



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GLT 22
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

SOMLT - SISTEMA ÓPTICO PARA MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO

Carlos Alexandre Meireles do Nascimento – Do Nascimento, C. A. M.* – CEMIG

C.A. Hortêncio, J.B.M. Ayres Neto, J.G.D. Aguiar, R.L. Leite, E.F. Costa, D.C. Dini, F. Borin, E.C. Longui e P.J.P. Curado - CPqD

RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo explicitar os resultados e conclusões experimentais obtidos em dois anos de projeto de p&d que resultou em uma inovação tecnológica desenvolvida em parceria entre a CEMIG e o CPqD de Campinas/SP, obtendo um sistema inédito de monitoramento em tempo real de linhas de transmissão baseado em tecnologia amplamente óptica. Esse trabalho técnico irá demonstrar que uma única fibra óptica pode ter vários sensores distribuídos, ao longo da mesma fibra, em diversas posições na linha e desempenhar diferentes funções, tais como: sensor de força mecânica, sensor de temperatura, sensor de vibração, etc. Mas, por outro lado, os sensores também podem ser configurados em duas fibras em paralelo e serem interrogados pela mesma fonte de luz, o que permite flexibilidade no projeto e na construção de uma rede de sensores ópticos. Finalmente, o escopo desse trabalho será dividido em três etapas: (i) a concepção do projeto do SOMLT; (ii) resultados obtidos com a aplicação do protótipo em laboratório e em campo e; (iii) conclusões, recomendações e propostas de novos desenvolvimentos para melhoria do protótipo.

PALAVRAS-CHAVE

Linhas de Transmissão, Monitoramento de Linhas de Transmissão, Sensores Ópticos, Grade de Bragg, Sistema de Supervisão e Fibra Óptica.

1.0 - INTRODUÇÃO

Atualmente, acompanhando a rápida evolução tecnológica que os meios de comunicação e de TI sofreram nos últimos anos, isto é, comunicação via satélite, rede celular, rede corporativa e a WEB, a tecnologia de monitoramento de linhas de transmissão vem sendo adaptada para trabalhar nessas plataformas de comunicação de dados. Mas mesmo assim, para expandir a aplicação comercial do monitoramento de linhas no Brasil o custo da tecnologia é a maior restrição. Em relação ao valor do investimento e ao custo operacional associado às licenças de uso da tecnologia importada, dos equipamentos sensores e ao meio de comunicação, é necessário reduzir drasticamente o custo final desses itens. Mesmo com todas tecnologias de comunicação tipo “sem fios” disponibilizadas, ainda não foi observado a expansão desses sistemas de monitoramento de linhas no Brasil.

Para objetivar a redução do custo do monitoramento de linhas no Brasil, foi verificado um nicho tecnológico através da evolução dos sensores ópticos (1, 2, 3, 4, 5 e 6), que vem se desenvolvendo desde a década de 90, quando os sensores em grade de Bragg foram comercializados para sensoriamento generalizado, surgindo então vários estudos, novas aplicações e, recentemente no Brasil, projetos de P&D da ANEEL sobre esse tema. Nesse contexto, a tecnologia de sensores à fibra óptica está sendo direcionada pelo grande avanço no desenvolvimento de componentes ópticos para telecomunicações e a subsequente produção em massa destes dispositivos. Na busca da substituição dos sensores tradicionais por sensores à fibra óptica tem-se obtido grandes avanços

tecnológicos em função da rápida queda do preço destes componentes e do aumento na qualidade atingida pelos sensores ópticos.

Os sensores à fibra óptica possuem grandes vantagens em relação aos sensores clássicos pelo fato da fibra óptica ser um dielétrico natural, o que a torna ideal para instalações em alta tensão. Devido às suas características físicas, a fibra óptica permite a construção de sensores compactos e de baixo peso, além de possuir a capacidade de enviar e receber sinais ópticos a longa distância, o que permite a construção de redes de sensores sem a necessidade da conversão óptica/elétrica em cada ponto de sensoriamento, possibilitando a redução drástica dos custos envolvidos no monitoramento amplo ao longo das linhas.

