

SENSOR MAGNETO-ÓPTICO PARA MONITORAMENTO DE CORRENTE ELÉTRICA

Fábio Vieira Batista de Nazaré

Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil
fabio.nazare@inpi.gov.br

Marcelo M. Werneck

Doutor em Ciências em Engenharia Biomédica pela University of Sussex, Sussex, Inglaterra, Reino Unido
werneck@lif.coppe.ufrj.br

RESUMO

Este trabalho propõe o estudo e o desenvolvimento de um sensor híbrido de corrente elétrica empregando materiais magnetostrictivos em conjunto com fibras ópticas, as quais apresentam diversas vantagens quando utilizadas em sistemas elétricos de potência. Um sensor magnetoóptico de corrente elétrica prático, ambientalmente adequado e de custo moderado é proposto, o qual é capaz de recuperar a senóide completa do sinal de corrente que está sendo conduzido pelo condutor através de um arranjo (no qual uma rede de Bragg em fibra óptica é fixada sobre uma peça de Terfenol-D) que é excitado por campos magnéticos DC e AC. Estágios do projeto e a configuração de sensor desenvolvido são apresentados, incluindo os experimentos com o sensor construído em laboratório utilizando um sistema de injeção de corrente desenvolvido exclusivamente para simular as características operativas de uma linha de transmissão. Os resultados de medição atestam, então, a eficácia do sensor de corrente inovador.

Palavras-chave: Corrente Elétrica. Fibras Ópticas. Medição. Monitoramento. Redes de Bragg.

MAGNETO-OPTICAL SENSOR FOR ELECTRICAL CURRENT MONITORING

ABSTRACT

A compact and practical opto-magnetic current sensor intended to be used in power transmission lines is proposed in this paper. The novel sensor is able to retrieve the complete sinusoidal current signal which is being carried by the line conductor through a fiber Bragg grating which is attached to a magnetostrictive rod set-up excited by DC and AC magnetic fields: a DC magnetic field created by a designed magnetic circuit in order to make the magnetostrictive material operate in its linear region, and an AC magnetic field generated by the current being monitored. Design stages and the proposed sensor configuration are showed, and the assembled sensor head is tested using a power set-up exclusively developed to simulate current magnitude levels in a transmission line. Measurement results are compared with those provided by a reference commercial probe, attesting the effectiveness of the novel current sensor.

Keywords: Bragg Gratings. Electrical Current. Measurement. Monitoring. Optical Fibers.

1 INTRODUÇÃO

Medições de corrente elétrica confiáveis são necessárias em várias aplicações, como por exemplo, em subestações e na transmissão de energia elétrica. Geralmente, e particularmente em países em desenvolvimento, transformadores de instrumentos localizados em instalações elétricas de potência são volumosos e pesados, constituídos de cobre, cerâmica e ferro. Ou seja, há uma inerente dificuldade de instalação e manutenção, apesar da robustez.

Estas limitações motivaram o desenvolvimento de tecnologias capazes de competir comercialmente com as técnicas tradicionalmente utilizadas; neste sentido, tecnologias fotônicas surgiram como um diferencial. A ausência de componentes eletrônicos e a não necessidade de energia elétrica no ponto de sensoriamento fornecem elevado nível de segurança às equipes de manutenção e de operação, assegurando o isolamento galvânico e imunidade à interferência eletromagnética. A ampla faixa dinâmica e precisão destes dispositivos tornam esta tecnologia uma ferramenta poderosa para registrar medidas e condições de falhas em tempo real dentro das subestações; enquanto que o baixo peso e a estrutura compacta destes dispositivos criam condições de instalação em qualquer ponto físico, não havendo necessidade de gasto com obras de grande vulto para alocação dos sensores (SILVA et al., 2012). Ressalta-se também a redução dos impactos ambientais negativos proporcionados pelos instrumentos convencionais, visto que, por exemplo, quando são empregados transformadores de corrente e de tensão ópticos não há mais a necessidade de utilização de óleo isolante, o qual é agressivos ao ambiente.

