

# Desenvolvimento de uma Metodologia para a Calibração de Transformadores de Potencial em Campo

Wilson R. E. Maftoum, LACTEC; Celso Fabrício de Melo, LACTEC;  
Minoru Ikeda, LACTEC e José Amilton Sidor, COPEL

## RESUMO

Este artigo apresenta dois dos principais métodos utilizados na calibração em laboratório de transformadores de potencial de alta tensão baseados em transformadores de potencial padrão ou em divisor eletrônico padrão. Para calibração no campo, é sugerido a utilização de um transdutor de tensão baseado em sensores opto-eletrônicos como padrão de referência. Transformadores de potencial ótico apresentam muitas vantagens em relação aos transformadores de potencial convencionais. O sistema ótico desenvolvido para tensões nominais fase-fase de 69kV e 138kV foi testado em laboratório de alta tensão na faixa de 10% a 120% da tensão nominal fase-terra. Os resultados encontrados após ajuste mostram erros de relação menores que 0,1% para toda a faixa e ângulos de fase menores que 1' para tensões acima de 40% da nominal e ótima estabilidade.

## PALAVRAS-CHAVE

Calibração, Metrologia, Transdutor de tensão.

## I. INTRODUÇÃO

Transformadores de potencial são essenciais para a medição precisa de tensão em sistemas de potência de alta tensão fornecendo um nível de tensão adequado para medição de energia, controle e proteção. Grandes quantidades de energia são fornecidas e os erros de medição existentes podem resultar em prejuízos econômicos substanciais tanto para o consumidor quanto para a concessionária.

Transformadores de potencial convencionais são largamente utilizados nas redes de distribuição e transmissão das concessionárias de energia. A medição de energia para faturamento tem se tornado cada vez mais importante principalmente devido a desregulamentação do setor de energia no Brasil. Esta medição depende em grande parte das medidas exatas de tensão e corrente em alta tensão.

Na metodologia mais comum utilizada na calibração

de Transformadores de Potencial (TPs), mede-se o erro de relação e o erro de fase (ensaio de exatidão) através de uma ponte tipo Schering-Alberti, ou Comparador Automático, com TPs padrões ou Capacitores Padrão, além de fontes de alta tensão e cargas. Este ensaio é normalmente realizado em laboratórios de calibração principalmente quando da aquisição de um novo TP antes da sua instalação no campo. Após a sua instalação no campo, os TPs raramente voltam a ser calibrados no laboratório, quando por alguma razão forem substituídos para reparo.

As concessionárias possuem milhares de TPs instalados no campo que não são calibrados periodicamente devido ao problema da sua retirada, que envolve interrupção do fornecimento e utilização de TP reserva, risco de danos durante o manuseio e transporte principalmente em equipamentos de extra alta tensão

Com a conscientização criada pela implementação de sistemas de gestão pela qualidade por algumas concessionárias e a nova regulamentação do setor elétrico, torna-se necessário estabelecer um programa de calibração periódico que inspecione e calibre os TPs instalados no campo, principalmente aqueles relacionados com faturamento.

Uma alternativa mais econômica com menor risco de danos seria a realização da calibração dos TPs no campo sem necessidade de interrupção do fornecimento de energia. Este serviço apresenta como vantagens o fato de usar a própria rede como fonte de tensão calibrando os TPs nas condições reais de carregamento.

A Suécia realizou um programa de calibração no campo iniciado em 1989 conforme relatado por Bergman [1], envolvendo 549 transformadores de potencial capacitivo (TPCs). O transformador de referência usado é do tipo indutivo multi-relação de alta exatidão, com isolamento apropriado para linhas de 400kV. O transformador de referência foi transportado num vagão e içado para a posição vertical por meio de um cilindro hidráulico antes de ser conectado ao barramento de alta tensão. O estudo da estabilidade ao longo do tempo permitiu concluir que TPCs classe 0,5 e 0,6 deveriam ser calibrados em intervalos de 7 anos e classe 0,2 em intervalos de 20 anos.

Neste trabalho são analisados os principais arranjos que podem ser utilizados para a calibração de TPs no campo e os tipos de padrões disponíveis, incluindo o uso de TPs não convencionais com sensor ótico.

A equipe técnica agradece o apoio da Copel Distribuição S.A. e da Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel.

Wilson R. E. Maftoum trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC (e-mail: maftoum@lactec.org.br).

Celso Fabrício de Melo trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC (e-mail: celso@lactec.org.br).

