Em todas as aplicações, a grandeza medida é determinada pelo deslocamento do comprimento de onda induzido pela deformação na grade de Bragg ou pela variação da potência usando, por exemplo, um laser com pequena largura de linha na borda do espectro de reflexão da FBG ou usando uma FBG e um filtro de borda. Nestes casos fica claro que a variação na temperatura interfere diretamente na quantidade medida. Muitas técnicas têm sido propostas para a construção de um sensor independente de temperatura, tal como comprimentos de

onda duplos superpostos em grades de Bragg [3], híbrido de grade de Bragg/grade de longo período [4], FBGs de duplo diâmetro [5], FBG combinados com EDFA [6], método de cavidade Fabry-Perot em FBG [7], entre outros. Um modo simples para discriminar medidas de temperatura e deformação consiste em usar um par de FBGs em série [8].

Essa idéia pode ser adaptada para obtenção de um sensor independente de temperatura se o espectro refletido pelas grades de Bragg forem ligeiramente deslocados, como proposto em [9] para uma configuração em paralelo. Nesse trabalho resultado do Projeto de P&D: Sensores ópticos de proximidade, Código ANEEL: 0372-61/2004, executado pela Fundação CPqD - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações e pela UFPA - Universidade Federal do Pará, com suporte financeiro da Eletronorte - Centrais Elétricas do Norte do Brasil, projeto este concluído, essas idéias são aprimoradas e aplicadas para medidas de proximidade. Um sensor de proximidade independente da temperatura foi desenvolvido usando um par de FBGs idênticas, uma delas afixada a um ímã que sofre atração em proximidade de um material ferromagnético aqui denominado de alvo metálico. Ambas FBGs são sensíveis à temperatura, porém somente uma irá ser tensionada pelo alvo metálico. Análises teóricas e experimentais nas respostas do sensor foram conduzidas obtendo diferentes escalas de operação e sensibilidade nessa configuração [10].

## II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Está apresentada a seguir a metodologia utilizada no desenvolvimento do projeto Sensores Ópticos de Proximidade cujo objetivo era determinar a configuração de um sensor de proximidade óptico à fibra mais adequado para monitorar continuamente a distância entre o eixo da turbina e os demais componentes da mesma.

Para atingir o objetivo deste projeto foi realizado inicialmente um levantamento bibliográfico do estado da arte em sensores ópticos de proximidade analisando as técnicas de detecção usadas e suas características de operação adequadas para o sensoriamento nas turbinas da Eletronorte.

Após o levantamento das tecnologias existentes de sensores ópticos de proximidade foi realizada uma análise crítica onde foi verificado que os sensores ópticos existentes não atendiam a todos os requisitos desejados neste projeto, a saber: não ter contato com o eixo da turbina, não necessitar de alimentação elétrica no local de instalação dos sensores,

---

Este trabalho foi desenvolvido no projeto “Sensores Ópticos de Proximidade” Cód. ANEEL-0372-61/2004 e financiado pela Eletronorte no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 e 19 de agosto de 2011.

C. Floridia, F. Borin, J. B. M. Ayres Neto, R. L. Leite, E. F. da Costa e D. C. Dini trabalham na Fundação CPqD - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (e-mails: floridia@cpqd.com.br, borin@cpqd.com.br, jbatista@cpqd.com.br, roger@cpqd.com.br, eduardoc@cpqd.com.br, danilo@cpqd.com.br).

A. C. S. Brígida, P. Alcântara Jr. trabalham na UFPA - Universidade Federal do Pará (emails: aacsbrigida@yahoo.com.br, petrus@ufpa.br).

N. Bramatti trabalha na Eletronorte - Centrais Elétricas do Norte do Brasil (email: bramatti@eln.gov.br).

possibilitar a multiplexação de vários sensores ao longo de uma única fibra óptica e ser de baixo custo. Dessa forma a equipe do projeto propôs o desenvolvimento de uma nova técnica utilizando-se de fibras ópticas com grade de Bragg (FBG) e de ímãs com alta capacidade magnética.

Foram então desenvolvidos os protótipos iniciais dos sensores de proximidade para a validação da técnica proposta com o uso de ímãs de NdFeB, que exercem alta força atrativa em material ferromagnético, e cujos testes em laboratório apresentaram excelentes resultados. A partir dos resultados preliminares foram desenvolvidos no CPqD vários protótipos de sensores em diversas configurações enquanto a equipe da UFFA trabalhou no desenvolvimento do modelamento teórico destes sensores. Foi também desenvolvido um sistema de detecção óptica para prover a integração destes sensores com o sistema de aquisição de dados da Eletronorte.

Para a validação da técnica foi realizado o teste de campo na Unidade Geradora UGH-03 da Usina Hidrelétrica de Samuel da Eletronorte em Porto Velho-RO cujos resultados contribuíram para obtenção de subsídios para o aprimoramento desta técnica. Durante a etapa do teste de campo foi possível identificar diversos pontos de melhorias que devem ser incorporados nos sensores ópticos de proximidade com fibras FBG em futuros desenvolvimentos.

