



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 08 7789
Tópico: Impacto da Desregulamentação do Setor Elétrico

CAMPANHA PILOTO DE MEDIÇÃO DOS INDICADORES DE FLUTUAÇÃO, HARMÔNICOS E DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO REALIZADA NA SUBESTAÇÃO DE TAUBATÉ

DALTON
OLIVEIRA
C. BRASIL
ONS

JOSÉ ROBERTO
DE
MEDEIROS
ONS

RICARDO
PENIDO D.
ROSS
CEPEL

LUIZ FELIPE
WILLCOX DE
SOUZA
CEPEL

ANTONIO
AUGUSTO
CHAVES ARRUDA
CTEEP

RESUMO

Neste artigo apresentam-se as principais constatações obtidas na campanha piloto de Taubaté realizada em Agosto de 2004.

O principal objetivo do artigo é fornecer uma visão abrangente da campanha englobando as principais constatações, as situações particulares e as dificuldades em realizar o previsto no documento “Definição das Metodologias e Procedimentos às Campanhas de Medição dos Indicadores de Desempenho” [1]. Espera-se que a experiência obtida em Taubaté possa ser assimilada e avaliada com vistas a futuras campanhas.

PALAVRAS-CHAVE

Qualidade de energia, campanhas de medição, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, distorção harmônica.

1.0 INTRODUÇÃO

Para cumprir a sua missão de operar o Sistema Elétrico Brasileiro dentro de padrões de segurança e qualidade, o ONS necessita não só estabelecer indicadores e padrões de desempenho, mas também gerenciá-los. A gerência dos padrões de desempenho da Rede Básica engloba o levantamento de indicadores de desempenho, a avaliação de situações de

violação de padrões e a avaliação do desempenho de novas conexões[4].

O processo de implantação do sistema de gerência dos indicadores de desempenho da rede básica constitui-se em uma atividade pioneira, se forem considerados os diversos aspectos técnicos que o compõe e a complexidade das soluções necessárias em um sistema com o tamanho e a diversidade do SIN.

Tanto a definição de indicadores e padrões de desempenho quanto a sua gerência foram objeto de intensos debates entre diversos Agentes, no âmbito do Grupo de Trabalho de Qualidade de Energia Elétrica (GT-QEE), coordenado pelo ONS. Como fruto deste trabalho, foram criados os seguintes módulos dos Procedimentos de Rede:

- Submódulo 2.2[5], que trata dos aspectos globais dos indicadores e de seus padrões;
- Submódulo 2.8[7], que trata da gerência dos indicadores de desempenho da Rede Básica.

O submódulo 2.8 estabelece que os indicadores relacionados aos fenômenos de *flutuação, desequilíbrio e distorção harmônica da tensão* devem ser obtidos através de *campanhas de medição*, que têm como objetivo identificar barramentos cujo desempenho esteja além do estabelecido em termos de indicadores globais. Os indicadores serão apurados em intervalos de 10 minutos, durante sete dias consecutivos, e os resultados serão enviados para o ONS e disponibilizados para todos os agentes.

A referência [1] e os artigos [2][3] divulgam o trabalho coordenado pelo ONS e realizado pelo CEPEL, em conjunto com os agentes do setor elétrico, para a definição das metodologias e procedimentos necessários às campanhas de medição de indicadores de desempenho da Rede Básica. Tais campanhas tratam dos fenômenos de flutuação (“flicker”), distorção harmônica e desequilíbrios de tensão. O objetivo destas campanhas é a medição dos indicadores, em locais definidos, durante sete dias consecutivos, visando a quantificação dos mesmos. Os dados obtidos nestas campanhas serão utilizados, pelo ONS, para gerenciar os indicadores de Qualidade de Energia na rede básica.

A campanha piloto de Taubaté constituiu-se na primeira oportunidade para se testar os procedimentos estabelecidos.

