

SENSOR ELETROÓPTICO PARA A MEDIDA DE ALTAS TENSÕES

**Jonas Rubini Jr^{1,2}, José Alexandre J. Ribeiro², Janaina Fernandes Rosa Arantes²,
Josemir Coelho Santos³, Ângelo Passaro¹**

¹CTA/ IEAv – EFA-A, Rod. dos Tamoios km 5,5 -Torrão de Ouro, CEP: 12.228-001, São José dos Campos, SP - Brasil, jonas@ieav.cta.br

²EteF Faculdades/Engenharia Elétrica, Av. Rio Branco 660 – Esplanada CEP: 12.228-001, jonas.junior@etep.edu.br

³ Escola Politécnica da Universidade de São Paulo EPUS/Depto. de Energia e Automação Elétricas- PEA, Av. Prof. Luciano Gualberto Trav.3 No158, CEP:05508-900 São Paulo, SP – Brasil, josemir@pea.usp.br

Resumo- Nos últimos anos sensores eletro-ópticos tem sido desenvolvidos e utilizados, na medida de altas tensões, em sistemas elétricos de potência. Tais sensores apresentam características muito interessantes, tais como, resposta rápida a transitórios, nenhuma susceptibilidade a interferência eletromagnética, alta relação Sinal/Ruído, tamanho e peso reduzidos, alta isolamento galvânica e, atualmente, com custo em declínio. Neste trabalho serão descritos os conceitos básicos desse tipo de sensor que utiliza o efeito eletro-óptico. O trabalho também inclui a comparação da simulação computacional, do campo elétrico, entre o Método dos Elementos Finitos (MEF) 2D e o Método da simulação da carga (CSM) na exploração da geometria axial simétrica do sensor. O valor da tensão V_{π} , que descreve a linearidade e sensibilidade, do sensor eletro-óptico é utilizado como figura de mérito do sensor em análise, sendo que, esse parâmetro dependente não só do número de cristais eletro-ópticos bem como da geométrica do mesmo.

Palavras-chave: Sensores, material eletro-óptico, alta tensão, método de elementos finitos, campo elétrico
Área do Conhecimento: Sensores eletro-ópticos

Introdução

Nos últimos anos, têm sido desenvolvidos sensores com tecnologia que utilizam dispositivos eletro-ópticos e que são utilizados para medidas de altas tensões e altas correntes em sistemas elétricos de potência, tais como: transformadores de tensão e corrente ópticos, também conhecidos como OVT (Optical Voltage Transformer) e OCT (Optical Current Transformer) [Pinheiro, et al., 2002]. Esses tipos de sensores apresentam características muito interessantes, como, resposta rápida a transitórios, baixa susceptibilidade a interferência eletromagnética, alta relação Sinal/Ruído, tamanho e peso reduzidos, alta isolamento galvânica e, atualmente, com custo em declínio.

As características da propagação da radiação eletromagnética nos cristais são governadas pelo elipsóide de índices, que depende diretamente da permissividade elétrica. O efeito eletro-óptico pode ser expresso pela mudança na elipsóide de índices que determinados cristais, tais como KDP (KH_2PO_4), Niobato de Lítio (LiNbO_3), Tantalato de lítio (LiTaO_3), Óxido de Germanato de Bismuto ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ - BGO), Silicanato de Zinco (ZnSe) e “óxido de silício e Bismuto” ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ - BSO). exibem quando um campo elétrico é aplicado [Yariv A. e Yeh, P., 1984]. Conseqüentemente, uma boa estimativa do campo elétrico nos cristais eletro-ópticos é de grande interesse no projeto de qualquer tipo de sensor eletro-óptico, incluindo os

sensores eletro-ópticos extrínsecos construídos usando-se fibras ópticas e materiais eletro-ópticos. [Santos, J.C., 1996].

Os softwares do tipo CAE podem ser utilizados a fim de se avaliar os campos elétricos nesses sensores. Tais softwares podem ajudar, através de simulações, o projeto da geometria dos eletrodos, visando uma melhor rigidez dielétrica e a escolha dos materiais com propriedades mecânicas e elétricas para a construção desses dispositivos sensores.

