

Desenvolvimento de Sensor de Alta Tensão à Fibra Óptica

F. M. Pires Neto e R. Marques, Bandeirante Energia, P. J. P. Curado, A. Paradisi, J. B. Ayres, F. Borin, R. L. Leite, D. C. Dini, C. A. Hortêncio, E.F. da Costa, F. E. Nalin, CPqD.

Resumo – Este trabalho tem por objetivo apresentar os resultados obtidos no desenvolvimento de um sensor de tensão à fibra óptica, baseado na utilização de uma Grade de Bragg em Fibra (FBG) fixada paralelamente ao eixo de deformação de um cristal piezoelétrico montado entre dois eletrodos planos, para detectar a intensidade de um campo elétrico. Quando o sensor é submetido a um campo elétrico ocorrem mudanças dimensionais que atuam na FBG. Tais mudanças são detectadas em um comprimento de onda específico pela monitoração da intensidade da luz refletida pela FBG. Protótipos de sensores foram desenvolvidos para a execução de testes em laboratório e campo. Nos testes de laboratório o protótipo sensor respondeu a tensões na faixa de 150 V até 88 kV, limitada à capacidade do gerador. Em campo o protótipo foi instalado na rede de distribuição interna de 11,9 kV do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações – CPqD. Os resultados obtidos indicam a viabilidade técnica do sensor de tensão à fibra óptica.

Palavras-chave— Sensor óptico de tensão, fibra óptica, grade de Bragg .

I. INTRODUÇÃO

O sensor de alta tensão à fibra óptica apresentado neste trabalho é resultado do Projeto de P&D B13 intitulado “Tecnologias de Sensores Ópticos à Fibra para Monitoramento e Supervisão Remota de Rede de Energia Elétrica”, desenvolvido pela Bandeirante Energia S.A. e pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações – CPqD, referente ao ciclo de Pesquisa e Desenvolvimento 2002/2003 e 2004/2005, aprovado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel.

A fibra óptica possui muitas características que a tornam apropriada para o uso como um sensor totalmente passivo. Um sensor passivo é aquele que não requer energia elétrica na região de sensoriamento. A mais importante vantagem

Este trabalho foi realizado com como parte do programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Bandeirante Energia S.A. – empresa do grupo Energias do Brasil.

F. M. Pires Neto trabalha na Bandeirante Energias do Brasil (e-mail: piresnt@bandeirante.com.br).

R. Marques. trabalha na Bandeirante Energias do Brasil (e-mail: rmarques@bandeirante.com.br).

P. J. P. Curado trabalha na Fundação Centro de Pesq. em Telecomunicações - CPqD (e-mail: curado@cpqd.com.br).

A. Paradisi trabalha na Fundação Centro de Pesq. em Telecomunicações - CPqD (e-mail: paradisi@cpqd.com.br).

das fibras ópticas é o fato de serem fabricadas com materiais dielétricos, como a sílica e plásticos, possibilitando que os sensores à fibra óptica sejam empregados em ambiente perigosos em que as utilizações de sensores elétricos convencionais não são adequadas. Os sensores à fibra óptica são especialmente indicados para operarem em ambientes que requerem isolamento elétrico, tendo em vista que em geral os sensores ópticos são imunes aos efeitos da interferência eletromagnética (EMI) encontrados em ambientes eletricamente ruidosos, tornando-se altamente vantajosos para as aplicações nos sistemas de sensoriamento utilizados pelas empresas de energia elétrica.

Os sensores que utilizam FBG são sensores intrínsecos [1] que vêm sendo utilizados e implementados para quantificar os mais diversos parâmetros, tais como: deslocamento, temperatura [2], pressão [3], tensão mecânica [4], corrente elétrica, campo elétrico [5], [6].

A Figura 1 ilustra um segmento de fibra óptica com uma grade de Bragg, com período espacial Λ , gravada ao longo do eixo do núcleo da fibra. As grades construídas em fibra, com cerca de 10 a 100 mm de comprimento, são praticamente imperceptíveis a olho nu. As cores foram utilizadas para facilitar a apresentação da estrutura de uma grade.



Figura 1. Configuração de uma grade de Bragg ao longo de um segmento de fibra

As grades de Bragg são previamente projetadas com períodos Λ , para refletir os comprimentos de onda em torno de um determinado λ_R de fase casada com a estrutura da grade. Portanto a grade opera como um refletor sintonizado em λ_R , que reflete com grande eficiência os comprimentos de onda próximos a λ_R e transmite os demais. A Figura 2 ilustra o mecanismo de operação de uma fibra com grade de Bragg sobre um feixe contendo várias componentes espectrais.