Neste contexto, várias propostas de sensores de corrente híbridos, ou seja, que unem características ópticas e magnetomecânicas no processo de transdução, têm sido apresentadas para o setor elétrico; e algumas delas exploram a atuação magnetostrictiva de uma haste ferromagnética sobre uma rede de Bragg (FBG, do termo em inglês *Fiber Bragg Grating*) em fibra óptica, a qual está fixada à haste, como os trabalhos de SATPATHI, MOORE e ENNIS (2005), MORA et al. (2005), e CREMONEZI et al. (2013). Entretanto, as técnicas de demodulação usualmente propostas para os sensores ópticos conhecidos como redes de Bragg, as quais são elementos sensíveis tanto à variação de temperatura quanto à aplicação de deformações mecânicas, geralmente são caras ou pouco suscetíveis de utilização em ambientes externos.

Assim, levando em consideração as vantagens gerais oferecidas pelos sensores de base óptica, propõe-se um sistema de medição de corrente que una características optomagnetostrictivas para sistemas de energia elétrica que seja de fácil manuseio, de pequenas dimensões, e cuja recuperação do sinal de corrente monitorado, ou seja, a demodulação do sinal óptico, seja prática, confiável e de baixo custo, possibilitando a redução da carga e complexa eletrônica associada a sensores ópticos convencionais.

Ainda, é importante ressaltar que as intrínsecas vantagens dos sensores de tecnologias ópticas são bastante atraentes para aplicações em altas tensões e oferecem a possibilidade de se tornarem valiosos ativos na nova geração de redes inteligentes, dada a eficácia e praticidade com que os sensores ópticos podem ser integrados aos equipamentos de monitoramento, controle e supervisão (SILVA et al., 2012).

Assim, é investigada uma configuração de sensor magneto-óptico de corrente, de custo moderado, adequada à operação em ambientes externos e que atende aos requisitos de isolamento elétrico para medições em ambientes de alta tensão, baseados na interação de uma

peça magnetostrictiva (uma liga de terras raras conhecida como Terfenol-D) com redes de Bragg. A rede de Bragg é fixada no material ferromagnético, e à medida que o conjunto é submetido ao campo magnético gerado pela corrente a ser medida o material magnetostrictivo atua sobre a rede, a qual tem sua resposta modulada. O parâmetro da rede de Bragg que é alterado quando esta sofre variações de temperatura, ou uma deformação mecânica é aplicada, é conhecido como comprimento de onda de Bragg (λ_B), o qual aumenta quando a temperatura aumenta e/ou a fibra óptica é esticada, e diminui quando temperatura diminui e/ou a fibra é comprimida longitudinalmente.

Portanto, como a deformação mecânica sofrida pelo material ferromagnético é transferida à rede, é no comprimento de onda de Bragg onde está codificada a informação de medição de corrente. O sistema inovador e ainda não discutido na literatura é capaz de recuperar o sinal senoidal de corrente de 60 Hz em um condutor, fato que é evitado pela maioria dos sistemas magnetostrictivos de medição de corrente elétrica em ambientes de alta tensão.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Aspectos Teóricos Básicos

2.1.1 Redes de Bragg em Fibras Ópticas

Uma FBG, em sua forma mais básica, consiste em uma modulação periódica do índice de refração do núcleo de uma fibra óptica monomodo; modulações estas que são chamadas grades (ou redes) de Bragg, são perpendiculares ao eixo de propagação da luz e apresentam períodos menores que 1 μm . A luz sofre uma reflexão conhecida quando muda de um meio com um índice de refração para outro, essa reflexão é conhecida como lei de Fresnel. Tal fenômeno ocorre normalmente no final da fibra onde a luz muda de um meio (no caso, a sílica) para o ar.

Entretanto, essa reflexão está sujeita a alguns outros parâmetros. Quando a luz introduzida em uma fibra atingir a região de uma FBG, alguns dos comprimentos de onda dessa luz serão refletidos pela variação periódica do índice de refração.