2.0 ARTICULAÇÕES ENVOLVENDO A CAMPANHA DE MEDIÇÃO EM TAUBATÉ

O Grupo de Trabalho de Qualidade de Energia Elétrica (GT-QEE) discutiu vários aspectos relacionados com as campanhas de medição que resultaram em:

- a contratação da UFU e de um consultor internacional de forma a testar e qualificar os medidores[8][9];
- a contratação do CEPEL para escrever os procedimentos e metodologias[1][2][3];
- a contratação da CTEEP para realização da campanha piloto na subestação Taubaté[10].

2.1 Contratação da CTEEP

A Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CTEEP) foi contratada pelo ONS para disponibilizar parte das instalações da SE Taubaté para campanha de medição. No escopo deste contrato foi incluída a infra-estrutura necessária, o acesso as três fases e ao neutro de um transformador de potencial capacitivo (TPC), a montagem de três fases de um divisor capacitivo de potencial (DCP) e a prestação dos serviços de consultoria que compreenderam a elaboração de um relatório técnico[10] descrevendo os trabalhos. É importante enfatizar que a escolha do sistema de 138kV da SE Taubaté deveu-se ao fato de existirem consumidores industriais que têm possibilidade de causar impacto na qualidade de energia naquela região.

2.2 Utilização de medidores pré aprovados

Nos últimos anos o ONS coordenou uma tarefa de analisar os medidores disponíveis no mercado

de forma a verificar aqueles cujos protocolos satisfazem aos requisitos mínimos estabelecidos[8][9] para medição dos principais fenômenos associados a qualidade de energia (tensão em regime permanente, distorção harmônica, flutuação de tensão, desequilíbrios e variações de tensão de curta duração) Após várias rodadas de testes em laboratório foi verificado que quatro tipos de medidores, de diferentes fabricantes, apresentaram resultados satisfatórios na medição dos três fenômenos objetos das campanhas de medição.

Os equipamentos considerados aptos a medirem estes fenômenos foram: 7600 ION da Power Measurement Limited, Power Sentinel da Arbiter Systems, RQEIII-P da Reason Tecnologia e Impedograph da QEE-Ctlab. Outros equipamentos foram considerados aptos a medirem apenas um destes fenômenos e ainda outros mediram satisfatoriamente tensão em regime permanente e VTCDs.

Os quatro fabricantes dos equipamentos supracitados foram convidados a participar da campanha de Taubaté e instalar duas unidades: no secundário do TPC e do DCP. Estas unidades foram submetidas a testes em laboratório para verificar sua calibração quanto à tensão e frequência, isto é, se as medições destas grandezas se situavam dentro da classe de precisão declarada pelo fabricante. Todas as oito unidades foram aprovadas nos testes de calibração.

No entanto, as duas unidades instaladas por um dos fabricantes não foram programadas de forma coerente e registraram dados de apenas alguns dias da campanha sendo, portanto, desconsiderados os seus resultados. Os resultados da campanha piloto de Taubaté, foram obtidos pelos dados dos outros seis medidores. Portanto, pode-se afirmar que o volume de dados correspondeu a seis campanhas. Destaca-se que os fabricantes dos equipamentos produziram os relatórios e forneceram os dados de forma padronizada conforme descrito na referência[1].

2.3 Avaliação de dois tipos de transdutores

Uma das principais novidades da campanha de Taubaté está relacionada com o fato de se ter escolhido dois locais distintos, porém com a mesma tensão para se proceder às medições com tipos distintos de transdutores:

- “Bay” de interligação do barramento de 138kV com o transformador de serviços auxiliares. Neste local foram conectados os divisores capacitivos de potencial (DCPs);

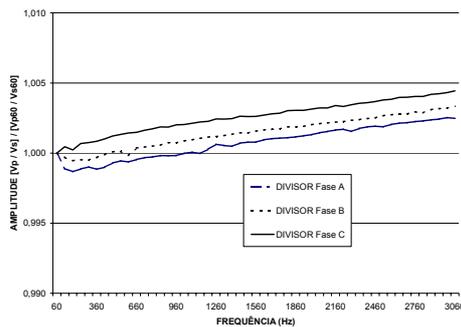


Figura 1 – Resposta em Frequência dos DCPs

- “Bay” de uma LT 138kV Taubaté – Campos do Jordão. Neste local os transformadores de potencial capacitivos (TPCs) existentes foram usados como transdutores.

