



**GRUPO III  
GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT**

**SENSOR DE VIBRAÇÃO PARA CABOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO  
USANDO FIBRA ÓPTICA E REDES DE BRAGG**

**Murilo M. Nogueira \* Arthur M. B. Braga Luiz C. G. Valente Sergio R. K. Morikawa Adriana L. C. Triques**

**EXPANSION  
TRANSMISSÃO**

**PUC-RIO**

**GAVEA  
SENSORS**

**GAVEA  
SENSORS**

**PUC-RIO**

**RESUMO**

A vibração eólica e a prevenção das falhas por ela induzidas são temas clássicos em linhas de transmissão. Não obstante progressos nas últimas décadas, algumas áreas de pesquisa ainda permitem avanços significativos como, por exemplo, a medição de vibração em cabos: os poucos instrumentos hoje disponíveis apresentam aspectos insatisfatórios quanto à autonomia e à taxa de amostragem.

O Informe apresentará a primeira aplicação no Brasil — e a segunda no mundo — da técnica das redes de Bragg para sensoriamento de vibrações em cabos de linhas de transmissão. Serão discutidos os aspectos teóricos da técnica, os protótipos fabricados e os ensaios realizados.

**PALAVRAS-CHAVE**

Linhas de transmissão, Vibração, Redes de Bragg, Instrumento de medição.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A vibração de cabos é um conhecido fator de risco em linhas de transmissão. Em casos extremos, pode levar ao rompimento dos cabos por fadiga e à conseqüente interrupção no transporte de energia, com prejuízos tanto para a concessionária como para o Sistema Elétrico.

A experiência mostra que mesmo com o uso de sistemas de amortecimento não há como garantir a imunidade dos cabos aos danos provocados pela vibração. A existência de modelos de previsão de fadiga baseados na medição da frequência e amplitude da vibração (4), (5), (6), (7), (14) permite uma ação preventiva baseada no resultado de medições de campo. Entretanto, os dispositivos comumente usados para medição (15), (16) empregam transdutores elétricos, tais como extensômetros, os quais, além de exigirem uma fonte externa de energia, sofrem influência dos intensos campos elétricos e magnéticos existentes em torno dos condutores.

Como resultado, tais instrumentos apresentam restrições de autonomia e armazenamento que limitam significativamente seu uso, de forma que os resultados medidos traduzem uma ínfima amostra da realidade e podem não ser representativos dos efeitos reais da vibração eólica sobre os cabos.

A imunidade das fibras ópticas frente a ambientes de intensa poluição eletromagnética e o uso de dispositivos de interrogação com baixo consumo de potência, como LEDs, oferecem uma alternativa para a criação de instrumentos para medição de vibração usando a técnica das redes de Bragg.

\* Avenida Marechal Câmara, 160 - sala 1534 - CEP 20020-080 - Rio de Janeiro - RJ - BRASIL  
Tel.: (021) 2223-7350 - Fax: (021) 2215-7216 - E-Mail: murilo.nogueira@expansion.com.br

Embora tais vantagens pareçam promissoras, existem ainda poucos registros de sensores a redes de Bragg desenvolvidos para estruturas e equipamentos de alta tensão. Destes, apenas um trabalho na Noruega (1), (2) está voltado para medição da vibração em linhas de transmissão de alta tensão.

O projeto de pesquisa da Expansion Transmissão e PUC-Rio visa definir e testar protótipos para a futura viabilização de instrumentos de medição de vibração tecnicamente eficazes e comercialmente viáveis.

## 2.0 - VIBRAÇÃO EM CABOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

O estudo da vibração em cabos de linhas de transmissão engloba os movimentos repetitivos ou cíclicos que derivam sua energia da força do vento.

A mecânica do fenômeno pode ser resumidamente descrita da seguinte forma: ao passar transversalmente por um cilindro, o ar sofre uma descontinuidade na velocidade, criando vórtices atrás desse cilindro enquanto se afasta do mesmo. Esse vórtices, denominados “vórtices karmanianos”, criam um desbalanço de pressão alternado que induz o cabo a mover-se cíclica e perpendicularmente à direção do vento.

Geralmente são reconhecidos três tipos de movimento cíclico nos cabos de linhas de transmissão: vibração eólica, galope e oscilações de sub-vão (7).

