



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GDS/16
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS

SISTEMA DE MEDIÇÃO E ANÁLISE REMOTA DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS - SMARTe

**Helvio J. A. Martins Ítalo F. Nova Walter C. Filho
CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Cintia de F. F. Carraro Carlos Magno R. Vasques
FPLF/PUC Rio**

**Miguel Michalski
M&D – MONITORAÇÃO & DIAGNOSE**

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema capaz de medir eventos transitórios ininterruptamente em campo com acompanhamento à distância e classificação automática dos sinais adquiridos. O sistema desenvolvido foi denominado de SMARTe – Sistema de Medição e Análise Remota de Transitórios Eletromagnéticos, sendo acessado remotamente via internet.

PALAVRAS-CHAVE

Medição Remota, Transitório Eletromagnético, Autotransformadores, Classificação, Falhas em Equipamentos.

1.0 - INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, concessionárias do setor elétrico Brasileiro vêm relatando falhas em equipamentos de transformação, em algumas situações, associadas aos transitórios de tensão gerados por manobra de seccionadores, disjuntores e outros equipamentos.

A caracterização destes eventos, com medição tradicional, sob demanda, realizada num determinado período de tempo (alguns dias), embora relevante, não é suficiente para caracterizar de forma segura as principais solicitações geradas na subestação e adjacências sobre equipamentos de grande porte, especificamente transformadores e autotransformadores.

Diante deste cenário e com a evolução da tecnologia para registro de eventos o SMARTe foi desenvolvido. Esse sistema se baseia numa arquitetura do tipo usuário-servidor. A parte “servidor” é composta por um módulo de aquisição de dados, um módulo de análise e pré-processamento dos dados, um módulo de publicação dos dados e gravação dos dados e um módulo de classificação. A parte “usuário” é composta pelo módulo de interface, ou seja, onde pode-se manipular os dados coletados, on-line ou off-line.

No momento o sistema encontra-se instalado em dois bancos de autotransformadores, monitorando um dos bancos via tap das buchas de 345 kV há mais de um ano.

2.0 - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

Basicamente o SMARTe é composto por dois subsistemas: de Medição e de Aquisição e Análise de Dados, os quais são mostrados em detalhes a seguir na Figura1.

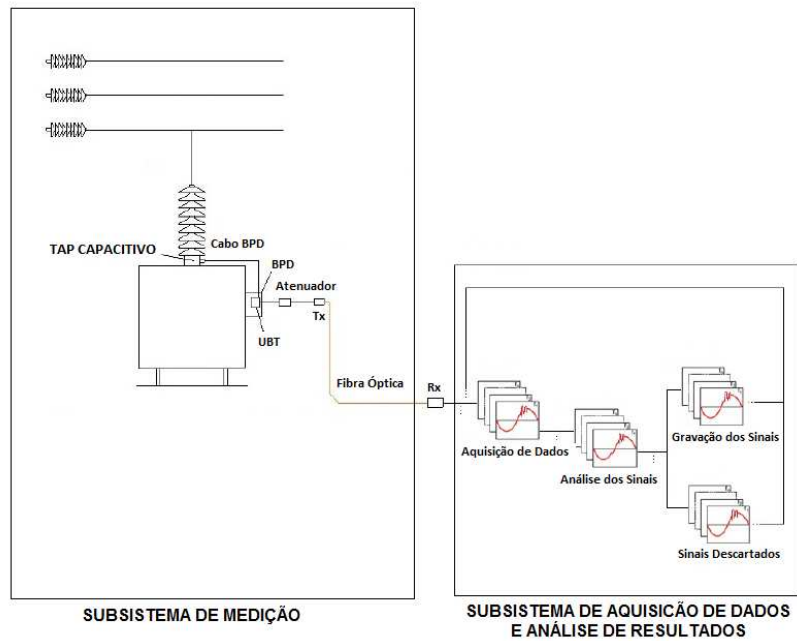


Figura 1 – Monitoramento com o SMARTe

2.1 Subsistema de Medição

A aquisição dos transitórios de tensão ocorre por meio do tap capacitivo das buchas do autotransformador utilizando unidades capacitivas para a terra, formando então um divisor de tensão conectado a um atenuador. Sendo os mesmos instalados no interior de uma caixa localizada em uma das paredes do autotransformador, onde originariamente havia um BPD (Bushing Potential Device). Além desses dispositivos, utiliza-se um sistema de transmissão por fibra óptica conectado a um sistema de aquisição de dados, sendo possível em campo, a conexão de um osciloscópio em paralelo. A Figura 2 mostra o sistema de medição utilizando o tap capacitivo da bucha e seus componentes.