2.4 Levantamento da resposta em frequência dos transdutores

A CTEEP realizou a montagem dos divisores capacitivos de potencial (DCPs), em seu laboratório. Para tanto, utilizou duas unidades capacitivas isoladas para alta tensão em série com uma unidade isolada para baixa tensão. A figura 1 mostra os resultados obtidos do levantamento da resposta em frequência. Observa-se que a resposta deste tipo de transdutor pode ser considerada plana até 3kHz.

O CEPEL realizou a medição no campo da resposta em frequência dos TPCs. Para tanto, foi adotado o seguinte procedimento:

- Desconexão da linha de transmissão da rede;
- Conexão de um gerador CA com tensão da ordem de 750V RMS e frequência variando entre 60 e 3kHz ao primário do TPC. Esta conexão foi feita no pátio da subestação;
- Medição da tensão nos secundários dos TPCs. Estas medições foram efetuadas na sala de relés distante cerca de 150m do equipamento no pátio.

A figura 2 mostra a resposta em frequência dos três TPCs cuja relação de transformação nominal é de 1200. Observa-se na figura que para a

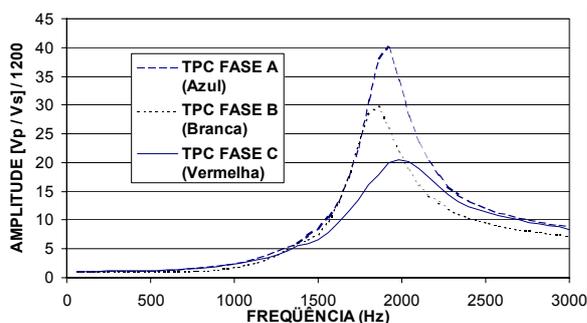


Figura 2 – Resposta em Frequência dos TPCs

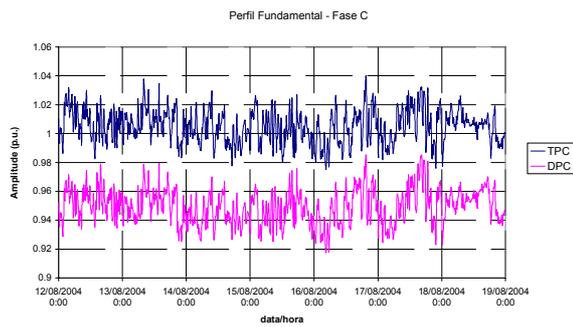


Figura 3 – Perfil da tensão fundamental no DCP e no TPC

freqüência de 60Hz a amplitude corresponde a 1,0 pu, a partir da freqüência de 840Hz, isto é, da décima quarta harmônica, houve a necessidade de se diminuir a tensão aplicada ao primário, pois o aumento de corrente foi de tal ordem que a proteção da fonte operava. Na faixa de freqüência de ressonância houve, portanto, uma grande atenuação de Vs e conseqüentemente um aumento na relação de transformação.

3.0 RESULTADOS OBTIDOS

Foram muitos os resultados obtidos nesta campanha. Nos itens seguintes são destacados apenas aqueles que conduziram a uma análise crítica.

3.1 Tensão em regime Permanente

A figura 3 mostra o perfil de tensão, em pu, à freqüência fundamental, obtido na fase “C” pelo TPC e pelo DCP. Pode-se observar que há grande correlação entre as duas grandezas, porém a tensão medida pelo DCP foi cerca de 5% inferior à do TPC. Acredita-se que este fato esteja relacionado com a existência de capacitâncias de entrada do medidor RQEIII-P que podem ter alterado a relação das capacitâncias entre primário e secundário impostas ao DCP no laboratório.

