



MEDIDOR DE TENSÃO E CORRENTE À FIBRA ÓPTICA

Policarpo B. Uliana*¹
Moacir Wendhausen ¹

Antonio Carlos Zimmermann ²

Sergio Simão Stüpp ³

- (1) Documentta Tecnologia Ltda
(2) UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
(3) CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina SA

RESUMO

Este trabalho apresenta a concepção e resultados parciais de um medidor de corrente e tensão híbrido (TCP Híbrido) com comunicação por fibra óptica aplicado a linhas de 138 kV. O transdutor está baseado em um circuito eletrônico montado no topo de um isolador de porcelana “flutuando” na tensão da linha a um potencial de 138kV. Este circuito obtém as informações de corrente e tensão da linha através de sensores e as transforma em sinais digitais por meio de um conversor AD de 16 bits. Os dados digitalizados são transmitidos, através de fibra óptica, para um circuito na base do isolador que processa todas as informações e as transmite para a subestação.

Palavras Chaves: TPC Híbrido, Conversor AD, Fibra óptica.

1. INTRODUÇÃO

O medidor de corrente e tensão híbrido (TPC híbrido) que é apresentado neste trabalho foi desenvolvido dentro do programa de P&D das Centrais Elétricas de Santa Catarina - CELESC e executado pelo Laboratório de metrologia e Automatização da UFSC - LABMETRO e pela empresa Documentta Tecnologia Ltda.

Na primeira etapa do projeto de P&D foi desenvolvido um protótipo que permitiu ensaiar os princípios básicos de funcionamento do TPC híbrido em laboratório. Na segunda etapa (atualmente em execução) 3 protótipos industriais estão sendo desenvolvidos, para serem instalados no pátio de uma SE de 138kV da CELESC em Florianópolis.

2. TIPOS DE TPC

Os transdutores de corrente e tensão (TPCs) são utilizados para transformar os altos valores de corrente e tensão (comuns nos em sistemas de transmissão e distribuição), em valores de mais baixo nível, que possam ser utilizados nos

dispositivos de medição e proteção. Idealmente TPCs devem apresentar grande precisão e linearidade numa larga faixa de operação.

Os transdutores de tensão (TPs) e de corrente (TCs) podem ser classificados em dois grandes grupos:

- i. Transdutores convencionais:
 - Transformador de corrente convencional;
 - Transformador de potencial convencional;
 - Transformador de potencial com divisor capacitivo.
- ii. Transdutores não convencionais:
 - Transdutor óptico de corrente.
 - Transdutor óptico de tensão;
 - Divisor resistivo/capacitivo de tensão;
 - Transdutores híbridos.

2.1. Transdutores convencionais

Os TCs e TPs convencionais que existem no mercado tem como base um conjunto de bobinas, indutores e capacitores. Estes equipamentos são basicamente semelhantes, apresentando diferenças quanto a sua classe de precisão, definidas pela IEEE, CSA, IEC e ANSI e também quanto ao material isolante que compõem o transdutor.

Apesar de serem os transdutores mais utilizados eles apresentam uma série de limitações, dentre as quais se podem citar: (i) limitação na resposta aos transientes, (ii) acoplamento galvânico entre o secundário e os instrumentos de medição, (iii) suscetibilidade aos problemas de compatibilidade eletromagnética [1], [2] e (iv) não linearidades (distorção da forma de onda devido à saturação do núcleo) [3], [4] e [5].

* Documentta Tecnologia Ltda – João Henrique Gonçalves, 1625 - Lagoa da Conceição - Florianópolis - SC

2.2. Transdutores Ópticos

Dentre os transdutores não convencionais os transdutores ópticos são os mais modernos no mercado. O funcionamento do TP óptico se baseia no efeito Pockels [6] e [7] o qual se utiliza da mudança do estado de polarização da luz quando submetida a um campo elétrico. Este transdutor é também conhecido como transdutor eletro-óptico, pois o efeito ocorre dentro de um meio anisotrópico, geralmente um cristal de Niobato de lítio (LiNbO_3) que altera sua estrutura cristalina quando submetido a um campo elétrico de tal maneira que o sinal luminoso polarizado que se propaga por ele tem suas componentes do eixo rápido e do eixo lento de polarização defasadas proporcionalmente ao valor do campo elétrico (que está associado ao valor de tensão).