A vibração eólica propriamente dita corresponde ao fenômeno clássico descrito acima, aplicado a um cabo singelo. É conhecida como uma das causas de fadiga e rompimento dos cabos desde a década de 1920.

A vibração eólica ocorre sob ventos de fracos a moderados (até 7 m/s) e provoca oscilações de pequena amplitude (da ordem de grandeza do diâmetro do cabo) e baixa frequência (até 150 Hz). Devido à proximidade entre as frequências naturais de vibração do cabo e à característica irregular da força aplicada pelo vento, a excitação eólica tem como resultado um batimento<sup>1</sup>, como mostrado na Figura 1.

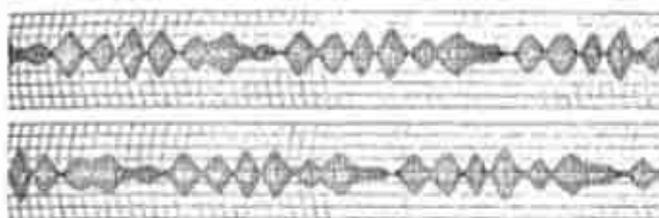


Figura 1 – Exemplo de registro de vibração eólica em LT (7)

O galope surge quando uma precipitação de neve forma ao redor dos cabos uma camada de gelo de diâmetro apreciável. Dependendo da geometria formada por tal camada, ventos de média velocidade podem originar amplitudes de vibração de vários metros, em baixíssimas frequências. Trata-se de fenômeno não registrado no Brasil e, por isso, sua medição não foi incluída entre os objetivos dos sensores ópticos descritos neste trabalho.

A oscilação de sub-vão ou oscilação de esteiramento (*wake-induced oscillation*) é fenômeno típico de feixes de condutores expostos a ventos de médios a fortes. Surge da interferência que os subcondutores a barlavento provocam no fluxo de ar que segue para os subcondutores a sotavento e geram movimentos complexos nos planos vertical e horizontal. Entre os vários modos de movimento desse gênero estão o modo de sub-vão, o qual envolve a oscilação de subcondutores no trecho entre dois espaçadores, e os chamados “modos de corpo rígido”, nos quais o feixe se move em conjunto como, por exemplo, o giro (*rolling* ou *twisting*).

## 3.0 - MEDIÇÃO DA VIBRAÇÃO EM CABOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Considerando a complexidade do fenômeno da vibração em cabos de linhas de transmissão e as incertezas das variáveis empregadas nos modelos matemáticos, é natural que a medição direta dos parâmetros de vibração se torne uma alternativa interessante para a engenharia de manutenção.

As tentativas de medição da vibração no campo são praticamente tão antigas quanto o reconhecimento dos problemas por ela causados. Já na década de 1930 instrumentos mecânicos de razoável engenhosidade foram testados, porém possuíam limitações quanto à precisão e variedade dos parâmetros medidos (7), (17).

Em 1941 Tebo (17) apresentou um dispositivo ferromagnético, fixado diretamente sob o grampo de suspensão, para medição da amplitude de vibração do cabo em relação ao grampo. O dispositivo possuía um pequeno *gap* cujo comprimento era alterado pelo movimento do condutor. A variação desse *gap* alterava a impedância do

<sup>1</sup> Batimento é uma pulsação caracterizada por aumentos e reduções alternados na amplitude da onda, causada pela adição de duas ondas de frequências diferentes porém próximas.

enrolamento de excitação do dispositivo, gerando assim uma saída elétrica proporcional ao movimento do cabo. As medições podiam ser registradas continuamente em um filme oscilográfico.

O autor tinha conhecimento de que a maioria dos eventos de fio rompido ocorria a até uma polegada do grampo de suspensão, tendo assim buscado elaborar um instrumento com sensibilidade adequada para registrar as pequenas amplitudes de vibração esperadas para essa região. Não obstante, nos testes de campo as medidas foram tomadas a distâncias ao redor de 3 polegadas, provavelmente para obter registros de mais fácil leitura.

Baseado na experiência de Tebo e na apresentação subsequente de outros dispositivos que também mediam a amplitude diferencial de vibração, Poffenberger e Swart (14) propuseram a hoje clássica equação correlacionando tal amplitude à deformação (*flexural strain*) nos fios, abrindo caminho para a estimação da fadiga a partir da medição em linha viva da amplitude diferencial do cabo em referência ao grampo de suspensão.