3.2 Medição de desequilíbrios de tensão

Verificou-se que apenas o medidor RQEIII-P da

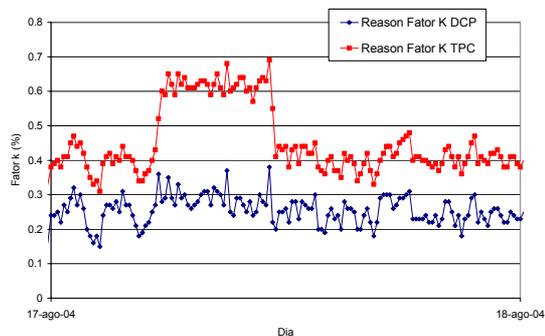


Figura 4 –Tendência do fator K no DCP e no TPC

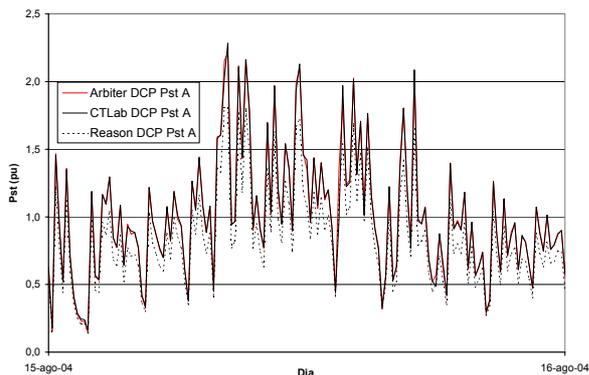


Figura 5 – Tendência da Flutuação medida no DCP

Reason mediu corretamente o desequilíbrio de tensão tanto nos DCPs como nos TPCs. Os outros tipos de medidores apresentaram problemas na programação do indicador K agregado em intervalos de 10 minutos e / ou devido ao fundo de escala escolhido.

No entanto, a análise destas medições permitiu a conclusão dos seguintes pontos importantes:

- O indicador de desequilíbrio medido nos DCPs foi inferior ao desequilíbrio medido pelo TPCs. Este fato é estranho, pois o desequilíbrio é um fenômeno de 60Hz e nesta frequência os TPCs têm classe de precisão 0,3% enquanto que os DCPs deveriam ser mais imprecisos;
- Verifica-se nos gráficos de tendência do indicador K, mostrados na figura 4, medidos ao longo dos sete dias da semana, que:
- houve períodos de algumas horas em que o desequilíbrio medido por um dos tipos de transdutores foi aumentado sem que nada fosse observado no desequilíbrio medido pelo outro tipo;
- nos períodos mencionados, a CTEEP não tem registro de alterações realizadas na rede elétrica.

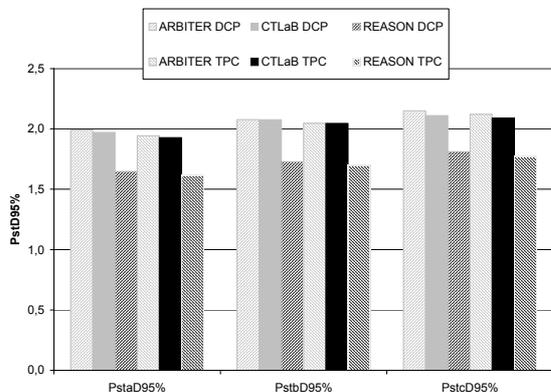


Figura 6 – Resultados dos Indicadores PstD95%

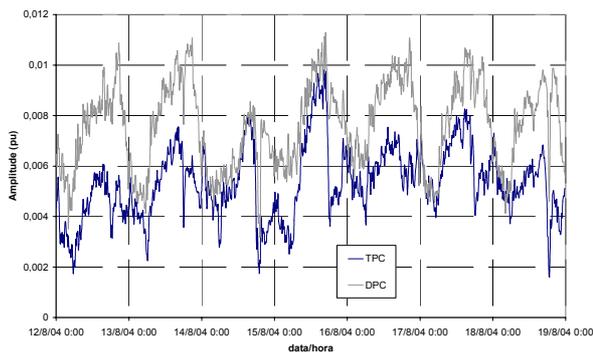


Figura 7 – Tendência do Quinto Harmônico da Fase A

3.3 Medição de flutuação de tensão

A figura 5 mostra que a flutuação de tensão medida pelos três tipos de medidores apresentou boa correlação embora alguns tivessem seus filtros calibrados para lâmpadas incandescentes de 240V e outros para lâmpadas incandescentes de 120V. Os primeiros apresentaram os indicadores Pst e Plt mais elevados do que os segundos em um percentual coerente com o mencionado nas normas e publicações internacionais.

