



**XX SNTPEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
XXX.YY  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

**GRUPO - VIII**

**GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÃO E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO**

**ASPECTOS CONSTRUTIVOS DE UM MEDIDOR ELETRO-ÓPTICO HÍBRIDO DE TENSÃO E CORRENTE COM APLICAÇÃO EM SUBESTAÇÕES 550 kV**

**A. C. Zimmermann\*    P. B. Uliana    M. Wendhausen    C. N. Carvalho    V. V. Coelho    M. A. Zatta  
UFSC/LABMETRO    DOCUMENTTA    DOCUMENTTA    ELETROSUL    ELETROSUL    ELETROSUL**

**RESUMO**

O presente artigo apresenta aspectos de projeto, construção e ensaio de um medidor eletro óptico híbrido de tensão e corrente para uso em medição e proteção em linhas de transmissão de classe 550 kV (MPC-550kV). Esta tecnologia possui vantagens sobre os TPs e TCs convencionais como, a operação a seco (sem óleo), diminuição dos riscos de explosão, aumento da segurança da equipe de manutenção, com erros de medição compatíveis com as exigências da medição para faturamento,

**PALAVRAS-CHAVE**

Medição de Tensão, TP Óptico, Medição de Campo Elétrico

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O presente artigo descreve medidor de tensão e corrente com tecnologia eletro óptica híbrida, desenvolvido dentro do programa de P&D da ANEEL e patrocinado pela ELETROSUL Centrais Elétricas S.A. denominado "MPC Eletro-Óptico para Monitoração de Linhas de 500 kV". Este projeto foi executado pelo Laboratório de Metrologia e Automatização da UFSC - LABMETRO em parceria com a empresa Documentta Tecnologia Ltda e em cooperação com o Grupo de Pesquisas em Sistemas Eletromagnéticos e de Energia – SELMAG da FURB.

Atualmente (março de 2009) o projeto se encontra em fase de conclusão com um primeiro protótipo completamente desenvolvido e mais dois protótipos em fase de produção. Alguns ensaios básicos de medição de corrente e tensão e testes de isolamento já foram realizados no laboratório de alta tensão da ELETROSUL – LALTE,

O equipamento ainda será submetido a ensaios de impulso de tensão nos laboratórios do CEPEL antes de ser instalado em campo numa subestação de 550 kV da ELETROSUL a ser definida. Serão instalados três equipamentos na entrada de uma linha de 550 kV a fim de avaliar o comportamento do equipamento desenvolvido em uma condição real de operação.

As principais características do protótipo industrial do MPC-550kV desenvolvido são:

- Medição simultânea de corrente e tensão, com medição de tensão na faixa de até 550 kV e medição de corrente em duas faixas: 4 kA e 40 kA;
- Alto grau de confiabilidade e sem risco de explosão;
- Utilização de fibras ópticas como meio de transmissão da informação;
- Resposta em frequência da ordem de 20 kHz;

\* Laboratório de Sensores Ópticos do LABMETRO – UFSC, Depto de Eng. Mecânica, Centro Tecnológico, Campus Universitário, Cx. Postal 5053, CEP 88040 970, Florianópolis, SC, Brasil  
Tel: (+55 48) 3239 2033 – Email: acz@labmetro.ufsc.br

- Erro de linearidade inferior a 0.5%.
- Imunidade total aos problemas de compatibilidade associados a este nível de tensão;
- Custo reduzido.

Este tipo de equipamento tem claras vantagens em relação aos TPs e TCs convencionais que hoje são amplamente utilizados no sistema de transmissão Brasileiro. Além de reunir em um único equipamento um TP, um TC de medição e um TC de proteção, o MPC-550kV devido à tecnologia utilizada possui um alto grau de imunidade às interferências eletromagnéticas e também não transmite sinais elétricos de potência para dentro das cabines de controle das subestações.