### 3.1 Padronização do método de medição da vibração eólica

Apoiado nos trabalhos anteriores, o IEEE (9) adotou a medição da amplitude diferencial a 3 ½" (89 mm) de distância do grampo de suspensão como método padrão de medição da vibração eólica. Foram também estabelecidos critérios de amostragem (v. Tabela 1).

Para cada registro, toma-se a frequência e a maior amplitude pico-a-pico. Tais valores são assumidos persistir ao longo de 15 minutos, até a medição seguinte. Os pares amplitude x frequência são acumulados em uma tabela representando os 14 dias de medição. Tais resultados podem então ser convertidos em deformação dinâmica pela relação de Poffenberger-Swart.

O método do IEEE era atendido por um instrumento eletromecânico canadense (12) que registrava o movimento do cabo em um filme de acetato de celulose de 16 mm, o qual podia posteriormente ser examinado com auxílio de um projetor.

A partir da década de 1980 surgiram no mercado instrumentos digitais que permitiam o armazenamento das medições em memória RAM e sua posterior transferência para microcomputadores (15), (16). Tais instrumentos representaram um grande avanço ao substituir o tedioso procedimento de inspeção visual dos registros analógicos pela análise via *software*.

Em 1995 os critérios do IEEE foram ratificados, com pequenas modificações, pelo Cigré (6) (v. Tabela 1), que propôs também requisitos específicos para os instrumentos digitais.

TABELA 1 – Comparação dos critérios de amostragem dos parâmetros de vibração

	IEEE	Cigré
duração dos registros	1 s	1 s (mín) - 10 s (pref.)
intervalo entre registros	15 minutos	15 min (máx)
período de medição	14 dias	3 meses (mín)

### 3.2 Críticas aos instrumentos de medição atuais

Embora tenham representado um grande progresso na investigação de campo dos danos causados pela fadiga por vibração eólica, os instrumentos de medição existentes ainda possuem deficiências que limitam seu uso e podem comprometer as conclusões sobre a vida útil do cabo obtidas a partir dos resultados medidos.

Algumas dessas deficiências são: autonomia das baterias, limitações para armazenamento e envio de dados a estações remotas e, principalmente, amostragem insuficiente de valores.

Por exemplo, um cabo submetido a uma vibração média de 10 Hz produzirá em 1 hora cerca de 36 mil valores de amplitude. Destes, apenas 400 (1,1%) serão registrados por um instrumento ajustado pelos critérios do Cigré.

A padronização do armazenamento discreto dos valores absolutos de frequência e amplitude pelos aparelhos digitais acabou também com um dos benefícios trazidos pelos primeiros instrumentos de acionamento mecânico: o registro gráfico da oscilação do cabo. Tal informação, embora desnecessária para o cálculo de estimativa da vida útil do cabo, possuía grande utilidade para os engenheiros interessados em pesquisar o fenômeno da vibração.

Deve ficar claro que os instrumentos existentes são de excelente qualidade e que tais deficiências se devem exclusivamente à tecnologia empregada, que exige o uso de transdutores e circuitos elétricos que consomem energia e estão sujeitos à interferência elétrica e magnética.

Esta avaliação coincide com a do EPRI que, em uma de suas propostas de projeto (8), assume que nenhum dos instrumentos hoje disponíveis no mercado atende às exigências das empresas de energia.<sup>2</sup>

Por fim, esses instrumentos não permitem a adequada supervisão de outros fenômenos, como vibrações eólicas no meio do vão e oscilações de sub-vão em feixes de cabos, estas últimas por apresentarem movimentos com componentes no plano horizontal.

### 3.3 Medição da vibração eólica com fibra óptica e redes de Bragg

Em 2000 Bjerkan (1) mostrou a viabilidade do uso de redes de Bragg em fibras ópticas para monitoramento da vibração eólica em uma LT 60 kV, circuito duplo. Posteriormente, esse trabalho foi estendido para LTs de 300 kV e 420 kV (2). Em ambos os casos, as redes foram fixadas diretamente no cabo com o objetivo de medir sua deformação dinâmica e daí inferir a amplitude e frequência de vibração. Entretanto, as redes foram posicionadas a grandes distâncias dos grampos de fixação — 80 e 90 m (1), 200 e 1.200 m (2) — caracterizando uma abordagem distinta das medições tradicionais.