Geralmente, a luz refletida estará fora de fase e tenderá a se cancelar, exceto quando o comprimento de onda satisfaça a condição de reflexão de Bragg. Neste caso específico, a luz refletida sofrerá uma interferência construtiva e formará um pico de reflexão definido pelos parâmetros das redes periódicas, assim, a luz refletida se propagará mesma na direção e sentido oposto do feixe propagante original (OTHONOS e KALLI, 1999).

Calculando as derivadas parciais do comprimento de onda de Bragg (λ_B) em relação à temperatura e ao deslocamento (OTHONOS e KALLI, 1999) é possível obter a relação de λ_B em função da temperatura e da deformação mecânica que a fibra sofre:

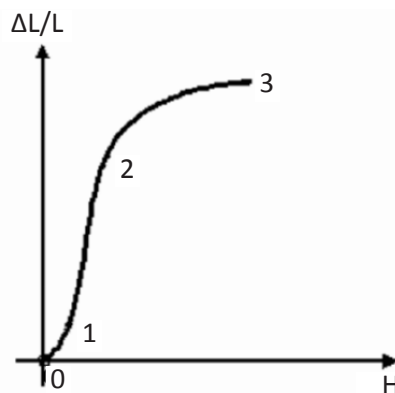
$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\epsilon_{FBG} + (\alpha + \eta)\Delta T \quad (1)$$

Onde $\Delta\lambda_B$ é a variação do comprimento de onda de Bragg, ρ_e é o coeficiente fotoelástico, ΔT é a variação de temperatura, ϵ_{FBG} é a deformação mecânica, α é o coeficiente de dilatação térmica da fibra e η é o coeficiente termo-óptico.

2.1.2 Conceitos Básicos de Magnetostricção

Todos os materiais magnéticos apresentam magnetostricção, uma característica magnetoelástica na qual o material sofre uma deformação mecânica quando submetido a um campo magnético. A amostra do material encolhe (no caso da magnetostricção negativa) ou expande (no caso da magnetostricção positiva) na direção de magnetização (OLABI e GRUNWALD, 2008). As mudanças de volume do material, porém, são tão pequenas que podem ser consideradas desprezíveis sob condições normais de operação; entretanto, a aplicação de campos com magnitudes cada vez maiores leva a uma mais forte e definida orientação de cada vez mais domínios magnéticos na direção do campo magnético. Este procedimento acontece até a situação quando todos os domínios magnéticos se tornam alinhados com o campo, e o ponto de saturação magnetostrictiva é atingido. Ou seja, materiais magnetostrictivos convertem energia magnética em energia mecânica, e o inverso também é verdadeiro, visto que se uma tensão mecânica é fornecida a um material magnetostrictivo o estado magnético deste material também é alterado. A variação do comprimento L de um material de magnetostricção positiva em função do campo magnético aplicado é apresentada na Figura 1 ($\Delta L/L$ é a deformação, ou *strain* magnetostrictivo, como geralmente citado na literatura), adaptada do esquema apresentado por OLABI e GRUNWALD (2008).

Figura 1: Deformação magnetostrictiva em função do campo magnético (OLABI e GRUNWALD,2008)