Já o transdutor óptico de corrente, também denominado transdutor eletro-óptico de corrente, está baseado no efeito Faraday [8], [9], [10] e [11], no qual as componentes da luz polarizada que se propaga por uma fibra óptica em torno do condutor sofrem uma rotação nos seus eixos na presença de um campo magnético gerando o sinal proporcional a corrente elétrica do condutor. Tal rotação é captada por um sistema de polarizadores e fotodetectores que por sua vez, disponibiliza um sinal de tensão proporcional a corrente no primário. Este efeito é conhecido a mais de 100 anos, porém, apenas nos últimos anos foi possível sua aplicabilidade devido aos avanços tecnológicos da opto eletrônica.

Estes tipos de transdutores têm uma resposta em frequência bastante ampla e de altíssima linearidade e precisão. Devido à isolação óptica, neste tipo de transdutor o sinal chega ao instrumento de medição isento de ruídos, sem problemas de compatibilidade eletromagnética e com total segurança ao usuário.

Devido ao altíssimo custo, inerente a tecnologia puramente óptica acima descrita, o uso destes equipamentos ainda é proibitivo. Além disso, a necessidade de um amplificador de potência para gerar níveis de tensão no secundário equivalentes aos TCs e TPs convencionais também limitam sua aplicabilidade, pois tal amplificador além de custar caro diminui significativamente a confiabilidade do equipamento.

2.3. Transdutores Híbridos

Os transdutores híbridos são aqueles que empregam tecnologias ópticas e eletrônicas simultaneamente. Normalmente os sinais de tensão e corrente são obtidos por meio de transdutores conectados no mesmo potencial da linha monitorada, sendo os sinais amostrados, digitalizados e transmitidos por cabos de fibra óptica para serem processados num equipamento fora do pátio da subestação. Outra forma de empregar a tecnologia eletro-óptica é gerar um sinal de frequência variável proporcional ao valor de tensão e corrente monitorados. Nesta

categoria enquadra-se o TPC híbrido desenvolvido pelos autores, que será descrito com mais detalhes na próxima seção.

Os trabalhos de pesquisa de TPCs híbridos encontrados em literatura [12], [13], [14], [15] e [16], apresentam apenas protótipos de equipamentos cujo aplicação comercial ainda não é viável devido a uma série de fatores, dentre os quais a alimentação dos circuitos eletrônicos que ficam no potencial de alta tensão. Além disso o emprego desta tecnologia tem se limitado a tensões de até 138kV, não sendo identificado pelos autores nenhum protótipo que opere em tensões mais elevadas.

Como este tipo de transdutor apresenta quase todas as vantagens de um TPC óptico com custo muito menor, o fato de ainda não se dispor de TPCs híbridos no mercado é um indicativo de que todos os problemas tecnológicos relacionados a aplicação prática do mesmo ainda não foram superados. Assim, o trabalho de pesquisa aqui relatado fica plenamente justificado, pois além de desenvolver uma tecnologia nacional, os autores acreditam que o TPC desenvolvido tem grande potencial servir de base para a criação de um equipamento comercial.

3. Medição de corrente e tensão nos tradutores não convencionais

A medição de corrente nos transdutores híbridos é relativamente simples, sendo baseada na medição direta do campo magnético próximo ao condutor, com um princípio semelhante ao utilizado em um amperímetro alicate. Dependendo da estrutura das bobinas utilizadas pode-se ter duas situações, onde o sinal de saída do transdutor é diretamente proporcional a corrente (princípio dos TCs convencional), ou então é proporcional a sua derivada (princípio das bobinas de Rogowski[17]). O sinal de saída do transdutor é amplificado (e no caso das bobinas de Rogowski, também integrado) e a seguir enviado a um conversor AD, ou a um conversor VCO (conversor de tensão em frequência). Uma fibra óptica é utilizada como canal de comunicação, com um módulo de processamento. Este módulo recebe a informação numérica proveniente do conversor AD (ou o valor de frequência do VCO) e aplica uma função de transferência a fim de obter o valor da corrente na linha.

