



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

BR/GTM/20
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO -XIII

GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES - GTM

IDENTIFICANDO A INTERAÇÃO ENTRE SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA E AUTOTRANSFORMADORES DE POTÊNCIA PELA ANÁLISE DAS TENSÕES TRANSITÓRIAS MEDIDAS UTILIZANDO TAP CAPACITIVO DAS BUCHAS

Helvio J. A. Martins (*) Ítalo F. da Nova Luiz E. Dias Santos Walter R. de C. Filho
CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA

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

Miguel A. de C. Michalski
M&D MONITORAÇÃO E DIAGNOSE

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de técnicas para medição e análise de solicitações elétricas impostas pelo sistema elétrico a um grupo de autotransformadores de potência de 765/500/345 kV, identificando as possíveis interações entre sistema e equipamentos. Os equipamentos foram caracterizados no domínio da frequência (tensões transferidas e impedâncias terminais), e com base nas informações medidas no lado de 345 kV de frequências e amplitudes resultantes das manobras na subestação comparadas às características dos autotransformadores, realizaram-se verificações do efeito dessas manobras nas frequências naturais de oscilação dos equipamentos, estimação da transferência de tensão entre os enrolamentos e avaliação do risco envolvido nas manobras para a suportabilidade dielétrica por meio do fator de severidade no domínio da frequência (FSDF).

PALAVRAS-CHAVE

Autotransformador, Interação, Tap capacitivo das buchas, Medição de transitórios, Resposta em frequência

1.0 - INTRODUÇÃO

Considerando o crescente interesse em avaliar a interação entre sistemas de energia elétrica e equipamentos de alta tensão, algumas concessionárias do setor elétrico brasileiro têm solicitado ao Cepel medições e avaliações quanto a solicitações impostas aos seus equipamentos, principalmente em transformadores, autotransformadores e reatores. Esta situação começou a ganhar relevância em casos em que há necessidade de identificar os motivos de falhas de equipamentos.

A fim de identificar que tipo de solicitação elétrica um autotransformador de potência está submetido, um banco de autotransformadores de 765/500/345 kV de diferentes fabricantes foi instrumentado. Tensões transitórias decorrentes de manobras na subestação foram aquiritadas durante alguns meses. Também foram realizadas medidas de transferência de tensão no domínio da frequência (SFRA - sweep frequency response analysis) a fim de estabelecer as amplitudes e frequências de ressonância e anti-ressonâncias naturais dos autotransformadores.

O monitoramento de tensões transitórias que alcançam as buchas de 345 kV utilizando os taps capacitivos das buchas de alta tensão associados a unidades secundárias de alto desempenho é uma tarefa inédita no Brasil. Os sinais aquiritados são armazenados num hardware específico e disponibilizados via intranet para as análises necessárias. Eventos decorrentes de descargas atmosféricas não tiveram medição prevista.

(*) Av. Horácio de Macedo, nº354 – Sala 01 – Bloco D – Labdig – CEP 21.941-590 – Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2598-6351 – Fax: (+55 21) 2598-6378 – Email: helvio@cepel.br

Previamente, medições sob demanda no local, foram obtidas usando simultaneamente divisores capacitivos externos e dispositivos acoplados ao tap capacitivo das buchas dos autotransformadores. Baseando-se nas aquisições das tensões transitórias durante as manobras, os sinais foram analisados e suas principais frequências foram identificadas através da utilização de uma rotina FFT (Fast Fourier Transform).

A partir da identificação das frequências naturais de oscilação de três autotransformadores de diferentes fabricantes e os espectros de frequência de tensões transitórias capazes de alcançar suas buchas de alta tensão (345 kV), foi possível inferir se houve alguma interação entre um dos equipamentos do banco de autotransformadores e tensões transitórias geradas por manobras na subestação.

Com base nas informações de frequências e amplitudes das manobras na subestação, realizaram-se as seguintes avaliações: efeito das manobras nas frequências naturais de oscilação dos autotransformadores, estimação da transferência de tensão entre os enrolamentos dos autotransformadores e avaliação do risco envolvido nas manobras medidas por meio do fator de severidade no domínio da frequência (FSDF) [1].