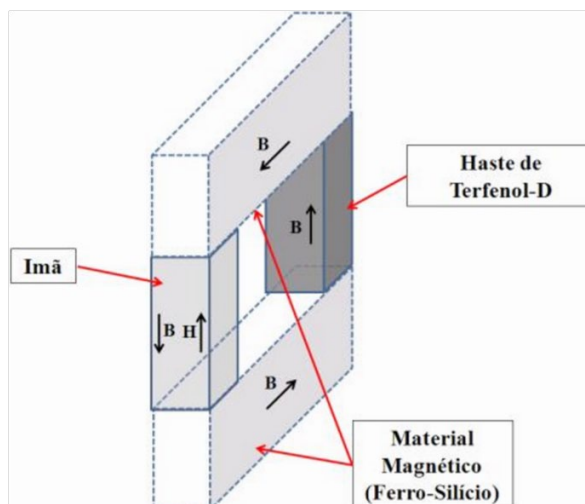
Na região entre 0 e 1, quando o campo magnético aplicado é pequeno, os domínios magnéticos praticamente não apresentam um padrão de orientação comum, ou então apresentam um padrão de orientação muito pequeno. Já na região compreendida entre 1 e 2 há uma relação quase linear entre a deformação e o campo magnético e a maioria dos dispositivos que empregam magnetostricção são projetados para operar nesta região, uma vez que o comportamento do material é previsto com maior precisão. A partir do ponto 2 a relação entre o campo e a deformação é novamente não-linear, o que decorre do fato de que quase todos os domínios magnéticos estão alinhados na direção do campo magnético. Já no ponto 3, com a magnitude do campo elevada, há o efeito de saturação, e o material não mais sofre alongamento. Ressalta-se também que a resposta magnetostrictiva é unipolar, ou seja, a inversão da direção do campo magnético aplicado resulta numa forma de onda exatamente igual àquela apresentada na Figura.

2.2 Projeto do Sensor

O evento-base para a medição de corrente elétrica reside no campo magnético que é gerado quando há uma corrente em um condutor; este campo magnético é levado a interagir com o material magnetostrictivo (neste caso, uma haste de Terfenol-D, a qual é uma liga de Térbio, Disprósio e Ferro, e é o material que apresenta os maiores efeitos magnetostrictivos) o qual tem suas dimensões alteradas e de maneira paralela causa um estiramento na rede de Bragg que está fixada na superfície do material magneto-elástico. Após estas etapas de conversão de energia, tem-se uma informação acerca da corrente elétrica codificada no comprimento de onda de Bragg. Dessa forma, vários arranjos de sistemas de medição têm sido propostos explorando esta configuração básica, com intuito de oferecer soluções para algumas desvantagens apresentadas pelos Transdutores Ópticos de Corrente convencionais (FOCSs, do termo em inglês *Fiber Optic Current Sensors*). Por exemplo, devido ao princípio de funcionamento baseado no Efeito Faraday, FOCSs convencionais geralmente requerem complexas e caras técnicas de compensação de temperatura e vibração, ao mesmo tempo em que a eletrônica auxiliar necessária para demodulação dos sinais de medição adiciona custos excessivos ao sistema completo. Assim, empregando tanto a sensibilidade elevada quanto a capacidade de compactação que as redes de Bragg oferecem em conjunto com os materiais magnetostrictivos, há um esforço em apresentar sistemas de monitoramento com desempenho cada vez mais elevado.

É possível, então, partir para uma concepção teórica do protótipo de sensor para linhas de transmissão, o qual deve intrinsecamente possuir um circuito para magnetização DC da haste de Terfenol-D, para que o transdutor opere em sua região linear (região ótima) e que seja possível recuperar sinais alternados, e ao mesmo tempo permitir que a haste magnetostrictiva seja submetida ao campo magnético gerado pela corrente no condutor. Uma configuração inédita, porém que atende ambos requerimentos, é proposta na Figura 2, na qual tanto o ímã gerador de um campo magnético DC de polarização quanto a haste de Terfenol-D estão presentes no circuito magnético. Observa-se que o material considerado para os braços do circuito é o ferro-silício.

Figura 2: Concepção teórica do protótipo do sensor de corrente



Ou seja, a intensidade de campo magnético, H_{TOTAL} , à qual a haste de Terfenol-D é submetida é dada por

$$H_{TOTAL} = H_T + H_{LT} \quad (2)$$

Onde:

H_T é a intensidade de campo magnético de polarização para operação magnetostrictiva da haste na região linear, e

H_{LT} é a intensidade de campo magnético gerado pela corrente na linha de transmissão.