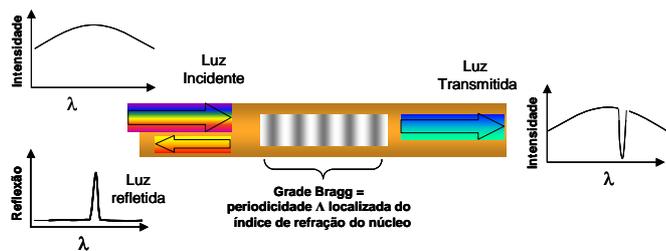


Figura 2. Grade de Bragg atuando sobre os componentes espectrais transmitidos na fibra

A seguir são apresentadas as etapas do desenvolvimento do protótipo do sensor de tensão à fibra óptica, incluindo a concepção do sistema, o princípio de funcionamento, a montagem do sensor, os testes de laboratório e de campo e os primeiros resultados obtidos. Neste trabalho são apresentados mais detalhes em relação ao trabalho apresentado no XVII SENDI [7], especialmente quanto às técnicas utilizadas para a conversão eletro-óptica, o controle do laser e o processamento dos sinais.

II. ELEMENTO SENSOR

O elemento sensor é composto por um cristal piezoelétrico, dois eletrodos e uma fibra sensora com Grade de Bragg. A Figura 3 mostra o esquema de montagem do elemento sensor.

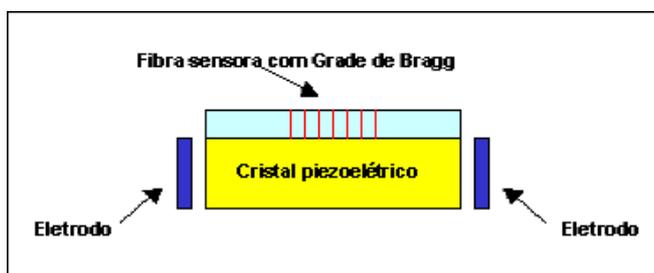


Figura 3. Esquema de montagem do elemento sensor.

O elemento sensor foi montado utilizando-se um material piezoelétrico como transdutor para detectar um campo elétrico alternado, com uma frequência de 60 Hz. Fixou-se paralelamente ao eixo de deformação do material piezoelétrico uma Grade de Bragg (FBG) em fibra, com propriedades específicas para sensoriamento de deformações axiais da grade, com objetivo de acompanhar as variações dimensionais ao longo do eixo de deformação do material piezoelétrico quando submetido à presença de campos elétricos variáveis e paralelos ao mesmo eixo. A grade de Bragg sobre a base piezoelétrica detecta opticamente as variações dimensionais.

A Figura 4 ilustra a configuração do primeiro protótipo do elemento sensor de tensão montado.



Figura 4. Configuração do primeiro protótipo do elemento sensor.

A. Princípio de Funcionamento

Quando aplicado um campo elétrico entre os eletrodos do dispositivo ocorrem mudanças dimensionais no cristal piezoelétrico (Niobato de Lítio) que serão detectadas pela FBG. Tais mudanças são detectadas pela mesma aplicando-se uma luz Laser em um comprimento de onda (λ) específico através da grade, de acordo com as propriedades da FBG. A monitoração da intensidade da luz refletida indicará as mudanças dimensionais do cristal em função do campo elétrico. A Figura 5 ilustra o espectro de reflexão da grade de Bragg sem estar tensionada ou pressionada.

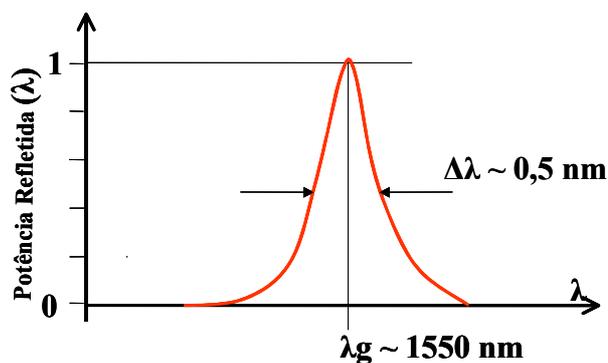


Figura 5. Espectro de Reflexão de uma FBG sem estar tensionada ou pressionada.

A Figura 6 ilustra o espectro de reflexão da grade de Bragg quando o dispositivo sensor estiver submetido ao campo elétrico. Nesta condição o cristal estará mudando dimensionalmente com a tensão aplicada sobre ele, fazendo-o comprimir ou esticar proporcionalmente à tensão elétrica. A grade de Bragg percebe as alterações.