Atualmente há uma crescente aplicação dos sensores à fibra óptica na engenharia de monitoração em geral. Sistemas para medição e configuração que não eram possíveis com tecnologias convencionais tornaram-se possíveis usando sensores ópticos. Esses sensores ganharam espaço no caso do monitoramento de linhas de transmissão. Dessa forma, a parceria entre a Cemig e o CPqD constituiu uma visão estratégica de desenvolvimento através do projeto de p&d da ANEEL para construir um sistema óptico de monitoração remota via sensores à fibra óptica na supervisão das grandezas da força mecânica, da vibração e da temperatura de condutor. O novo sistema desenvolvido teve caráter inovador e por isso foi requerido registro de patente por ser uma significativa contribuição científica Brasileira para a engenharia de monitoramento de linhas (7).

Os resultados experimentais e aplicações práticas desse trabalho foram desenvolvidos através da implantação do protótipo do SOMLT em uma linha em operação real da Cemig, a LT Pouso Alegre 1-2, 138 kV e para validação da tecnologia SOMLT foi utilizado o tradicional sistema americano Cat-1 (8). Opcionalmente, as grandezas e/ou estados monitorados pelos sensores ópticos à fibra também podem ser transmitidos a centros de controle através de outros meios de comunicação, tais como rádio ou celular com a utilização de interfaces dedicadas, apresentando dessa forma uma alternativa para os locais que não existam enlaces de fibra óptica para transmissão dos dados monitorados até o centro de controle.

2.0 - MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

A utilização da real capacidade das linhas de transmissão pode ser obtida através do uso de sensores e gerar um aumento médio de 15% da capacidade atual dessas instalações sem grandes alterações no projeto original (9, 10 e 11), significando uma otimização da planta existente com elevados benefícios econômicos para a concessionária e posteriormente para toda sociedade. Outra motivação mensurável é incentivar a concorrência entre os poucos fabricantes existentes no mercado mundial de sistema de monitoramento de linhas. A possibilidade de existir um fabricante brasileiro nesse ramo da engenharia vai incentivar a concorrência e conseqüentemente a queda do custo de expansão dessa tecnologia no Brasil e por outro lado, abrir o mercado mundial para a industrial Brasileira na engenharia de monitoramento de linhas de transmissão.

3.0 - DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A pesquisa foi baseada na tecnologia de sensores à fibra óptica com grade de Bragg (Fiber Bragg Grating - FBG) por apresentar um baixo custo. Esses sensores ópticos têm uma das características fundamentais em sensoriamento em geral, que é operar em conjunto com outros sensores distribuídos ao longo da mesma fibra óptica, para otimizar o custo do meio de comunicação das informações monitoradas. Dessa forma, a rede de sensores na tecnologia FBG opera de forma multiplexada e requer apenas uma fibra óptica para emissão e recepção das grandezas físicas monitoradas em campo a partir da central de controle. Essa foi a premissa tecnológica adotada para a definição do projeto do protótipo desenvolvido. Basicamente, a pesquisa foi dividida em três etapas distintas de desenvolvimento do protótipo, tais como: projeto, construção e os testes de validação do protótipo.

3.1 Projeto do Protótipo

O projeto do protótipo iniciou através de amplo levantamento bibliográfico realizado para o conhecimento do estado da arte de técnicas de sensoriamento óptico, com foco nas técnicas de monitoramento de temperatura, força e vibração em condutores de linhas de transmissão. Para tanto, foi aplicada a teoria básica sobre as fibras ópticas e suas propriedades como guia de onda de luz. A Figura 1 destaca em linhas gerais a arquitetura do projeto do protótipo SOMLT composto de: (i) fonte de luz – SLED (Superluminescent Light Emitting Diode); (ii) circulador óptico que direciona a luz do sinal emitido e do refletido; (iii) fibra óptica que é o meio físico de comunicação; (iv) sensores que refletem parte do sinal gerado; (v) OSA (Optical Spectrum Analyser) que analisa a parte do sinal refletido, e por final (vi) a estação de trabalho que interpreta a informação gerada no OSA e disponibiliza-a em rede cooperativa.