Neste trabalho, o campo elétrico nas proximidades de um cristal de Pockel é simulado computacionalmente aplicando o método de elementos finitos (MEF), considerando a geometria dos eletrodos, a configuração dos cristais eletro-ópticos e os materiais usados no projeto. Estes resultados são comparados com os obtidos previamente aplicando o método da simulação da carga (CSM), fruto de apresentado em alguns trabalhos anteriores [Santos, 1996].

O Sensor eletro-óptico

Um sensor eletro-óptico usado para medidas de alta tensão em sistemas de energia é baseado no conceito do modulador eletro-óptico longitudinal [Santos e Hidaka – 1997], também chamada de célula Pockels.

A Figura 1 ilustra um modulador de amplitude composto por um único cristal eletro-óptico, onde

a fonte V, aplicada nos eletrodos, gera um campo elétrico no sentido da propagação da luz.

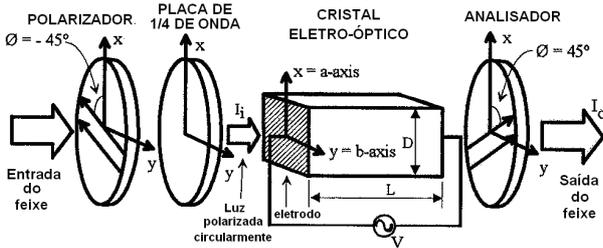


Figura 1- Um modulador eletro-óptico longitudinal.

Na configuração longitudinal um campo elétrico paralelo ao sentido da propagação do feixe luminoso é imposto sobre o cristal. Este tipo de modulador executa uma integração do campo elétrico ao longo do sentido da propagação da luz. Para um modulador polarimétrico, na configuração longitudinal, o campo elétrico aplicado induz um atraso de fase Γ do feixe luz. O atraso total de fase, Γ_t , é a soma do atraso de fase induzido eletricamente (Γ) com o atraso de $\pi/4$ (ϕ_r) causado por uma placa (atraso) $1/4$ de onda e é dado por:

$$\Gamma_t = \phi_r + \pi \cdot \frac{V}{V_\pi} \quad (1)$$

onde V_π é chamado de tensão de meia onda do modulador e define o valor da tensão, aplicada no modulador, que causa o atraso (Γ) igual a π [Santos et al. 2003], [Pinheiro et al. 2002], [Yariv, 1984]. O valor de V_π determina a sensibilidade e a linearidade do sensor eletro-óptico.

O fator de transmissão T é definido como a relação entre as intensidades de luz que sai e a que entra no sensor e é função da tensão aplicada $V(t)$ e é dada por:

$$T = \frac{I_o}{I_i} = \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \frac{V(t)}{V_\pi} \right) \quad (2)$$

onde I_i and I_o são as intensidades da luz que entra e a que sai do modulador, respectivamente [Santos, 1996].

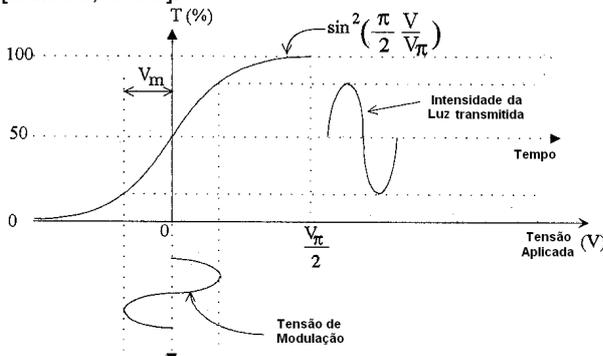


Figura 2 - Curva de resposta do modulador longitudinal Pockels.

A curva característica de resposta para o modulador longitudinal Pockels é mostrado na figura 2.

O sensor eletro-óptico multi-segmentado é composto por várias lâminas de cristal eletro-óptico, em vez de apenas um cristal, dispostos ao longo dos eletrodos contidos no modulador longitudinal e sustentados por espaçadores. O sensor apresenta uma simetria axial [4 Santos e Hidaka - 1996].