Na Figura 3 é apresentada a resposta magnetostrictiva para a haste de Terfenol-D usada na construção do protótipo do sensor, e uma curva de ajuste é obtida, permitindo assim uma análise mais detalhada do fenômeno. Ou seja, como o ponto de operação ótimo da haste de Terfenol-D (não confundir com o ponto de operação dos ímãs permanentes usados para geração do campo H_T) é aquele onde a inclinação é alta, ou máxima, a derivada da curva de ajuste fornece uma indicação da região de operação linear, facilitando o projeto do circuito magnético. É necessário, neste caso, atentar para os pontos de máximo da derivada da curva de ajuste, a qual é apresentada na Figura 4.

Então, observa-se que o ponto onde a inclinação da curva é máxima ocorre em aproximadamente $H = 82$ kA/m. O projeto do circuito magnético deve, dessa forma, ser direcionado no sentido de fornecer tal intensidade de campo magnético (ou uma aproximação) à haste de Terfenol-D, propiciando que o sensor opere de maneira otimizada. Utilizando ímãs de NdFeB para geração do campo magnético de polarização observa-se que o arranjo de operação que determina o H_T mais próximo do valor que define a região de operação ideal da haste de Terfenol-D ($H = 82$ kA/m) é com 4 ímãs em série, o qual desenvolve uma intensidade de campo magnético $H_T = 92.81$ kA/m.

Figura 3: Resposta magnetostrictiva e curva de ajuste polinomial para a haste de Terfenol-D

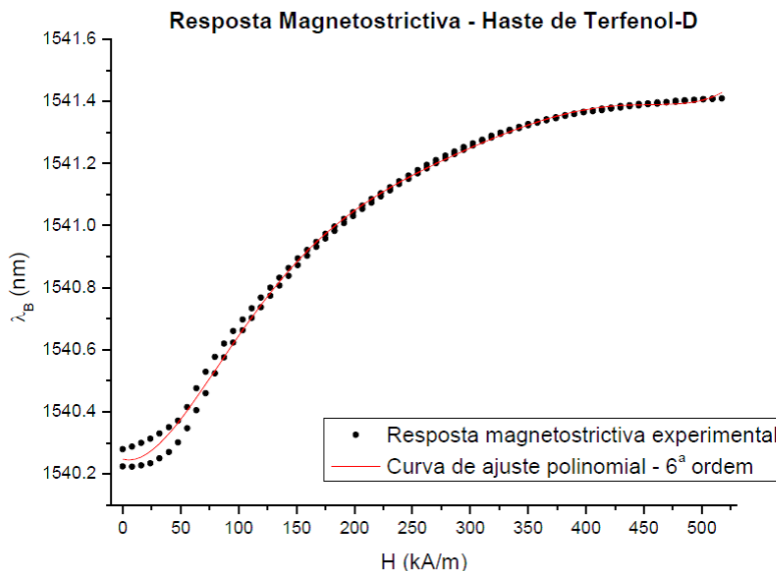
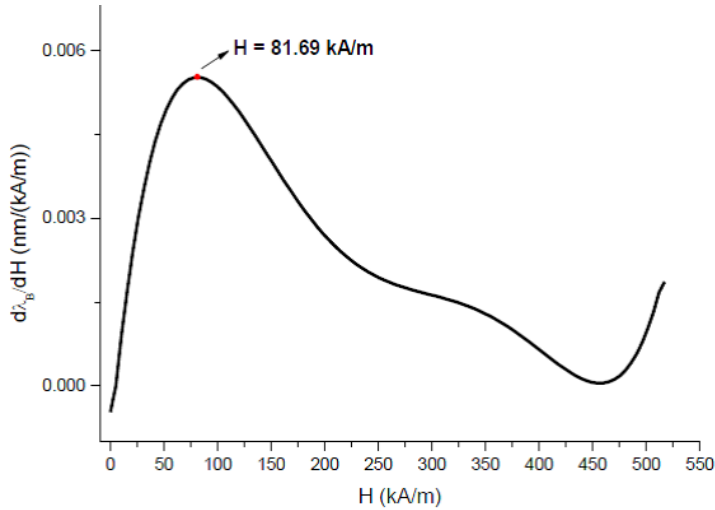


Figura 4: Obtenção do ponto ótimo da região de operação da haste de Terfenol-D, a partir da derivada da resposta magnetostrictiva



Contudo, de forma a compensar eventuais perdas magnéticas e efeitos de borda é conveniente considerar um arranjo de operação que propicie uma intensidade de campo magnético teórica mais elevada, neste caso, obtido com 6 ímãs em série. Esta configuração permite a realização de $H_r = 107,54$ kA/m, a partir da geometria apresentada na Figura 5 para o sensor de corrente magneto-óptico. Na Figura 6 o protótipo construído em laboratório é mostrado.