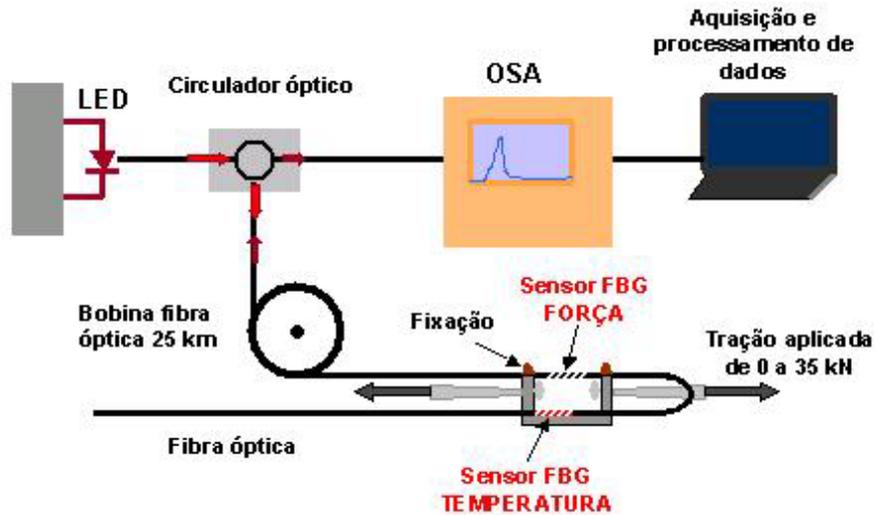


FIGURA 1 - Arquitetura básica do projeto do protótipo SOMLT.

3.2 Construção do Protótipo – Sensor de Força

Para atender ao escopo do projeto de p&d na área de monitoramento de linhas de transmissão foi construído um protótipo composto de: (i) transdutores dos sensores ópticos; (ii) unidade de aquisição das informações ópticas e (iii) programa computacional de leitura dos dados.

O transdutor para medir a força mecânica foi fabricado em aço carbono 1020 em formato de “U”, conforme mostra a Figura 2. Nas extremidades do “U” foi fixada uma FBG e na lateral do transdutor mecânico foi fixada a segunda FBG para medir a temperatura do transdutor “U”. O objetivo é obter a correção do efeito da temperatura sobre o transdutor, que se expande ou se contrai termicamente e com isso altera o valor do comprimento de onda de reflexão referente à força mecânica sobre o sensor de força óptico em FBG.

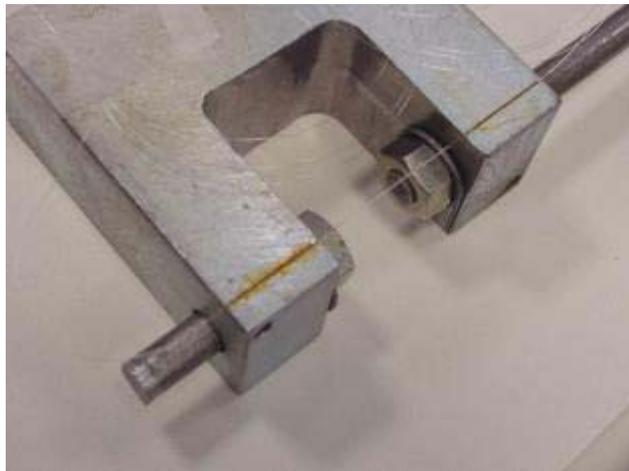


FIGURA 2 - Construção do Sensor de Força “U” do SOMLT.

3.3 Sensores de Vibração e Temperatura

A Figura 3(a) detalha o empacotamento final desses dois tipos de sensores no condutor e a Figura 3(b) detalha as partes internas dos transdutores de vibração mecânica formado por um acelerômetro óptico e o de temperatura em FBG.

3.4 Sistema de Aquisição

A Figura 4(a) detalha a construção do bastidor desenvolvido para abrigar os componentes ópticos e eletrônicos do sistema de aquisição. A Figura 4(b) detalha os dados do bastidor com o equipamento OSA que interpreta o sinal óptico dos sensores através do Laptop através do programa desenvolvido em LabVIEW para aquisição dos dados dos sensores ópticos instalados na linha e o rádio de comunicação do sistema Cat1, para confrontar as informações de campo.