Já a medição da tensão é bem mais complexa, pois na realidade o que é medido são os campos elétricos em alguns pontos entre a linha e o potencial de terra. Neste caso o valor da tensão não é diretamente proporcional a uma dada medida, mas sim uma função que depende dos diversos valores de campo elétrico monitorados.

Na figura 1 pode-se observar o gradiente de potencial em torno de um isolador de 138kV que serve como base para o TPC desenvolvido. As curvas apresentadas foram calculados de forma

numérica, num caso onde apenas uma tensão esta sendo aplicada e considerando um instante no qual o valor da mesma é igual a 100kV. As curvas representam regiões equipotenciais, e as setas indicam a direção do campo elétrico.

Na figura 2 observa-se o gradiente de potencial ao longo do eixo do isolador, sendo que as irregularidades presentes na curva (nos pontos que representam as extremidades do isolador) são devidas a presença de partes metálicas.

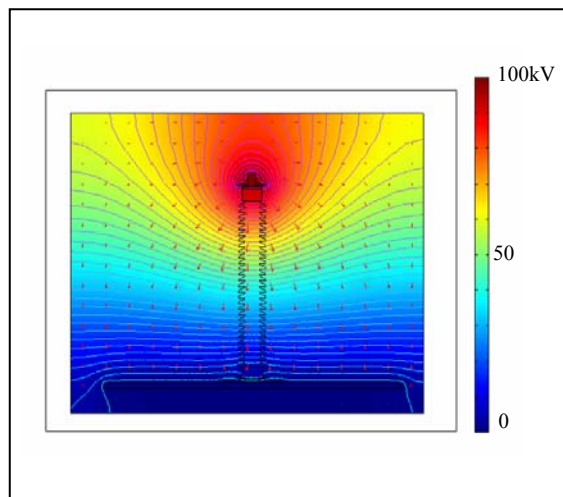


Figura 1 - Gradiente de Potencial em um plano que corta o isolador.

Pela figura 2, também se pode observar que a curva que representa os gradientes dentro do corpo do isolador não é linear.

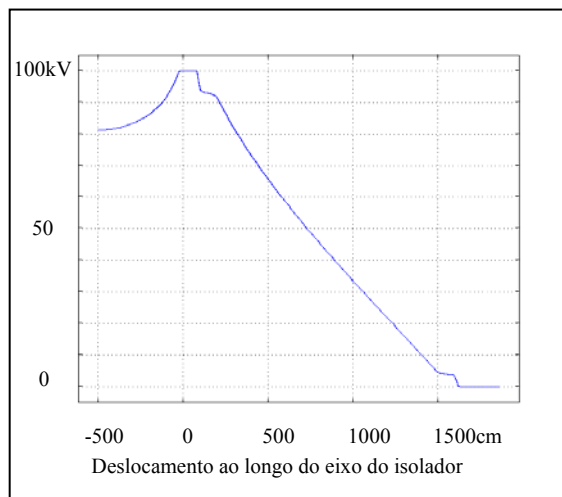


Figura 2 - Gradiente de Potencial ao longo do eixo vertical do isolador (deslocamento no sentido descendente e referenciado ao topo do isolador).

Desta forma se fosse desejado obter de uma curva real com base na medição do campo elétrico no interior do isolador, precisaria-se de no mínimo três pontos sobre os quais poderia-se aplicar, por exemplo, uma interpolação polinomial de segunda ordem. De forma análoga os TPs ópticos comerciais trabalham com a medição de campos elétrico em

vários pontos no interior do isolador. Normalmente são monitorados os campos elétricos em três pontos (na base, no meio e no topo do isolador), sendo a tensão calculada por meio de uma função que leve em conta estas três informações, e com base em informações de curvas semelhantes à apresentada na figura 2.