No Brasil, equipamentos de medição puramente ópticos como os, por exemplo, produzidos pela empresa NxT-Phase tem sido aplicados pontualmente na monitoração de tensão em algumas aplicações especiais enquanto equipamentos híbridos como o DOIT produzido pela ABB tem sido aplicados principalmente na monitoração da corrente em bancos de capacitores. A aplicação em larga escala destes equipamentos tem sido limitada basicamente por dois fatores:

- Alto custo dos equipamentos;
- Problemas de compatibilidade com os equipamentos de medição e proteção que operam com níveis relativamente elevados de corrente (até 100 A) e tensão (115 V);

Entretanto com o barateamento das tecnologias e a mudança de paradigmas no interfaceamento dos equipamentos de medição e proteção que está sendo promovida por iniciativas como a norma IEC61850 (1) deverão se abrir as portas para o uso de tecnologias ópticas e híbridas de monitoração de corrente e tensão como a que será descrita com mais detalhes a seguir.

## 2.0 - TRANSDUTORES NÃO CONVENCIONAIS DE CORRENTE E TENSÃO

Os transdutores não convencionais de corrente e tensão tem princípio de operação bastante distintos dos TPs e TCs convencionais. Atualmente, entre os diversos tipos de transdutores existentes dois grupos de destacam os transdutores ópticos e híbridos;

### 2.1 Transdutores ópticos

Os transdutores ópticos operam segundo o princípio da variação de propriedades ópticas de certos materiais quando submetidos a campos elétricos ou magnéticos. Desta forma as variações nos campos elétricos e magnéticos são medidas por meio de feixes de luz os quais são levados ao sensor através de cabos de fibras ópticas. Para estes transdutores o problema de isolamento elétrica que é crítico nos TPs e TCs convencionais, é automaticamente eliminado, pois tanto as fibras como os sensores ópticos são materiais eletricamente isolantes.

Os transdutores ópticos de corrente (TCs ópticos) normalmente se baseiam no efeito Faraday (2) enquanto os transdutores ópticos de tensão (TPs ópticos) são baseados no efeito Pockels (3).

Os transdutores ópticos têm uma resposta em frequência bastante ampla e de altíssima linearidade e exatidão. Devido à isolamento 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 as tecnologias ópticas, o uso do TPs e TCs ópticos ainda é muito pequeno, ainda com poucos fornecedores de equipamentos como o caso do fabricante NxT-Phase (AREVA).

### 2.2 Transdutores híbridos

Os transdutores híbridos utilizam fibras ópticas apenas para a transmissão de informações coletadas por transdutores elétricos e eletrônicos que se encontram no mesmo potencial da linha. A informação transmitida pode ser um sinal analógico proporcional a intensidade da luz transmitida, como por exemplo, a saída de uma bobina ligada diretamente a um emissor de luz conectado a fibra óptica, entretanto este tipo de transmissão tem diversos problemas de precisão. Num esquema mais completo é utilizado um circuito eletrônico de condicionamento conectado a um CAD (Conversor Analógico Digital) ligado a uma interface serial de alta velocidade que transmite pela fibra óptica o valor digital lido pelo CAD.

Este esquema permite uma alta precisão principalmente para o caso da medição de corrente onde uma medição direta na linha pode ser realizada com a utilização de bobinas de Rogowski (4) ligada ao mesmo potencial da linha. Este tipo de sensor não tem problemas de saturação por possuir núcleo não magnético e, além disso, e bastante imune a ruídos externos. Já para a medição de tensão os transdutores híbridos sofrem o mesmo problema dos transdutores ópticos, sendo medido o campo elétrico em alguns pontos a partir dos quais é calculada a tensão.

Os transdutores híbridos também têm alta resposta em frequência e sua linearidade e precisão é bastante elevada, se bem que tendendo a um valor um pouco menor que a dos transdutores ópticos. A isolação óptica utilizada também permite que o sinal monitorado seja disponibilizado de forma isenta de ruídos, sem problemas de compatibilidade eletromagnética e com total segurança ao usuário.

Um grande problema tecnológico para a implementação deste tipo de sensor é a alimentação dos circuitos eletrônicos que se encontram no mesmo potencial da linha. Este problema tem sido tratado com uma série de técnicas que vão da captação de energia da própria linha ao uso de células solares que carregam baterias de alta duração, entretanto todas estas soluções são críticas, principalmente para aplicação em sistema de alta tensão.

### 3.0 - ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO MPC-550KV

O MPC-550kV desenvolvido é basicamente um transdutor híbrido que monitora simultaneamente corrente e tensão dentro de uma subestação de transmissão de energia no nível de 550 kV.