A figura 3 mostra a seção transversal do dispositivo sensor. Dois eletrodos de alumínio com 90 mm de diâmetro (L) e oito lâminas de um cristal eletro-óptico (cristal BGO - $\epsilon_1 = 16\epsilon_0$), compõem a célula sensora. As lâminas são espaçadas por um material dielétrico (PVC - $\epsilon_2 = 2,7\epsilon_0$). A espessura das lâminas de cristal eletro-óptico é 1 mm (d_1). As espessuras dos espaçadores dielétricos variam de 14.5 a 16 mm (d_2) dependendo da posição, totalizando um comprimento de 110 mm ($d = n \cdot d_1 + (n-1) \cdot d_2$). De modo a estimar a sensibilidade do sensor o campo elétrico, na área transversal do feixe luminoso que atravessa o modulador, é considerado uniforme.

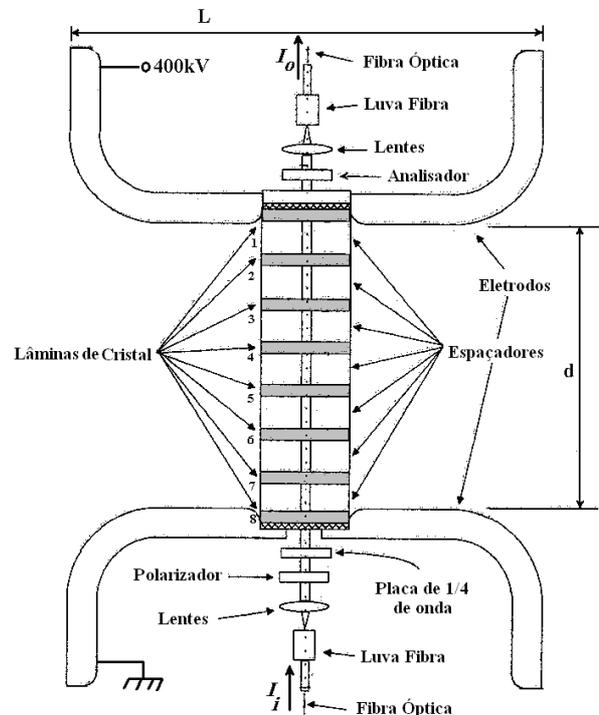


Figura 3- Geometria do sensor eletro-óptico multi-segmentado (Modulador óptico longitudinal).

Para um sensor eletro-óptico multi-segmentado, a tensão V_π pode ser expressa por:

$$V_{\pi} = \frac{(\lambda.K)}{2 \cdot n_0^3 \cdot r_{41} \cdot n \cdot d_1} \quad (3)$$

onde

$$K = \left[n \cdot d_1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} (n-1) \cdot d_2 \right] \quad (4)$$

onde n é o número de lâminas de cristal, λ é o comprimento de onda da fonte de luz (laser), n_0 é índice de refração ordinário e r_{41} é o coeficiente pockels do cristal. Para esse tipo de sensor, que utiliza BGO, o valor de V_{π} é da ordem de 6,8MV.

Análise Computacional

a) Método da simulação da carga – CSM

As simulações computacionais com o CSM foram feitas aplicando um software desenvolvido por Hidaka (1982) e nomearam EFCAX94 que permite a exploração das simetrias axiais [Santos, J.C., 1996] - [Hidaka K., Kouno, T., 1982]. EFCAX94 é um módulo de vários software que permitem o estudo dos dispositivos que não apresentam nenhuma simetria (versão 3D), ou apresentam uma simetria planar (2D versão).

b) Método de elemento finito – MEF

O método dos elementos finitos é usado em diversas áreas da engenharia. A exatidão das soluções para os problemas elípticos obtidos aplicando o mercado de MEF é bem conhecida. Os resultados apresentaram neste trabalho foram obtidos aplicando um código 2D-MEF desenvolvido no IEAv/CTA, nomeado LEVSOFT, que permite a exploração da simetria axial geométrica apresentada pelo sensor. Este software foi usado na análise dos elementos finitos de diversos componentes de óptica integrada baseados no efeito eletro-óptico [Franco et al., 1999], [Abe et al., 2002].

Comparação entre os dois métodos

Foram realizados três casos de simulação computacional, denominados: caso 0, caso 1 e caso 2.

