

## ISOLADOR PARA SENSOR ÓPTICO DE ALTA TENSÃO PRODUZIDO EM IMPRESSORA 3D

Kelvin Meira Barbosa<sup>1</sup>, José Henrique Galeti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Mato Grosso do Sul – Três Lagoas - MS

kel.meir@gmail.com, jose.galeti@ifms.edu.br

### Resumo

Os sistemas de energia elétrica, especialmente após o advento das redes inteligentes, exigem medidores inteligentes de tensão e corrente dedicados ao faturamento de energia, controle, proteção e monitoramento da qualidade. Novas arquiteturas de Sensores Ópticos de Tensão (OVS) estão sendo pesquisadas para abordar diferentes aplicações industriais de eletricidade. Neste trabalho, uma bucha isoladora (CIB) foi desenvolvida para embalar um OVS baseado em cristal eletro-óptico de niobato de lítio, aplicado à proteção e monitoramento da qualidade de energia para a classe de tensão de 13,8 kV. O projeto e a implementação atingiu alto isolamento e flexibilidade interna adequada para atender às tolerâncias dimensionais do sensor eletro-óptico, e, foram produzidos com ácido polilático (PLA) usando uma impressora 3D.

**Palavras-chave:** Sensor óptico de tensão, isolamento elétrico, PLA, Impressão 3D, embalagem de componentes ópticos.

### Introdução

As subestações são elementos estratégicos para implementar as redes inteligentes (*smart grids*), elas necessitam de tecnologias digitais e novas formas de comunicação [1]. Devido a isso, surgiu uma geração não convencional de transformadores de instrumentos e a integração de unidades autônomas utilizando IEC 61850 no processo de comunicação [2], [3]. Entre estes instrumentos não convencionais estão os modernos Sensores Ópticos de Tensão (OVS), cujas interfaces digitais satisfazem essa demanda e aumentam a segurança além de atenderem aos requisitos de espaço.

Os OVSs são mais vantajosos que os transformadores de potencial convencionais, eles são instrumentos compactos, leves, reduzem os impactos ambientais (isolamento é mais simples, exigindo menos óleo, papel ou gás poluente), proporcionam maior segurança operacional (o operador fica eletricamente isolado pela conexão em fibra óptica), constituem plataformas diretas para os barramentos digitais não necessitando de processamento adicional, permitem supervisão online além de melhorar a precisão da medição (ausência de distorções na forma de onda produzidas pela saturação do núcleo de ferro) e melhor exatidão nas medidas de altas frequências [4].

Transformadores convencionais de alta tensão, baseados em princípios eletromagnéticos, apresentam não linearidades (distorções harmônicas) e resposta de frequência limitada. Já os OVSs apresentam excelente resposta em frequência e linearidade [5], [6], tornando-se uma solução promissora na indústria de energia elétrica visando à qualidade de energia, segurança e tarifação. Empresas de prestígio internacional tem lançado instrumentos ópticos medidores de alta tensão baseados no efeito Pockels e cristais eletro-ópticos [7],[8], demandando soluções de isolamento e acondicionamento dos cristais.

Normalmente assume-se que as necessidades do suporte do cristal são apenas em relação à resistência dielétrica do conjunto, isto é, quanto à máxima magnitude do campo elétrico sem que haja ruptura dielétrica. No entanto, os isoladores também são guias do campo elétrico a ser medido, projetados para evitar a dispersão do campo elétrico e preferencialmente manter as linhas de campo paralelas. Com este fim, um esforço de pesquisa considerável tem sido dedicado ao correto acondicionamento do cristal para OVSs baseados em cristal eletro-óptico [9], [10], [11], [12]. O isolamento, a orientação do campo elétrico, a montagem adequada do cristal e a robustez (em aplicações de campo) são levados em consideração, proporcionando uma tecnologia de transformador de média tensão em conformidade com padrões industriais.