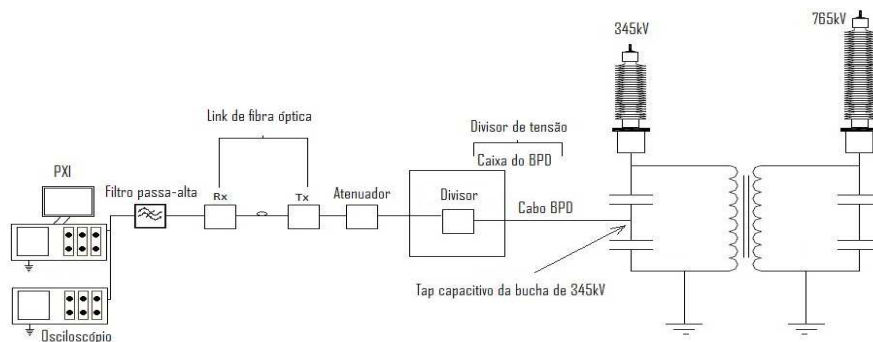


Figura 2– Subsistema de medição utilizando o tap capacitivo da bucha e seus componentes

Uma caracterização típica do sistema de medição no domínio da frequência (ponto de medição no tap capacitivo da bucha, conexão entre o tap capacitivo da bucha e BPD, divisor misto, atenuador, fibra óptica e filtro passa-altas) é mostrada na Figura 3. O circuito de medição para cada autotransformador tem características próprias, porém semelhantes. As curvas apresentadas na Figura 2 foram obtidas através da aplicação da FFT (Fast Fourier Transform) a resposta do sistema de medição ao degrau, bem como, a transferência de tensão no domínio da frequência (SFRA - sweep frequency response analysis).

De modo a garantir a confiabilidade do circuito de medição, bem como, a repetibilidade dos valores medidos e a conseqüente identificação dos eventos, esta resposta é verificada periodicamente.

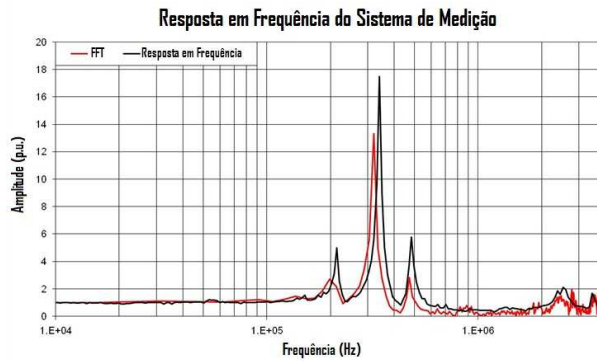


Figura 3 – Resposta em frequência do sistema de medição

2.2 Sistema de Aquisição de Dados e Análise de Resultados

Neste sistema, composto de duas partes principais: Servidor e Usuário, os dados são coletados até que o buffer (memória temporária) seja preenchido, ao final deste período o sistema analisa automaticamente se dentre as informações coletadas alguma é útil (por ex.: violação do limite de tensão preestabelecido), armazena esta informação e descarta as demais. Após este período, um novo ciclo é iniciado.

2.2.1 Parte “Servidor”

2.2.1.1 Módulo – Aquisição dos Dados

Uma vez iniciado o sistema, a aquisição de dados se dá de maneira ininterrupta, pois os drivers das placas de aquisição são acionados e as mesmas passam a coletar as informações desejadas. Na Figura 4 são apresentadas algumas telas do sistema.