Na figura 3 tem-se um caso mais geral, considerando um sistema trifásico, e pode-se observar que a distribuição de gradientes (que na figura 1 era relativamente uniforme) fica bastante distorcida. Apesar disso o campo no interior do isolador terá um valor muito próximo do mostrado na figura 2.

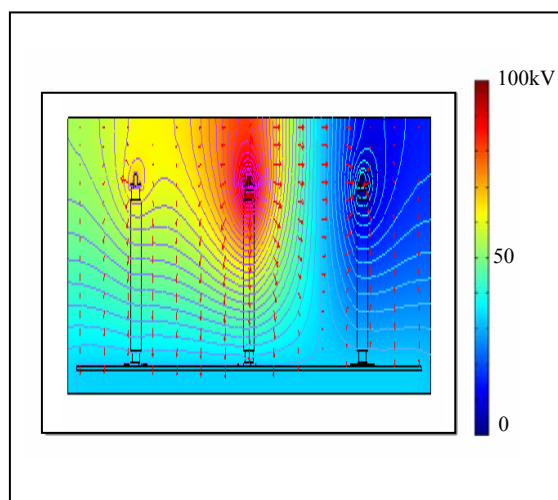


Figura 3 - Gradiente de Potencial, para um sistema trifásico, representado em um plano que corta os três isoladores. A escala vertical foi distorcida para visualização das curvas.

No TPC híbrido desenvolvido, os autores optaram pela medição do campo elétrico em apenas dois pontos (na base e no topo do isolador), sendo que um dos objetivos da primeira fase do projeto foi determinar se a tensão poderia ser calculada de forma precisa, com base apenas no valor destes dois campos elétricos.

4. DESCRIÇÃO DO PROJETO

O TPC híbrido desenvolvido está baseado na utilização de uma fibra óptica [17], [18], [19] como elemento de isolamento e transmissão do sinal adquirido por um circuito eletrônico localizado no mesmo potencial da tensão monitorada. Este tipo de transdutor é também referenciado TPC de tecnologia híbrida ou TPC eletrônico.

O projeto do TPC aqui relatado encontra-se em seu segundo ano de execução, sendo que os resultados obtidos no primeiro ano já demonstraram que a tecnologia de empregada é viável para os níveis de tensão de até 138kV. O objetivo final do projeto é obter um transdutor aplicável na medição simultânea de corrente e tensão em linhas de 138kV. O

transdutor deverá ter uma boa resposta em frequência, baixo nível de ruído e também baixo custo.

O circuito eletrônico de medição foi montado no topo de um isolador de porcelana de 138kV tipo pedestal, cujo potencial de alimentação do circuito de medição “flutua” sobre a tensão da linha. Este circuito obtém a informação da corrente por meio de um TC de baixa isolamento acoplado ao cabo da linha. A tensão não é medida diretamente, mas sim através da monitoração dos campos elétricos na base e no topo do isolador. Como os sensores de campo são basicamente duas placas metálicas separadas por um dielétrico, formando um capacitor de baixo valor, pode-se alternativamente considerar que a tensão é na realidade obtida através de um divisor capacitivo formado pelos sensores de campo que estão na base, no topo do isolador e pelo próprio corpo do isolador.

Como a capacitância do isolador de porcelana é aproximadamente 1.000 vezes menor que a dos sensores, quando o isolador é submetido a uma tensão da ordem de unidades de kV, se tem nos sensores de tensão valores da ordem unidades de volts, que são lidos pelo circuito de aquisição através de divisores resistivos de alta impedância.