O equipamento é composto basicamente por um corpo isolado dentro do qual são colocados três sensores de campo elétrico que permitem o cálculo da tensão a ser monitorada. Além disso, no topo do equipamento foi instalado um cabeçote dentro no qual está fixado um link de corrente, que é basicamente um tarugo de cobre no qual são conectados os dois terminais da linha monitorada. Em torno deste link foram instaladas duas bobinas de Rogowski que permitem a monitoração de correntes na faixa de 4 kA e 40 kA respectivamente.

O corpo do MPC foi obtido pela conexão de três isoladores cerâmicos. Os isoladores são ocios e dentro de cada um deles fica alojado um sensor de campo elétrico. Para evitar a entrada de umidade no interior dos isoladores e garantir a isolação do equipamento o interior do mesmo foi pressurizado com duas atmosferas de nitrogênio seco,

A seguir alguns aspectos importantes do projeto MPC-550kV são apresentados com mais detalhes.

#### 3.1 Sistema de alimentação

No MPC-550kV a alimentação dos circuitos eletrônicos de cada um dos quatro sensores (três de campo elétrico e um de corrente) foi realizada por meio do sistema de alimentação óptico.

#### 3.2 O problema da medição de tensão

Tanto os TPs ópticos quanto os TPs híbridos não medem a tensão diretamente, pois neste caso seria necessário conectar uma carga ao ponto de potencial e monitorar a corrente sobre a mesma, o que não é desejável por aspectos de segurança e isolação. Desta forma estes equipamentos normalmente medem o campo elétrico em alguns pontos no eixo do isolador e calculam a tensão aplicada sobre o mesmo com base na seguinte relação que é derivada das equações de Maxwell (Equação 1):

$$V_{ab} = - \int_{\Gamma_{ab}} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1)$$

Onde  $\Gamma_{ab}$  representa um caminho qualquer no espaço entre os pontos a e b para os quais se deseja obter a tensão, sendo o vetor  $E$  associado ao campo elétrico observado no intervalo vetorial  $d\vec{l}$  que forma este caminho. Para um caminho linear definido sobre um eixo  $y$  que conecta o ponto de injeção de tensão no topo do isolador com o plano de terra, esta equação pode ser simplificada para (Equação 2):

$$V_a = - \int_0^a E_y(y) dy \quad (2)$$

Neste caso o campo elétrico passa a ser uma grandeza escalar, pois o mesmo é medido ao longo do eixo  $y$ . Esta integral pode ser aproximada por uma somatória de pontos:

$$V_a = - \int_0^a E_y(y) dy \approx - \sum_{i=1}^N \alpha_i E_y(y_i) \quad (3)$$

Na Equação 3, são definidos  $N$  pontos de medição para o campo elétrico ao longo do eixo  $y$ , sendo o valor de campo medido sobre cada ponto ponderado por um fator de ganho individual, que varia em função do intervalo espacial para o qual foi medido o campo elétrico.

Segundo a equação 3 a exatidão da medição do campo elétrico é aumentada a medida que se utiliza uma quantidade maior de pontos de medição, o por sua vez, aumenta também a exatidão da tensão elétrica calculada a partir destes pontos independentemente de existirem nas imediações do caminho de medição influências externas, sejam elas devidas a corpos metálicos que perturbem o campo elétrico ou mesmo a outros sinais de tensão.

Como este é um aspecto muito importante deste artigo, a fim de esclarecê-lo melhor foram feitas algumas simulações nos campos elétricos de dois isoladores que foram modelados em um plano bidimensional, conforme mostrado na Figura 1-a. As cores representam os diversos níveis intensidade observadas em cada ponto.

Neste caso específico no primeiro isolador foi aplicada uma tensão contínua de 500 kV enquanto no segundo foi aplicada uma tensão de -350 kV. Para a tensão positiva o campo é negativo e pode ser observado em vermelho.