Isso se explica devido aos objetivos diversos ambicionados por esses trabalhos: no primeiro caso, visava-se testar a técnica das redes de Bragg para medição de cargas estáticas e oscilações mecânicas em cabos energizados de linhas de transmissão. Nas medições da LT 420 kV, as redes de Bragg foram usadas para investigar a eficácia do sistema de amortecimento na travessia de um fiorde com 2,9 km de extensão, onde ventos contínuos e baixas temperaturas contribuíam para tornar críticas as condições de vibração no meio do vão.

Em 2002 a PUC-Rio desenvolveu um acelerômetro triaxial usando redes de Bragg (11). Baseado nesse protótipo e nos resultados promissores apresentados por Bjerkan, a Expansion Transmissão propôs um projeto de pesquisa para desenvolver sensores de vibração para linhas de transmissão usando fibras ópticas e redes de Bragg.

## 4.0 - REDES DE BRAGG: PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

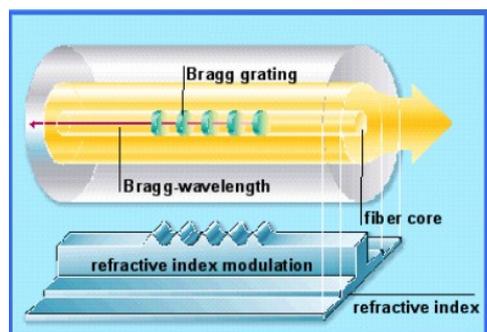


FIGURA 2 – Princípio construtivo de uma rede de Bragg

Na sua forma mais simples, uma rede de Bragg em fibra óptica (*fiber Bragg grating*) é um componente óptico passivo obtido a partir da modulação local, longitudinal e periódica do índice de refração do núcleo da fibra óptica (10), (13). Um desenho ilustrativo é mostrado na Figura 2.

Ao aumentar ligeiramente o índice de refração nessas regiões, induz-se uma pequena reflexão da luz que se propaga na fibra. Quando as regiões moduladas estão espaçadas a intervalos regulares, ocorrerão reflexões com interferências construtivas para um determinado comprimento de onda, enquanto os demais seguirão sem perdas significativas.

Assim, ao se iluminar uma rede de Bragg com um feixe de luz de largo espectro, apenas um comprimento de onda retornará pelo núcleo da fibra (v. Figura 3).

O comprimento de onda refletido  $\lambda_B$  — chamado comprimento de onda de Bragg — é dado pela relação:

$$\lambda_B = 2 n_{ef} \Lambda \quad \text{onde: } n_{ef} : \text{índice efetivo de refração} \\ \Lambda : \text{espaçamento da rede}$$

Variações de temperatura e deformações mecânicas aplicadas à rede provocam pequenas modificações em seu espaçamento, bem como nos valores do índice de refração, alterando portanto o valor de  $\lambda_B$ .

Assim, ao supervisionar o valor do comprimento de onda de Bragg, pode-se inferir as variações de temperatura e deformação no local onde está posicionada a rede. Em outras palavras, a rede de Bragg funciona como um sensor para essas grandezas, bem como para quaisquer outras que possam ser direta ou indiretamente associadas a essas variáveis.

<sup>2</sup> "It is, in fact, likely none of the vibration recorders available today will meet all the requirements of the electric power industry." (8)

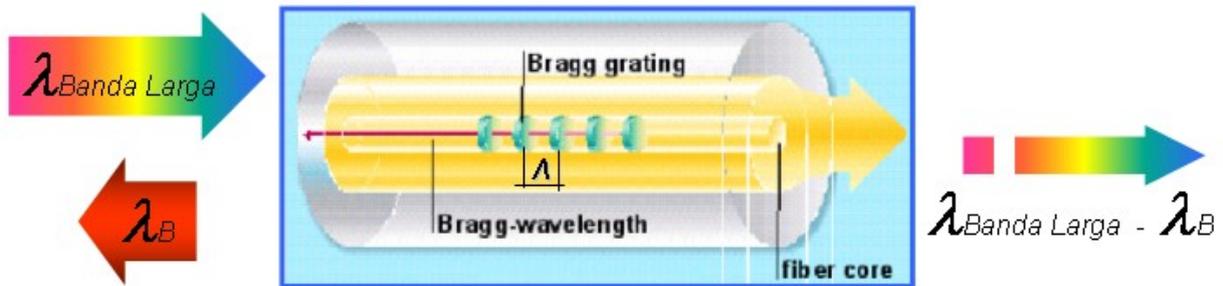


FIGURA 3 – Representação esquemática do funcionamento de uma rede de Bragg, onde cada cor representa um comprimento de onda diferente.