Figura 5: Configuração geométrica para o sensor de corrente magneto-óptico

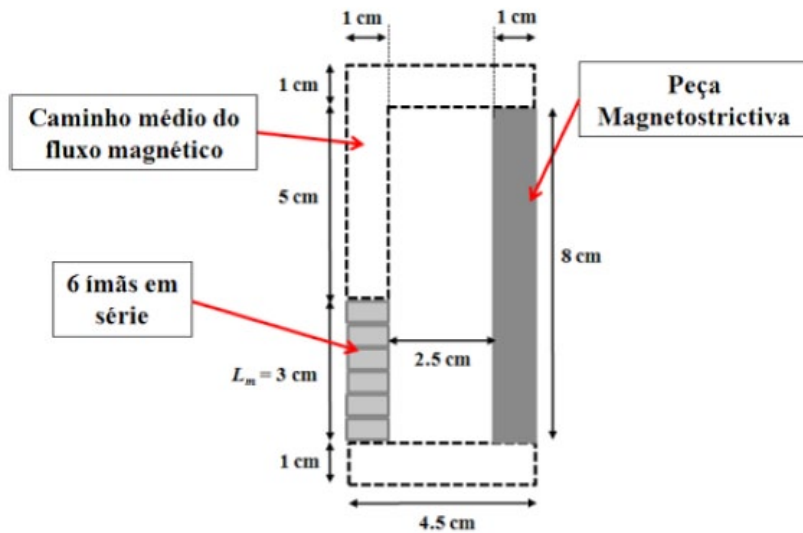
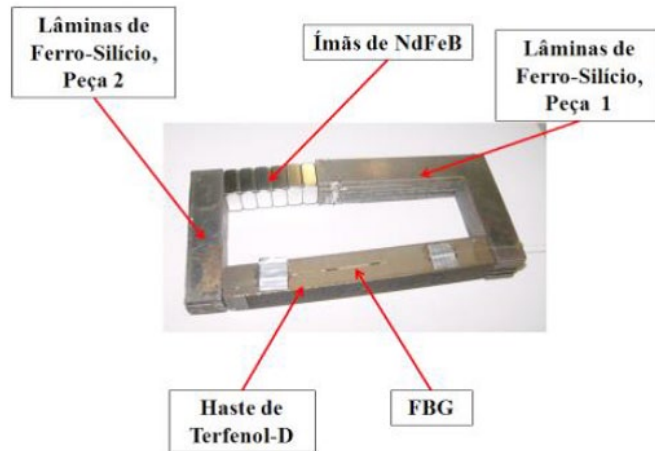
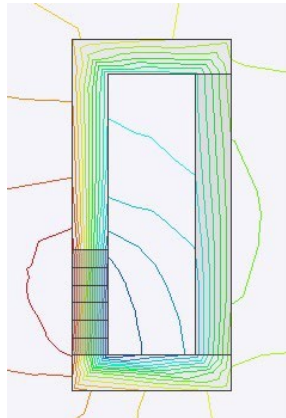


Figura 6: Protótipo do sensor de corrente magnetoóptico montado em laboratório, com núcleo laminado



Uma das maneiras de proceder com uma investigação acerca do correto funcionamento do circuito magnético de polarização é empreendendo simulações por meio do Método dos Elementos Finitos, no qual para análise do problema são especificados a geometria, propriedades dos materiais e as formas de excitação (elétrica ou magnética) para o dispositivo em estudo. Na Fig. 7 é apresentado o resultado da simulação para o protótipo, no qual são mostradas as linhas de fluxo magnético DC em todas as peças que compõem o circuito magnético.