Caso 0 corresponde à simulação computacional da distribuição do campo elétrico do sensor eletro-óptico, figura 4, inserido em um tanque metálico, cilíndrico, aterrado.

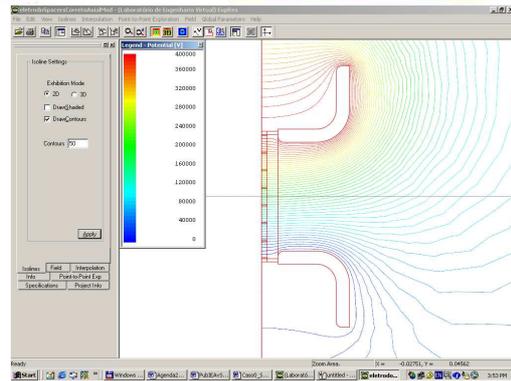


Figura 4- Geometria do sensor eletro-óptico multi-segmentado vista pelo simulador LEVSOFT-caso0.

Os casos 1 e 2 apresentam a mesma geometria, entretanto, com a presença de um objeto aterrando (anel metálico) nas proximidades do sensor, de modo a verificar a influência desses objetos, na distribuição do campo elétrico ao longo do trajeto óptico (linha da simetria). O anel apresenta um diâmetro interno de 100 mm e um diâmetro exterior de 120 mm para caso 1. Para o caso 2, os diâmetros internos e exteriores são 50 mm e 70 mm, respectivamente. A altura, dos anéis, é 40 mm. As Figuras 5 e 6 esboçam essa geometria.

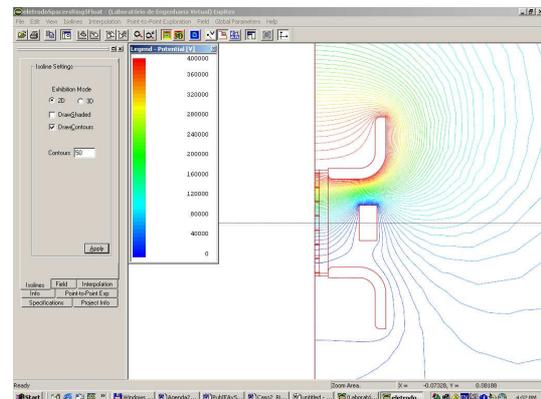


Figura 5- Geometria do sensor eletro-óptico multi-segmentado vista pelo simulador LEVSOFT-caso1.

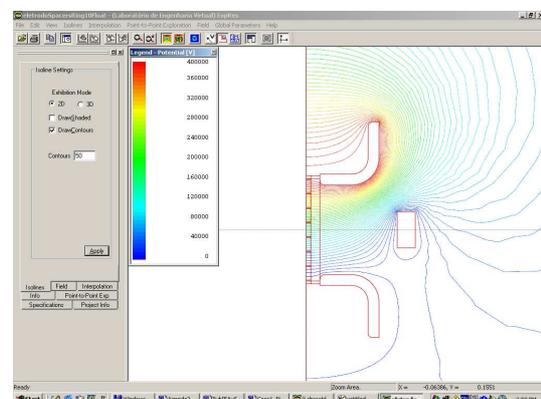


Figura 6- Geometria do sensor eletro-óptico multi-segmentado vista pelo simulador LEVSOFT-caso2.

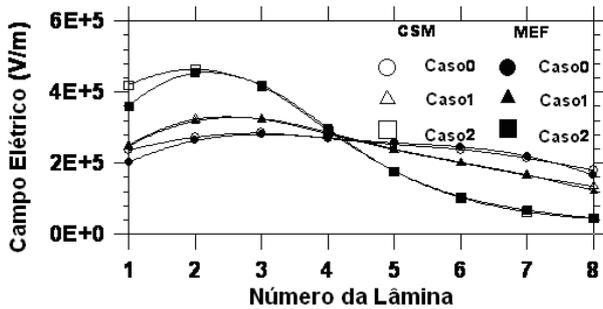


Figura 7- Comparação do campo elétrico obtido para os casos 0, 1 e 2, aplicando-se os métodos CSM e FEM.