#### 4.1 Sensoriamento com redes de Bragg

A variação do comprimento de onda de Bragg  $\Delta\lambda_B$  é dada de maneira genérica pela equação abaixo (13):

$$\Delta\lambda_B = 2 \left( \Lambda \frac{\partial n_{ef}}{\partial l} + n_{ef} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left( \Lambda \frac{\partial n_{ef}}{\partial T} + n_{ef} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T$$

O primeiro termo da equação representa o efeito da deformação da fibra óptica sobre o espaçamento da rede bem como, por efeito fotoelástico, em seu índice de refração, podendo ser expresso de modo simplificado como:

$$\Delta\lambda_{B1} = \lambda_B (1 - p_e) \varepsilon_z \quad \text{onde} \quad p_e = 0,2126 \quad \text{para fibra de silício dopada com germânio}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta L}{L} = \text{deformação na fibra}$$

O segundo termo representa o efeito da temperatura e pode ser escrito como:

$$\Delta\lambda_{B2} = \lambda_B (\alpha_\Lambda + \alpha_n) \Delta T \quad \text{onde} \quad \alpha_\Lambda = \text{coeficiente de expansão térmica da fibra} \cong 0,55 \cdot 10^{-6} \quad \text{para o silício}$$

$$\alpha_n = \text{coeficiente termo-óptico} \cong 8,6 \cdot 10^{-6} \quad \text{para fibra de silício dopada com germânio}$$

Portanto,  $\Delta\lambda_B$  pode ser representada pela equação:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (0,787 \varepsilon_z + 9,15 \cdot 10^{-6} \Delta T)$$

Uma rede com tais parâmetros e  $\lambda_B = 1550 \text{ nm}$  teria a seguinte sensibilidade:

- para deformação:  $\Delta\lambda_B = 1,22 \text{ pm} / 1 \text{ } \mu\text{e}$
- para temperatura:  $\Delta\lambda_B = 1,42 \text{ pm} / 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$

Também dessa última equação verifica-se que o comprimento de onda refletido aumenta quando a fibra se alonga ou se aquece e diminui quando a fibra se comprime ou se resfria. A Figura 4 ilustra esse comportamento.

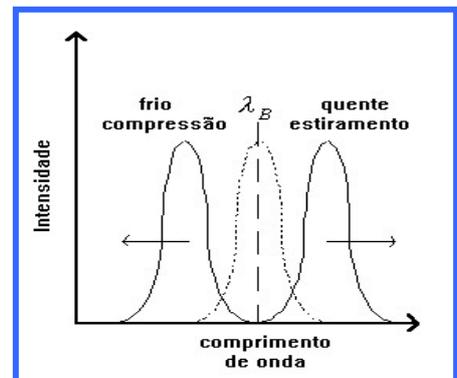


FIGURA 4 – Resposta da rede à variação de deformação e temperatura

Sensores a redes de Bragg possuem diversas vantagens em relação aos tradicionais sensores/transdutores elétricos, como extensômetros (*strain gages*) e termopares (13):

- imunidade a campos elétricos e magnéticos e radiação UV;
- baixíssima perda de sinal, possibilitando medições a grandes distâncias;
- tolerância a temperaturas elevadas (até  $200 \text{ } ^\circ\text{C}$ );
- linearidade de resposta sobre várias ordens de grandeza;
- baixo consumo de energia, caso a fonte de luz seja um LED, permitindo maior autonomia;
- valor medido codificado no próprio comprimento de onda, tornando-o imune a flutuações na intensidade da luz incidente, variações na fonte de potência e perdas nas conexões;
- facilidade de multiplexação, permitindo a instalação de diversos sensores em uma única fibra monomodo.

Os dois últimos casos significam vantagens também em relação aos outros sensores baseados em fibras ópticas.