2.0 - CARACTERIZAÇÃO DOS AUTOTRANSFORMADORES NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Ensaio de caracterização dos autotransformadores na subestação foram realizados a fim de identificar as amplificações e atenuações das frequências naturais de oscilação. As Figuras de 1 a 4 mostram o comportamento da impedância terminal e resposta da transferência de tensão no domínio da frequência destes autotransformadores.

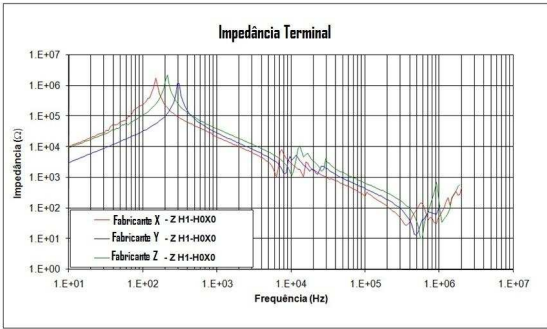


Figura 1 – Impedância terminal no lado de alta tensão

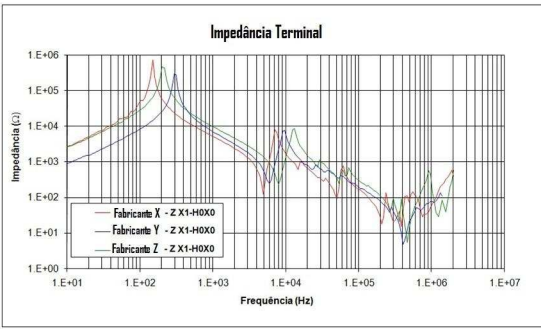


Figura 2 – Impedância terminal no lado de baixa tensão dos autotransformadores

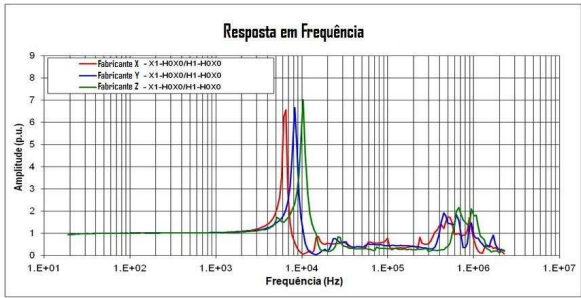


Figura 3 – Resposta em frequência, aplicação em H e medição em X, dos autotransformadores

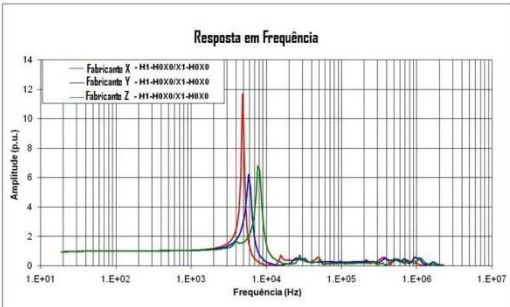


Figura 4 – Resposta em frequência, aplicação em X e medição em H, dos autotransformadores

Na Tabela 1 mostram-se as regiões de maior amplificação de cada autotransformador bem como as amplitudes correspondentes em p.u.

Tabela 1 – Características e regiões de amplificação dos autotransformadores

Autotransformador			
	Fabricante X	Fabricante Y	Fabricante Z
Fase	A	B	C

Início da Amplificação (kHz)	2	2	2
Região de Amplificação (kHz)	6-7	8-9	5 / 300-400
Amplitude (p.u)	9	7,5	12/3

3.0 - MEDIÇÕES DE TRANSITÓRIOS

Em um primeiro momento é possível considerar o uso de equipamentos convencionais, como transformadores para instrumentos existentes em uma subestação ou mesmo divisores capacitivos utilizados em laboratórios de alta tensão.

Os dispositivos convencionais (TP, TC, TPC), normalmente instalados em sistemas de energia elétrica não apresentam desempenho satisfatório no domínio da frequência, impossibilitando seu uso de forma satisfatória. Os divisores capacitivos de laboratório requerem uma logística para transporte e uso no campo, além de nem sempre serem apropriados e disponíveis para permanecer por longos períodos ao tempo. Outra preocupação refere-se à inserção de uma capacitância no circuito, que se comparável àquela do barramento, pode afetar diretamente as medições, impactando nos resultados e avaliações relacionadas.