Minoru Ikeda trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC (e-mail: minoru@lactec.org.br).

José Amilton Sidor trabalha na Copel Distribuição S.A. (e-mail: sidor@copel.com).

## II. TRANSFORMADORES DE POTENCIAL NA COPEL

O estudo se concentrou na caracterização dos TPs instalados para medição de faturamento, representando um universo de 3767 equipamentos em todo o estado do Paraná (dados do primeiro trimestre de 2003). Foram observadas características como tipo, classe de exatidão, tensão nominal do primário, tensão nominal do secundário e local instalado.

Os TPs usados para medição de faturamento são todos do tipo indutivo. Os TPs com tensão primária de 13,8kV são maioria no sistema elétrico da COPEL representando 3245 equipamentos ou aproximadamente 86% do total. Os TPs de 34,5kV representam 399 equipamentos ou aproximadamente 11% do total. Há ainda 40 TPs de 69kV, 19 de 138kV e 10 de 230kV instalados em grandes consumidores.

## III. SISTEMAS DE CALIBRAÇÃO CONVENCIONAIS

Os sistemas automáticos para calibração de transformadores de potencial vendidos comercialmente admitem dois métodos de medição: comparação direta com um TP padrão ou comparação direta com um divisor eletrônico padrão. Um conjunto automático para ensaio de exatidão de transformadores de potencial (automatic instrument transformer test set - AITTS) é usado para medir rapidamente o erro de relação e o ângulo de fase do TP sob calibração pelo método diferencial.

Características especiais incorporadas ao AITTS permitem a medição da exatidão mesmo que o TP sob calibração e o TP padrão tenham diferentes relações.

### A. Comparação Direta com TP Padrão

A figura 1 apresenta um esquema de ligação típico de comparação direta em laboratório usando um TP indutivo padrão multirelação como referência.

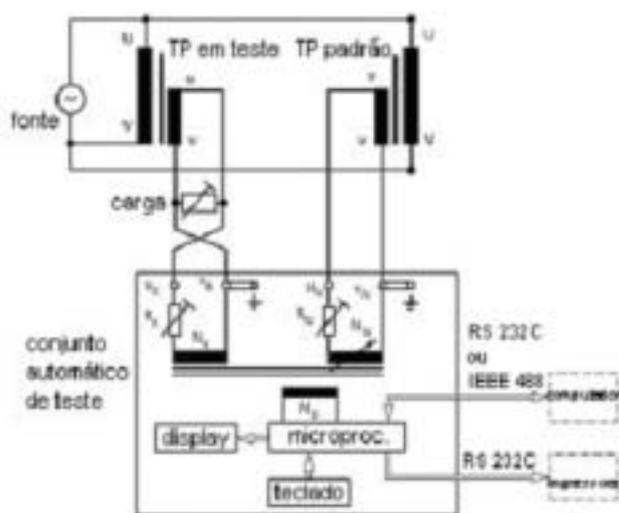


FIGURA 1 - Esquema de ligação do AITTS com TP padrão

O primário do TP padrão e do TP em teste são conectados à saída da fonte de alta tensão. Uma carga padrão é conectada ao secundário do TP sob calibração e este aos terminais Ux e Vx no AITTS. O secundário do TP padrão é conectado aos terminais UN e VN no AITTS.

### B. Comparação Direta com Divisor Eletrônico Padrão

A figura 2 apresenta um esquema de ligação típico de comparação direta em laboratório, usando um divisor eletrônico padrão como referência.

O divisor eletrônico padrão é formado por um divisor capacitivo de alta tensão e um dispositivo eletrônico. O divisor capacitivo é formado por um capacitor padrão de alta tensão e um capacitor a ar de baixa tensão com tensão máxima de 1000 Vrms.

O primário do TP em teste e a entrada do capacitor padrão de alta tensão são conectados à saída da fonte de alta tensão. Uma carga padrão é conectada ao secundário do TP em teste e este aos terminais Ux e Vx no AITTS. A saída do divisor eletrônico padrão é conectada aos terminais UN e VN no AITTS.