As informações adquiridas pelos sensores são condicionadas e convertidas por meio de um AD de 16 bits e transmitidas digitalmente, por um cabo de fibra óptica para um circuito na base do isolador. Este circuito por sua vez monitora a tensão no divisor capacitivo na base do isolador e transmite todas as informações coletadas, (corrente e tensões), para uma unidade central de processamento onde a tensão na linha é calculada, sendo gerada uma saída de sinal (4 a 20mA) proporcional a corrente e outra a tensão da linha. Além disso, para facilitar os ensaios a unidade de processamento é capaz de gerar registros oscilográficos dos sinais monitorados (com disparo manual dos registros).

4.1. Protótipo desenvolvido no primeiro ano do projeto

A Figura 4 mostra o diagrama em blocos do protótipo desenvolvido na primeira fase do projeto, composto de três circuitos eletrônicos:

- Módulo de transdução: Mede a corrente na linha e o campo elétrico no topo do isolador, gerando dois sinais digitais que são transmitidos serialmente via fibra óptica ao módulo de retransmissão;
- Módulo de retransmissão: Mede o campo elétrico na base do isolador, gerando um sinal digital. Este módulo recebe os sinais do módulo de tradução e os envia através de fibra óptica para o módulo de processamento;
- Módulo de processamento: Recebe as três amostras digitalizadas, uma corrente e duas tensões, por fibra óptica, calcula o valor RMS

de cada sinal podendo gerar registros oscilográficos dos três sinais monitorados e os transmite via interface serial RS-232. Este módulo também gera dois sinais de corrente de 4 a 20mA proporcionais a corrente e a tensão monitoradas.

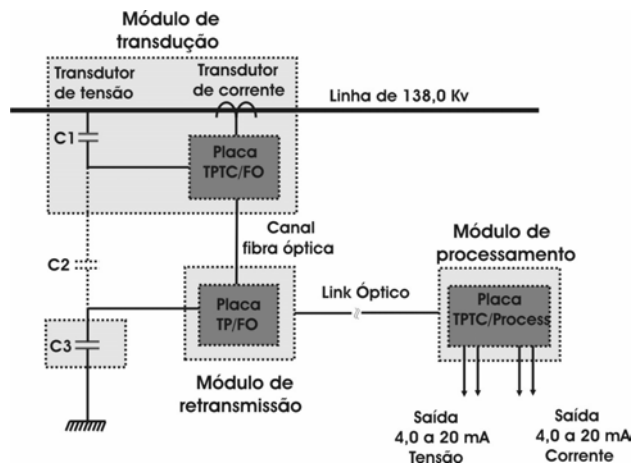


Figura 4 – Diagrama em blocos do medidor

No primeiro ano do projeto o objetivo foi o de ensaiar preliminarmente (em laboratório) o comportamento do TPC eletro-óptico desenvolvido, assim alguns problemas relativos a instalação do equipamento em campo só serão tratados na segunda fase do projeto (a qual está em curso). Desta forma no primeiro protótipo foi utilizado um isolador de porcelana tipo pedestal normal e os cabos de fibra óptica foram passados por fora do mesmo, conforme mostrado na figura 5.

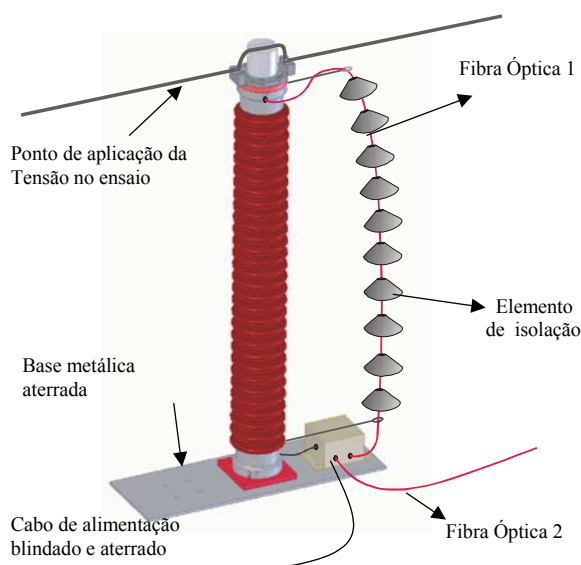


Figura 5 – Desenho mostrando a mecânica do primeiro protótipo desenvolvido.