Por se tratar de uma nova tecnologia o aparecimento de novos desafios antes não previstos reforça a necessidade do aprimoramento no empacotamento destes sensores de forma a se tornar uma tecnologia madura e pronta para a sua utilização em ambientes de alta severidade como no caso das Usinas Hidrelétricas. Além disso, o surgimento de novos interrogadores (equipamento usado na detecção da reflexão das FBGs) de alta velocidade de varredura para a detecção da reflexão das grades de Bragg facilitará a implementação da detecção e aquisição de dados destes sensores neste tipo de aplicação.

Neste trabalho são apresentadas as principais características dos sensores ópticos de proximidade, o modelo teórico e a técnica utilizada para a detecção dos sinais para aplicação em uma rede de sensores.

### III. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

O sensor de proximidade proposto é esquematicamente mostrado na figura 1.

A FBG é montada entre dois discos de alumínio e o ímã é fixado em uma extremidade. O sensor é posicionado afastado do alvo metálico de tal forma que se ergue devido à atração magnética.

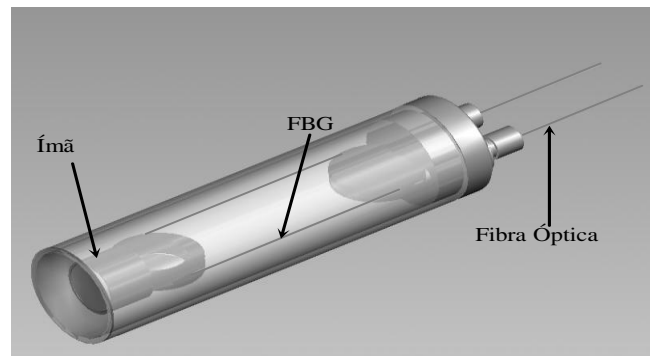


Figura 1. Sensor de proximidade baseado em fibra óptica.

Variações desta proximidade inicial são detectadas pela deformação da FBG, causando o deslocamento do espectro de reflexão, como apresentado na figura 2.

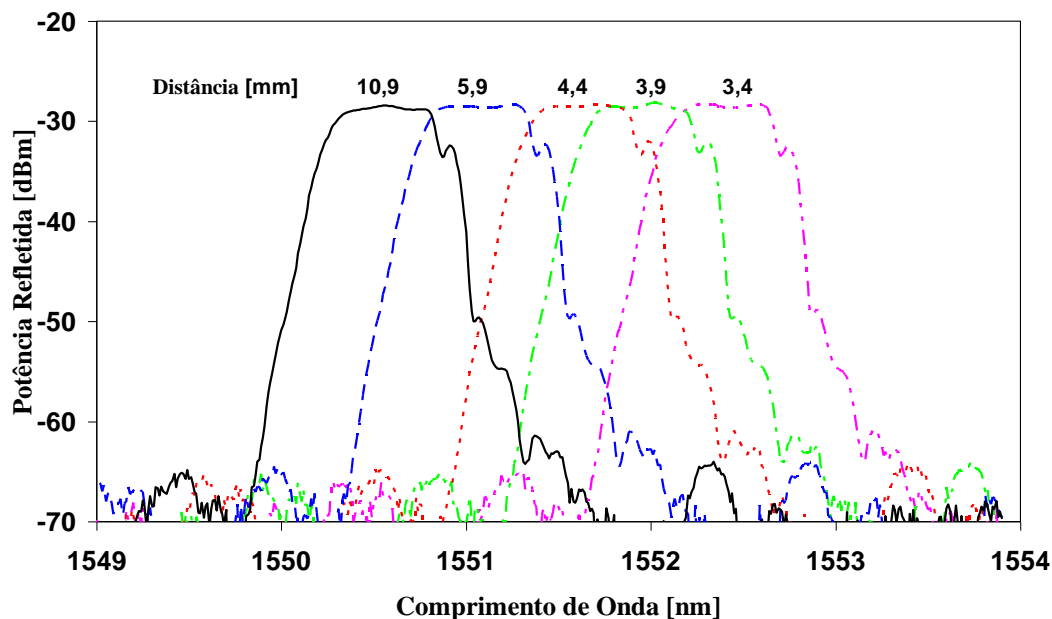


Figura 2. Espectro de reflexão a diferentes distâncias do alvo metálico.

Para converter a leitura de deslocamentos dos comprimentos de onda em potência óptica e também para obter a compensação de temperatura na resposta do sensor a fibra são usadas duas FBGs idênticas em paralelo. Desse modo uma delas é submetida somente a variações de temperatura, enquanto a segunda é submetida tanto à ação da temperatura como à atração magnética na proximidade do alvo ferromagnético.