Portanto, o uso do tap capacitivo das buchas de transformadores e reatores, juntamente com divisores de tensão (unidades secundárias especiais) apresenta-se como uma alternativa viável para a medição de tensões transitórias de alta frequência. As Figuras 5a e 5b mostram o uso de ambas alternativas.



Figura 5a – Medição com Divisor Capacitivo [2]



Figura 5b – Medição utilizando o tap capacitivo da bucha

3.1 MEDIÇÕES E RESULTADOS UTILIZANDO O TAP CAPACITIVO DAS BUCHAS

Por questões de segurança, mesmo considerando a necessidade de desligamento do equipamento a ser monitorado, a utilização do tap capacitivo das buchas para medições de transitórios de tensão demanda um curto espaço de tempo para sua implementação, montagem e calibração. A utilização do tap capacitivo elimina a possibilidade de uma possível modificação da capacitância do barramento onde o equipamento se encontra ligado por conta de algum sistema externo, conectado diretamente ao barramento. Sendo assim, as medições de transitórios de tensão utilizando o tap capacitivo das buchas de transformadores e reatores de potência provaram ser uma alternativa viável e não invasiva, desde que previamente qualificada.

Eventos transitórios gerados no interior da subestação que foram capazes de sensibilizar o sistema de medição instalado nos taps das buchas de 345 kV foram analisados e agrupados [2], tendo as principais componentes de frequência identificadas utilizando uma rotina de FFT. Medições típicas relacionadas com manobras realizadas na subestação e seus respectivos espectros são mostradas nas Figuras 6 e 7.

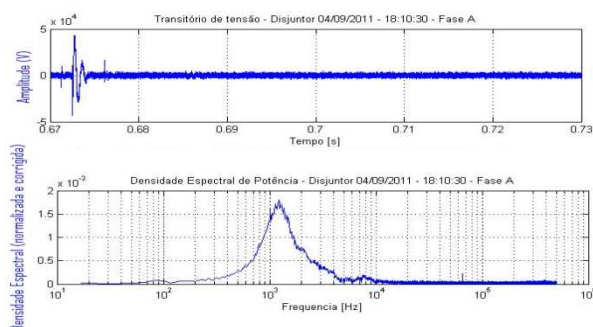


Figura 6 – Medição de transitório de tensão do fechamento de um disjuntor e seu espectro correspondente

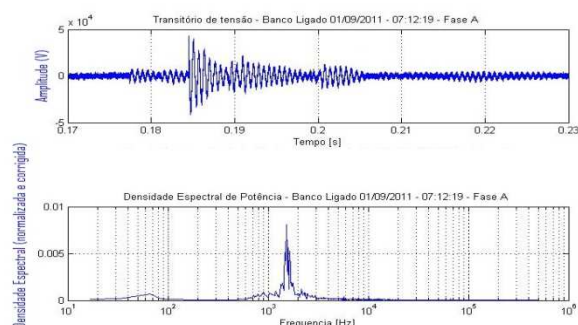


Figura 7 – Medição de transitório de tensão da energização de um banco de capacitores e seu espectro correspondente

4.0 - ANÁLISE E IDENTIFICAÇÃO DOS TRANSITÓRIOS DE TENSÃO

Foram realizadas duas abordagens para análise das medições: superpondo informações de caracterização no domínio da frequência dos autotransformadores versus espectros de frequências oriundos das medições de eventos transitórios, e considerando a avaliação de risco envolvido nestes eventos por meio de um fator de severidade no domínio da frequência (FSDF)[1].

Para aplicação dos critérios definidos anteriormente, os valores de cada uma das medições de transitórios de tensão foram corrigidos de acordo com a característica em frequência de cada um dos sistemas de medição (a partir do tap da bucha até o filtro passa-alta), a avaliação foi complementada aplicando a transformada rápida de Fourier a estes resultados, obtendo assim o espectro de frequências envolvido em cada evento analisado.