## 5.0 - MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COM REDES DE BRAGG: O PROJETO EXPANSION - PUC RIO

O projeto de pesquisa entre Expansion e PUC-Rio (3) — com a participação da Gavea Sensors, empresa de tecnologia ligada ao Laboratório de Sensores a Fibra Óptica da universidade — engloba o desenvolvimento de dois instrumentos para medição de vibração em linhas de transmissão: um acelerômetro biaxial e um transdutor de deslocamento para aferição da amplitude diferencial, conforme o padrão do IEEE - Cigré.

### 5.1 Acelerômetro biaxial

O projeto do acelerômetro é um aperfeiçoamento do protótipo triaxial anteriormente desenvolvido pela PUC-Rio (11). Neste modelo, a medição foi restrita aos dois eixos do plano transversal ao cabo a ser supervisionado.

O princípio de operação é ilustrado na Figura 5. A fibra unida à massa sísmica funciona como um conjunto massa-mola de um acelerômetro convencional. Ao vibrar a massa provoca um efeito simultâneo de compressão e alongamento nas redes de Bragg da fibra, respectivamente diminuindo e aumentando os comprimentos de onda de Bragg. O efeito da temperatura pode ser compensado pois as respostas das duas redes estão defasadas de 180°.

O acelerômetro é constituído por dois módulos, um para cada eixo de medição, encapsulados em invólucro de duralumínio convenientemente projetado para garantir a estanqueidade à umidade e evitar o surgimento de corona quando conectado a cabos em alta tensão, conforme ilustrado na Figura 6.



FIGURA – 5 princípio de operação do acelerômetro

### 5.2 Medidor de amplitude diferencial (padrão IEEE-Cigré)

O sucesso dos testes com o acelerômetro incentivou o grupo de pesquisa a preparar um protótipo para medição da amplitude de deformação do cabo a 89 mm de distância do grampo de suspensão, conforme padrão do IEEE-Cigré adotado pela indústria. Na versão inicial, que visou determinar soluções para a parte óptica, o protótipo seguiu as características do instrumento comercial mais avançado, que utiliza o princípio de medição da amplitude de deformação reversa (15). Nesse caso, a fibra com as redes está colocada sob a haste horizontal. Essa versão, mostrada na Figura 7, já permite antever que é possível construir um instrumento muito mais leve e fácil de instalar do que os modelos hoje comercializados. Pretende-se aperfeiçoar o protótipo incluindo outras facilidades, como medição de temperatura, antes de se chegar a um *design* definitivo.

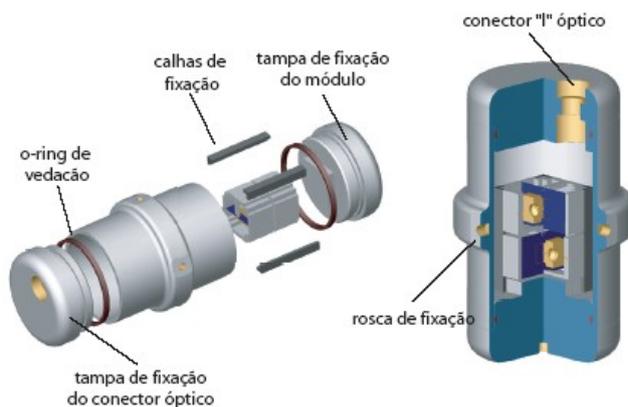


FIGURA 6 – Acelerômetro óptico biaxial

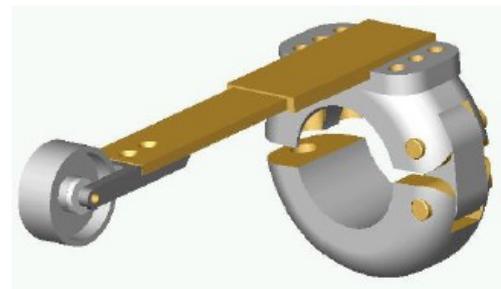


FIGURA 7 – Medidor de amplitude diferencial

### 5.3 Sistema de interrogação das redes e armazenamento de dados

O sistema completo de medição no campo inclui, além dos sensores acima (instalados em linha-viva), um conjunto que inclui os seguintes dispositivos (v. Figura 8):

- Fonte de luz de baixa potência (LED)
- filtro fixo de espectro largo (WDM)
- fotodetectores e acopladores ópticos
- sistema de controle de temperatura

- placa de conversão analógico digital
- microcomputador
- fonte de tensão
- rack industrial 19", altura 2U

O rack contendo esses dispositivos será montado na torre de transmissão, sendo portanto acessível ao operador sem necessidade de desligamento da linha ou uso de equipe de linha-viva.