A figura 6 mostra que os indicadores PstD95% obtidos pelos TPCs e pelos DCPs foram muito coerentes. Portanto, os indicadores Pst e Plt parecem independe do tipo de transdutor usado.

3.4 Medição da distorção harmônica de tensão

O fenômeno da distorção harmônica de tensão, conforme previsto[1][2][3], é muito influenciado pelo tipo de transdutor empregado.

Nas medições da campanha piloto de Taubaté pôde-se constatar que:

- Nas fases A (azul) e B (branca) aparentemente houve alguma interferência que prejudicou a medição no secundário dos TPCs. Esta conclusão está baseada na comparação entre os harmônicos de tensão medidos pelos TPCs e pelos DCPs. A figura 7 mostra a distorção de quinto harmônico da fase A medida por ambos transdutores. Observa-se que durante um curto período houve coerência entre os valores medidos, mas percebe-se uma interferência, que é máxima no período noturno e diminui significativamente após às 00:00hs;

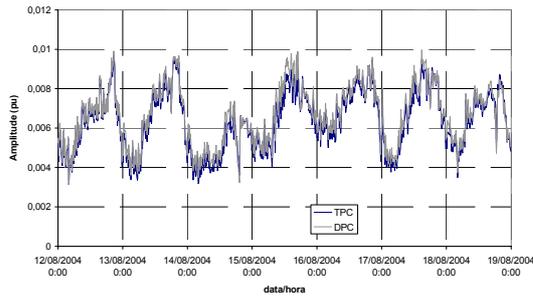


Figura 8 – Tendência do quinto Harmônico da fase C – sem correção da frequência do resultado do TPC

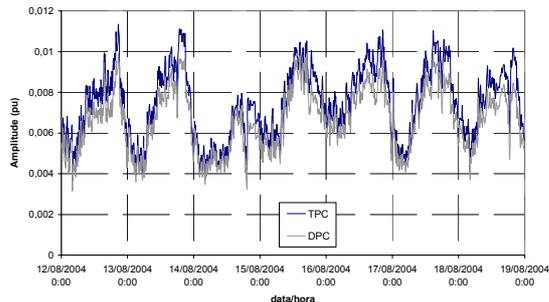


Figura 9 – Tendência do quinto Harmônico da fase C – com correção da frequência do resultado do TPC

- Na fase C (vermelha) houve melhor correlação entre as medições obtidas no TPC e no DCP a menos dos harmônicos ímpares
- múltiplos de três: 3°, 9°, 15°, etc. A figura 8 mostra a tendência do quinto harmônico. A figura 9 também mostra a tendência do quinto harmônico, porém corrigindo-se o resultado da distorção harmônica do TPC pela resposta em frequência mostrada no gráfico da figura 2;
- A figura 10 mostra os dados de distorção do 13° harmônico obtidos para o DCP e TPC sem considerar a correção deste. A figura 11 mostra a mesma tendência, porém corrigindo-se a resposta em frequência do TPC;
- A figura 12 mostra o fator de correção dos harmônicos medidos na fase C do TPC por duas maneiras distintas: uma delas considera o levantamento da resposta em frequência realizado no campo e a outra considera o fator F_{med} que é definido da seguinte maneira:

$$F_{med} = \text{Mediana} \left(\frac{V_{hdcp}}{V_{htpc}} \right) \quad \text{onde } V_{hdcp}$$

corresponde ao harmônico de ordem h medido no DCP e V_{htpc} ao medido pelo TPC sem qualquer correção. O fator F_{med}

corresponde a mediana das 1008 razões ao longo dos sete dias de medição;