4.1 IDENTIFICAÇÃO DE FREQUÊNCIAS COINCIDENTES

A superposição das frequências naturais de oscilação dos autotransformadores e os espectros de frequência de eventos transitórios capazes de alcançar suas buchas de baixa tensão (345 kV) permitem identificar possíveis regiões de coincidência. Entretanto, para realizar a superposição é necessária a normalização das medições dos eventos transitórios e da caracterização dos autotransformadores para indicar uma mesma faixa de valores das informações, evitando assim que uma dimensão se sobreponha em relação à outra. Nas Figuras 8 e 9 são mostradas, através de um gráfico, as características no domínio da frequência de um autotransformador e as de manobras de fechamento de um disjuntor e de energização de um banco de capacitores respectivamente. A análise gráfica mostra os eventos vistos de ambos os lados do autotransformador.

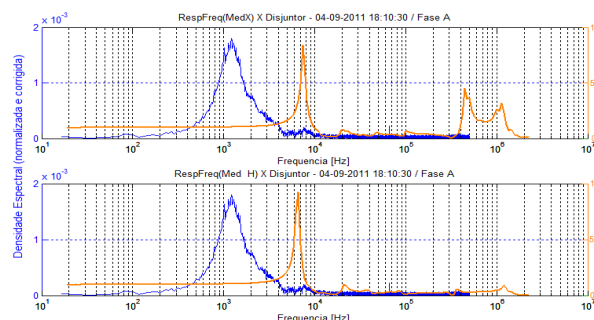


Figura 8 – Análise gráfica da resposta em frequência, no lado de baixa e alta tensão, de um dos autotransformadores e a medição de uma manobra de fechamento de um disjuntor

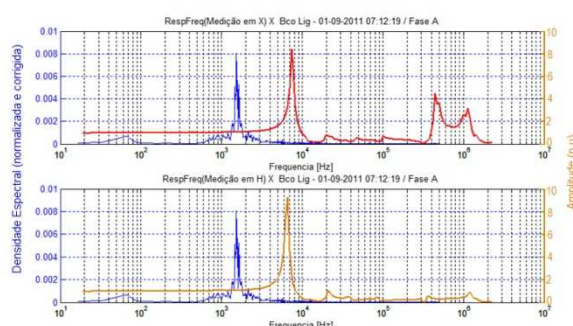


Figura 9 – Análise gráfica da resposta em frequência, no lado de baixa e alta tensão, de um dos autotransformadores e a medição de uma manobra de energização de banco de capacitores

4.2 ESTIMAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE TENSÃO ENTRE ENROLAMENTOS

Todas as medições relativas aos eventos transitórios foram aquisitadas no lado de baixa tensão (345 kV) dos autotransformadores. Sendo assim, para as manobras geradas no lado de baixa tensão do autotransformador a estimativa da transferência das componentes de frequência pode ser realizada considerando a multiplicação da curva contendo as principais componentes dos transitórios de tensão e a curva das regiões de ressonância de cada autotransformador. A curva de resposta em frequência do autotransformador pode ser entendida como a curva que retrata a função de transferência do mesmo. Para as manobras geradas no lado de alta tensão do autotransformador a estimativa das componentes de frequência geradas no enrolamento de alta tensão do autotransformador pode ser realizada considerando a divisão da curva de medição contendo as principais componentes dos transitórios de tensão e a curva das regiões de ressonância de cada autotransformador (função de transferência da alta para a baixa tensão). Na Figura 10 pode ser verificada a influência direta da característica do autotransformador na medição de uma manobra na subestação e o transitório de tensão gerado. Assim sendo, uma estimativa das componentes de frequência transferidas para os demais enrolamentos pode ser realizada.