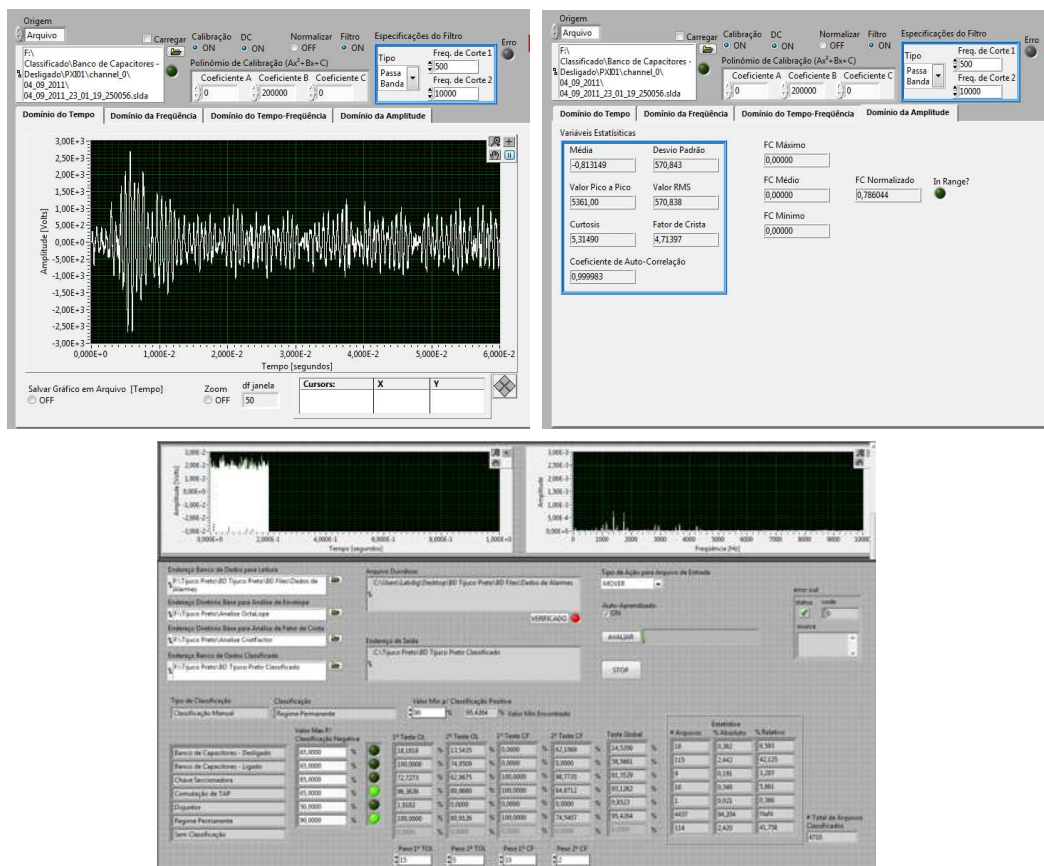


Figura 1 – Telas do Sistema SMARTe

2.2.1.2 Módulo – Análise e Pré-Processamento dos Dados

Depois de adquiridos, os dados são analisados baseados em: valores de média, RMS, pico a pico, máximo ou mínimo obtidos a partir de cada sinal coletado e comparados a limites preestabelecidos. Caso algum desses limites seja ultrapassado, um evento é detectado.

2.2.1.3 Módulos – Publicação e Gravação dos Dados

Uma vez que o módulo de análise e pré-processamento detecta um evento, os dados coletados relacionados ao instante que o evento ocorreu, são gravados. Os dados de todos os canais monitorados são gravados independentemente do canal no qual o evento foi identificado. No caso de não haver eventos identificados, os dados gravados em disco rígido após a aquisição são excluídos. Os sinais são apresentados no domínio do tempo e da frequência.

2.2.1.4 Módulo – Classificação dos Dados

O sistema classifica os sinais a partir do conceito de oitavas, caracterizando cada tipo de sinal transitório por uma envoltória construída a partir de dados conhecidos, e a partir daí, conforme os dados são classificados numa determinada classe, estes passam a contribuir para a formação de uma nova envoltória, possibilitando maior confiabilidade na classificação.