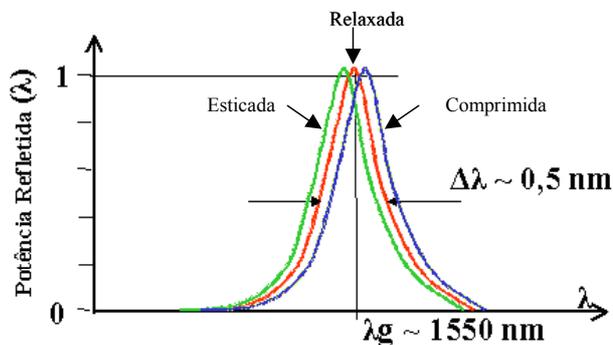


Figura 6. Espectros de reflexão da FBG quando o dispositivo sensor estiver submetido ao campo elétrico.

A Figura 7 ilustra o diagrama esquemático da montagem

utilizada para monitoração da luz refletida pela grade de Bragg acoplada ao cristal.

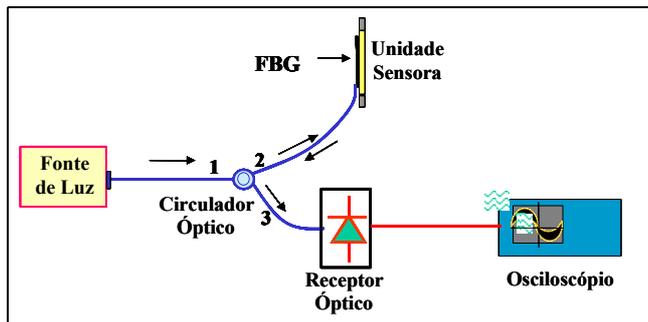


Figura 7. Esquemático para monitoração da luz refletida pela grade de Bragg.

Testes em laboratório mostraram que a profundidade de modulação do sinal óptico refletido pela grade, proporcional ao campo elétrico medido, aumenta muito quando a fonte Laser está sintonizada no comprimento de onda igual ao ponto “quiescente” do comprimento de onda de reflexão da grade de Bragg ($\lambda = \lambda_Q$). Isto melhora a detecção do sinal óptico. A Figura 8 mostra este detalhe.

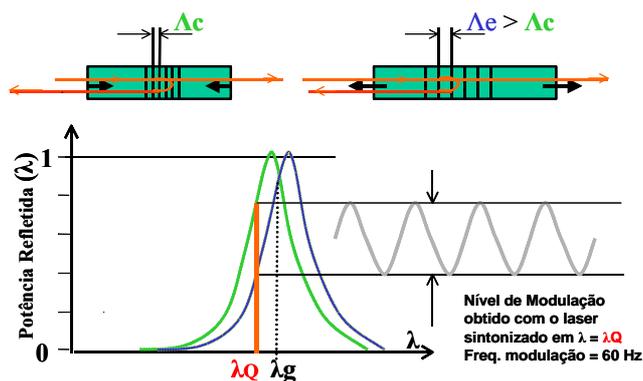


Figura 8: Espectros de reflexão da grade de Bragg e o nível de modulação resultante, com o dispositivo submetido ao campo elétrico, com a fonte operando em $\lambda = \lambda_Q$.

B. Testes do elemento sensor em laboratório

Com objetivo de validar o funcionamento do elemento sensor foram realizados testes na infra-estrutura de ensaios de tensão aplicada do Laboratório de Proteção Elétrica do CPqD. A Figura 9 apresenta os resultados de um dos testes realizado no protótipo do elemento sensor (primeira configuração). Como pode ser observado na Figura 9, o protótipo respondeu até 60 kV- Fase/Terra (limite da infra-estrutura do laboratório).

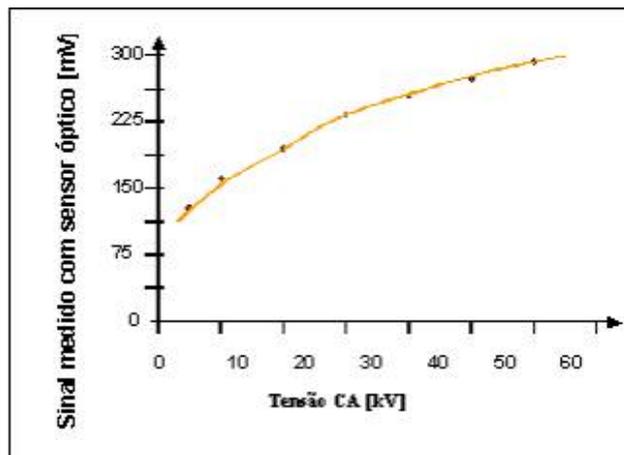


Figura 9. Resultados do protótipo do elemento sensor.