Como ambas FBGs tem as mesmas características, é possível compensar a dependência da temperatura nas medidas

de proximidade de modo análogo ao mostrado em [9]. Nesta configuração, o sinal vindo da fonte óptica de banda larga, como um LED ou um SOA, passa primeiramente por um circulator óptico e é refletido pela primeira FBG. O sinal refletido passa então por um segundo circulator óptico e é refletido novamente na segunda FBG. Como resultado, somente a sobreposição do espectro óptico refletido vindo das duas FBGs é captado na recepção óptica, como mostrado na figura 3.

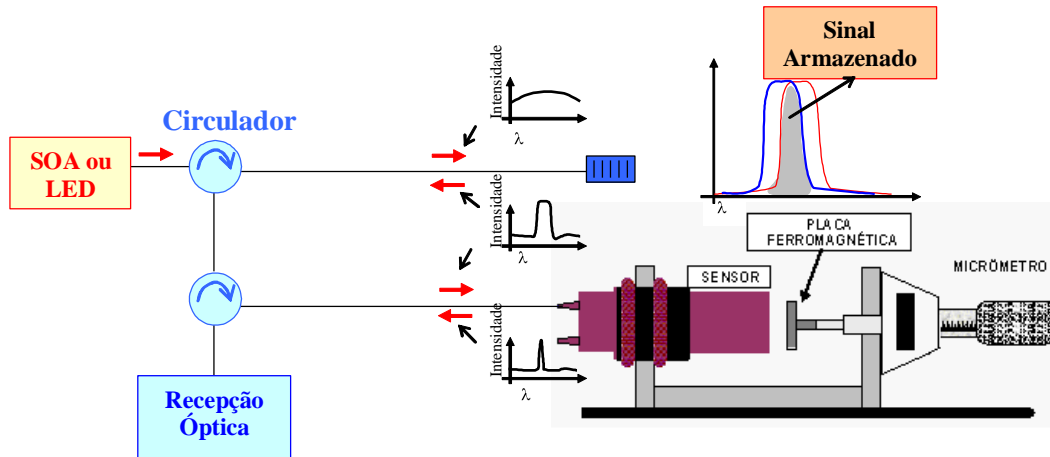


Figura 3. FBGs em configuração paralela.

Na próxima seção, obtemos as expressões da potência óptica na recepção para essa configuração.

#### IV. MODELAGEM

Para modelar a resposta da configuração discutida na seção anterior, primeiramente ajusta-se o espectro resultante da FBG não deformada por meio de uma aproximação matemática. A resposta da FBG foi fitada por uma Gaussiana de segunda ordem, dada por (1):

$$R(\lambda, \lambda_0, z) = \exp \left[ - \left( \frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta \lambda} \right)^{2m} \right] \quad (1)$$

onde  $m=2$  e  $\Delta \lambda = 0,33$  nm. A primeira FBG tem seu comprimento de onda de reflexão central em  $\lambda_0 = 1550,55$  nm. A comparação do espectro refletido pela FBG e a aproximação matemática correspondente dada por (1) é mostrada na figura 4.

A resposta espectral da configuração da figura 3 na recepção óptica é dada por (2), que corresponde à sobreposição do espectro óptico refletido pelas duas FBGs:

$$G(\lambda, z) = R(\lambda, \lambda_{01})R(\lambda, \lambda_{02}(z)) \quad (2)$$

Nessa equação,  $\lambda_{01}$  é o comprimento de onda central da primeira FBG e  $\lambda_{02}$  é o comprimento de onda central da segunda FBG. O comprimento de onda da segunda FBG varia com a aproximação do ímã do alvo ferromagnético, de acordo com a expressão (3) que é obtida pelo ajuste de uma fun-

ção com duplo decaimento exponencial com as medidas experimentais do comprimento de onda central (definido em -10 dB) em uma função da aproximação do alvo (em mm).

Esses dados experimentais e o ajuste obtido são mostrados na figura 5 na qual são também mostradas as posições específicas onde os espectros da figura 2 foram tomados.

$$\lambda_{02}(z) = 1550.519 + 9.204 e^{-z/1.518} + 3.201 e^{-z/2.696} \quad (3)$$

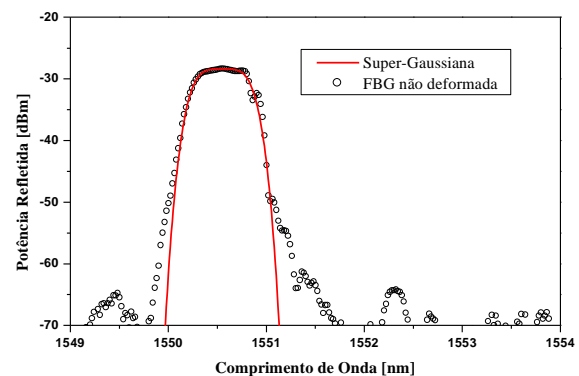


Figura 4. Comparação do espectro reflexão de uma FBG não tensionada e a super Gaussiana usada na análise teórica.