Projetar, criar protótipos e testar, considerando os requisitos de isolamento, guia de campo e acondicionamento do cristal (*insulator shield and crystal packaging* - ISCP), foram facilitados usando-se a tecnologia de impressoras 3D. Neste trabalho, o projeto, simulação, prototipagem e teste de uma nova topologia de ISCP, dedicada a um OVS eletro-óptico baseado em niobato de lítio (LiNbO<sub>3</sub>), foi realizado. O ISCP foi projetado para classe de isolamento de 13,8 kV e confeccionado com ácido polilático (PLA).

### Fundamentos teóricos

Nesta seção é apresentada uma breve revisão dos OVSs baseados em modulador de intensidade óptica usando células Pockels de LiNbO<sub>3</sub> [3].

Um diagrama esquemático do sistema sensor é apresentado na figura 1 ilustrando o sistema de coordenadas (x, y, z) em relação aos eixos de laboratório, sendo os eixos ópticos do cristal indicados por X, Y, Z. A fonte óptica utilizada neste trabalho é um laser de He-Ne, comprimento de onda de 632,8nm e potência de saída de 20 mW. O feixe de laser é

polarizado a  $45^\circ$  em relação ao eixo  $y$ , passa sequencialmente pelo Modulador de Fase Óptica (OPM), pelo Sensor de Alta Tensão (HVS) e pelo analisador, i.e., um segundo polarizador (cruzado com o primeiro) a um ângulo de  $-45^\circ$  em relação ao eixo  $y$ . Como o  $\text{LiNbO}_3$  é um cristal uniaxial [12], haverá o acoplamento de dois modos (ortogonais entre si e formando um raio elipticamente polarizado) que se propagam ao longo dos eixos longitudinais de ambas as células. Em seguida, o feixe de luz resultante é detectado por um fotodiodo PIN amplificado, passa por um filtro *anti-aliasing* (AAF) e o sinal resultante é digitalizado e processado em tempo real usando um dispositivo de controle portátil e reconfigurável, myRIO (National Instruments). Para evitar o efeito de desvanecimento do sinal óptico devido a derivas ambientais, uma forma de onda sinusoidal  $V_m(t)$ , de amplitude ajustável, é usada para controlar o sistema com a realimentação aplicada ao OPM usando uma saída analógica da placa myRIO [3].

A célula de controle, OPM, é constituída por um cristal de  $\text{LiNbO}_3$  com dimensões de 10 mm, 1,1 mm e 50 mm, nas direções  $x = X$ ,  $y = Z$  e  $z = Y$ , respectivamente. A tensão  $V_m(t)$  é aplicada ao longo do eixo  $Z$  e a propagação da luz ocorre ao longo da direção  $Y$ ; conseqüentemente, esta célula apresentará birrefringência natural [13]. Neste caso (operando como célula Pockels), a tensão de necessária para gerar um desvio de fase relativa de  $\pi$  entre os modos próprios é chamada de “tensão de meia onda”,  $V_{\pi}$ . Seguindo Yariv e Yeh [13], esse valor teórico pode ser calculado, resultando para o OPM um  $V_{m\pi} = 64.9\text{V}$ .

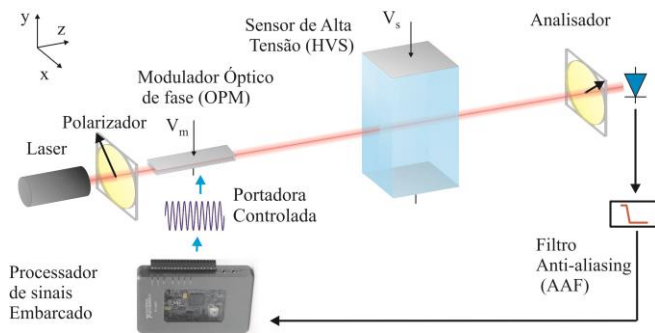


Figura 1. Configuração experimental de OVS usando o efeito Pockels.