Os sinais são classificados de modo automático em sete classes (padrões): Regime Permanente, Energização de Banco de Capacitores, Desenergização de Banco de Capacitores, Comutação de Tap, Manobra de Seccionador, Manobra de Disjuntor e Sem Classificação. Os primeiros padrões construídos foram oriundos de sinais obtidos com medições sob demanda, a partir de eventos conhecidos, normalmente com o autotransformador em vazio. Posteriormente os padrões foram aprimorados com a análise de aproximadamente 3 meses de funcionamento do SMARTe em conjunto com o Relatório de Ocorrências da subestação neste período.

Durante a classificação automática são realizados 4 testes: dois para envoltórias de oitava e dois para fator de crista. Os testes de oitava comparam o sinal em questão com os valores máximos, médios e mínimos das classes, formando uma espécie de envelope. O sinal pertence a uma dada classe, quanto mais enquadrar-se no envelope. Os testes de fator de crista comparam também os valores máximos, médios e mínimos, uma vez que sinais transitórios são assimétricos.

A média destes testes determina a classificação: o funcionamento é análogo ao uma rede neural, ou seja, para cada sinal é calculada uma média dos quatro testes, para todas as classes. Desta forma, cada classe possuirá um valor percentual do teste, o sistema classifica como sendo da classe que possuir maior porcentagem. Quando ocorre de duas ou mais porcentagem muito próximas, o sistema solicita intervenção humana, e o especialista através da interface gráfica pode analisar o sinal e observar a que classe este pertence.

Além disso, é preestabelecido que o valor mínimo para classificação positiva que determina a partir de qual porcentagem um dado sinal pode pertencer a determinada classe. A cada um dos quatro testes também atribui-se um peso.

O SMARTe, permite também que sinais coletados com diferentes taxas de aquisição e por diferentes períodos de aquisição com espectros de frequências com padrões diferentes (diferentes “df” e frequências máximas distintas observáveis) possam ser comparados.

Após a construção das envoltórias, o SMARTe atribui o transitório a uma classe, com auxílio das envoltórias e com os pesos aplicados aos processamentos.

A análise em oitavas (ou frações de oitava), permite ao invés de apresentar todo o espectro com um “df” fixo (intervalo entre frequências), definido pelo período de aquisição do sinal, apresentar bandas com “df” variável, que possuem uma frequência central e cuja a amplitude é proporcional à encontrada no sinal contido na banda em questão. Isto permite às bandas mais baixas de frequência uma maior resolução e àquelas mais altas, menor resolução.

O sistema ainda vai contabilizando o total de arquivos classificados em cada uma das classes e fornece o valor absoluto e relativo da classificação.

2.2.2 Parte “USUÁRIO”

Esta parte contempla o Módulo de Interface com Usuário, permitindo analisar os sinais classificados automaticamente pelo sistema com mais detalhes ou ainda, auxiliar na classificação manual de dados não classificados de forma automática.

2.2.2.1 Módulo – Interface com Usuário

A fim de observar algum fenômeno com mais detalhes, pode ser aplicada uma janela gráfica nos dados coletados, com o intuito de se analisar regiões relevantes no evento monitorado, uma janela temporal retangular no sinal no domínio do tempo e apenas a amostra do sinal, resultante deste janelamento, é considerada para efeito de análise. Na Figura 5 é mostrado o janelamento temporal para o Transitório de Tensão – Energização de Banco de Capacitores, janelamento de 800ms, 60ms e 600 μ s.