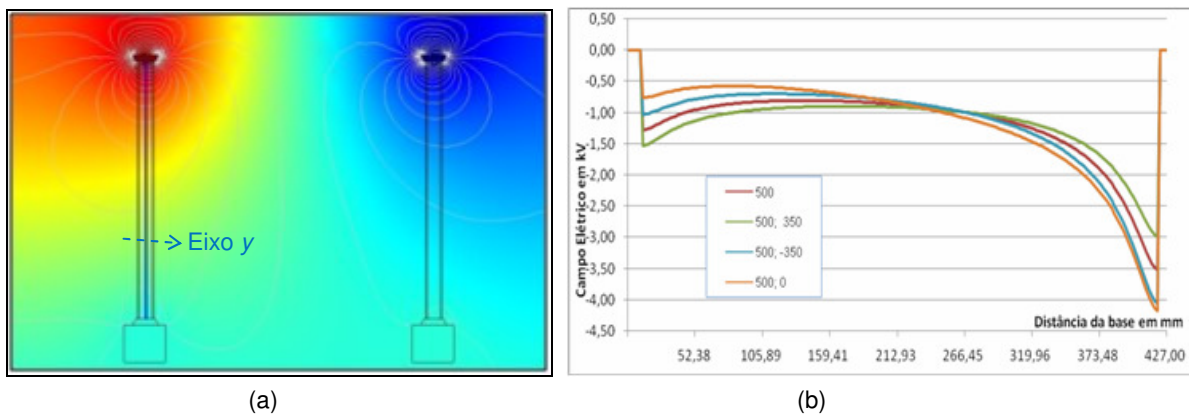


FIGURA 1– (a) Simulação de campo sobre um plano contendo dois isoladores; (b) Campo elétrico ao longo do eixo ( $y$ ) para diversas tensões aplicadas no segundo isolador

Ao longo do eixo  $y$  definido sobre o primeiro isolador, foi calculado o valor de campo elétrico para diversas condições de tensão no segundo isolador. A Figura 1-b mostra os resultados obtidos onde pode ser percebido facilmente que o campo elétrico ao longo primeiro isolador é de fato bastante afetado pela presença de tensões aplicadas no segundo isolador. Curvas semelhantes são obtidas com a colocação de esferas paredes metálicas aterradas próximas ao primeiro isolador.

Pelos gráficos da Figura 1-b observa-se que a presença de tensões e corpos metálicos aterrados próximos ao isolador vai afetar o campo elétrico em seu interior. Como a tensão calculada pela Equação 3 depende diretamente do valor de campo nestes pontos, parece bastante óbvio que o valor da tensão calculada será também afetado e desta forma este tipo de medição indireta não funcionaria na prática pois equipamento no mínimo deve operar num sistema trifásico, sendo portanto afetado pelas tensões das demais fases.

Na realidade como a Equação 3 é derivada das leis de Maxwell ela é sempre verdadeira independentemente das condições de contorno. O que ocorre aqui pode ser facilmente observado na Figura 2 onde a tensão foi calculada ao longo do eixo do isolador por meio da aplicação da Equação 3 aos mesmos dados apresentados na Figura 1-b.

Pode-se observar nos gráficos da Figura 2 que a tensão evolui por curvas diferentes, mas atinge sempre o mesmo ponto final. Desta forma a área total sobre as quatro curvas mostradas na Figura 1-b é sempre a mesma e podemos considerar que de fato as interferências externas “giram” as curvas, mas sem modificar o valor da somatória total definida na Equação 3.

Entretanto para que este esquema de cálculo funcione é necessário que a curva que define o campo elétrico seja medida com bastante precisão para um bom número de pontos. Felizmente as curvas mostradas na Figura 1-b podem ser bem modeladas por equações polinomiais de quarto grau cujos coeficientes podem ser genericamente obtidos a partir de apenas cinco pontos.

Devido a características específicas destas curvas e sabendo-se que a tensão na base do isolador é igual a zero os coeficientes das mesmas podem ser obtidos pela medição do campo elétrico em apenas três pontos do isolador (base, meio e topo), conforme detalhado em (5), onde um método de integração numérica chamado de Quadratura Gaussiana é aplicado para o cálculo da tensão.