Figura 7: Simulação por método dos elementos finitos para o protótipo do sensor de corrente magneto-óptico

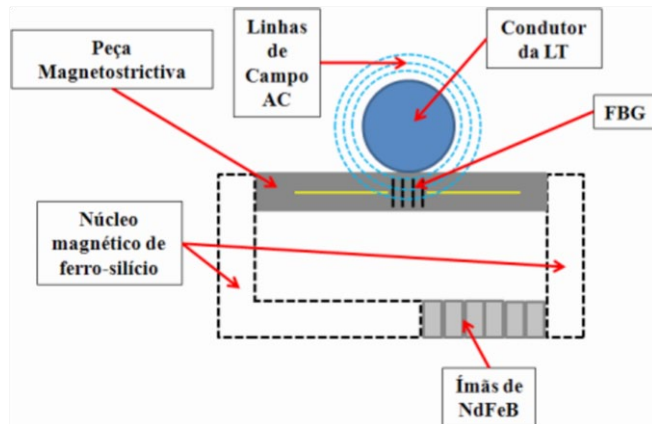


2.3 Experimentos e Resultados

Experimentos foram conduzidos para averiguação do funcionamento do circuito de magnetização projetado e da viabilidade do sensor de corrente desenvolvido. Foi empregado um sistema de injeção de corrente construído a partir de dois transformadores de corrente em série conectados inversamente, isto é, entrada pelo terminal secundário e saída pelo primário, permitindo variar a corrente de zero até cerca de 800 A. Para variar a corrente de entrada optou-se por um transformador variável de 5 kW. A corrente então percorre um enlace condutor

construído com um cabo de cobre isolado apropriado para suportar até 1000 A, simulando assim a operação de uma linha de transmissão. Os testes são realizados aproximando o sensor do condutor, assim como na Figura 8, de tal maneira que as medições podem ser realizadas sem a necessidade de que o núcleo magnético envolva a linha. Tal fato facilita bastante o procedimento de instalação do protótipo em campo.

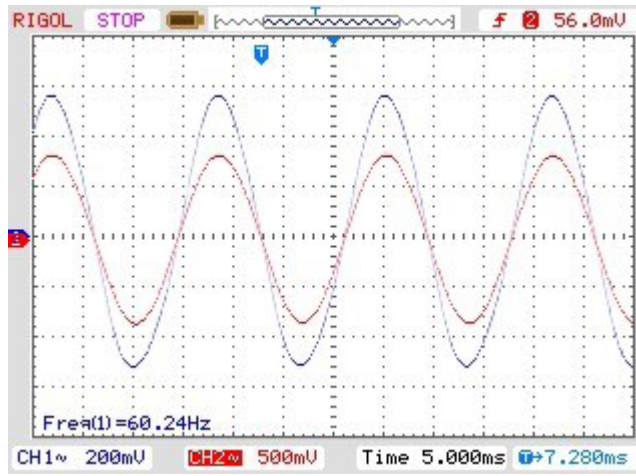
Figura 8: Seção reta da alocação do sensor de corrente magneto-óptico próximo ao condutor monitorado



O arranjo óptico utilizado para a demodulação dos sinais de corrente emprega a interferometria de Fabry-Perot e um circuito fotodetector-amplificador. Uma fonte de luz de banda larga incide sobre a FBG fixada sobre a haste de Terfenol-D através de um circulador óptico, e o sinal refletido atinge o filtro sintonizável de Fabry-Perot. Dessa forma, o sinal que atinge o fotodetector, é, então, uma intersecção entre os espectros do filtro e do sensor, e o sinal elétrico gerado é amplificado e monitorado por um osciloscópio.