O microcomputador embarcado poderá executar qualquer rotina de aquisição e processamento elaborada, seja a análise de fadiga e estimativa de vida útil do cabo, segundo os critérios preconizados pelo Cigré (6), seja o registro gráfico da oscilação do cabo, inexistente nos instrumentos digitais mais recentes. A leitura pode ser realizada independentemente da retirada do sensor montado no cabo energizado. O armazenamento em disco rígido permitirá o acúmulo de registros por até 1 ano.

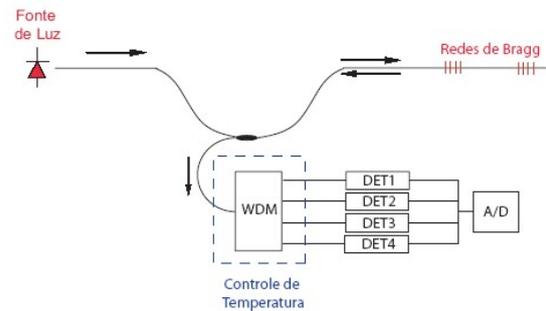


FIGURA 8 – Esquema do sistema de interrogação óptica a ser instalado na torre de transmissão

#### 5.4 Testes de bancada e calibração dos medidores

O primeiro dispositivo desenvolvido pelo grupo de pesquisa foi o acelerômetro, por já possuir um projeto prévio (11). Foram realizados testes de bancada para comparação de seu desempenho com o de acelerômetros piezelétricos convencionais. Esses testes serviram para aperfeiçoamento do projeto, tendo sido testados sucessivos protótipos até se chegar ao desenho final.

Definido esse desenho, o módulo uniaxial que compõe o instrumento completo foi submetido a ensaio de calibração de elevada precisão no Laboratório de Vibrações - Lavib, do Inmetro (v. Figura 9). O Lavib é o laboratório de referência do Inmetro responsável, no país, pela guarda, manutenção e realização das unidades do Sistema Internacional de Unidades (SI) referentes às grandezas aceleração, velocidade e deslocamento.

Nesse ensaio, realizado à temperatura ambiente controlada de 20°C, foi usado sistema de calibração absoluta por interferometria laser (Interferômetro de Michelson), com incerteza  $\pm 0,5\%$ . O acelerômetro foi submetido a acelerações de até 12 m/s<sup>2</sup> na faixa de 20 a 45 Hz, e de até 50 m/s<sup>2</sup> na faixa de 50 a 75 Hz. A faixa de frequências completa coberta pelo ensaio foi de 10 a 120 Hz. O acelerômetro mostrou resposta plana ao longo de toda a faixa.



Figura 9 - Calibração no Inmetro. Da esquerda para a direita: módulo do acelerômetro montado no excitador eletromagnético, vista geral do sistema de interferometria laser e tela do sistema de calibração.

O medidor de amplitude diferencial passou por testes iniciais para aferir a resposta da rede à deflexão da haste em balanço. No momento de preparação deste texto, está sendo programada calibração estática no Laboratório de Sensores a Fibra Óptica da PUC-Rio.

#### 5.5 Testes de campo

Ao longo de 2005 estão previstos testes de campo em um vão de LT de treinamento, situado na Base da Manutenção da Expansão em Pires do Rio, GO. No momento de preparação deste texto, tais testes ainda não haviam sido iniciados.

#### 5.6 Metas do projeto de pesquisa

Os instrumentos de medição em desenvolvimento no projeto Expansion - PUC-Rio visam dar um passo adiante na tecnologia usada atualmente nos medidores de vibração de cabos de linhas de transmissão, baseada em transdutores elétricos, substituindo-a por sensores a fibra óptica e redes de Bragg. Entre as principais vantagens dos sensores a redes de Bragg estão a maior autonomia, amostragem mais completa dos parâmetros vibratórios, armazenamento de dados mais extenso e completo e possibilidade de registro gráfico da vibração.

Com o acelerômetro biaxial pretende-se criar uma ferramenta para análises de fenômenos que hoje não podem ser aferidos no campo, como oscilações de sub-vão e vibrações de meio de vão.