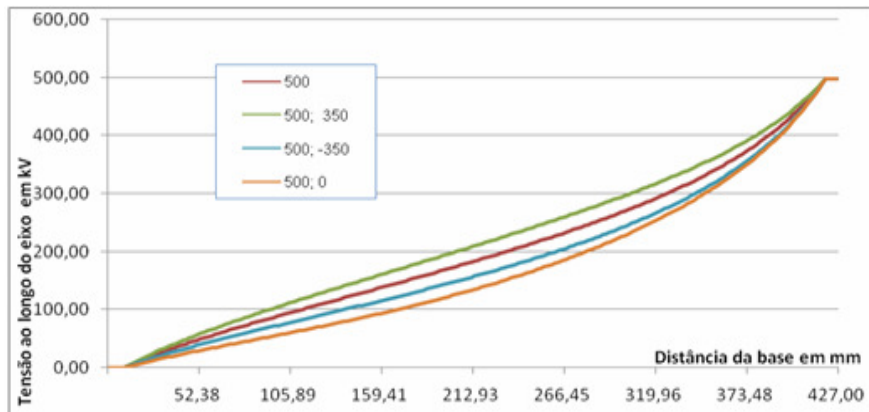


FIGURA 2 – Tensão calculada ao longo do eixo (y) para diversas tensões aplicadas no segundo isolador.

### 3.3 Implementação dos sensores de tensão

Para medição de tensão no MPC-550kV foram desenvolvidos sensores de campo elétrico compostos basicamente de superfícies metálicas. A Figura 3 mostra uma foto da placa eletrônica utilizada dentro do sensor. Na parte inferior do sensor foi alojado o receptor da fonte de alimentação óptica. A parte eletrônica opera com base em um CAD de 16 bits controlado por um circuito digital programável (PLD) que transmite informações por um canal serial óptico a uma taxa de 2 Mbps.



FIGURA 3 – Foto de um dos sensores (aberto).

### 3.4 Implementação dos sensores de corrente

O circuito eletrônico responsável pela medição de corrente recebe o sinal de duas bobinas de Rogowski uma para medição na faixa de até 4 kA e outra para a faixa de até 40 kA. Este circuito opera com dois conversores AD de 16 bits controlados por um circuito digital programável (PLD) que transmite informações por um canal serial óptico a uma taxa de 2 Mbps. O circuito foi alojado em um cilindro metálico completamente blindado que atua como uma gaiola de Faraday, recebendo além dos sinais das bobinas de Rogowski, um cabo com três fibras ópticas, que conforme citado acima alimentam o circuito e transmitem as informações de corrente adquiridas.

Na Figura 4-a e b podem ser observados detalhes do sensor de corrente. Na foto da Figura 4-a é mostrado o circuito eletrônico de medição sendo possível observar as três fibras ópticas utilizadas para comunicação e alimentação óptica. Na figura 4-b é apresentada a foto da bobina utilizada para medição de corrente na faixa de 40 kA.

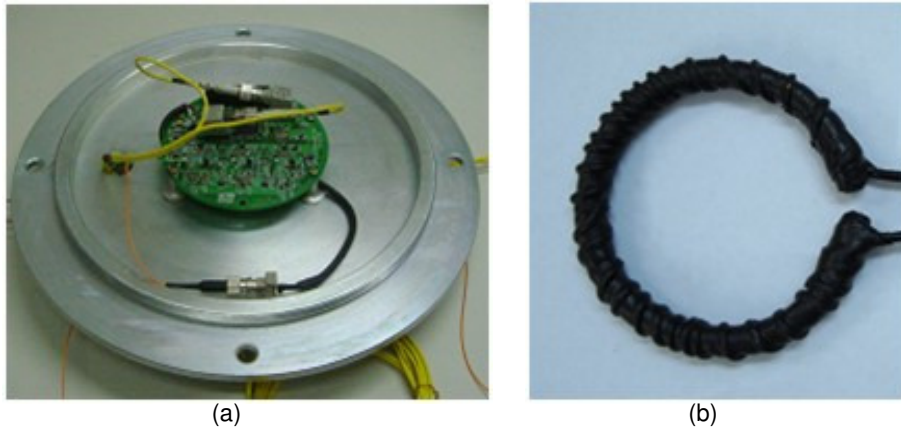


FIGURA 4 – Projeto do sensor de corrente; (a) Circuito do sensor; (b) Bobina de Rogowski.

### 3.5 Montagem completa do MPC

A Figura 5 (a) apresenta o MPC completo sendo submetido a um teste de isolamento. Nesta figura são mostrados também imagens de algumas partes do equipamento incluindo a base (b), o corpo formado por três isoladores cerâmicos (d) e o link de corrente (c) que é instalado no topo do equipamento.