A outra célula, HVS, também constituída por cristal  $\text{LiNbO}_3$ , tem dimensões de 9,92, 20 e 10,26 mm ao longo dos eixos  $x = Y$ ,  $y = X$  e  $z = Z$ , respectivamente. Nela é aplicada a alta tensão a ser medida,  $V_s(t)$ , ao longo do eixo  $X$  e a propagação da luz ocorre ao longo da direção  $Z$ , e, neste caso, não apresentará birrefringência natural [13]. A tensão teórica de meia onda é igual a  $V_{\pi s} = 7.59\text{ kV}$ .

A tensão foto-detectada, que pode ser mensurada por um osciloscópio digital, é dada por [3]:

$$v(t) = A \{1 - V \cos [\Phi(t) + \Phi_0 + \phi(t) + \varphi(t)]\}, \quad (1)$$

Onde  $A$  é a tensão média,  $V$  é a visibilidade de franja  $\Phi(t)$  e  $\Phi_0$  são os desvios de fase óptica dinâmicos e estáticos induzidos pela célula OPM, respectivamente,  $\phi(t)$  é o deslocamento de fase óptica induzido pela célula HVS e  $\varphi(t)$  é uma fase óptica de variação lenta e aleatória causada por derivas ambientais.

Aplicando um método de desmodulação de fase adequado, como os descritos em [3], [5] ou [6], é possível extrair  $\dot{\phi}(t)$  de (1). Conseqüentemente, a medida de alta tensão desejada  $[V_s(t)]$  é obtida por:

$$V_s(t) = \frac{V_{\pi s}}{\pi} \int_{t_0}^t \dot{\phi}(t) \quad (2)$$

Portanto,  $V_s(t)$  é medido indiretamente, a partir do conhecimento da constante,  $V_{\pi s}$ , o que, por sua vez, depende do acondicionamento do cristal e conseqüente paralelismo das linhas do campo elétrico, conforme previsto pelo sistema ISCP.

### Simulação e impressão 3D

Nesta seção são apresentados: o projeto, a simulação da distribuição do campo elétrico baseado no método dos elementos finitos (MEF), bem como as discussões sobre a prototipagem impressa em 3D.

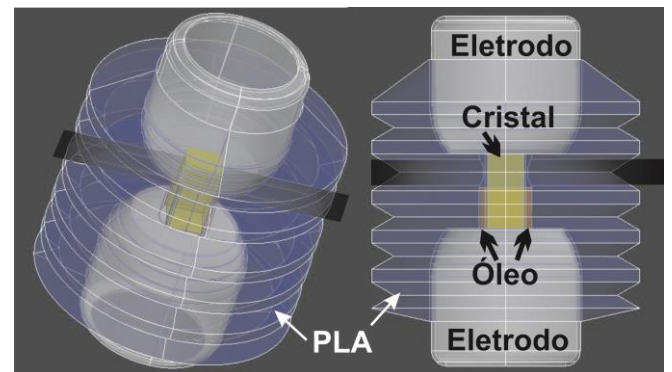


Figura 2. Protótipo ISCP projetado para simulação e impressão 3D.

Na figura 2, observa-se o projeto do ISCP desenvolvido no AutoCAD, o qual foi utilizado para a simulação elétrica e para a construção dos protótipos em 3D. As simulações contidas neste trabalho foram realizadas através do software de elementos finitos CONSOL *Multiphysics*, que combina os fenômenos mecânicos, dielétricos e elétricos de acordo com os materiais adicionados ao domínio e a física escolhida para a simulação. A simulação com elementos finitos é uma técnica numérica que consiste dividir o objeto

estudado em vários elementos (células) conectados por nós em uma malha sobre toda a geometria, onde, a cada elemento da malha atribui-se um domínio (as características do material). Uma vez que se aplicam diferentes tensões para os respectivos pontos (no caso os eletrodos), o campo elétrico pode ser calculado para cada célula do material.

Observa-se na figura 3 que o ISCP é projetado para acomodar o cristal em uma posição vertical entre dois eletrodos de metal, a fim de permitir a detecção direta de  $V_s(t)$ . Há também um orifício no meio do isolador que permite que o feixe de laser passe e atinja o cristal de célula de Pockels (HVS).