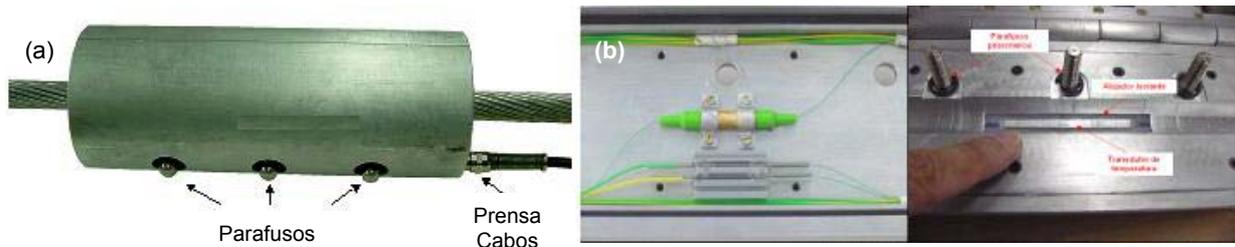


FIGURA 3 - (a) Empacotamento dos sensores de vibração e temperatura e (b) detalhes internos dos sensores para aplicação em condutores de linhas de transmissão.

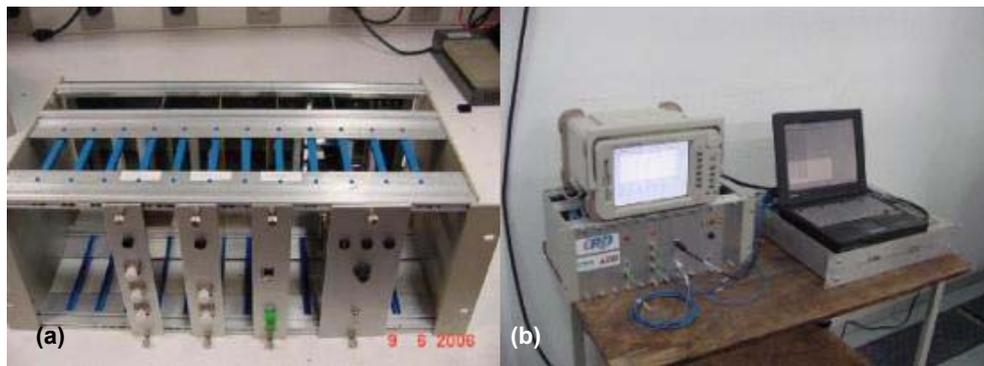


FIGURA 4 - (a) Construção do "Rack 19" do sistema de aquisição de dados e (b) detalhes dos sistemas de aquisições do SOMLT e Cat-1 (b).

3.5 Teste Experimental

A aplicação experimental do SOMLT foi desenvolvida na região do Sul de Minas Gerais, em função da facilidade de logística para acompanhamento das equipes da Cemig e do CPqD durante as atividades de instalação e operação do sistema SOMLT em campo.

Outras estratégias também foram planejadas através do uso e da divulgação da tecnologia em campo, tais como: (i) oportunidade para divulgar o uso da tecnologia de monitoramento de linhas na Cemig; (ii) usar um cabo OPGW com um par de fibras ópticas disponível para uso dedicado do SOMLT; (iii) apoio técnico dos recursos humanos das equipes de linhas e subestações da Cemig para executar as etapas da instalação do SOMLT em campo. Dessa forma, após visita de campo às instalações foram selecionadas a LT Pouso Alegre 1 – Santa Rita do Sapucaí, 138 kV e a LT Pouso Alegre 1 – 2, 138 kV, para a aplicação do SOMLT, conforme croqui simplificado apresentados na Figura 5.

O procedimento para instalação do SOMLT utilizou o cabo OPGW como meio de comunicação das informações dos sensores instalados nas linhas de transmissão até a unidade de aquisição e interpretação dos dados na SE Pouso Alegre 1, e em seguida, esses dados são disponibilizados através de rede corporativa da Cemig no Centro de Processamento de Linhas de Transmissão em Belo Horizonte/MG. As informações estão disponíveis via rede corporativa Cemig, sendo todas informações atualizadas e convertidas para uma única base de dados do sistema de controle, e ainda podem ser acessadas em qualquer parte da Cemig via aplicativo computacional em ambiente Intranet.