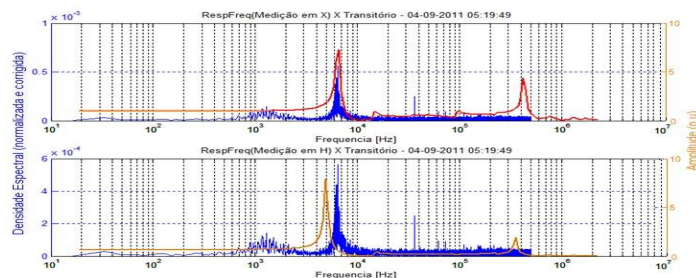


Figura 10 – Transitório de tensão proveniente de uma manobra um seccionador na subestação e caracterização do autotransformador

4.3 FATOR DE SEVERIDADE

O CIGRÉ através do grupo de estudos JWG A2/C4-03 elaborou uma brochura técnica onde consolida alguns trabalhos realizados pelo grupo, permitindo concluir que os valores máximos das sobretensões, embora muito importantes, não são os únicos fatores de risco para o equipamento. Também devem ser levados em conta os efeitos do espectro de frequências da onda de tensão transitória resultante da excitação oscilatória envolvendo a interação de cada equipamento com o sistema [1].

Todo equipamento antes de ser energizado e colocado em operação é submetido a ensaios através de formas de onda padronizadas, definidas em normas técnicas. Estas formas de ondas padronizadas são utilizadas em ensaios dielétricos em laboratório para verificação das especificações do equipamento quanto à suportabilidade dielétrica.

A partir do cálculo do espectro de frequências de cada forma de onda padronizada, é possível definir uma envoltória que corresponde aos maiores valores de densidade espectral para cada valor de frequência. Com o propósito de estabelecer um novo critério que leve em conta o espectro de frequências de transitórios presentes na subestação, foi definido o Fator de Severidade no Domínio da Frequência (FSDF) como a razão entre a densidade espectral da tensão transitória medida (Vs) e a densidade espectral da envoltória definida pelas formas de onda padronizadas [1]. A Figura 11 ilustra a proposta do critério fazendo alusão à suportabilidade dielétrica do equipamento.

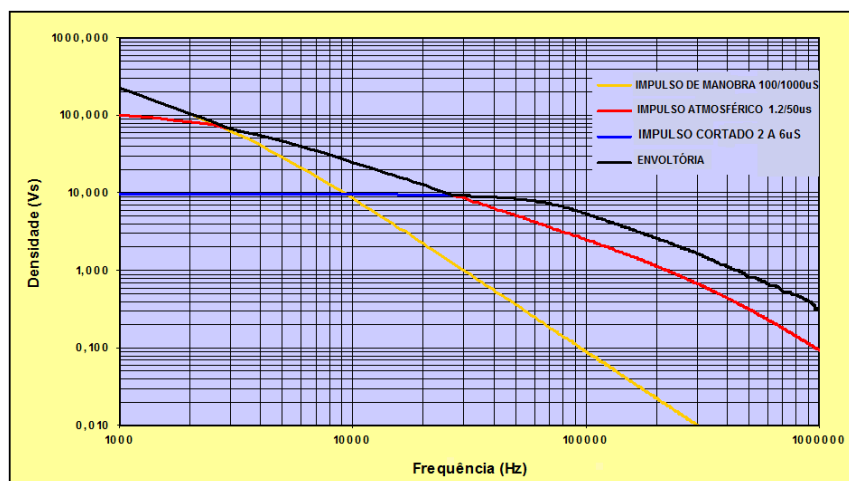


Figura 11 – Suportabilidade dielétrica do autotransformador – envoltória

De todos os eventos registrados durante os meses de monitoramento, para aqueles mais significativos, foi aplicado o critério do FSDF. Como exemplo, nas Figuras 12 e 13 são apresentadas a curva no tempo de um transitório de tensão relativo ao fechamento de um disjuntor e a razão entre a densidade espectral relativa a este evento e a densidade espectral da envoltória obtida pelas formas de ondas padronizadas para este equipamento.

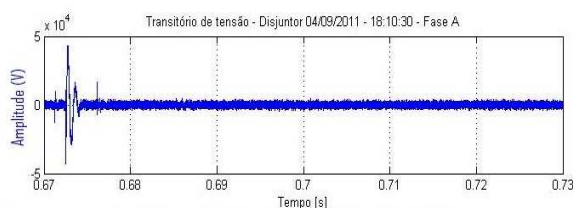


Figura 12 – Transitório de tensão do fechamento de um disjuntor

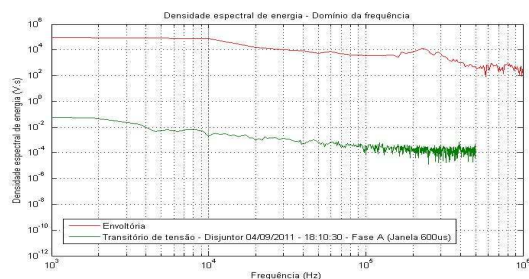


Figura 13 – Espectro de tensão transitória da manobra de fechamento de um disjuntor