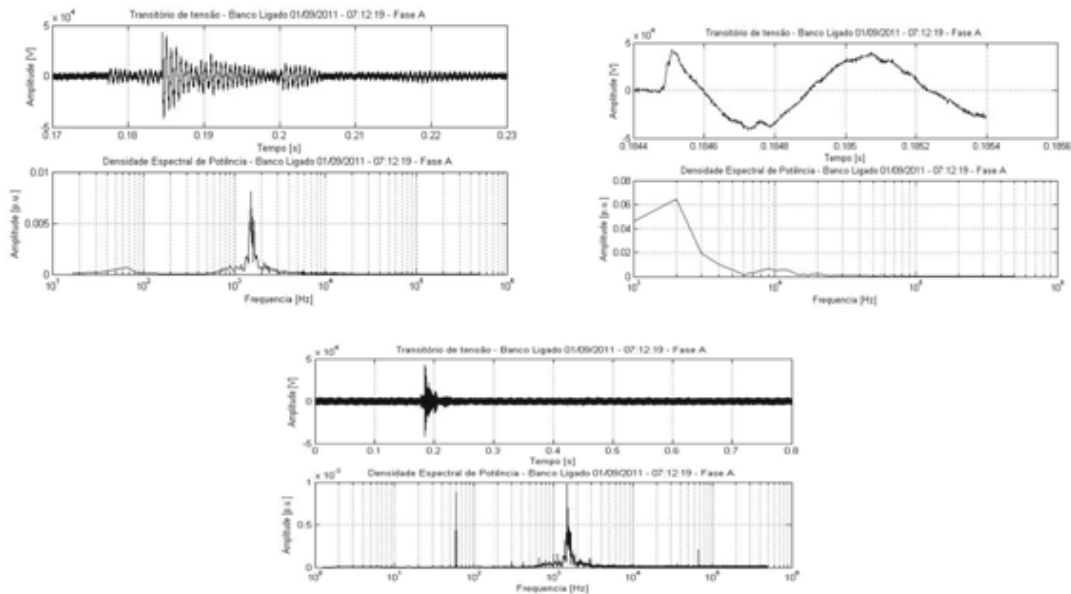


Figura 2 – Aplicação de janela temporal – Energização de banco de capacitores

Outra aplicação refere-se à comparação de densidades espectrais de sinais. A partir do cálculo do espectro de frequências de cada forma de onda padronizada (Frequência industrial, Impulso de Manobra e Impulso Atmosférico), é possível definir uma envoltória que corresponde aos maiores valores de densidade espectral para cada valor de frequência. Na Figura 6 é mostrada a análise a partir das envoltórias com diferentes janelas temporais da densidade espectral da tensão transitória medida (Vs) quando manobra de um banco de capacitores e a densidade espectral da envoltória de um autotransformador definida pelas formas de onda padronizadas [1].

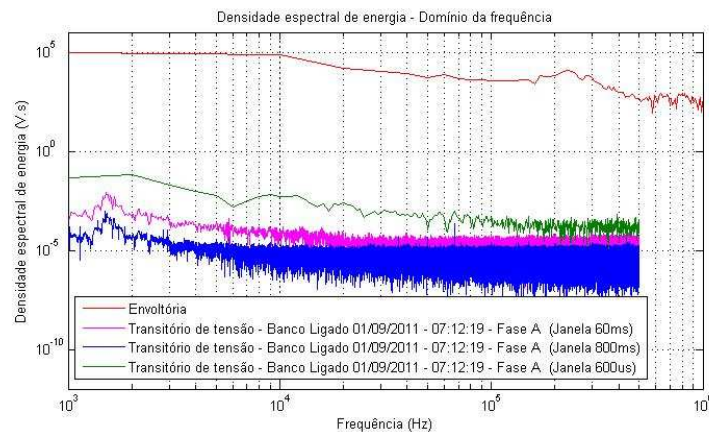


Figura 3 – Envoltória de energização de banco de capacitores

Além disso, o SMARTe permite observar o sinal por meio de diversas análises:

- Análise no Domínio do Tempo – verifica-se o sinal no domínio do tempo e pode-se calibrar o sinal (multiplicar pelos valores de atenuação da ponta de prova), normalizar (utilizar o maior valor do sinal e dividir o sinal todo por este valor, permitindo comparar sinais diferentes), aplicar um filtro ao sinal (passa alta, passa baixa, passa faixa ou rejeita faixa) é possível ainda autodetectar o evento, aplicando uma janela menor em torno do transitório.

- Análise no Domínio da Frequência – pode-se analisar o sinal em diferentes óticas no domínio da frequência, tais como: Transformada de Fourier (FFT), Desvio Espectral, Oitavas e Envoltória e ainda escolher o “df”.
- Análise no Tempo x Frequência
- Domínio da Amplitude – observação das variáveis estatísticas contidas no sinal: média, valor de pico a pico, curtosis, desvio padrão, valor rms, fator de crista, coeficiente de autocorrelação.