Apesar de já se estar pesquisando um sistema de alimentação óptica para o circuito de transdução, para os testes laboratoriais optou-se pelo uso de baterias de Lithium-Íon. Esta estratégia permitiu a

divisão dos problemas com o intuito de facilitar o desenvolvimento da pesquisa.

4.2. Protótipo que está sendo desenvolvido no segundo ano do projeto

Na segunda fase do projeto (em andamento), será utilizado um isolador com características especiais como um furo interno para passagem. Como está prevista a instalação em campo (no pátio de uma subestação da CELESC), o equipamento terá que ser capaz de suportar os efeitos do clima como vento, chuva e calor devido à irradiação solar.

Um fator fundamental para o protótipo de campo é a utilização de um sistema de alimentação eletro-óptica para os circuitos de medição. Este sistema usa um laser cujo feixe de luz é enviado por fibra óptica até uma célula localizada no módulo de transdução, esta célula irá gerar uma tensão contínua com potência de até 400mW, suficiente para alimentar os circuitos de transdução que apresentam baixo consumo de energia elétrica. Com o uso desta tecnologia acredita-se ser plenamente viável a construção deste TPC híbrido para operar nas tensões de 138kV.

5. TESTES COM O PROTÓTIPO DESENVOLVIDO

Os testes do TPC híbrido desenvolvido foram divididos em duas etapas. Na primeira, foram efetuados ensaios de isolamento e operação básica. Estes ensaios foram realizados no laboratório de ensaio de alta tensão da CELESC.

Ensaio mais avançados, incluindo testes de compatibilidade eletromagnética e ensaios metrológicos, serão realizados no protótipo de campo ao final da segunda fase do projeto. Apesar deste encaminhamento, já durante os ensaios de isolamento e testes funcionais foram também realizadas algumas medições preliminares que permitiram uma avaliação metrológica primária do TPC. Neles observou-se que as incertezas dos instrumentos utilizados como padrão de medição são da mesma ordem de grandeza das incertezas previstas para o TPC híbrido. Desta forma não pode-se separar os erros devidos ao próprio TPC e os devidos ao sistema de medição. Para contornar este fato, na avaliação metrológica final serão utilizados equipamentos com incertezas menores.

5.1. Medição de corrente

A medição de corrente no TPC híbrido é bastante simples e não apresenta grandes problemas associados. Como foi utilizado um circuito magnético equivalente a um TC “sem núcleo” não existem problemas de saturação e desta forma para correntes mais elevadas o desempenho do TC deve ser mantido.

Nos ensaios realizados a corrente foi aplicada conforme mostrado nas tabelas a seguir, considerando duas faixas de medição: 20.000A (tabela 1) e 2.000A (tabela 2). Observa-se que na medição foi usado um amperímetro alicate e, portanto com uma baixa precisão de medição (erros estimados na faixa de até $\pm 5A$ até 250A e $\pm 10A$ até 500A).

Tabela 1 – Ensaio de corrente para ganho 1 (Até 20.000A).

Corrente aplicada (A)	Corrente medida		Erro	
	Valor CAD	(A)	(A)	(%)
100	325	98	2	0,01
200	620	187	13	0,07
300	979	296	4	0,02
400	1302	394	6	0,03
500	1689	511	-11	-0,06

Tabela 2 – Ensaio de corrente para ganho 10 (Até 2000A)

Corrente aplicada (A)	Corrente medida		Erro	
	Valor CAD	(A)	(A)	(%)
50	2376	54	-4	-0,20
100	4268	97	3	0,15
150	6512	148	2	0,10
200	9064	206	-6	-0,30
250	10868	247	3	0,15
300	12848	292	8	0,40
350	15620	355	-5	-0,25
400	17424	396	4	0,20
450	19624	446	4	0,20
500	22396	509	-9	-0,45

5.2. Medição de tensão

A medição de tensão é um fator que merece maior atenção no medidor, visto que na realidade o que é efetivamente medido é o campo elétrico na base e no topo do medidor/isolador. TPs ópticos trabalham com este mesmo princípio mas medem também o campo em pontos dentro do isolador (3 a 4 pontos de medida no total).