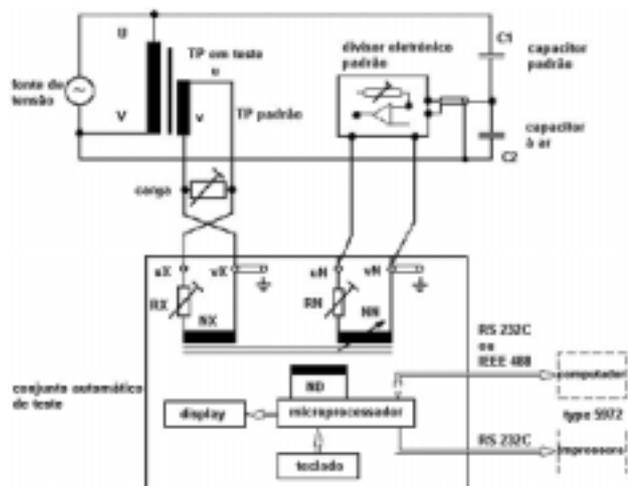


FIGURA 2 - Esquema de ligação do AITTS com Divisor Eletrônico Padrão

## IV. TRANSDUTOR ÓTICO DE TENSÃO

Transdutores de tensão convencionais como transformadores de potencial indutivo, apresentam algumas desvantagens tais como: limitações na resposta transitória e suscetibilidade à interferência eletromagnética na transmissão do sinal ao sistema de medição além de peso excessivo.

Christensen [2] relata que sistemas de medição com sensores óticos para alta tensão (efeito Pockels), possuem uma série de vantagens não obtidas com técnicas convencionais.

Sensores óticos provêm uma separação galvânica total entre o ponto de medição no potencial de alta tensão e o equipamento de medição no potencial terra. A transmissão do sinal de medição em fibras óticas é imune a ruídos eletromagnéticos induzidos. O isolamento é independente do nível de tensão com vantagens econômicas para tensões acima de 100kV. O peso do sistema é bastante reduzido em comparação com o sistema convencional. Transformadores óticos de tensão possuem alta exatidão e uma grande largura de faixa. Os sinais de saída são facilmente interfaceados com computadores e equipamentos eletrônicos.

Todas as vantagens acima, em especial o peso reduzido e a alta exatidão, qualificam o transdutor ótico de tensão para

ser usado como transformador de potencial padrão em calibrações no campo. São encontrados facilmente no mercado TPs óticos classe 0,2 e, sob encomenda, classe 0,1 suficiente para calibração de TPs convencionais indutivos classe 0,3 e acima. Além disso, tais sistemas óticos podem ser fornecidos com dispositivos eletrônicos na sua saída que transformam o sinal ótico em sinal de tensão analógico amplificando-o para tensões de até 120V. Este sistema eletrônico permite a compensação dos erros de relação e ângulo de fase.

#### A. Transformador de Potencial Ótico

A figura 3 mostra o sistema ótico desenvolvido pela NxtPhase Corporation para utilização no campo como padrão de referência. Este sistema possui entrada para duas tensões nominais (120kV e 69kV) e classe de exatidão 0,2 com interface analógica para amplificação do sinal de saída para tensões de até 115Vrms e cargas de 2,5VA. Um detalhe da interface eletrônica é mostrado na figura 4.

O isolamento, feito de material composto, e a base para acoplamento das fibras óticas possuem um peso aproximado de 110kg. Este peso relativamente baixo facilita o manuseio do conjunto, principalmente quando tiver que ser instalado no campo. A interface eletrônica tem um peso aproximado de 15kg e pode ser manuseada independentemente do sistema ótico (coluna e base).

Um programa de computador dedicado permite atuar diretamente sobre a interface eletrônica para a realização de correções do erro de relação e ângulo de fase medidos, permitindo desta forma que o Transformador de Potencial Ótico tenha erros compatíveis com classe de exatidão 0,1 ou menor, apropriados para o padrão de referência desejado. Este programa é usado também para comutar entre as tensões primárias de 138kV e 69kV fase-fase. Para manuseio no campo é recomendável a utilização de um notebook.



FIGURA 3 - Transformador de Potencial Ótico (138kV e 69kV)

A parte mais sensível do conjunto são os cabos de fibra ótica que quebram com facilidade e precisam ser manuseados com muito cuidado. A figura 5 mostra os cabos e conectores de fibra ótica ligados na interface eletrônica.