- Observa-se na figura 12 que o levantamento no campo resultou em um valor 12% superior ao obtido pelo DCP para o quinto harmônico, 22% superior para o sétimo harmônico, 19% inferior no décimo primeiro harmônico e 38% superior para o décimo terceiro harmônico. Portanto, verificou-se que o método previsto de correção do valor medido pelo fator obtido no levantamento da resposta em frequência do TPC nem sempre conduz a bons resultados;
- O método previsto no Procedimento de Rede 2.8 estabelece que os harmônicos sejam calculados em porcentagem da tensão nominal do sistema. Este método mostrou ser de difícil aplicação prática, pois as tensões RMS medidas nos secundários dos DCPs foram da ordem de 5% inferiores às tensões medidas nos secundários dos TPCs, devido à adição das capacitâncias dos medidores conectados ao secundário. Nestas condições não é possível a comparação entre harmônicos do DCP e do TPC através da razão entre a tensão primária e a nominal. Portanto, verificou-se a necessidade de expressar os harmônicos em porcentagem da tensão à frequência fundamental.

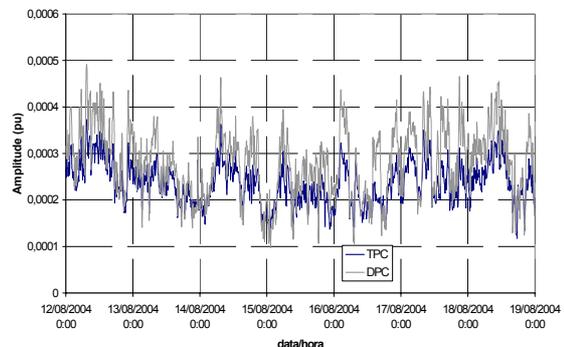


Figura 10 - Tendência do Décimo Terceiro Harmônico da Fase C sem correção com a frequência

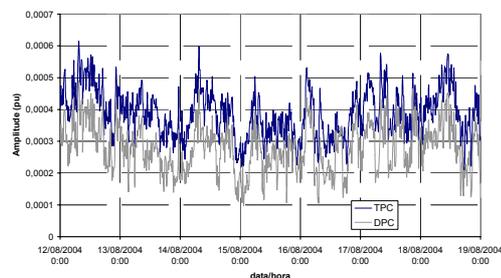


Figura 11 - Tendência do Décimo Terceiro Harmônica Considerando correção da frequência

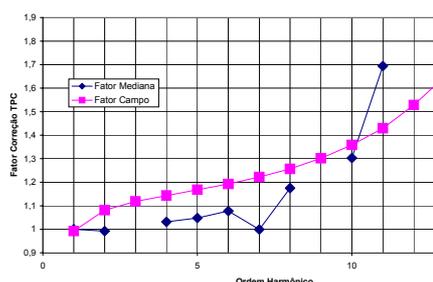


Figura 12 - Comparação da Correção da Frequência no Campo com os

4.0 CONCLUSÕES

A experiência obtida em Taubaté foi muito rica e permitiu verificar que o trabalho empreendido para seleção de medidores que satisfaçam aos requisitos mínimos impostos pelo ONS está frutificando. Do ponto de vista de flutuação de tensão verificou-se que os resultados obtidos por diferentes medidores foram coerentes independentemente de estarem conectados nos secundários dos TPCs ou dos DCPs.

A medição de desequilíbrios de tensão mostrou que apenas os RQEIII-P da Reason mediram o fenômeno como previsto nos procedimentos [1][2][3] pois os outros tipos apresentaram problemas de programação. Os resultados para o TPC e para DCP apresentaram incongruências que não foram explicadas satisfatoriamente. Sugere-se, portanto, que em campanhas futuras este tópico continue sendo objeto de investigação.