Com o medidor de amplitude diferencial pretende-se aperfeiçoar os instrumentos existentes, superando as atuais deficiências já mencionadas de autonomia, armazenamento e qualidade da amostragem.

Para criar instrumentos viáveis tecnicamente a pesquisa ainda deverá passar por algumas etapas, como ensaios de alta tensão e durabilidade, a serem programados.

## 6.0 - CONCLUSÕES

A medição da vibração de cabos de LTs, em que pesem os avanços realizados tanto na teoria de análise dos resultados quanto na instrumentação necessária para obtê-los, ainda mantém algumas deficiências devido às limitações impostas pela tecnologia hoje em uso.

A pesquisa demonstrou a viabilidade de se criarem instrumentos para medição usando a técnica das redes de Bragg. Foram desenvolvidos protótipos de instrumentos que aperfeiçoam os modelos disponíveis comercialmente (medidor de amplitude diferencial) e criam possibilidades de medidas para fenômenos vibratórios até aqui não cobertos (acelerômetro biaxial).

Embora mais testes necessitem ser realizados, os resultados obtidos até o momento apontam um futuro promissor para os sensores ora em desenvolvimento.

## 7.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) BJERKAN, L. *Application of fiber-optic Bragg grating sensors in monitoring environmental loads of overhead power transmission lines*. Applied Optics, vol 39, n° 4, p 445-560. EUA. Fev 2000.
- (2) BJERKAN, L. et al. *Measurements on aeolian vibrations on a 3 km fjord crossing with fibre-optic Bragg grating sensors*. Cigré Session 2004. B2-314. França. Set 2004. 8 p.
- (3) BRAGA, A.M.B.; VALENTE, L.C.G.; MORIKAWA, S.R.K.; TRIQUES, A.L.C.; RIBEIRO, A.S.; REGAZZI, R.D. *Sensoriamento de Vibração de Cabos em Linhas de Transmissão Usando Fibra Óptica e Redes de Bragg*. Relatórios de atividades n°s 1, 2, 3, 4, 5 e 6. Projeto de P&D Expansion - PUC-Rio. Brasil. 2003-2004.
- (4) CIGRÉ STUDY COMMITTEE 22. WG 04. *Recommendations for the evaluation of the lifetime of transmission line conductors*. Electra n° 63, p 103-145. França. Mar 1979.
- (5) CIGRÉ STUDY COMMITTEE 22 - WG 01. *Report on aeolian vibration*. Electra n° 124, p 40-77. França. Mai 1989.
- (6) CIGRÉ STUDY COMMITTEE 22 - WG 11 - Task Force 02. *Guide to vibration measurements on overhead lines*. Electra n° 162, p 124-137. França. Out 1995.
- (7) EPRI. *Wind-induced conductor motion*. Transmission Line Reference Book. EUA. 1979. 625 p.
- (8) EPRI. *Establish an aeolian vibration measurement and monitoring guide*. Project opportunity n° 1009098. EUA. Ago 2003. 2 p.
- (9) IEEE COMITTEE REPORT. *Standardization of conductor vibration measurements*. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol PAS-85 n° 1, p 10-20. EUA. Jan 1966.
- (10) MORIKAWA, S.R.K. *Acelerômetro triaxial a redes de Bragg*. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica. PUC-Rio. Brasil. 2004. 105 p.
- (11) MORIKAWA, S.R.K. et al. *Acelerômetro óptico triaxial*. 6ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos. Brasil. Ago 2002. 8 p.
- (12) ONTARIO HYDRO. *Ontario Hydro vibration recorder - instruction manual n° 6*. Canadá. Jun 1968. 77 p.
- (13) OTHONOS, A.; KALLI, K. *Fiber bragg gratings : fundamentals and applications in telecommunications and sensing*. Artech House. EUA. 1999. 422 p.
- (14) POFFENBERGER, J.C.; SWART, R.L. *Differential displacement and dynamic conductor strain*. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol PAS-84 p 281-289. EUA. 1965.
- (15) ROCTEST - TELEMAC. *Instruction manual – transmission line vibration recorder and analyser model PAVICA*. Canadá. 2003. 44 p
- (16) SEFAG. *Vibrec 300 – user's manual*. Sefag AG. Suíça. 1992. 78 p.
- (17) TEBO, G.B. *Measurement and control of conductor vibration*. Transactions of AIEE, vol 60 p 1188-1193. EUA. 1941.