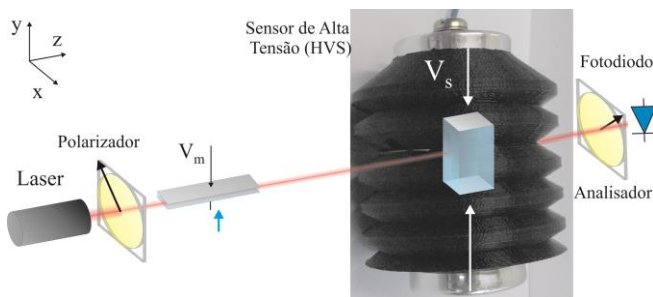
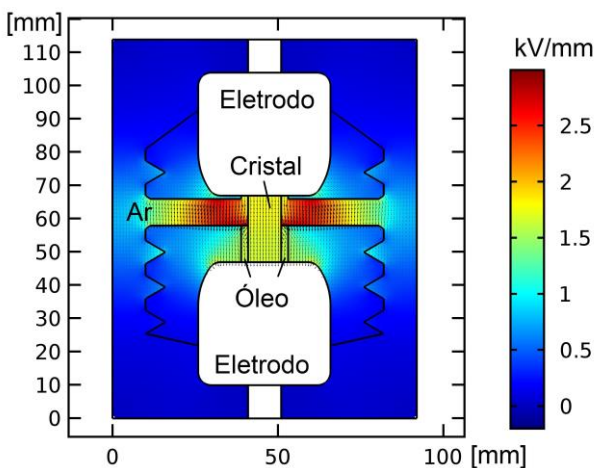
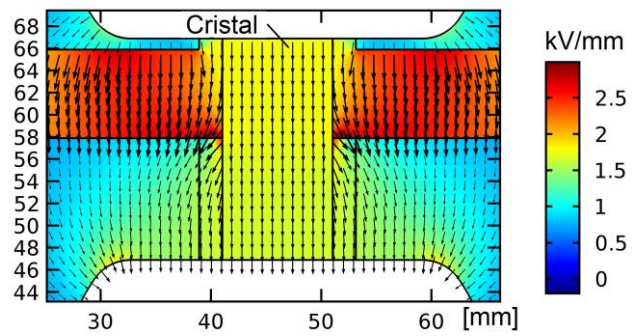


Figura 3. Esquema do feixe de laser passando através da blindagem do isolador e embalagem de cristal (ISCP).

A distribuição do campo elétrico é bastante relevante para maximização do desempenho do sensor. A parte crítica do ISCP é a constituída pelo ar próximo ao cristal, i.e. o furo longitudinal necessário para a passagem do laser através do cristal. Na vista em corte da figura 4 (a) é mostrado o campo elétrico e a camada de ar (pior caso). A barra de cores refere-se ao módulo deste campo, em kV/mm.



(a)



(b)

Figura 4. Vista transversal intensidade do campo elétrico. (a) Região crítica da rigidez dielétrica quando submetido tensão de 35 kV ISCP. (b) Vista detalhada, mostrando paralelismo entre as linhas sobre o cristal.

Como observa-se na figura 4 (b), o campo elétrico simulado para o ISCP satisfaz a necessidade de paralelismo (entre as linhas) em todo o cristal. A diferença de tensão aplicada aos eletrodos foi de 35 kV e a intensidade máxima de campo (módulo) resultante foi de 2,95 kV/mm. Considerando o nível de ruptura do dielétrico de ar  $\sim 3$  kV/mm, então, o nível de ruptura total do ISCP pode ser considerado 35 kV.

A figura 5 mostra as linhas equipotenciais, indicados pela barra de cores em volts, quando uma tensão de 35 kV é aplicado aos eletrodos. Portanto, o paralelismo entre as linhas de tensão equipotencial é satisfeito em todo o cristal.