Com este arranjo é possível recuperar as formas de onda da corrente elétrica desenvolvida no condutor e capturadas pelo fotodetector. Na Figura 9, por exemplo, é apresentada a resposta do sensor magneto-óptico para o monitoramento de uma corrente de 600 A (em azul). Como pode ser visto, o sinal de saída do sensor opto-magnético apresenta uma frequência de 60 Hz devido ao circuito de polarização magnética, indicando que a haste magnetostrictiva está operando em sua região linear. A forma de onda em vermelho é a resposta de uma pinça de corrente comercial de referência, monitorando o mesmo condutor. Considerando a escala da pinça de corrente de referência (sinal de saída em cor vermelha) como 1 mV/A, tem-se que a corrente aproximada desenvolvida no condutor que simula uma linha de transmissão é de aproximadamente 600 A.

Figura 9: Resposta do sensor magneto-óptico desenvolvido (em azul)



3 CONCLUSÃO

Propostas de sensores de corrente que unem características ópticas e magnetomecânicas no processo de transdução têm sido apresentadas para o setor elétrico; algumas delas explorando a atuação magnetostrictiva de uma haste ferromagnética sobre uma rede de Bragg em fibra óptica, a qual está fixada à haste. Há, neste esforço, o intuito de prover medições de corrente elétrica confiáveis tão necessárias em aplicações de sistemas de potência, transmissão de energia elétrica e tarifação de consumidores. Geralmente, e particularmente em países como o Brasil, transformadores de instrumentos localizados em instalações elétricas de potência são volumosos e pesados, constituídos de cobre, cerâmica, ferro e óleo isolante, este geralmente um agente poluidor. Existe, então, uma inerente dificuldade de instalação e manutenção desses ativos, apesar da robustez.

Neste sentido, é proposto neste artigo o emprego de FBGs em conjunto com um material magnetostrictivo para o desenvolvimento de um sensor magnetoóptico de corrente elétrica com uma topologia adequada à utilização em linhas de transmissão. Foi projetado então um circuito magnético que permitisse não só a magnetização DC da haste magnetostrictiva por meio de ímãs permanentes, mas também que esta pudesse ser submetida ao campo magnético gerado pela corrente em um condutor sem que o enlace da linha pelo sensor fosse necessário. Assim, considerando as características optomagnetostrictivas do conjunto transdutor Terfenol-D/FBG foi projetado um sensor de corrente de pequenas dimensões, leve e prático. Ainda, por não existirem dispositivos de controle ou inteligência na região de alta tensão não é necessário um cuidado elevado com blindagem eletromagnética; todos os sinais de monitoramento são enviados para o ambiente de baixa tensão por meio de uma fibra óptica. O sensor é capaz de atender aos requisitos das redes elétricas inteligentes, além de apresentar desempenho superior em termos de impacto ambiental quando comparado com os transformadores de instrumentos convencionais. Deseja-se, porém, aprimorar o sensor no sentido de torná-lo ainda menor e mais adequado para operação em campo, ou seja, capaz de atuar em ambientes que apresentam regimes climáticos severos.

REFERÊNCIAS

CREMONEZI, A. et al. A Fiber Bragg Grating RMS Current Transducer Based on the Magnetostriction Effect Using a Terfenol-D Toroidal Shaped Modulator. **IEEE Sensors Journal**, v. 13, n. 2, p. 683690, 2013.

MORA, J. et al. Simultaneous temperature and ac-current measurements for high voltage lines using fiber Bragg gratings. **Sensors and Actuators A**, v. 125, p. 313316, 2005.

OLABI, A. G.; GRUNWLAD, A. Design and Application of Magnetostrictive Materials. **Materials and Design**, v. 28, p. 469-483, 2008.

OTHONOS, A.; KALLI, K. **Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing**. Boston: Artech House Publishers, 1999.

SATPATHI, D.; MOORE, J. A.; ENNIS, M. G. Design of a Terfenol-D based fiberoptic current transducer. **IEEE Sensors Journal**, v. 5, n. 5, p. 1057-1065, 2005.

SILVA, R. M. et al. Optical Current Sensors for High Voltage Power Systems: A Review. **Applied Sciences**, v. 2, p. 602628, 2012.