Sabe-se que o deslocamento do comprimento de onda central devido à deformação ou tensionamento da fibra óptica é linear. Como a força magnética é não linear com a distância do ímã do alvo metálico, o comprimento de onda central também varia não linearmente com esta distância, resul-

tando na dependência já mostrada na figura 5.

$$F(z) = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} G(\lambda, z) d\lambda \quad (4)$$

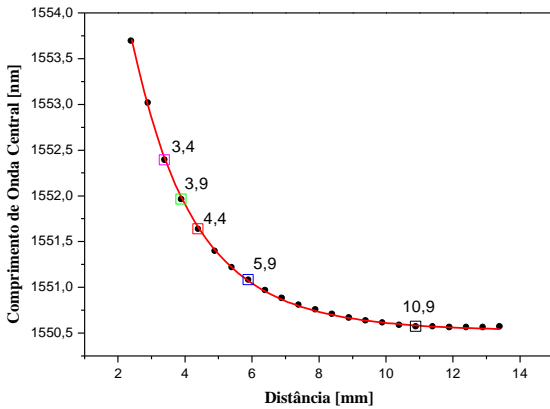


Figura 5. Comprimento de onda central em relação à faceta metálica. Pontos experimentais (ciclos sólidos). Tracejado (linha sólida) e pontos correspondentes da reflexão espectral (quadrados abertos).

Obtivemos tanto teoricamente como experimentalmente a resposta do sensor variando o comprimento de onda central da primeira FBG,  $\lambda_{01}$ , fixando-o nos valores 1551,025 nm, 1551,45 nm, 1551,00 nm e 1550,51 nm. Os resultados experimentais são mostrados na figura 6(a) (símbolos). As curvas teóricas (linhas) foram normalizadas.

A figura 6(a) mostra um excelente acordo entre os pontos experimentais e o modelo teórico. Observamos que existem diversos intervalos de operação e sensibilidade nesta configuração, variando o comprimento de onda central da primeira FBG. Por exemplo, a curva para  $\lambda_{01}=1550,51$  nm tem um intervalo de operação em torno de 6,0 mm de distância do alvo metálico enquanto para  $\lambda_{01}=1552,025$  nm o “ponto de operação” está por volta de 3,4 mm.

A potência óptica no receptor óptico é obtida simplesmente integrando a expressão (2) para cada distância  $z$  do alvo metálico:

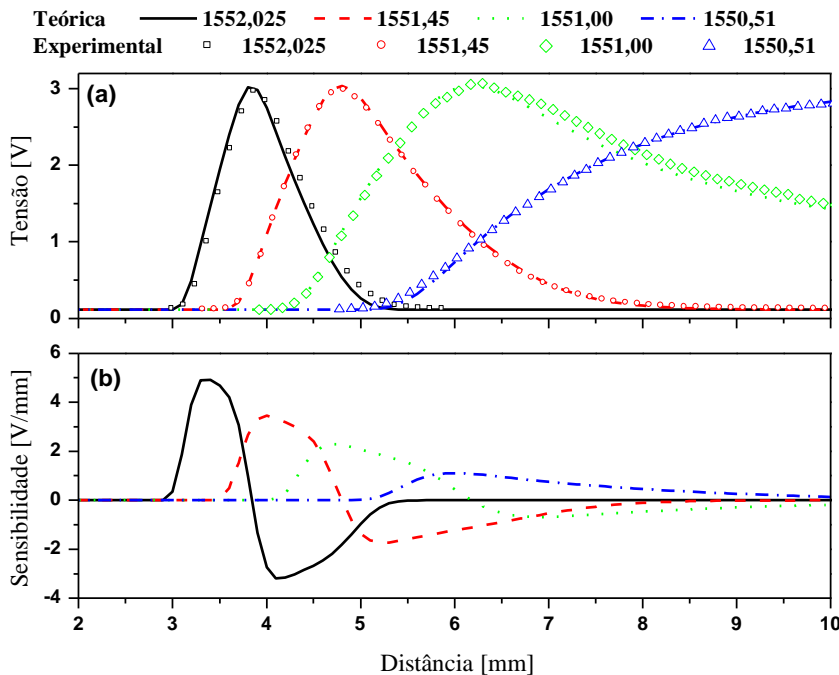


Figura 6. (a) Resposta teórica e experimental do sensor variando o comprimento de onda central da primeira FBG. (b) Sensibilidade do sensor para os casos estudados.

Para melhor compreender isto, calculamos as derivadas das curvas teóricas e as plotamos, como apresentado na figura 6(b). Obtemos desta forma a sensibilidade (em V/mm) do sensor para todos os casos estudados. Definem-se os “pontos de operação” como os valores de distância que correspondem aos máximos (e mínimos) dessas curvas de sensibilidade.

O “intervalo de operação” do sensor é definido pelo intervalo de valores de distância que estão 1,0 dB abaixo do máximo (ou acima do mínimo), o intervalo de operação determina os trechos das curvas da figura 6(a) que são monotonicamente crescentes ou decrescentes, onde um simples ajuste polinomial pode ser usado como curva de calibração.

Os resultados são resumidos na tabela 1. Nota-se clara-

mente que a sensibilidade do sensor decai, com o decréscimo de  $\lambda_{01}$ , entre 1552,025 nm até 1550,51 nm. Por outro lado, o intervalo de operação é incrementado, assim como o ponto de operação.