C. Empacotamento do elemento sensor

Foi desenvolvido um sistema de empacotamento para o sensor, tendo sido implementadas algumas modificações. Os eletrodos que eram aplicados diretamente na lâmina de cristal foram eliminados e passaram a se posicionar no empacotamento do conjunto. A Figura 10 ilustra a montagem do primeiro protótipo do empacotamento do elemento sensor, o qual não funcionou adequadamente em função do sistema de ancoragem do cristal que não permitia uma livre movimentação do mesmo quando exposto ao campo elétrico.

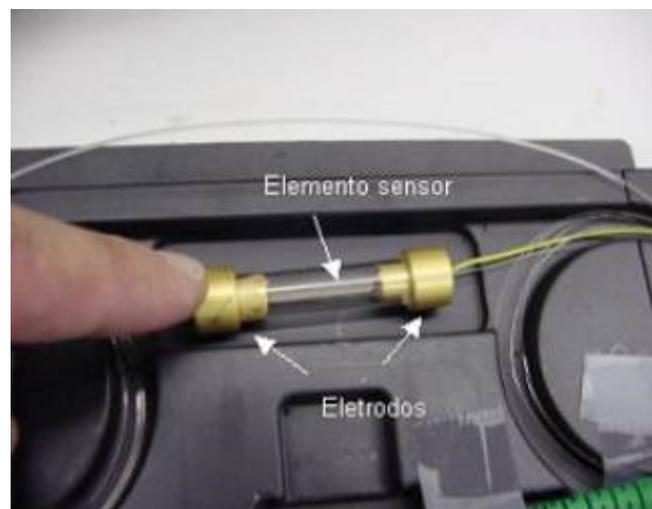


Figura 10: Primeiro protótipo do empacotamento do elemento sensor.

Foi desenvolvido um novo protótipo de empacotamento no qual o elemento sensor fica suficientemente livre para movimentar-se quando submetido ao campo elétrico. A Figura 11 ilustra este segundo protótipo.

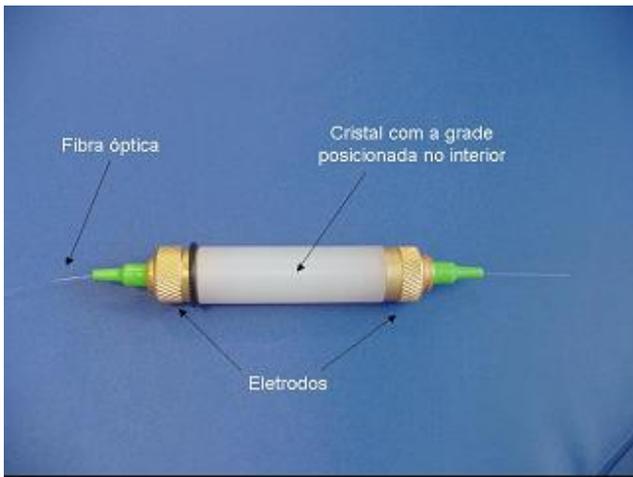


Figura 11: Segundo protótipo do empacotamento do elemento sensor.

O empacotamento do elemento sensor permitiu uma maior robustez do conjunto para realização dos testes no laboratório, além de garantir as mesmas condições para os mesmos.

III. TRANSPONDER

O transponder é composto por um circuito receptor óptico, por um circuito driver de laser e por um circulador. A luz emitida pelo laser é acoplada ao elemento sensor através de uma fibra óptica. O feixe de luz, refletido pelo elemento sensor, é direcionado para o circuito receptor do transponder. O sinal óptico é convertido para elétrico, amplificado e enviado ao processador. O elemento sensor altera a intensidade da luz que ele reflete de acordo com a amplitude da tensão elétrica na linha monitorada.

A. Receptor óptico

O sinal óptico proveniente do sensor de tensão possui uma componente CC muito maior que a componente CA, que contém a informação da tensão elétrica a ser medida, como mostra a Figura 12.

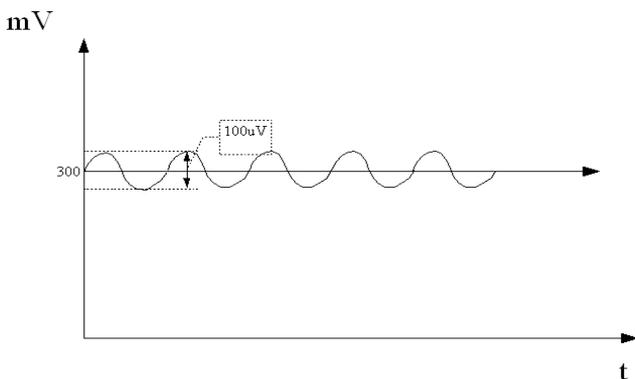


Figura 12. Forma de onda do sinal óptico de entrada

Da Figura 12, pode ser observado que a componente do sinal que contém a informação é cerca de 3000 vezes menor que a componente CC do sinal, o que dificulta muito a detecção da informação de tensão contida neste sinal. A dificuldade está em aplicar-se uma amplificação seletiva

somente na componente que contém a informação de interesse.