3.6 Validação Experimental

O SOMLT foi supervisionado pelo sistema Cat-1, que monitorou por 2 meses a mesma grandeza física na linha, isto é, a força mecânica de esticamento do condutor em um mesmo ponto. Outra tecnologia utilizada foi o sistema de monitoramento de altura do condutor ao solo associado a uma estação climatológica portátil. Mesmo sendo um experimento preliminar os resultados obtidos foram excelentes em função de ter sido aplicado o protótipo SOMLT em linhas em operação da Cemig, o que confirma a robustez do projeto óptico desenvolvido.

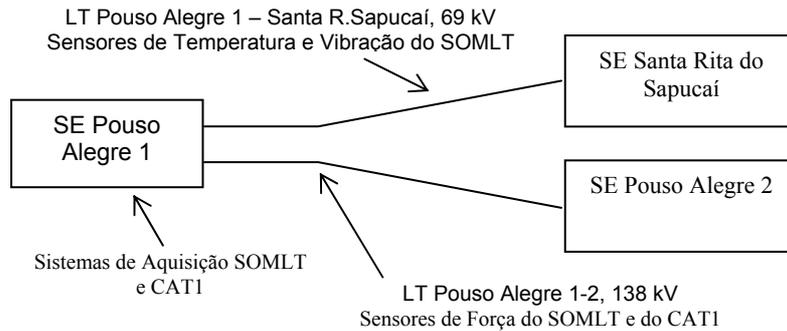


FIGURA 5 - Detalhe da aplicação dos sensores em campo.

4.0 - RESULTADOS OBTIDOS

Os principais resultados obtidos em laboratório e em campo confirmaram a precisão de medição com que os sensores ópticos operam. Esses resultados iniciais serão mostrados a seguir.

4.1 Projeto do Protótipo

A Figura 6 detalha uma visão macro de todos os componentes do projeto SOMLT. O projeto apresentou características interessantes por ser modular e ser facilmente adaptado ao controle do sistema de monitoramento de linhas de transmissão da Cemig - SMLT, onde as informações são processadas, consistidas e previstas em tempo real.

4.2 Sensores

O protótipo do sensor de força completamente montado foi fixado à máquina universal de ensaios de tração, conforme mostra a Figura 7, para realizar as medições de comprimento de onda refletido para forças de tração entre 0 kN e 30 kN, em ciclos de carga e descarga, com uma temperatura ambiente fixa de 20°C, conforme mostram os excelentes resultados obtidos na Figura 7. Os sensores de vibração e temperatura também foram testados em laboratório. Todo processo de montagem e calibração foi desenvolvido nos laboratórios do CPqD.

4.3 Teste Experimental

Antes da instalação experimental em campo, o sistema SOMLT foi testado em vão de teste montado na SE Pouso Alegre 1. O vão de teste, conforme mostra a Figura 8, permitiu verificar a precisão da leitura entre as células de força, nas tecnologias óptica (SOMLT) e convencional (Cat1). A Figura 9(a) mostra o registro visual da instalação do sensor óptico de força e a Figura 9(b) mostra o registro dos sensores ópticos de vibração e temperatura.