Assim existe um compromisso entre sensibilidade e inter-

valo de operação. A melhor opção para uma aplicação específica pode ser feita com um simples ajuste no comprimento de onda central, na FBG( $\lambda_{01}$ ) de referência.

Tabela I. Pontos de operação, sensibilidade e intervalo de operação do sensor variando-se o comprimento de onda central da FBG ( $\lambda_{01}$ ).

$\lambda_{01}$ [nm]	Ponto de Operação [mm]	Sensibilidade [V/mm]	Intervalo de Operação @1,0dB		Intervalo Total [mm]
1552,025	3,4	4,92	3,20	3,64	0,44
	4,1	-3,18	3,98	4,58	0,60
1551,450	4,1	3,35	3,81	4,41	0,61
	5,2	-1,73	5,00	5,80	0,80
1551,000	4,7	2,30	4,47	5,25	0,78
	6,9	-0,69	6,53	7,66	1,14
1550,510	6,0	1,11	5,63	6,68	1,06
	NA	NA	NA	NA	NA

#### V. PROTÓTIPOS DOS SENSORES DESENVOLVIDOS PARA TESTE DE CAMPO

Para o teste de campo, foram desenvolvidos diversos protótipos de sensores de proximidade utilizando-se esta técnica. Estes sensores foram empacotados mecanicamente na forma circular e na forma retangular conforme apresentados na figura 7.

Para a calibração dos protótipos dos sensores ópticos de proximidade foi utilizada, em campo, a montagem experimental apresentada na figura 3 na qual um sensor é fixado em suporte mecânico. A distância do sensor em relação à placa de material ferromagnético pode ser variada por meio de um parafuso micrométrico acoplado nesta montagem. Com a variação da distância a força atrativa do ímã altera a tensão mecânica na FBG do sensor alterando a potência óptica resultante da sobreposição das reflexões da FBG de referência e a do sensor.



Figura 7. Protótipos dos sensores de proximidade.

Os resultados das potências ópticas obtidas nestas medições para o sensor óptico de proximidade S1 estão apresentados na figura 8 onde se pode verificar um grande intervalo de operação para este sensor.

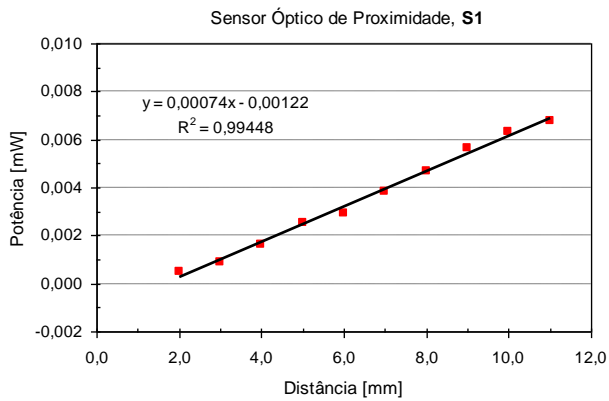


Figura 8. Potência óptica de reflexão da FBG em função da variação da distância do Sensor S1 em relação ao alvo de material ferromagnético.

Utilizando-se de FBG com as mesmas características utilizada no sensor S1 foi desenvolvido um novo sensor de proximidade S2. Os resultados obtidos na caracterização deste novo sensor estão apresentados na figura 9 com resultados bem semelhantes.

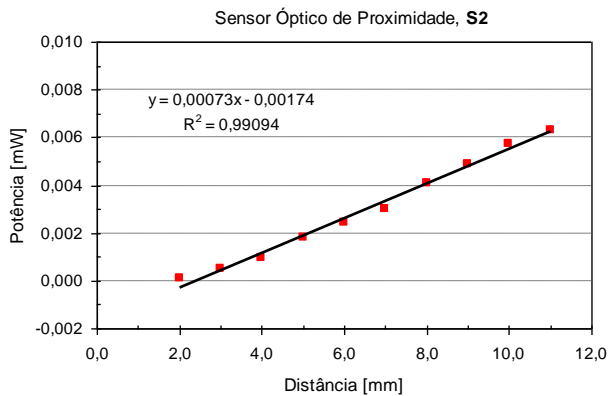


Figura 9. Potência óptica de reflexão da FBG em função da variação da distância do Sensor S2 em relação ao alvo de material ferromagnético.

Pelos resultados obtidos conclui-se que a técnica apresentada demonstrou a viabilidade do desenvolvimento de sensores ópticos de proximidade utilizando-se de grade de Bragg baseado na atuação da força magnética de ímãs. Os intervalos de operação obtidos são ideais para a aplicação desejada, tendo sido obtidos com a escolha adequada das FBGs empregadas.