Desta forma a tensão final é obtida utilizando-se as duas informações do campo elétrico no topo e na base do isolador. A tabela 5 mostra o resultado dos ensaios de medição de tensão, apresentando erros da ordem de 0.5% que é basicamente a incerteza do medidor padrão utilizado no ensaio. Os erros

maiores no final da tabela são devidos a saturação do transdutor, pois o valor aplicado está fora da faixa de medição, mas deve ser suportado pelo mesmo.

Tabela 3 – Tensão média e seu respectivo erro absoluto e percentual.

Tensão aplicada (kV)	Tensão Média (kV)	Erro na Tensão Média (kV)	Erro na Tensão Média (%)
4,2	4,50	-0,3	-0,15
18,1	17,95	0,15	0,07
19,9	19,75	0,15	0,07
41,7	40,75	0,95	0,50
47,5	47,00	0,5	0,26
67,2	67,40	-0,2	-0,10
97,2	96,65	0,55	0,28
123,0	122,05	0,95	0,50
145,0	144,70	0,3	0,15
151,0	150,50	0,5	0,26
175,0	174,95	0,05	0,02
190,1	182,80	7,3	3,84
192,0	184,95	7,05	3,71

6. CONCLUSÃO

Através dos dados obtidos nos ensaios realizados com o primeiro protótipo do TPC híbrido pode-se observar que o mesmo se comportou como previsto e passou sem problemas nos testes de isolamento e testes funcionais básicos. Apesar de que os ensaios metrológicos estarem previstos apenas para o protótipo de campo (que está sendo desenvolvido atualmente) pôde-se, com base nas medições já realizadas observar erros de medição bastante reduzidos e que na realidade são da mesma ordem de grandeza dos instrumentos utilizados, ou seja, o TPC pode ter incertezas ainda menores.

No protótipo de campo será utilizado um sistema de alimentação óptica e também será prevista a instalação dos mesmos sob os rigores do clima, considerando problemas de umidade, acúmulo de poeira e temperatura. Serão construídos 3 protótipos que após serem devidamente ensaiados em laboratório serão instalados em campo em paralelo com TPCs convencionais. Os autores acreditam que terão condições de desenvolver um equipamento que pode ser facilmente aprimorado na direção de um produto comercial, com custo inferior aos TPCs convencionais.

Como as incertezas de medição dos TPCs convencionais é da ordem de até 5% e as incertezas já observados no TPC híbrido são inferiores a 0.5% , certamente já existe uma vantagem na sua utilização sob o ponto de vista metrológico. Além disso, a

faixa de frequência do TPC híbrido é muito maior que a dos TPCs convencionais e não existem problemas de injeção de ruídos nos cabos que transmitem a informação pois são todos de fibra óptica, o que também gera um alto grau de segurança na operação do equipamento.

Desta forma o grande fator limitante para o uso prático da tecnologia desenvolvida no projeto, será a compatibilização com os relés digitais que hoje recebem sinais dos TPCs convencionais (na faixa de 115V e 100A). Acredita-se que não será difícil estabelecer uma parceria com um fabricante de relés a fim de disponibilizar uma conexão digital para conexão ao TECT/FO. Este tipo de ligação além de ser mais imune a ruídos também proporciona um alto grau de isolamento e segurança tanto para os equipamentos quanto para quem os opera.

Assim, com base nos resultados preliminares de ensaios realizados e aqui apresentados os autores acreditam que no final do projeto do transdutor híbrido de corrente e tensão com comunicação por fibra óptica terão dado um importante passo na viabilização prática das tecnologias de TPCs híbridos viabilizando uma aplicação em escala da mesma com grandes vantagens com relação as tecnologia de TPCs convencionais, inclusive um custo menor.