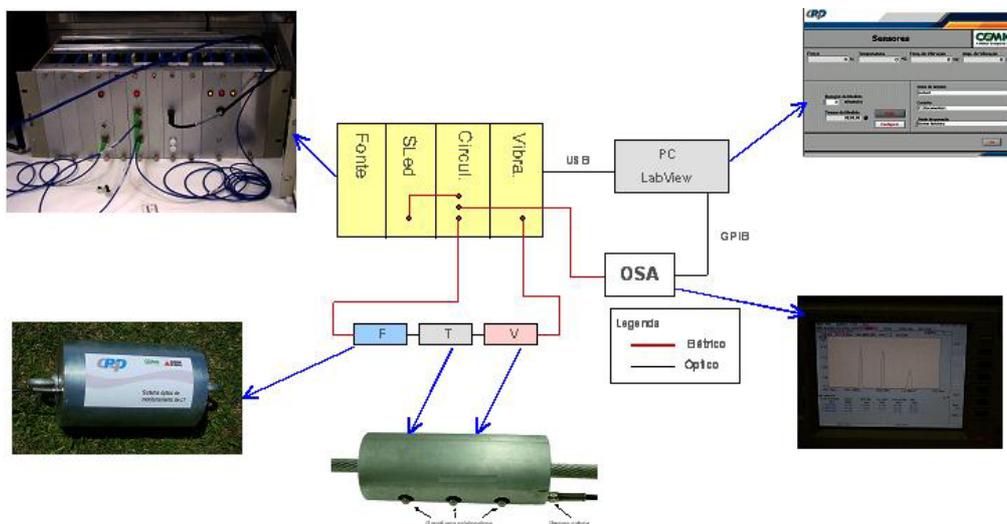


FIGURA 6 - Visão macro do projeto - SOMLT.

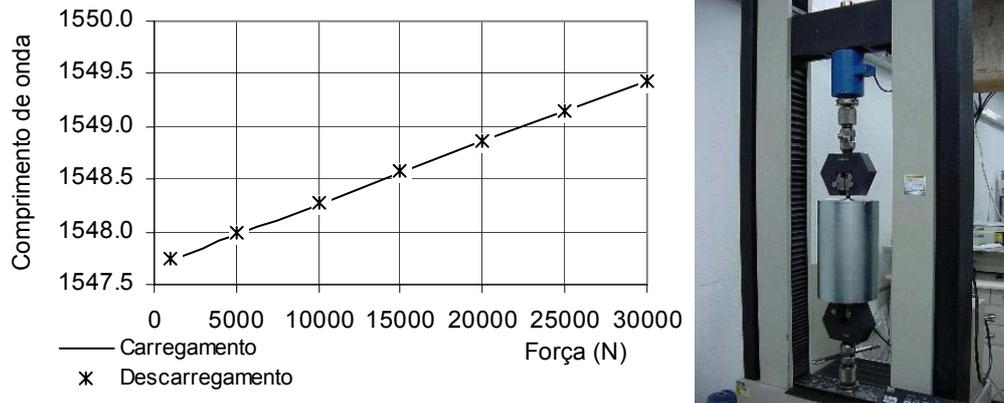


FIGURA 7 - Testes de aferição no sensor de força do SOMLT.



FIGURA 8 - Detalhe do vão de teste na SE Pouso Alegre 1.



FIGURA 9 - (a) Aplicação do sensor de força óptico na linha. (b) Sensores de vibração e temperatura do SOMLT.

5.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados comparativos entre as tecnologias SOMLT e Cat-1 foram similares e satisfatórios no experimento realizado em campo. Ainda falta adotar algum tipo de ajuste a ser implementado para as seguintes hipóteses pesquisadas: (i) Hipótese 1: O SOMLT está correto e o Cat-1 está com precisão incompatível; (ii) Hipótese 2: O Cat-1 está correto e o SOMLT está com precisão incompatível, ou (iii) outra hipótese ainda não observada.

A divergência nas leituras da força mecânica está sendo verificada com o aumento da temperatura ambiente e possui comportamento linear bem definido. Um ajuste na base de conversão dos dados do SOMLT é facilmente aplicável para a convergência com os dados do Cat-1, isto é, se o erro estiver no modelo de leitura do SOMLT. Como não foi possível aferir o sistema Cat-1 antes da instalação em campo, não se pode comentar sobre a

precisão desse sistema, mas em relação ao SOMLT foram elaborados vários ensaios de precisão que atestam a sua precisão de leitura em laboratório.

A Figura 10(a) mostra as leituras realizadas pelos sistemas de monitoramento, SOMLT e Cat1-1, no vão de teste. Os resultados preliminares foram satisfatórios, uma vez que as células de força mostraram um comportamento coerente entre:

- Variação da temperatura ambiente: As duas células mediram valores similares da força mecânica no vão de teste;
- Força: O valor divergente das medições entre as células pode ser em função da construção de cada célula de carga, isto é, existe valor de ajuste inicial;
- Variação ao longo do período de teste: Durante o período de teste não foi observado nenhum registro anormal de leitura, mostrando com isso, similaridade das leituras entre os sistemas aplicados no vão de teste.