## VI. VALIDAÇÃO DO SENSOR ÓPTICO DE PROXIMIDADE NO EIXO GERADOR

Embora não tenha sido possível construir um instrumento de medição micrométrica com uma placa móvel e composta do mesmo material ferromagnético que compõe o eixo da turbina, tal que permitisse levantar uma curva de resposta do sensor em função da proximidade para aquele material, foi possível selecionar previamente o sensor para um teste de funcionalidade que permitisse posicioná-lo adequada e manualmente em relação ao eixo superior.

Este teste foi realizado com todas as partes do protótipo montadas e interligado ao lado da parte superior ou topo do eixo do gerador, junto com o osciloscópio e um microcomputador portátil para a aquisição dos resultados.

A seguir na figura 10 está apresentado o posicionamento do sensor óptico de proximidade junto a Unidade Geradora UGH-03 na Usina Hidrelétrica de Samuel em Porto Velho.

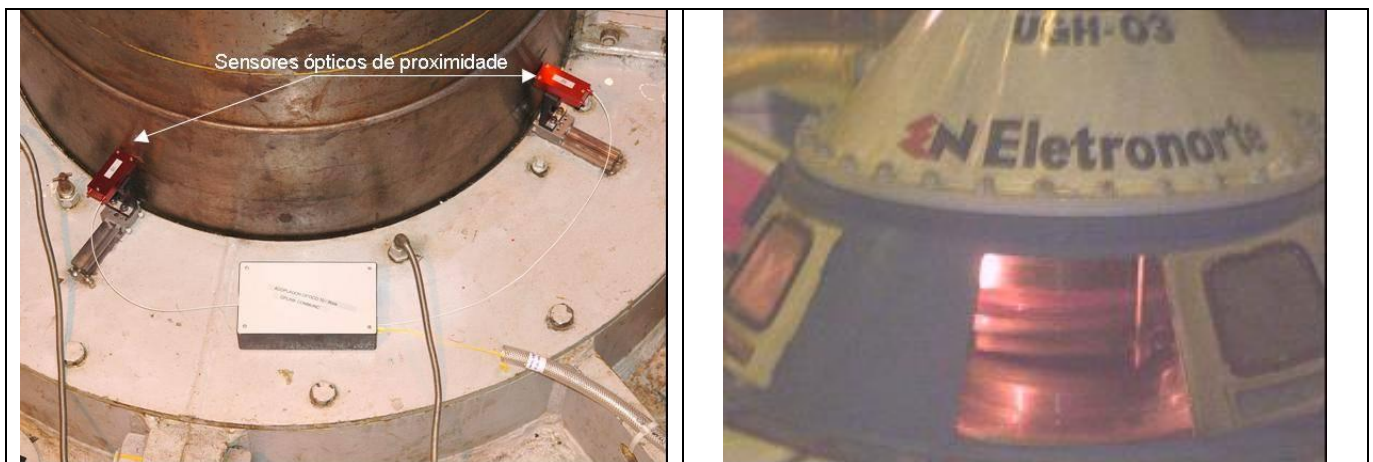


Figura 10. Detalhe dos sensores ópticos de proximidade no teste de campo na Usina Hidrelétrica de Samuel da Eletronorte.

O sensor foi cuidadosamente aproximado do eixo até se obter um sinal significativo e estável do protótipo do sensor que era manualmente fixado naquela posição durante alguns minutos para aquisição de dados. A figura 11 mostra o sinal

DC (Escala vertical 2 V/div.) medido com o sensor S1 de seção retangular a cerca de 3,0 mm do eixo superior e na figura 12 mostra a componente AC (Escala vertical 200 mV/div.) do sinal medido com o mesmo sensor.

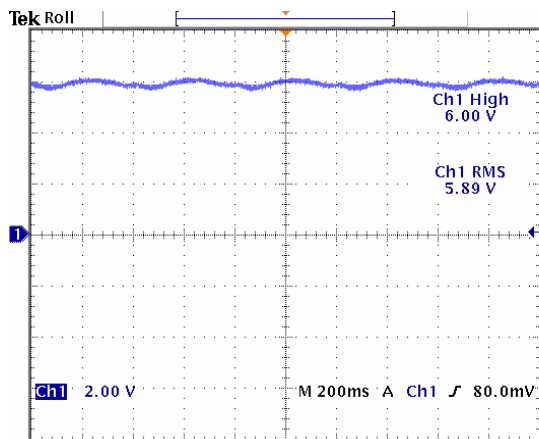


Figura 11. Sinal DC do sensor retangular S1 distante 3,0 mm do eixo superior

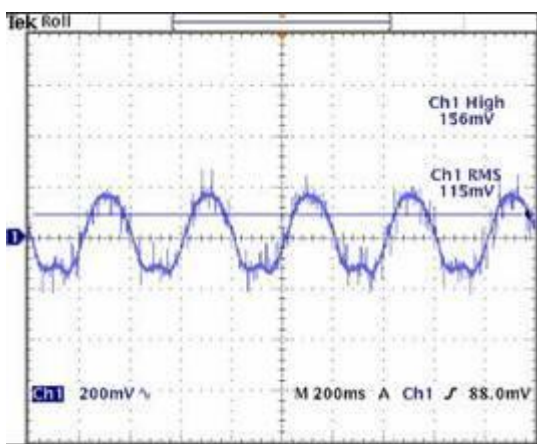


Figura 12. Sinal AC do sensor retangular S1 distante 3,0 mm do eixo superior da turbina.