Para resolver o problema de detecção de um sinal com uma componente CA pequena e uma componente CC grande, foi projetado um circuito amplificador de transimpedância com malha de realimentação T. A Figura 13 mostra o circuito implementado.

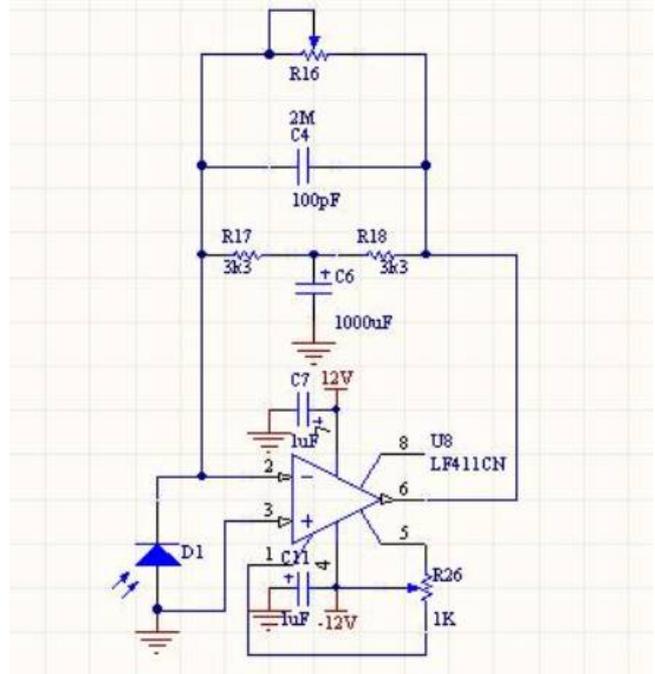


Figura 13. Amplificador de transimpedância com malha T.

Foi selecionado um amplificador operacional com entrada JFET, que tem um comportamento superior com relação a ruído, uma corrente de ruído de entrada de $0,01 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ e uma corrente de polarização de entrada de 50 pA , que praticamente não provoca nenhuma interferência no sinal do fotodiodo. Além disso, este amplificador operacional possui pinos para ajuste da tensão de offset, o que possibilita uma redução dos erros na tensão de saída ocasionados pela tensão de offset de entrada. O sinal de saída passa por um filtro ativo, centrado em 1 KHz e depois passa por dois estágios amplificadores fornecendo nas duas saídas analógicas os níveis de tensão de $\pm 5 \text{ V}$ e de $\pm 10 \text{ V}$.

A Figura 14 mostra o circuito analógico completo.

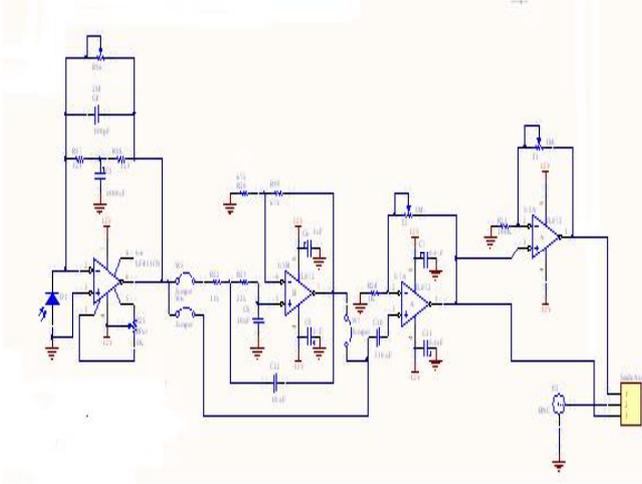


Figura 14. Circuito analógico completo.

B. Driver de laser

O sistema para controlar o laser é composto por dois circuitos eletrônicos, um para controlar o nível de corrente que é fornecida para o laser, controlando a potência óptica emitida, e outro para controlar a temperatura que o componente semiconductor opera. Através do controle da temperatura do laser pode-se controlar o comprimento de onda de emissão. A Figura 15 mostra o diagrama esquemático do circuito de driver do laser.