3.0 - APLICAÇÃO

Como exemplo de aplicação do sistema, o mesmo encontra-se instalado desde Junho/2011 numa subestação de 765/345 kV, utilizando os taps capacitivos das buchas de 345 kV de um banco de autotransformadores. Os dados abaixo se referem a um período de monitoramento de 6 meses.

Nas Figuras 7 a 10 são mostrados alguns padrões observados neste período. Importante notar que estas formas de onda são aquelas percebidas e aquisitadas nos taps de 345 kV dos autotransformadores quando de algum evento no interior da subestação.

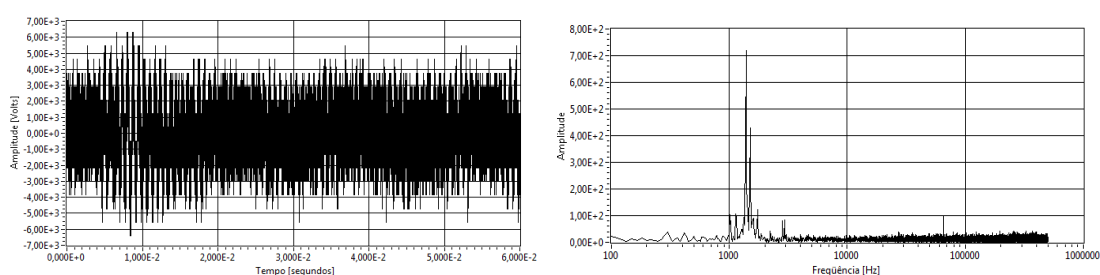


Figura 4 - Padrão de Desenergização de Banco de Capacitores

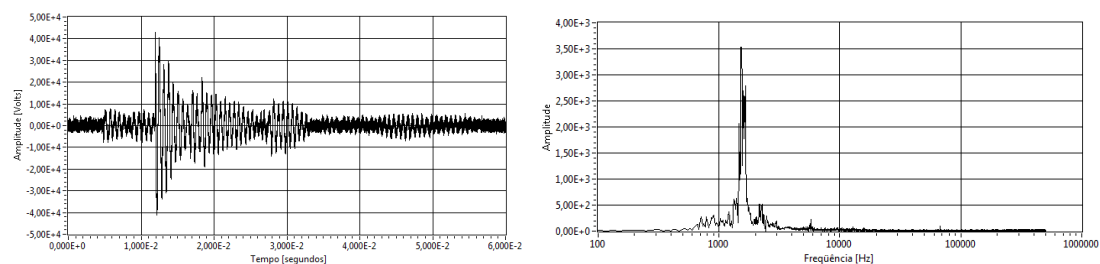


Figura 5 - Padrão de Energização de Banco de Capacitores

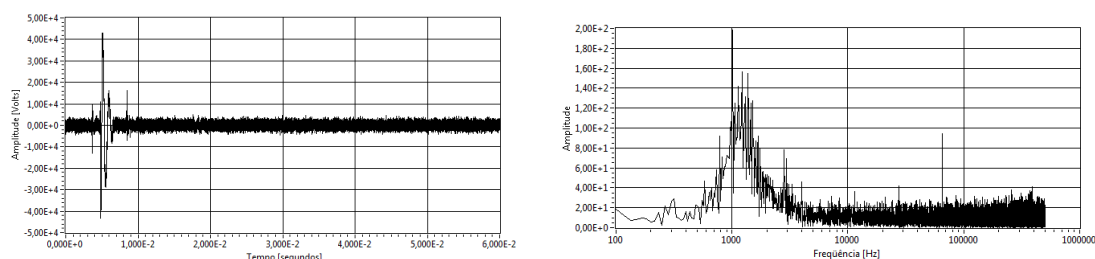


Figura 6 – Padrão Manobra de Disjuntor

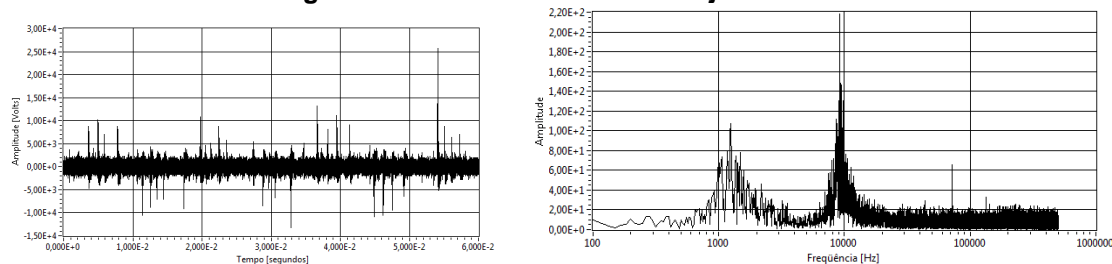


Figura 7 - Padrão Manobra de Seccionador

Os seccionadores quando manobram, apresentam uma sequência de descargas entre contatos, sendo esperado eventos aleatórios. Interessante notar que no caso específico destes seccionadores, os resultados quando vistos no domínio da frequência têm frequências predominantes. Uma explicação para este comportamento refere-se a: O comprimento do gap entre eletrodos é muito grande (metros), minimizando o efeito dos eletrodos e suas geometrias, a velocidade da lança do seccionador é lenta, bem como a onda aplicada é de baixa frequência (60 Hz). Outra consequência é que os padrões tanto para abertura como fechamento sejam muito semelhantes.

Na Tabela 1 é mostrada uma estatística geral dos eventos e na Tabela 2 a estatística dos eventos reconhecidos e classificados automaticamente pelo SMARTe durante este período. Observa-se que ocorre uma dispersão entre as fases: A **fase A** corresponde a aproximadamente **65%** dos eventos monitorados, enquanto as **fases B e C** correspondem a **22% e 13 %** respectivamente.