O sinal AC do sensor na figura 12 indica variação de proximidade em função do tempo. Entretanto, como não foi possível obter a curva de calibração do sensor para o material do eixo da turbina, não é possível quantificar a variação de proximidade existente no eixo da turbina.

## VII. PROPOSTAS DE MELHORIAS DO SISTEMA.

Durante as etapas de implantação do sistema de sensores ópticos de proximidade a equipe do projeto pode identificar diversos pontos de melhorias que devem ser implementados em um próximo projeto visando à adequação dos protótipos desenvolvidos neste projeto para que os mesmos possuam maior robustez e possuam dispositivos que facilitem a sua rápida implantação em uma usina hidrelétrica.

Dentre os principais pontos de melhorias identificados pela equipe do projeto durante a implantação dos sensores ópticos de proximidade no teste de campo e que devem ser objeto de novos desenvolvimentos são os seguintes:

- Desenvolvimento de um novo empacotamento mecânico no qual as FBGs dos sensores sejam terminadas em conectores ópticos fixados na própria peça mecânica dos sensores facilitando o seu acoplamento com o cabo óptico conforme sugestão de melhoria apresentada na figura 13.

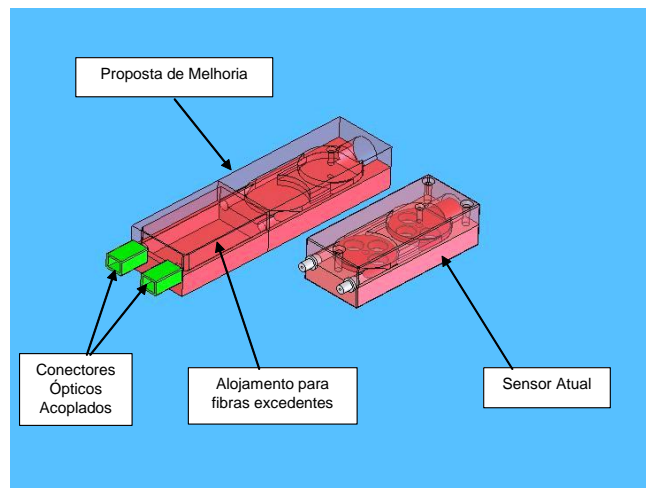


Figura 13 – Proposta de melhoria no empacotamento mecânico do sensor.

- Desenvolvimento de um condutor para a proteção mecânica das fibras ópticas na passagem das mesmas ao longo do poço do gerador. Este condutor deve possuir um tubo envolto por conduíte flexível em aço que tenha resistência mecânica para elevados pesos e possua uma terminação óptica para ser facilmente acoplada ao sensor óptico.

- Instalação de cabo óptico pré-conectorizado evitando a necessidade de emendas com máquina de fusão de fibras ópticas que são equipamentos sensíveis para operação em ambientes de alta umidade e a presença de materiais como água, óleo e partículas de aço.

- O cabo óptico foi lançado e acomodado nas mesmas calhas utilizadas para o encaminhamento dos cabos elétricos da Usina. Considerando que podem ocorrer novas instalações e/ou reposições dos cabos elétricos nesta calha, o cabo óptico estará susceptível a mudanças nas suas curvaturas e com isso alterar os valores da potência óptica entre os sensores e o sistema de detecção afetando os valores medidos da proximidade.

- Outro aspecto muito importante é que a permeabilidade magnética do aço do eixo da turbina era mais baixa em relação ao material utilizado nos testes de laboratório para o desenvolvimento e a calibração dos sensores ópticos. Este fator limita a distância de trabalho dos sensores em relação ao eixo da turbina e, portanto diminui a resolução da variação da proximidade.

De qualquer forma os dados obtidos em laboratório demonstraram a viabilidade do uso deste tipo de tecnologia e a sua validação foi demonstrada com os resultados obtidos na etapa de calibração e no teste realizado junto ao eixo da turbina durante o teste de campo.

## VIII. REDE DE SENSORES

O sensor proposto pode ser usado em redes de sensores (para monitorar diversos geradores, por exemplo) de duas formas. Na primeira [3] o sistema da figura 3 pode ser replicado para N sensores, simplesmente introduzindo-se um divisor óptico para distribuir a fonte de luz de banda larga (LED or SOA) para cada unidade sensora (par de sensores), como mostrado na figura 14. Neste esquema, como a

potência na recepção é independente para cada unidade sensora, o mesmo par de FBGs pode ser usado nos diferentes pontos de monitoração. O limite deste arranjo é o orçamento de potência óptica (potência óptica suficiente deve ser fornecida pela fonte de luz, uma vez que esta potência será dividida para as N unidades de recepção).