Tabela 1. Propriedades elétricas e dielétricas dos materiais

Função	Material	Propriedade	Valor
Meio	Ar	Constante dielétrica ( $\epsilon_r$ )	1 pu
Eletrodo	Alumínio	Densidade ( $\rho$ )	2700 kg.m <sup>-3</sup>
		Condutividade Elétrica ( $\sigma$ )	$3.8 \times 10^7$ S.m <sup>-1</sup>
Isolador	Óleo Mineral	Constante dielétrica ( $\epsilon_r$ )	4 pu
Cristal eletro-óptico	Niobato de Lítio	Permissividade relativa ( $\epsilon_{11}/\epsilon_0$ )	46.30 pu
		Permissividade relativa ( $\epsilon_{22}/\epsilon_0$ )	46.30 pu
		Permissividade relativa ( $\epsilon_{33}/\epsilon_0$ )	29.16 pu
Isolador e suporte do cristal	PLA	Constante dielétrica ( $\epsilon_r$ )	2.95 pu



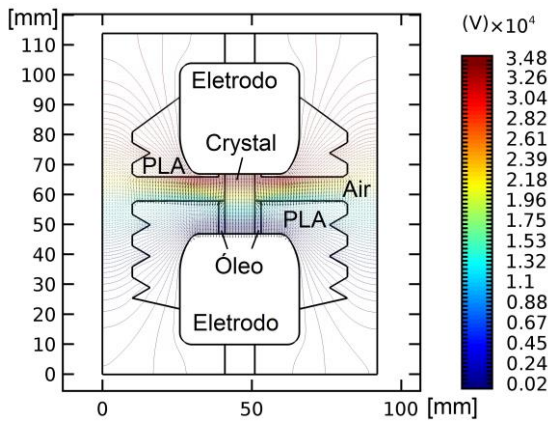


Figura 5. Vista da seção transversal (caso crítico) das linhas de campo elétrico e de tensão equipotencial aplicadas aos eletrodos.

O design e a prototipagem ISCP foram feitos usando AutoCAD 3D, Blender e uma impressora 3D Makerbot. Durante o desenvolvimento do protótipo, vários testes foram necessários até se encontrar uma forma adequada. Para esta etapa de sucessivas impressões e verificações de formato foi utilizado preenchimento parcial, como pode ser observado na figura 6. Após algumas interações o primeiro protótipo do ISCP funcional foi simulado e foi impresso (figuras 7 e 8).

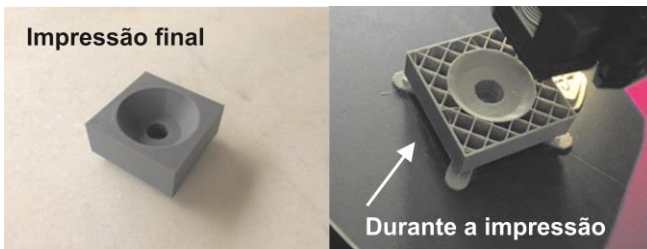


Figura 6. Primeiros passos para o desenvolvimento do protótipo ISCP: preenchimento parcial.



Figura 7. Protótipo ISCP: isolador e eletrodos.

A parte do isolamento foi feita em duas metades e os eletrodos de alumínio foram montados nas extremidades do isolador, como mostra a figura 7. Ambos os eletrodos são idênticos e foram fabricados de acordo com o uso de um torno mecânico. Finalmente, o cristal é inserido na metade inferior do isolador e as duas metades são montadas, como mostrado na figura 8.



Figura 8. Protótipo final: isolador, eletrodos e cristal.

### Ensaios elétricos

Nesta seção, a resistência dielétrica do ISCP foi testada usando-se um testador de óleo isolante (TOI), composto por um auto transformador de alta tensão, e comumente chamado de testador de tensão de ruptura dielétrica (da General Electric).



Figura 9. Processo de calibração usando-se o testador de rigidez dielétrica da General Electric (Insulating Oil Dielectric Strength Tester).