A definição de um limite de trigger para classificação dos eventos requer algum cuidado, há necessidade de se compatibilizar este valor para os diversos eventos (ou grupos de eventos) esperados, pois um valor muito pequeno pode gerar excesso de informação, em grande parte ruído da própria instalação.

Tabela 1 - Dados Transitórios – Estatística geral

Desenergização de Banco de Capacitores	0,71%	Transitório 4,26%
Energização de Banco de Capacitores	1,46%	
Manobra de Seccionador	0,04%	
Comutação de “tap”	0,28%	
Manobra de Disjuntor	0,02%	
Não Classificados Automaticamente	1,73%	
Regime Permanente	95,74%	

Tabela 2 - Dados Transitórios por Padrão x Fase

	FASE A	FASE B	FASE C	A+B+C
Desenergização de banco de capacitores	37,0%	18,4%	9,9%	29,5%
Energização de banco de capacitores	48,6%	76,5%	67,3%	57,1%
Manobra de Seccionador	0,8%	2,2%	4,0%	1,5%
Comutação de Tap	12,6%	2,2%	18,8%	11,1%
Manobra de Disjuntor	1,1%	0,6%	-----	0,9%
Total por Fase	65,6%	22,0%	12,4%	100,0%

Os casos não classificados automaticamente pelo SMARTe são analisados a posteriori por um especialista.

4.0 - CONCLUSÕES

-Utilizando taps capacitivos de buchas de autotransformadores foi desenvolvido um sistema capaz de medir sinais transitórios oriundos de eventos gerados no interior de uma subestação, armazená-los e transmiti-los via intranet. Uma outra parte do sistema faz classificação automática dos eventos, havendo diversas ferramentas para avaliação dos mesmos, inclusive quanto a verificação de possível superação de suportabilidade dielétrica dos autotransformadores.

-Inicialmente, a solução adotada para medição utilizando o tap de buchas causava algum desconforto, visto desconhecer-se como seria o comportamento da função de transferência do circuito de medição ao longo do tempo. Variações nos parâmetros desta função poderiam comprometer os resultados. Porém, ao longo do tempo, o comportamento dos circuitos de medição tem sido estável, havendo acompanhamento automático da tensão de 60 Hz e verificações periódicas em campo dos circuitos. A dificuldade encontrada ao aplicar-se este tipo de solução reside no tempo necessário para caracterização dos circuitos de medição no domínio da frequência.