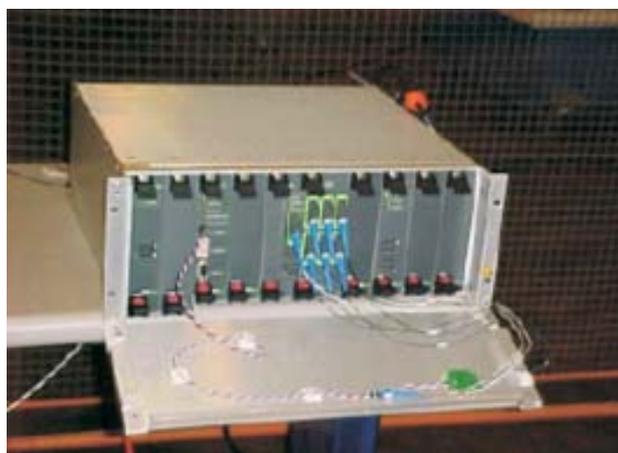


FIGURA 4 - Interface eletrônica do Transformador de Potencial Ótico.

#### B. Calibração do Transformador de Potencial Ótico

O TP Ótico desenvolvido para ser utilizado como referência na calibração de TPs no campo, foi calibrado em laboratório de alta tensão utilizando um divisor eletrônico padrão como referência conforme circuito da figura 2.

O primário do TP Ótico em teste e a entrada do capacitor padrão de alta tensão foram conectados à saída da fonte de alta tensão. O secundário do TP Ótico, sem carga, e a saída do divisor eletrônico padrão foram conectados aos terminais de entrada do AITTS. A figura 5 apresenta uma ilustração da calibração realizada em laboratório.



FIGURA 5 - Calibração do TP Ótico no laboratório.

Em primeiro plano na foto da figura 5, aparecem o capacitor padrão de alta tensão (100kV) e o capacitor a ar de baixa tensão, partes integrantes do divisor eletrônico padrão. A esquerda está situado o TP Ótico padrão sob calibração e ao fundo a fonte de alta tensão Hipotronics.

O ensaio foi executado para as tensões primárias nominais fase-terra de 138kV/3 e 69kV/3, respectivamente. O teste foi realizado para 12 valores de tensão situados entre 10% e 120% da tensão nominal fase-terra. O resultado do primeiro teste mostrou valores de -0,24% a -0,16% para o erro de relação e de -12' a 8,7' para o ângulo de fase.

Os erros de relação e o ângulo de fase foram ajustados para valores inferiores à classe 0,1 utilizando-se do programa do TP Ótico. O gráfico da figura 6 apresenta o resultado para os erros de relação e da figura 7 o resultado para os ângulos de fase medidos após ajuste para tensões situadas entre 10% e 120% da tensão nominal fase-terra 138kV/3.

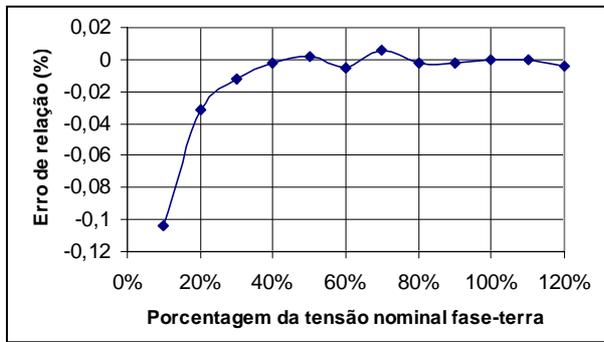


FIGURA 6 - Erros de relação para a tensão nominal de 138kV.

Os erros de relação medidos ficaram em -0,1% para 10% da tensão nominal fase-terra e em 0% medidos entre 80% e 120% da tensão nominal fase-terra.

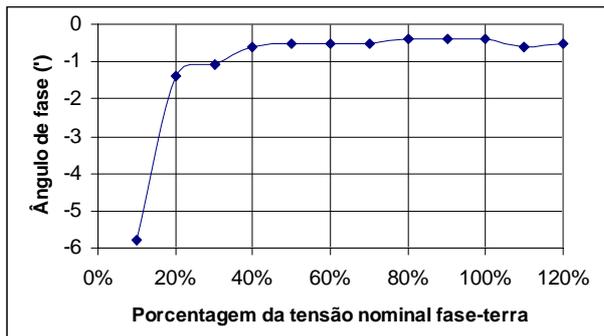


FIGURA 7 - Ângulos de fase para a tensão nominal de 138kV.

Os ângulos de fase medidos ficaram com -5,8' para 10% da tensão nominal fase-terra e entre 0,4' e 0,6' medidos entre 40% e 120% da tensão nominal fase-terra.

Os resultados obtidos para a tensão nominal fase-terra de 69kV/ 3 foram ainda melhores, resultando em erros de relação menores que 0,03% para toda a faixa de teste e ângulos de fase menores que 0,5' para a faixa entre 20% e 120% da tensão nominal fase-terra.