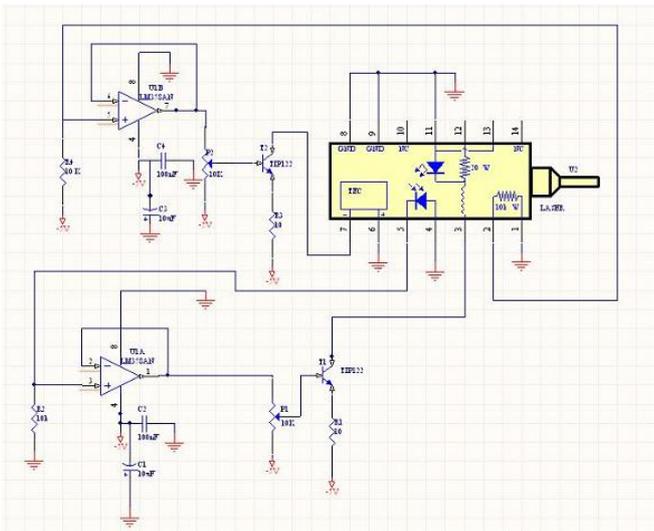


Figura 15. Circuito eletrônico do driver de laser.

IV. PROCESSAMENTO

O processamento digital de sinal ocorre em dois processadores. Deixou-se um microcontrolador para a aquisição de dados e foi utilizado um microcomputador tipo PC104 para o cálculo do valor máximo do sinal, cálculo do valor RMS e para o processamento do protocolo DNP 3.0.

Para controlar a aquisição de dados foi utilizado o microcontrolador AT89S9252 da ATMEL. As funções deste microcontrolador são:

- Controlar a aquisição de dados;

- Realizar uma média de 10 curvas de 40 pontos;
- Gerar a frequência de 2,4 kHz para a aquisição de dados;
- Ler as amostras do sinal;
- Interpretar os comandos provenientes da placa do microcomputador PC104;
- Fornecer os dados para a porta paralela do PC104;
- Fornecer a temporização para que o PC104 possa ler os dados corretamente.

O sistema digital funciona da seguinte forma:

Cada placa de sensor possui um endereço, o microcomputador PC104 emite um sinal de comando para o sensor enviar os dados da curva. O microcontrolador lê o comando e, se for para o seu sensor, libera os circuitos tri-state para que os sinais da curva digitalizada possam ser conectados à porta paralela do PC104.

A Figura 16 mostra um diagrama de blocos da placa do sensor.

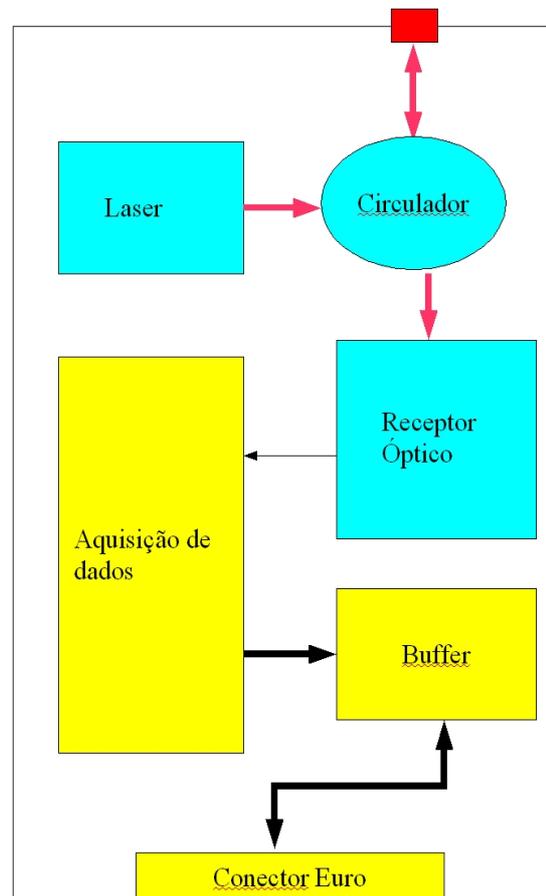


Figura 16. Diagrama de blocos da placa do sensor de tensão.

Para fazer o processamento digital de sinais foi selecionada um microcomputador PC104 modelo MZ104 V4.01, conforme a Figura 17.



Figura 17. PC 104 , microcomputador da placa digital.

As funções deste microcomputador são:

- Realizar a medição do valor RMS do sinal;
- Realizar a medição do valor de pico do sinal;
- Possibilitar o ajuste de escala para a calibração do medidor;
- Comandar a aquisição de dados dos sensores;
- Disponibilizar a interface de comunicação com o centralizado através do protocolo DNP3.0, camada 1.

V. PROTÓTIPO DO SENSOR DE TENSÃO PARA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

A. Montagem do protótipo

A partir do empacotamento do dispositivo sensor óptico, conforme a Figura 11, foi desenvolvida uma nova montagem para execução de testes em laboratório e em campo (rede de distribuição). O elemento sensor, conforme mostrado na Figura 11, foi inserido em uma bucha isoladora para capacitor, com tensão de isolamento da ordem de 30 kV, fornecida pela fábrica de Isoladores Santana. A bucha isoladora está mostrada na Figura 18.