Após a implantação do protótipo do SOMLT em Pouso Alegre, foi desenvolvida a análise técnica das informações coletadas em campo pelas equipes da Cemig e do CPqD. Conforme já mencionado, o sistema Cat-1 foi instalado com o objetivo de verificar, comparar e validar os registros da tecnologia SOMLT. A análise dos resultados faz parte da validação do projeto de p&d. A Figura 10(b) mostra alguns dias com os dados brutos coletados em campo.

A metodologia de análise das informações dos sistemas SOMLT e Cat-1 foi desenvolvida em ambiente ACCESS da seguinte forma: (i) filtragem de todos os registros coincidentes através de consultas tipo SQL; (ii) montagem de uma consulta única contendo as médias horárias dos registros; (iii) análise horária, diária e de todos os registros válidos e coincidentes; (iv) análise entre os mesmos tipos de sensores das tecnologias; (v) análise gráfica para ajuste de tendência; e (vi) relatório técnico com a análise final dos resultados.

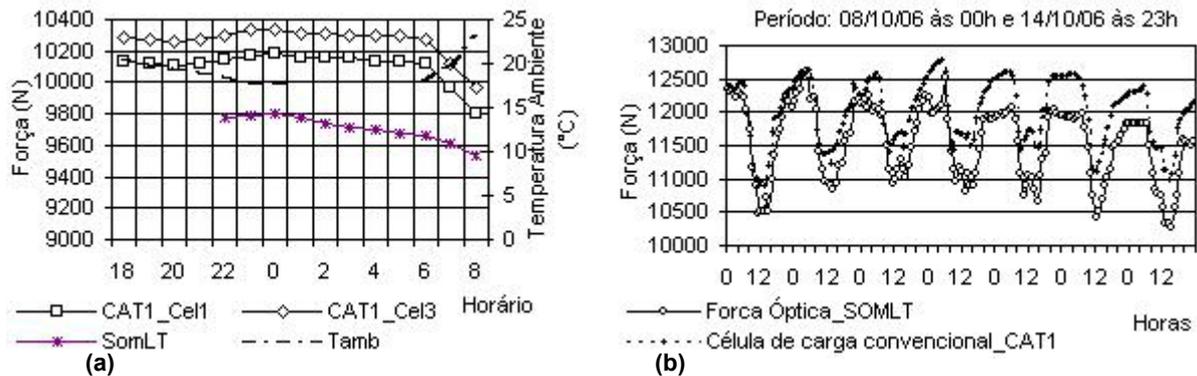


FIGURA 10 - Resultados obtidos no vão de teste na SE Pouso Alegre 1.

6.0 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O projeto foi original na sua concepção construtiva, uma vez que, os protótipos dos sistemas e equipamentos de aquisição e dos sensores utilizaram tecnologia amplamente óptica e foram desenvolvidos com inovação em um período de apenas 2 anos. O projeto encontra-se concluído, mas os sensores continuam instalados em campo nas linhas de Pouso Alegre objetivando medir a robustez dos protótipos desenvolvidos pelo CPqD.

A recomendação da Cemig é para continuar o desenvolvimento da tecnologia óptica através da parceria do CPqD. Nesse sentido, essas entidades já apresentaram um novo projeto de p&d tipo “cabeça-de-série” a ANEEL, no ciclo 2006/2007, focado na industrialização da primeira geração de protótipos do SOMLT usando o sensor de força mecânica óptica. Optou-se pela medição da força mecânica devido à característica técnica do sensor ser aplicado fora do potencial elétrico do condutor da linha, o que facilita muito o projeto do sistema em tecnologia óptica.

Os sensores ópticos, de vibração e temperatura, foram totalmente desenvolvidos na concepção de projeto e concebidos como protótipos, mas não foi possível aplicá-los diretamente ao condutor devido à falta de isolamento na fibra óptica. Pesquisas nessa área estão sendo desenvolvidas, mas isto não era foco da pesquisa atual. Dessa forma, esses sensores foram aplicados em campo e mediram a vibração da estrutura metálica e a temperatura em um trecho de condutor sem potencia elétrica.