7. REFERÊNCIAS

- [1] P. C. Oliveira, *Análise de Transformadores de Corrente para Medição*, Dissertação de mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- [2] A. F. S. Levy, Et all, “Diagnóstico integrado de transformadores de potência – Aplicação”, XV SNPTTE, Foz do Iguacu, Paraná, Brasil, outubro de 1999.
- [3] D. KIND, “An Introduction to High-Voltage Experimental Technique”, Braunschweig: Fried. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, pp 3-13, 1978.
- [4] M.C. TAPLAMACIOGLU, Design and Constution of a Pure High Voltage Capacitance Divider, M. Sc. thesis, Middle East Technical University, Electrical Engineering Department, Ankara, Turkey, 1986.
- [5] NBR 6856/92, Transformador de Corrente – Especificação, Rio de Janeiro, Abril 1992.
- [6] J.C. SANTOS, M.C. TAPLAMACIOGLU, K. HIDAKA, Pockels Hight-Voltage Measurement System, Transactions on Power Delivery, Vol. 15, NO. 1, January 200.
- [7] J. C. Santos, New optical Pockels techniques for direct measurement of high voltage, Doctor Thesys, University of Tokyo, December, 1996.
- [8] E.A. UDREN, T.W. CEASE, “Transmission Line Protection with Magneto-Optic Current Transducer and Microprocessor-Based Relays”, *Georgia Tech*

Protective Relaying Conference, pp 1-21, May 1-3, 1991.

- [9] G. SCHETT, F. ENGLER, F. JAUSSE, K. PETTERSSON, A. KACZKOWSKI, “The intelligent GIS – A Fundamental Change in the Combination of Primary and Secondary Equipment”, Cigré, artigo 104, Working Group 34, Paris, Session – 1996.
- [10] J. SONG, P.G. MCLAREN, D.J. THOMSON, R.L. MIDDLETON, “A Prototype Clamp-on Magneto-Optical Current Transducer for Power System Metering and Relaying”, IEEE Power Engineering Review, p. 50, October 1995.
- [11] Y.N. Ning, Z.P. Wang, A. W. Palmer, K.T.V. Gratan. “Recent Progress in Optical Current Sensing Techniques”. Ver. Sci. Instrum., 66 (5), May 95.
- [12] N.A. PILLING, R. HOLMES, G.R. JONES, “Low-power optical current measurement system employing a hybrid transmitter”, IEE-Proceedings-Science,-Measurement-and-Technology, 141(2), p.p.: 129-34, London, UK, March 1994.
- [13] C. BO, S. QIUFENG, Y. CHENGQUN, Y. YIHAN, “Study on a new optoelectronic current transformer”, Proceedings of PowerCon2002.-2002-International-Conference-on-Power-System-Technology, Cat.-No.02EX572, vol.2, p.p. 1105-1109, 2002.
- [14] E.F. DONALDSON, J.R. GIBSON, G.R. JONES, N.A. PILLING, B.T. TAYLOR, “Hybrid optical current transformer with optical and power-line energisation”, IEE-Proceedings-Generation,-Transmission-and-Distribution, 147(5), p.p.: 304-9, Sept. 2000.
- [15] R. GROSS, H.J. HERRMANN, U. KATSCHINSKI, P. MENKE, A. OSTERMEIER, J. SCHMID, M. WACHE, “Substation Control and Protection Systems for Novel Sensors”, Cigré, Working Group 34, Paris, Session – 2000.
- [16] P.M. Silveira, C.A.M. Guimarães, “Novos Transdutores de Corrente e de Potencial em Alta Tensão: Estado de Arte, Tendências e Aplicações”, XIV SNPTEE, Grupo 4, Belém, 1997.
- [17] A. Wirth, Tudo Sobre Fibras Ópticas, Alta Books, Rio de Janeiro, 2002.
- [18] J.A.J. Ribeiro, Comunicações Ópticas, Érica, São Paulo, 2003.
- [19] B. CULSHAW, J. DANKIN, “Optical Fiber Sensors: Systems and Applications”, Artech House, Inc., 1989.