Figura 18: Bucha isoladora para capacitor.

Nesta bucha isoladora foi inserido um eletrodo para ajustar a intensidade do campo elétrico aplicado ao sensor

de tensão, para um nível ótimo de potência óptica no receptor, possibilitando uma melhor eficiência de detecção. Foi acoplada à bucha isoladora uma base para fixação do sensor e para acomodar a emenda da fibra óptica do sensor com o cordão óptico. A Figura 19 apresenta o protótipo montado.



Figura 19. Protótipo do sensor de tensão para rede de distribuição.

B. Instalação do protótipo no poste

O sensor foi instalado na rede elétrica de média tensão no CPqD. A Figura 20 apresenta alguns detalhes da instalação do protótipo do sensor de tensão neste campo de testes onde pode ser observado que foi colocado um fusível para proteção, no caso de falha do dielétrico do sensor.



Figura 20. Detalhes da instalação do sensor.

C. Medições realizadas com o sensor óptico

Foi realizado com osciloscópio uma medição da tensão na linha de média tensão com o objetivo de compará-la com a forma de onda proveniente do sensor de tensão.

A forma de onda da rede de média tensão do CPqD está apresentada na Figura 21, onde pode ser observada a forma de onda com o valor de pico a pico da tensão, que é de 19,60 kV e de frequência de 59,98 Hz. Para um valor de 19,60 kV de pico a pico, tem-se um valor RMS de 6,92 kV e pode ser observado que há uma distorção na forma de onda.

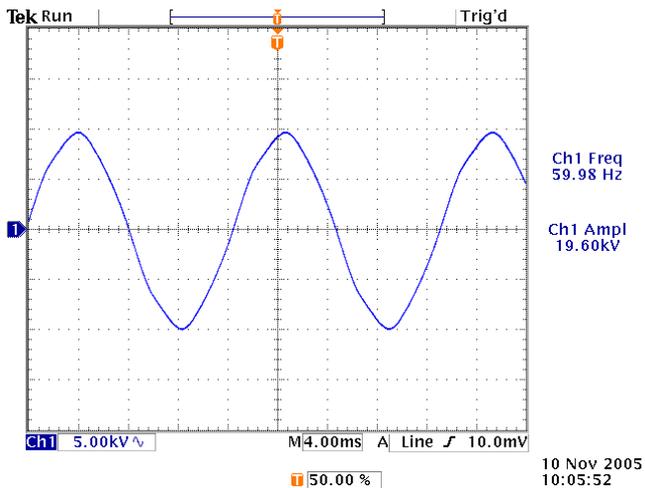


Figura 21. Medição da forma de onda da rede de média tensão do campo de prova do CPqD.

A primeira verificação realizada foi uma comparação da forma de onda do sinal elétrico com a forma de onda da saída do circuito receptor. Esta comparação está mostrada na Figura 22.

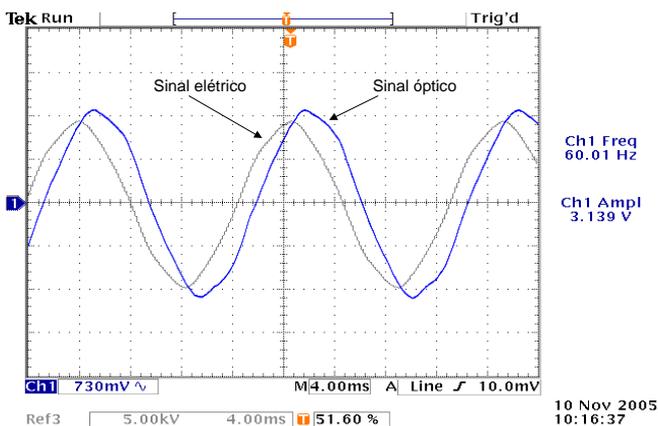


Figura 22. Formas de ondas elétrica e óptica

Pode-se observar que as duas formas de onda da rede e do sensor são bastante semelhantes. A distorção que aparece na onda elétrica aparece também na forma de onda do sensor, mas deslocada de 90°. Este deslocamento está relacionado com o comprimento de onda de trabalho e pode ser ajustado sintonizando o comprimento de onda do laser no ponto “Q” de trabalho do sensor.

A Figura 23, mostra a forma de onda da saída do circuito

analogico completo, a qual está devidamente amplificada e filtrada, ou seja, pronta para os circuitos de digitalização e processamento.