O fenômeno da distorção harmônica de tensão é muito influenciado pelo tipo de transdutor empregado. Nas medições de Taubaté pôde-se constatar os seguintes pontos importantes:

- Nas fases A e B aparentemente houve alguma interferência que prejudicou a medição no secundário dos TPCs. Em Taubaté a distância entre os TPC, no pátio, e o secundário, na sala de relés, era de aproximadamente 150 metros. Este é mais um parâmetro a ser investigado em campanhas futuras, pois se acredita que quanto maior esta distância maior a probabilidade de haver interferências;
- Na fase C houve coerência entre as medições obtidas no TPC e no DCP a menos dos harmônicos ímpares múltiplos de três: 3° , 9° , 15° , etc. No entanto, comparando-se o valor numérico dos demais harmônicos, medidos pelo TPC e pelo DCP, verificou-se que a correção do valor medido pelo fator

obtido no levantamento da resposta em frequência do TPC nem sempre conduz a bons resultados;

- É necessária a revisão no método de cálculo da distorção harmônica previsto nos Procedimentos de Rede, para que a tensão harmônica seja expressa em percentagem da tensão fundamental

5.0 PASSOS FUTUROS

A campanha piloto de Taubaté foi uma primeira oportunidade de se testar os procedimentos e metodologias anteriormente definidos [1][2][3].

Acredita-se que em próximas campanhas a distorção harmônica deva ser avaliada através de outros tipos de transdutores: transformadores de potencial indutivo (TPIs), com o levantamento de sua resposta em frequência, e ainda os transdutores formados a partir da bucha capacitiva de transformadores e reatores. Os valores assim obtidos devem ser comparados com os oriundos dos divisores capacitivos de potencial (DCPs).

Outro ponto de grande importância para futuras campanhas é o acompanhamento de novos processos e tecnologias:

- Existem fabricantes de TPCs que prevêm a utilização de um dispositivo em derivação para medição de harmônicos cuja resposta em frequência é bem mais “plana” do que a dos transformadores capacitivos convencionais;
- A norma IEC 61850 estabelece conceitos inovadores para automação e integração dos dados de subestações. Prevê a utilização de transdutores óticos que substituirão os TPs e TCs convencionais e redes digitais na subestação que tornarão acessíveis as formas de onda de tensão e corrente com centenas de pontos por ciclo. Portanto, subestações assim serão imunes aos dois maiores problemas identificados em Taubaté: dificuldades de medição de harmônicos através de TPCs e interferência.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ONS – “Definição das Metodologias e Procedimentos Necessários às Campanhas de Medição dos Indicadores de Desempenho” Relatório 2.1-028/2005;
- [2] D. O. Brasil, J. R. Medeiros, R. P. Ross, L. F. W. Souza, H. J. Martins, A. A. C. Arruda - “Metodologias e Procedimentos para as

- Campanhas de Medição de Indicadores de Flutuação de Tensão, Harmônicos e Desequilíbrios na Rede Básica*”, T&D Latin América, São Paulo, Novembro 2004;
- [3] D. O. Brasil, J. R. Medeiros, R. P. Ross, L. F. W. Souza, H. J. Martins - *“Definição de Metodologias e Procedimentos para as Campanhas de Medição de indicadores de Flutuação de Tensão, Harmônicos e Desequilíbrios na Rede Básica*”, IX Sepope, Rio de Janeiro, Maio 2004;
- [4] R. J. Gomes, D. O. C. Brasil, J. R. Medeiros, *“Gerência dos Padrões de Desempenho da Rede Básica – Conceitos e Procedimentos*”, Anais do V SBQEE, Vol. 2, pp. 375-380, Aracaju, Agosto 2003;
- [5] ONS. - *“Padrões de Desempenho da Rede Básica*”, Submódulo 2.2, Procedimentos de
- [6] Rede, Revisão 2; dezembro de 2002, [online em www.ons.org.br];
- [7] ONS. - *“Padrões de Desempenho da Rede Básica*”, Submódulo 2.8, Procedimentos de Rede, Revisão 0, dezembro de 2002 [online em www.ons.org.br];
- [8] UFU-ONS 03-03-00 *“Classificação dos Equipamentos – Testes de Desempenho Funcional em Instrumentos de Medição da Qualidade de Energia Elétrica*”, Maio 2003;
- [9] Paulo Ribeiro *“Relatório Técnico sobre o desempenho funcional de Instrumentos de Medição de Qualidade de Energia*”, em andamento em Setembro de 2003;
- [10] ONS - *“Campanha de Medição Piloto de Qualidade de Energia Elétrica SE Taubaté*”, Relatório 020/2005.