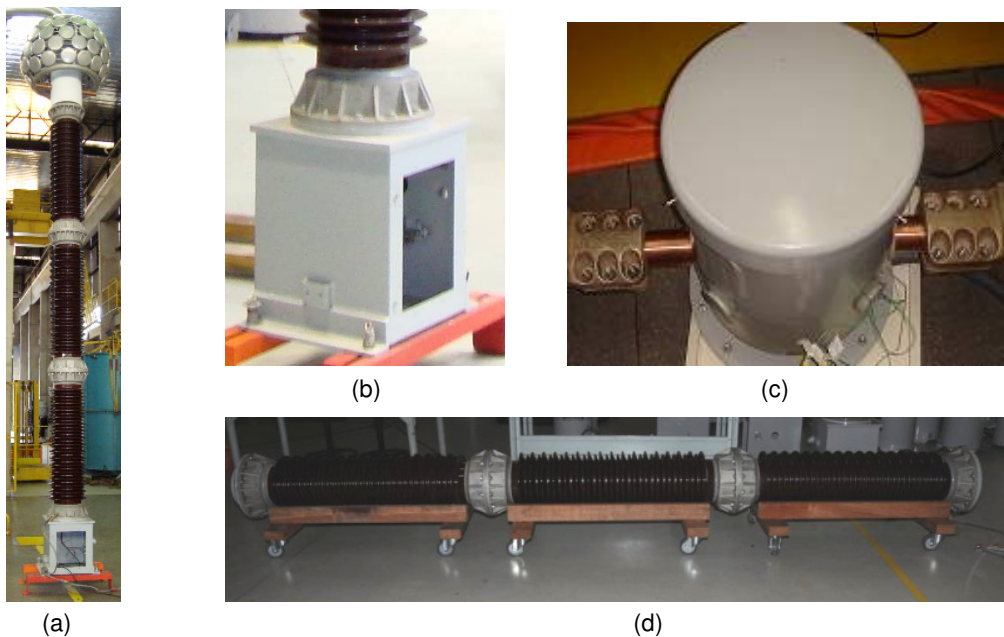


FIGURA 5 – (a) MPC; (b) Base do MPC; (c) Link de corrente; (d) Isoladores que formam o corpo do MPC.

### 4.0 - ENSAIOS REALIZADOS

No primeiro protótipo do MPC-550kV foram realizados os seguintes ensaios:

- Ensaio de temperatura do link de corrente;
- Ensaio de medição de corrente até a faixa de 3000 A;
- Ensaio de medição dos sensores de tensão;
- Aquisição da tensão ao longo de todo o eixo e utilizando os sensores de tensão desenvolvidos;
- Ensaio de medição de tensão para a faixa de até 320 kV com e sem aplicação de interferências externas;

Em um ensaio preliminar de calibração da corrente foi observada uma exatidão da ordem de 0,2% para a faixa de 4 kA que é basicamente a incerteza do sistema de medição utilizado como referência sendo estimado que o incerteza do MPC-550kV seja melhor que 0,1% para medição de corrente.

A medição de tensão se mostrou bastante próxima das simulações realizadas. A fim de avaliar o efeito das interferências a tensão foi calculada de duas formas uma mais simplificada tendo como base apenas a informação de campo elétrico de um dos sensores e a segunda mais completa levando em conta os valores de campo elétricos medidos nos três sensores, cujos valores foram combinados tendo por base o método da quadratura Gaussiana.

A Figura 6 mostra os erros observados para o método simplificado, sendo que no gráfico em (a) foi utilizando apenas o campo elétrico medido na base do MPC e no gráfico em (b) foi utilizado apenas o campo medido no topo. Conforme esperado pelas curvas de simulação mostradas na Figura 3-b as interferências geraram grandes variações nos campos medidos na base e no topo do isolador que foram refletidos para o processo de medição simplificada gerando erros positivos para um caso e negativos para o outro.