Neste trabalho, o TOI foi primeiramente calibrado [14] usando um medidor de voltagem conectado ao enrolamento

primário do transformador, e um osciloscópio ligado ao enrolamento secundário (Alta Tensão) através de uma ponta de prova calibrada (Tektronix P6015A, 28 kV, 75 MHz), como mostrado na figura 9. Uma vez que o TOI foi calibrado corretamente, o ISCP foi montado na saída HV TOI, como se observa na figura 10. Aplicou-se tensões até 35 kV (o limite superior do TOI) sem haver rompimento dielétrico. Este resultado comprovou que o protótipo ISCP permite operações de até 35 kV, como previsto na simulação. Portanto o ISCP é adequado como isolante do OVS mostrado na figura 1, uma vez que objetiva-se à classe de tensão de 13,8 kV.



Figura 10. ISCP dielectric strength tested up to 35 kV.



Figura 11. Comparação entre as dimensões de um transdutor convencional e o protótipo ISCP.

Nos próximos passos desta pesquisa, o cristal de niobato será inserido no ISCP, e serão realizados ensaios envolvendo medições de forma de onda de alta tensão além do uso de fibra ótica, para levar e trazer a luz do laser até o

OVS. Assim, além do isolamento dielétrico, também haverá isolamento físico entre o equipamento de alta tensão e o equipamento de demodulação do sinal ótico (usuário final ou operador do OVS).

### Resultados e Discussão

De acordo com os resultados obtidos, o ISCP suporta altas tensões de até 35kV. Esse resultado é encorajador pois permite o OVS operar, com segurança, dentro da classe de tensão pretendida de 13,8kV.

Um resultado importante refere-se à diferença de tamanho e peso do OVS/ISCP comparado a um Transformador de Potencial (TP) comercial típico [classe de energia 15 kV (fase a fase), 95 kV BIL, com entrada de 30 M $\Omega$  e 13,1 pF e com saída de 841,5 k $\Omega$  e 495,0 pF, como mostrado na figura 11. O TP convencional, especificado para operar na classe de distribuição, tem a necessidade de trabalhar com gás isolante, o que é desnecessário para o OVS. Também os TPs convencionais operam adequadamente (com um erro de 0,2%) somente dentro da faixa de 80% a 120% de sua tensão nominal, enquanto o OVS é capaz de operar a partir de aproximadamente 10% a 200% da faixa nominal. Além disso, o TP convencionais podem não conseguir transformar formas de onda distorcidas, enquanto o OVS detecta com eficiência até 30ª harmônicas [3].

### Considerações Finais

Devido às diferentes topologias e dimensões físicas do cristal de niobato de lítio HVS usado recentemente em [3], o OVS em desenvolvimento tem operado somente até aproximadamente 9 kV, acima do qual a uma ruptura dielétrica pode causar danos permanentes ao cristal. Este trabalho descreveu resultados preliminares envolvendo o projeto, simulação, fabricação e teste de um isolador e suporte do cristal (ISCP), para alojar um sensor óptico de tensão (OVS) capaz de operar na classe de 13,8V. Além disso, o ISCP garante o paralelismo entre as linhas de campo elétrico ao longo do cristal eletro-óptico, o que é relevante para a operação eficiente da célula HVS. Finalmente, o grande poder da tecnologia de impressão 3D, permitindo a fabricação rápida e confiável de protótipos, conforme descrito no documento, deve ser destacado.

### Reconhecimento

Os autores gostariam de agradecer ao Prof. Ricardo Taoni Xavier pelo apoio inicial com a impressora 3D e a Everaldo Leandro de Moraes por ajudar com o teste de resistência dielétrica a óleo isolante (TOI).