Todos os resultados acima mencionados foram obtidos em medições realizadas logo após o tempo de aquecimento da interface eletrônica (30 minutos).

O teste de estabilidade realizado para a tensão nominal de 69kV/ 3, demonstrou que os erros de relação variaram entre 0,03% e 0,06% em 24 horas. Neste mesmo período, o ângulo de fase variou entre -0,5' e 0,6'. A temperatura ambiente oscilou entre 19°C e 25°C durante o ensaio.

### C. Sistema de Calibração com TP Ótico de Referência

O TP Ótico desenvolvido pode ser utilizado como TP padrão na calibração de TPs indutivos com tensões primárias de até 138kV fase-fase. O esquema de ligação para calibração de TPs convencionais no campo usando um TP Ótico calibrado como referência é semelhante ao mostrado na figura 2.

O primário do TP Ótico padrão e do TP indutivo em teste são conectados à saída da fonte de alta tensão, que neste caso é a própria linha de alta tensão que alimenta o TP em teste. A instrumentação de medição é a carga que deve ser conectada ao secundário do TP sob calibração e este aos terminais Ux e Vx no AITTS. O secundário do TP Ótico padrão é conectado aos terminais UN e VN no AITTS.

O equipamento de medição AITTS, a interface eletrônica e o computador podem ser instalados dentro de um furgão configurado como uma gaiola de Faraday e com condicionamento do ar. É recomendável que a alimentação dos instrumentos e da interface eletrônica seja feita através de um transformador de isolamento. Um ponto de aterramento único é utilizado situado no terra do TP em teste.

## V. CONCLUSÕES

A calibração dos TPs indutivos de alta tensão instalados na rede de distribuição para efeitos de medição de faturamento devem ser realizadas periodicamente. O intervalo de calibração necessita ser determinado em estudo específico mas como ponto de partida um intervalo inicial de três anos pode ser adotado.

Por razões logísticas e econômicas, recomenda-se a realização destas calibrações no próprio local da instalação sem necessidade de desligamento. Assim, o valor do erro de relação e do ângulo de fase podem ser determinados nas condições reais de carregamento.

O transformador de potencial ótico desenvolvido apresenta muitas vantagens técnicas para ser usado como padrão de referência para tensões nominais fase-fase entre 13,8kV a 138kV. Características como baixo peso e altura, grande largura de faixa (até 6kHz), possibilidade de correção do erro de relação e ângulo de fase e estabilidade de curto prazo, tornam este transdutor apropriado para servir como padrão no campo. Uma desvantagem está na necessidade de manuseio freqüente dos cabos de fibra ótica, a parte mais sensível do conjunto, que pode ser minimizada com treinamento da equipe técnica.

## VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao engenheiro José Arinos Teixeira Junior do Laboratório de Alta Tensão do LACTEC e ao estagiário Alberto Luís Krawczyk do Laboratório de Metrologia do LACTEC, cuja contribuição tornou possível a realização deste trabalho.

## VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Bergman, "Insitu calibration of voltage transformers on the Swedish national grid," in 8th International Conference on Metering and Tariffs for Energy Supply, (Conf. Publ. No. 426), pp. 227-239, 1996.
- [2] L. H. Christensen, "Design, construction, and test of a passive optical prototype high voltage instrument transformer," IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 10 Issue 3, pp. 1332-1337, July 1995.
- [3] J. C. Santos, M. C. Taplamacioglu, and K. Hidaka, "Pockels high-voltage measurement system," IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 15 Issue 1, pp. 8-13, Jan. 2000.
- [4] F. Rahmatian, P. P. Chavez, and N. A. F. Jaeger, "Wide-band 138 kV distributed sensor optical voltage transducer: study of accuracy under pollution and other field disturbances," in Power Engineering Society Summer Meeting, 2001, Volume 1, pp. 156-161, 2001.
- [5] R. I. García, and E. G. Zaretsky, "Calibracion 'In Situ' de transformadores de medida en la red electrica," in II Congresso Brasileiro de Metrologia - Metrologia 2000, pp. 429-435, 2000.
- [6] A. Bergman, "Estimation of errors of voltage transformers on-site and the uncertainty of the estimate," in Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest, pp. 415-216, 2000.
- [7] J. I. Juvik, and M. Nilsson, "Calibration system and uncertainty budget for instrument transformers with digital output," in 11th International Symposium on High Voltage Engineering (Conf. Publ. No. 467), Volume 1, pp. 234-237, 1999.