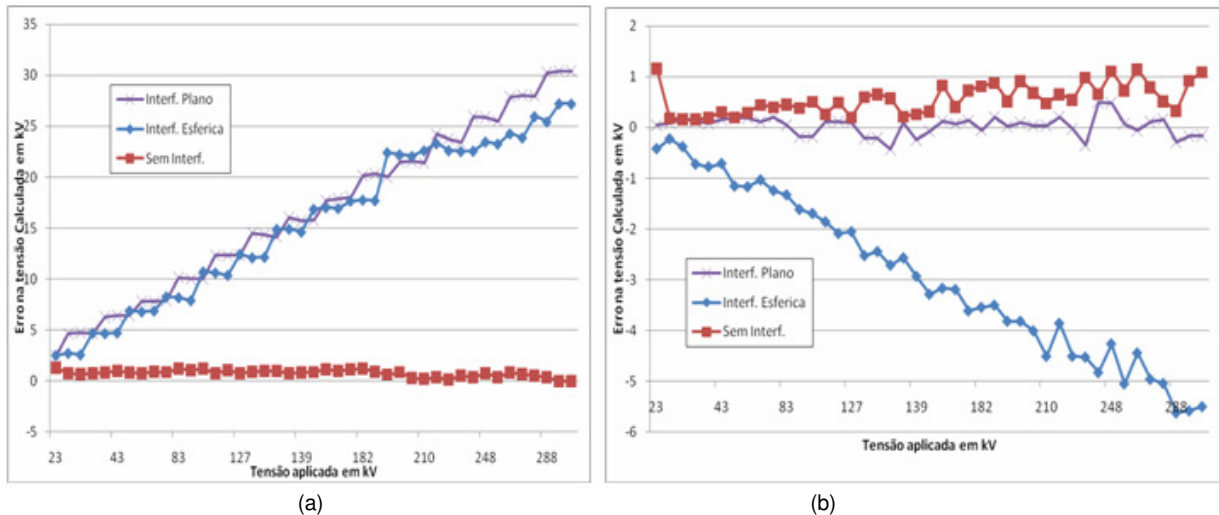


FIGURA 6 – Erros observados na medição simplificada: (a) sensor na base; (b) sensor de topo.

No cálculo completo onde foram utilizadas as três informações de campo elétrico os resultados são bem melhores, sendo que, conforme esperado as interferências praticante não afetam a medição.

A Figura 7 apresenta os resultados em termos de erro de amplitude de tensão e também erro de fase. Pode ser observado que a incerteza de medição de amplitude ficou na faixa de  $\pm 0.8$  kV que corresponde a um erro 0.25% da faixa nominal de medição. Já o erro de fase apesar de ser relativamente elevado para tensões menores tende a se estabilizar na faixa de  $\pm 0.2$  graus para a faixa nominal de medição.

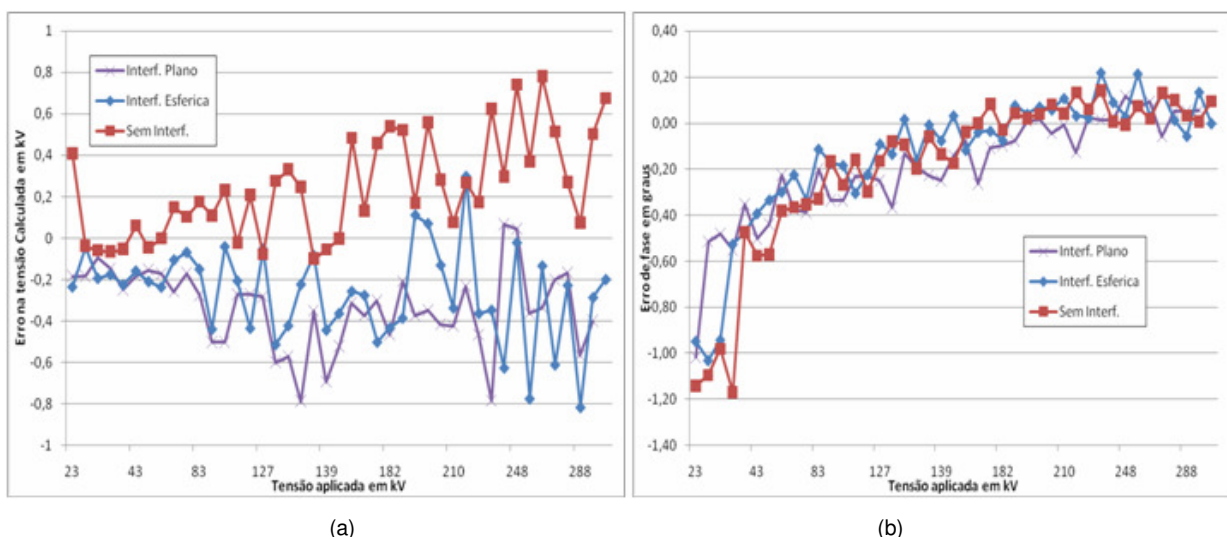


FIGURA 7 – Erros observados na medição completa: (a) Erro na amplitude; (b) Erro na fase.