## Referências

- [1] G. I. Volovich, I. M. Kirpichnikova and D. V. Topolskiy, "Experimental operation of the adaptive electronic instrument transformer of current and voltage," In: 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), St. Petersburg, 2017, pp. 1-5.
- [2] R. Thomas, A. Vujanic, D. Z. Xu, J. - E. Sjödin, H. R. M. Salazar, M. Yang, N. Powe, "Non-conventional instrument transformers enabling digital substations for future grid," In: 2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Dallas, TX, pp. 1-5, 2016.
- [3] F. C. Pereira, J. H. Galeti, R. T. Higuti, M. J. Connelly and C. Kitano, "Real-time polarimetric optical high-voltage sensor using phase controlled demodulation" Journal of Lightwave Technology, vol. 36, pp. 3275 – 3283, 2018.
- [4] J. Faiz, M. Ghazizadeh, H. Oraee, "Derating of transformers under non-linear load current and non-sinusoidal voltage - An overview", IET Electric Power Applications, vol. 9, pp. 486-495, 2015.
- [5] J. H. Galeti, R. T. Higuti, C. Kitano and M. J. Connelly, "Polarimetric optical high-voltage sensor using synthetic-heterodyne demodulation and Hilbert transform with gain control feedback", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 23, pp. 417-423, 2017.
- [6] J. Galeti, C. Kitano and M. J. Connelly, "Improved synthetic-heterodyne Michelson interferometer vibrometer using phase and gain control feedback", Appl. Opt., vol. 54, pp. 10418-10424, 2015.
- [7] A. Kumada and K. Hidaka, "Directly high-voltage measuring system based on pockels effect", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, pp. 1306-1313, 2013.
- [8] J. C. Santos, A. C. de Sillos and C. G. S. Nascimento, "On-field instrument transformers calibration using optical current and voltage transformers" In: 2014 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems Proceedings (AMPS), Aachen, pp. 1-5, 2014.
- [9] Q. Tan, Q. Xu, L. Chen and Y. Huang, "A New Method to Improve Internal Electric Field Distributions of Pockels OVS" IEEE Sensors Journal, vol. 17, pp. 4115-4121, 2017.
- [10] Y. Huang, Q. Xu, K. -L. Chen and J. Zhou, "Optimization of Pockels electric field in transverse modulated optical voltage sensor", Measurement Science and Technology, vol. 29, pp. 57, 2018.
- [11] T. Zhu, Z. Ou, M. Han, M. Deng, and K. Chiang, "Propylene Carbonate Based Compact Fiber Mach-Zehnder Interferometric Electric Field Sensor" J. Lightwave Technol. vol. 31, pp. 1566-1572, 2013.
- [12] Q. Ma, K. Huang, Z. Yu and Z. Wang, "A MEMS-based electric field sensor for measurement of high-voltage DC synthetic fields in air" IEEE Sensors Journal, vol. 17, pp. 7866-7876, 2017.
- [13] A. Yariv and P. Yeh, Optical Waves in Crystals: Propagation and Control of Laser Radiation, New York: John Wiley & Sons, 1983.
- [14] IEC/TR-61869-3, "Instrument transformers - Part 3: Additional requirements for inductive voltage transformers," IEC, Jul. 2011.

Esta pesquisa foi financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Processo 420673/2016-4) e Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul (IFMS) (Processo 112-35/2017).

## HIGH VOLTAGE OPTICAL SENSOR INSULATION USING PLA (POLYLACTIC ACID)

**Abstract**— The Smart grid technology recent advances are demanding intelligent voltage and current meters at electric power systems, especially devoted to energy billing, control, protection and quality monitoring. Novel Optical Voltage Sensors (OVS) schemes have been researched to address different electricity industrial applications. In this work, a case insulator bushing (CIB) was developed to pack an electro-optical crystal-based OVS, employing lithium niobate, for the voltage class of 13.8 kV and applied to protection and energy quality monitoring. The design and implementation of this CIB, provided with high isolation and the appropriate internal flexibility to meet the dimensional tolerances of the electro-optical sensor, was produced with Polylactic Acid (PLA) by using a 3D printer.

**Keywords**—Optical voltage sensor, electrical insulation, PLA, 3D printing, optical component packaging.