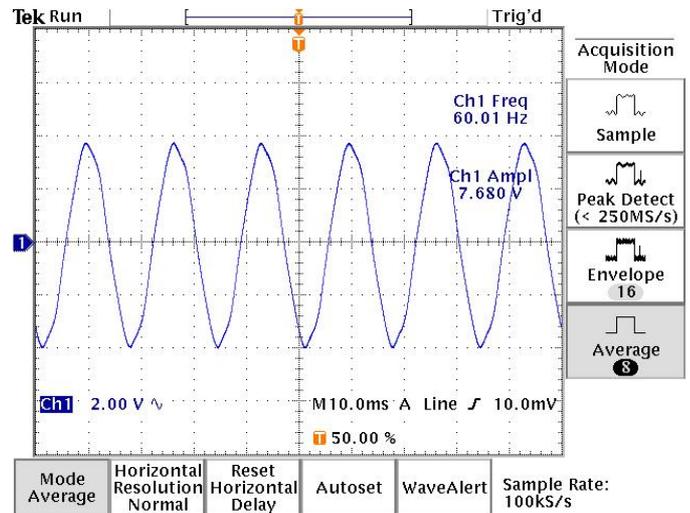


Figura 23. Forma de onda na saída do circuito analógico completo.

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho demonstra a viabilidade técnica de se medir alta tensão, utilizando-se um sensor à fibra óptica. Os resultados indicam a possibilidade de se fazer oscilografia para se avaliar a qualidade de energia da rede elétrica, utilizando o sensor de tensão, devido à sua alta sensibilidade e alta resposta em frequência.

Nos testes de laboratório a unidade sensora respondeu a estímulos de tensão na faixa de 150 V até 88 kV. Entretanto o limite da classe de tensão a que ele pode ser submetido não foi definido. O limite é dado pela máxima intensidade de campo elétrico ao qual a unidade sensora pode ser submetida sem o comprometimento de sua integridade física. Essa condição é determinada pelas características intrínsecas do material piezoelétrico, pelo projeto mecânico da unidade sensora e pelo projeto do conjunto mecânico do produto para a aplicação desejada.

Como resultado deste trabalho fica evidente a viabilidade técnica do sensor óptico de alta tensão, dependendo de esforços e investimentos na continuidade deste projeto, principalmente na engenharia de produto para transformar o protótipo descrito neste artigo em um produto, e do desenvolvimento de novos protótipos para aplicação em alta tensão.

VII. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições de C. Sertório, A. G. Costa, da Fábrica de Isoladores Santana.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANDONOVIC, Ivan; UTTAMCHANDANI, Deepak. Principles of modern optical systems. Norwood, 1989, pp. 357-431.
- [2] BHATIA; et al. Wavelength-tracked white light interferometry for highly sensitive strain and temperature measurements. Electr Lett 32, n.3, pp. 247-248, Feb. 1996.

- [3] ABEYSINGHE, DASGUPTA, et al. A novel MEMS pressure sensor fabricated on an optical fiber. IEEE Photonics Tech Lett 13, n.9, pp. 993-995, Sep. 2001.
- [4] XIAO; DENG; PICKRELL; MAY; WANG. Single-Crystal Sapphire Fiber-Based Strain Sensor for High-Temperature Applications. Journ. Light Tech 21, n.10, pp 2276-2283, Oct. 2003.
- [5] <www.llnl.gov/sensor_technology/STR14.html>. Remote Electric Field Sensor. Acesso em 08/jan/2004.
- [6] <www.iris.stuttgart.de/FACILITIES/DIAG/d_fpi.html>. Fabry-Perot-Interferometrie. Acesso em: 09/jan/2004.
- [7] Pires, F. M. N.; Marques, R; Curado, P. J. P., Paradisi, A. P.; Ayres, J. B, Borin, F., Leite, R. L., Dini, D. C., Hortencio, C. A. e Nalin, F. E. Sensor de Alta Tensão à Fibra Óptica. XVII SENDI - Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Belo Horizonte, agosto de 2006.
- [8] Borin, F, .R. L. Leite, E.F.Costa, e C. A. Hortêncio "Desenvolvimento dos Sensores Ópticos - Sensor de Tensão" CPqD, Campinas, SP, Relatório Técnico. PD 33.ER.TRO.0014A/RT-04-AA, Dez. 2004.
- [9] R. L. Leite, J. B. Ayres, E.F.Costa e C. A. Hortêncio "Desenvolvimento dos Sensores Ópticos - Sensor de Tensão – Parte 3" CPqD, Campinas, SP, Relatório Técnico. PD 33.ER.TRO.0014A/RT-09AA, Dez. 2005.
- [10] R. L. Leite, E.F.Costa e C. A. Hortêncio "Desenvolvimento dos Sistema de Monitoração de Sensores – Parte 3" CPqD, Campinas, SP, Relatório Técnico. PD 33.ER.TRO.0014A/RT-07AA, Set 2005.