## 5.0 - VISÃO DE FUTURO

Acredita-se que no futuro dois MPCs dotados de porta de rede Ethernet ópticas de alta velocidade conectadas a hubs ópticos com links redundantes e ligados a relés de proteção, medidores e oscilógrafos operando de forma redundante. Os MPCs irão transmitir em tempo real pacotes de dados com formas de ondas de corrente e tensão, já codificados em valores primários, com tempo de atualização na faixa de alguns milissegundos. É interessante observar que estes MPCs também deverão possuir entradas ópticas no padrão IRIB-B (formato de sincronização temporal gerado por receptores GPS) de forma a já fornecer os sinais de tensão e corrente com estampas de tempo sincronizado.

## 6.0 - CONCLUSÃO

O projeto MPC-550kV representou um grande desafio para toda a equipe envolvida e somente pode ser realizado com base no esforço conjunto do pessoal técnico da ELETROSUL, LABMETRO/UFSC, FURB e DOCUMENTTA.

O protótipo industrial produzido tem características bastante próximas de um produto final e deve ser instalado em campo logo após os ensaios de impulso.

Por outro lado para a medição de tensão onde se esperava grandes problemas devido a medição indireta utilizada, os primeiros resultados apontam para a possibilidade de obtenção de um sistema bastante preciso com classe de exatidão final da ordem de 0,2 a 0,3% e erros angulares na faixa de 0.2 graus.

Os autores acreditam que no futuro os equipamentos MPC com tecnologia óptica ou híbrida, tenderão substituir o esquema atual onde normalmente são utilizados um TP e um TC, realizando em um mesmo ponto a medição de corrente e tensão. A informação obtida deverá ser transmitida digitalmente por meio de rede óptica de alta velocidade, com o protocolo IEC61850 e enviando informações em tempo real.

Um projeto de P&D que viabilize bases para a criação de equipamentos MPCs híbridos nacionais como é o caso do projeto MPC-550kV certamente é uma iniciativa pioneira que está gerando uma tecnologia inovadora não somente no Brasil, mas também em todo o mundo.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEC 61850-7-4 Basic communication structure for substation and feeder equipment - Compatible logical node classes and data classes
- (2) UDREN, E.A., CEASE, T.W., "Transmission Line Protection with Magneto-Optic Current Transducer and Microprocessor-Based Relays", Georgia Tech Protective Relaying Conference, May 1-3, 1991, pp 1-21.
- (3) SANTOS, J.C., TAPLAMACIOGLU, M.C., HIDAKA, K., "Pockels High-Voltage Measurement System", Transactions on Power Delivery, Vol. 15, NO. 1, January 200.
- (4) MÄHÖNEN, P., MOISIO, M., HAKOLA, T., KUISTI, E H., "The Rogowski Coil and the Voltage Divider in Power System Protection and Monitoring", Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques – Cigré,
- (5) Chavez, P. P., Jaeger N. A. F., Accurate Voltage Measurement by the Quadrature Method. IEEE Transactions on Power Delivery, VOL. 18, NO. 1, January 2003.

## 8.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da ELETROSUL e também reiteram a importância do programa de P&D desenvolvido pela ANEEL como uma importante iniciativa para criação de competência tecnológica e capacitação de recursos humanos no Brasil que já está gerando bons frutos nas instituições de ensino e pesquisa do país e fortalecendo a indústria nacional e o setor elétrico como um todo.

## 9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Antonio Carlos Zimmermann

Formado em Engenharia Elétrica em 1981, especialização no ITI (USA), fez seu doutorado na área de Sistemas de Informação na Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Trabalha como pesquisador cientista no Laboratório de Sensores Ópticos do LABMETRO – UFSC em Florianópolis desde 1982.