Os resultados obtidos com o desenvolvimento do protótipo do SOMLT durante 2 anos de projeto mostrou que a tecnologia óptica é viável e terá uma participação cada vez maior nos sistemas de supervisão e controle do sistema elétrico em geral. As vantagens e desvantagens do uso da tecnologia óptica foram perfeitamente

mensuráveis através dos resultados obtidos nos testes de campo, abrindo um novo foco de pesquisa no Brasil para o desenvolvimento dos sensores ópticos com as mais variadas funções, tais como: sensor de força, vibração, temperatura, presença, pressão, corrente, tensão, espécie química etc.

Como destaque tecnológico do projeto é importante registrar o primeiro sistema nacional de monitoramento de força de condutores em linhas de transmissão desenvolvido com projeto 100% nacional. Em um futuro breve será possível obter 100% da tecnologia óptica nacional, devido ao aumento do número de fabricantes de sensores ópticos disponíveis no mercado, inclusive fabricantes nacionais.

Dessa forma, o SOMLT estará disponível para sua comercialização já nos próximos anos e será um produto genuinamente nacional para concorrer com outras tecnologias importadas, objetivando com isso, reduzir drasticamente o custo final na expansão da tecnologia de monitoramento de linhas de transmissão no Brasil. Novos nichos para aplicação da tecnologia óptica já foram identificados pela Cemig em parceria com o CPqD nas áreas de monitoramento de equipamentos em geral do setor elétrico, tais como: usinas, subestações e linhas, que podem ser facilmente adaptados à concepção do projeto SOMLT.

7.0 - PRÓXIMAS PESQUISAS

A Cemig e o CPqD pretendem atuar em novas linhas de pesquisas para tornar o uso da fibra óptica mais flexível na tecnologia de monitoramento de linhas de transmissão.

7.1 Compartilhamento do canal de fibras ópticas

O compartilhamento do canal de dados em meio óptico, entre os dados de Telecom e de sensoriamento, é uma otimização para compartilhar essas duas funções distintas através da mesma fibra. A fase de montagem desse novo projeto de pesquisa para o ciclo 2007/2008 já iniciou.

7.2 Uso híbrido das tecnologias óptica e tradicional no monitoramento de linhas de transmissão

Outra necessidade na tecnologia de monitoramento de linhas de transmissão é compartilhar o meio óptico com os sistemas tradicionais existentes, através do desenvolvimento de um sistema híbrido óptico/elétrico. A fase de estudo da proposta desse novo projeto de pesquisa para o ciclo 2008/2009 já foi iniciada.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) L.Bjerkan-"Application of fiber optic Bragg sensors in monitoring environmental loads of overhead power transmission lines", Appl. Optics, 39, N°4, 554-60, (2000)
- (2) R.Kashyap-"Fiber Bragg Gratings" Academic Press (1999)
- (3) Gthonos and Kalli-"Fiber Bragg Gratings Fundamentals and Applications In Telecommunications And Sensing" Artech House, (1999)
- (4) Hill and Meltz-"Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview" J. Lightwave Tech.15, N° 8,1263-76, (1997)
- (5) Baak-"Thermal Coefficient of Refractive Index of Optical Glasses " Journ.Opt.Soc.Amer.59, 851-57, (1969)
- (6) Magne et.al. "State of Strain Evaluation With FBG Rosettes:Application to Discrimination Between Strain and Temperature Effects in Fiber Sensors" Appl Opt.36, N° 36, (1997)
- (7) Sistema e Dispositivo Óptico para Monitoração Remota da Tensão Mecânica de Esticamento em Condutores de Redes Aéreas de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica, Brasil, P&D-110-Aneel/Cemig/Patente.
- (8) Cat-1 – Power Transmission Line Tension Monitoring System – <http://www.cat-1.com/>.
- (9) Nascimento, C.A.M. - Aplicação de Tecnologias de Monitoramento em Tempo Real para Aumentar a Capacidade de Transmissão em LTs Aéreas.– Procel/ANEEL – CEMIG – Ciclo 98/99 – I CITENEL.
- (10) T. Seppa - Accurate Ampacity Determination: Temperature-Sag Model for Operational Real-Time Ratings', IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10 No. 3, July 1995, pp 1460-1470 incl. discussions by Morgan, Douglass and White.
- (11) Furtado, T.A. - Carregamento elétrico de linhas aéreas de transmissão, informações coletadas na LT Experimental Bonsucesso - Nova Lima. XIII – ERLAC – Foz do Iguaçu-1997.