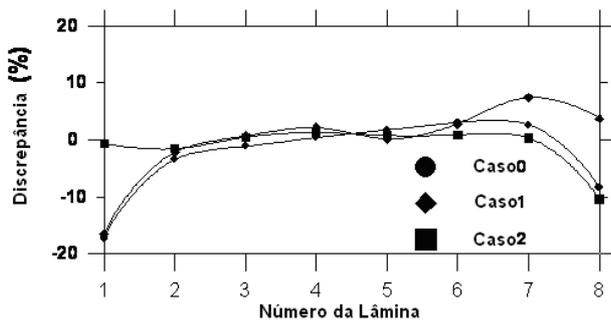


Figura 8 - Discrepância entre os dois métodos de simulação para os casos 0, 1 e 2.

O campo elétrico obtido na linha de simetria aplicando-se os dois métodos MEF e CSM para as configurações dos três casos descritos são comparados, conforme mostram as figuras 7 e 8. Os resultados da comparação foram satisfatórios, pois observou-se que o campos elétricos obtidos nas lâminas de 2 a 7 são bem próximo, para os dois métodos. Contudo, verificou-se, também, uma discrepância de até 17%, no campo elétrico nas lâminas de cristal próximas aos eletrodos (lâminas 1 e 8). As curvas obtidas para o caso 1 são as que possuem menor discrepância entre os dois métodos.

Conclusões

Uma avaliação precisa do campo elétrico é de grande interesse para a determinação de parâmetros característicos de sensores eletro-ópticos. Os códigos do tipo CAE podem ajudar na definição de configurações geométricas dos cristais e eletrodos desses tipos de sensores, de modo a otimizá-los.

Neste trabalho mostrou-se que a simulação computacional do campo elétrico, em sensores eletro-ópticos multsegmentado, utilizando-se dois códigos baseados em métodos numéricos diferentes. Os resultados, da comparação, entre os métodos mostraram-se satisfatória para os três casos estudados, contudo, verificaram-se diferenças, consideráveis, nos dados do campo

elétrico nas lâminas de cristal, próximas aos eletrodos.

De modo a elucidar esta diferença, uma avaliação experimental está sendo elaborada, o que será de grande ajuda na validação do método dos elementos finitos para esse tipo de aplicação.

Agradecimentos

Agradecemos ao laboratório de Engenharia Virtual –LEV, do Instituto de Estudos Avançados-IEAv/CTA, pelo fornecimento do código LEVSoftware utilizados nas simulações nesse trabalho e pelo apoio do Laboratório de Sistemas Ópticos-LSO do departamento de Energia e automação-PEA, da Escola Politécnica da USP-EPUSP.

Referências

- ABE, N.M. ET.AL., 2002. Um sistema de software para análise de dispositivos e componentes de óptica integrada, fibras ópticas e microondas. In V Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (CBMAG 2002), CD-ROM.
- FRANCO, M.A.R.; Passaro, A.; Sircilli, F., & Cardoso, J.R., 1999. Finite element analysis of anisotropic optical waveguide with arbitrary index profile. IEEE Transactions on Magnetics, vol.35, No. 3, pp. 1546-1549.
- HIDAKA K. & KOUNO, T., 1982. A method for measuring electric field in space charge by means of Pockels device. J. Electrostatics, v.11, pp. 195-211
- PINHEIRO, L.C.S.; Santos, J.C.; Côrtes A. L., & Hidaka, K., 2002. Optical high voltage measurement transformer using white light interferometry. In 25th Brazilian Meeting for Condensed Matter Physic. pp 204-207
- SANTOS, J.C., 1996. New Optical Pockels Techniques for Direct Measurement of High Voltage, PhD Thesis, Tokio University, Japan.
- SANTOS, J.C. & HIDAKA K., 1996. IEE - Japan Research Symp. on Elect. Discharges, ED-96-156, pp. 1-9.
- SANTOS, J.C. & HIDAKA, K.,1997. Optical high voltage measurement technique using Pockels device, Japan Journal Appl. Phys., vol. 36, pp. 2394-2398
- YARIV A. & YEH, P., 1984. Optical Waves in Crystals, John Wiley New York, USA.