-O sistema classifica os sinais a partir do conceito de oitavas, caracterizando cada tipo de transitório por uma envoltória construída a partir de dados conhecidos, e a partir daí, conforme os dados são classificados numa determinada classe, estes passam a contribuir para a formação de uma nova envoltória possibilitando que uma maior quantidade de dados possa ser classificada corretamente.

-No caso exemplo, durante o período de monitoramento não foram encontrados eventos dissociados de manobras internas a SE.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] H. J. A. Martins, W. R. Cerqueira, C. Vasques, and all, "Identifying Interaction between Electric Power System and Autotransformers by Analyzing Transient Voltages Measured Using Bushing Capacitive Taps" CIGRE A2 & D1 2011, KYOTO, JAPAN, 2011

[2] H. J. A. Martins, A. Neves, "Investigation about failures in 500 kV/185 MVA generator transformers at Luiz Gonzaga", 12nd International Symposium on High Voltage Engineering, Bangalore, India, 2001.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Helvio Jailson Azevedo Martins: Nasceu em Nova Friburgo – RJ, em Julho de 1955. Graduado em Engenharia Elétrica (Sistemas de Potência) pela UFRJ, 1979, onde também obteve o grau de Mestrado em Engenharia Elétrica (Alta Tensão), 1987; e Doutor em Engenharia Elétrica em 2007, desenvolvendo tese sobre monitoramento de deslocamentos geométricos de enrolamentos de transformadores de potência utilizando a resposta em frequência associada a algoritmos de inteligência artificial. Iniciando experiência profissional na ex-PTEL- Projetos e Estudos de Engenharia, participando de estudos de planejamento da interligação do sistema elétrico brasileiro e projetos de subestações. No CEPEL desde 1985, atuando no desenvolvimento de técnicas de ensaios aplicadas a avaliação de equipamentos elétricos de AT. Atualmente desenvolve pesquisas relacionadas a métodos e técnicas para monitoramento, avaliação e diagnóstico de equipamentos elétricos. É autor de diversos trabalhos, nacionais e internacionais, participando ativamente de alguns grupos de trabalho do Cigré.



Cintia de Faria Ferreira: Nascida em Vassouras – RJ, em outubro de 1982. Graduou-se na Universidade Severino Sombra em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Potência, em 2007. Obteve o grau de Mestra pela PUC-Rio em 2012 em Sistemas de Energia Elétrica. Atualmente, exerce suas atividades no CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), realizando pesquisas voltadas à avaliação e diagnóstico de estados operativos dos equipamentos elétricos de alta tensão, contribuindo para o desenvolvimento de métodos e técnicas. E-mail: cintiaf@cepel.br

Carlos Magno Rodrigues Vasques: Nasceu em Volta Redonda – RJ, em Agosto de 1978. Graduou-se em Engenharia Eletrônica e Computação pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004. Conclui o Mestrado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, na área de processamento de sinais e inteligência computacional. Iniciou suas atividades profissionais no CEPEL em janeiro de 2005 envolvendo-se em atividades de análise e estudo de projetos de equipamentos elétricos utilizados em áreas classificadas bem como o acompanhamento de produtos junto aos fabricantes. Atualmente participa de pesquisas voltadas ao desenvolvimento de métodos e técnicas para monitoramento, avaliação e diagnóstico de equipamentos elétricos através da aplicação das técnicas de medição de sinais no domínio da frequência (transferência de tensão e impedância). É co-autor de alguns trabalhos nacionais. E-mail: cmagno@cepel.br

Ítalo Foradini da Nova: Engenheiro eletrônico graduado pela Sociedade Educacional Professor Nuno Lisboa em 1991. No CEPEL desde 1985. Trabalhou com manutenção e calibração de instrumentação eletrônica de medição, Medição e calibração em laboratórios de alta tensão e alta potência. Autor de trabalhos voltados para diagnóstico em equipamentos elétricos de alta tensão. Atualmente trabalha no LABDIG, com pesquisa, projetos de sistemas de medição e condicionamento de sinais. foradini@cepel.br