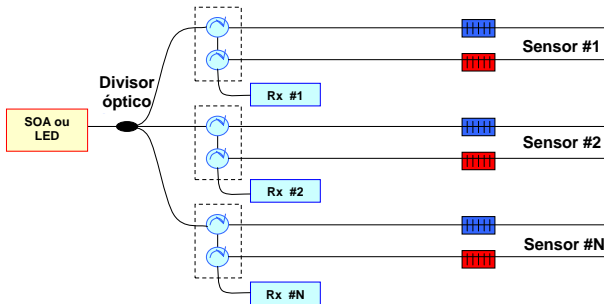


Figura 14. Um possível arranjo de redes de sensores.

No outro arranjo possível, o sinal proveniente de uma multiplicidade de unidades sensoras é dividido por um demultiplexador óptico, como mostrado na figura 15. Neste arranjo, a limitação está na banda óptica usada para cada par de sensores, na banda óptica disponível e na disponibilidade dos demultiplexadores ópticos apropriados.

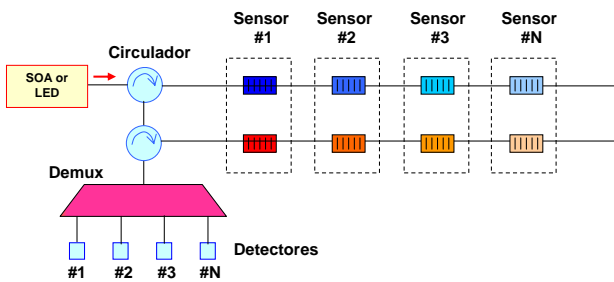


Figura 15. Segundo arranjo de redes de sensores possível.

Ambos os arranjos descritos podem ser usados para aplicações de redes de sensores, como na monitoração da proximidade em diversos hidrogeradores de uma usina ao mesmo tempo.

## IX. CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi proposto e foram desenvolvidos sensores ópticos de proximidade utilizando fibra óptica com grade de Bragg baseado em força magnética para aplicações em hidrogeradores. Utilizaram-se duas FBGs idênticas colocadas em paralelo em cada sensor para medir a potência óptica refletida que varia com o tensionamento. A configuração do sensor e o método proposto, permitem o ajuste exato do intervalo operacional e da sensibilidade a partir da escolha apropriada dos pares de FBGs usadas.

O teste de campo possibilitou a identificação de diversos pontos de melhorias que devem ser incorporados nos sensores ópticos de proximidade com fibras FBG em futuros desenvolvimentos. Por se tratar de uma nova tecnologia o aparecimento de novos desafios antes não previstos reforça a necessidade do aprimoramento no empacotamento deste tipo

de sensores de forma a se tornar uma tecnologia madura e pronta para a sua utilização em ambientes de alta severidade como nos casos das Usinas Hidrelétricas.

## X. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A.D. Kersey, M.A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, H. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele, Fiber grating sensor, *J. Lightwave Technol.*, 15, 1997, 1442-1463.
- [2] J. Mora, A. Diez, J. L. Cruz, and M. V. Andres, A magnetostrictive sensor interrogated by fiber gratings for dc current and temperature discrimination, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 12, 2000, 1680-1682.
- [3] M. G. Xu, J.-L. Archambault, L. Reekie, and J. P. Dakin, Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fiber grating sensors, *Electron. Lett.*, 30, 1994, 1085-1087.
- [4] H. J. Patrick, G. M. Williams, A. D. Kersey, J. P. Pedrazzani, and A. M. Vengsarkar, "Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 8, 1996, 1223-1225.
- [5] S. W. James, M. L. Dockney, and R. P. Tatam, Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fiber Bragg grating sensors, *Electron. Lett.*, 32, 1996, 1133-1134.
- [6] J. Jung, H. Nam, J. H. Lee, N. Park, and B. Lee, Simultaneous measurement of strain and temperature by use of a single-fiber Bragg grating and an erbium-doped fiber amplifier, *Appl. Opt.*, 38, 1999, 2749-2751.
- [7] W. C. Du, X. M. Tao, and H. Y. Tam, Fiber Bragg grating cavity sensor for simultaneous measurement of strain and temperature, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 11, 1999, 105-107.
- [8] M. Song, S. B. Lee, S. S. Choi, B. Lee, Simultaneous Measurement of Temperature and Strain Using Two Fiber Bragg Gratings Embedded in a Glass Tube, *Optical Fiber Technology*, 3, 1997, 194-196.
- [9] Y. J. Chiang, L. Wang, H. S. Chen, C. C. Yang, and W. F. Liu, Multipoint temperatures-independent fiber-Bragg-grating strain-sensing system employing an optical-power-detection scheme, *Applied Optics*, 41, 2002, 1661-1667.
- [10] C. Floridia, D. C. Dini e F. Borin; Relatório Técnico PD.33.11.18A.0018A/RT-06-AA; "Técnica de Detecção com Dupla Grade de Bragg para Sensores Ópticos de Proximidade"; CPqD, Campinas-SP, 27/dez/06.