Nas Figuras 14 e 15 são mostradas a curva no tempo do transitório de tensão da energização de um banco de capacitores e a razão entre a densidade espectral deste evento e a densidade espectral da envoltória definida pelas formas de onda padronizadas, respectivamente.

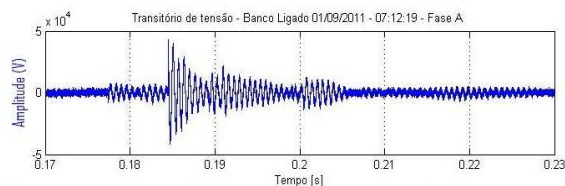


Figura 14 – Transitório de tensão da energização de um banco de capacitores

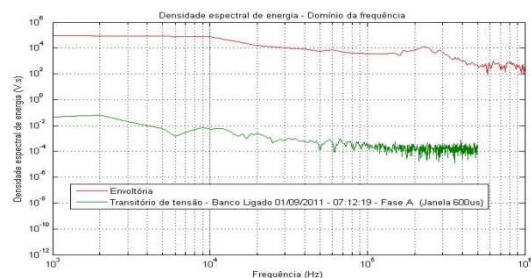


Figura 15 – Espectro de tensão transitória da manobra de energização de um banco de capacitores

Das manobras aquisitadas na subestação, percebe-se que apesar de algumas das regiões de amplificação do autotransformador coincidirem com algumas regiões de frequência dos transitórios analisados, as amplitudes não são significativas, portanto, insuficientes para se aproximar da suportabilidade dielétrica dos equipamentos.

Entretanto quando se trata de trechos isolados da subestação, com configuração radial, em medições sob demanda, com o autotransformador em vazio, as amplitudes apresentadas foram bastante significativas [3]. Nas Figuras 16 e 17 são apresentadas a curva no tempo do transitório de tensão da manobra de fechamento de um disjuntor no lado de alta tensão do autotransformador e a razão entre a densidade espectral deste evento e a densidade espectral da envoltória definida pelas formas de ondas padronizadas, respectivamente.

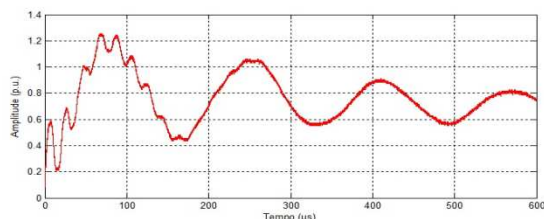


Figura 16 – Transitório de tensão da manobra de fechamento do disjuntor no lado de alta tensão do autotransformador

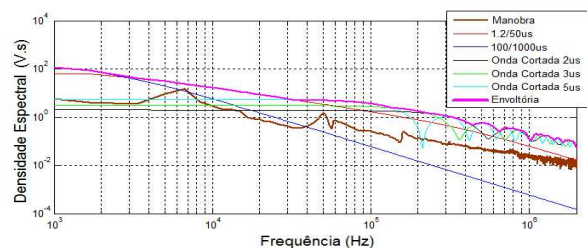


Figura 17 – Espectro de tensão transitória da manobra de fechamento do disjuntor no lado de alta tensão do autotransformador

As diferenças encontradas entre medições sob demanda, com os autotransformadores alimentados por circuito radial e àquelas na qual os eventos medidos tiveram sua origem numa rede mais complexa (barramentos completamente interconectados), é esperada, visto que nesta última situação as tensões transitórias até alcançarem as buchas de 345 kV, pelas várias conexões no circuito, sofrem refrações e reflexões resultando em menores amplitudes. A seguir, na Figura 18 é mostrado um fluxograma sintetizando todo o processo para medições e avaliações remotas de transitórios de tensão numa subestação.

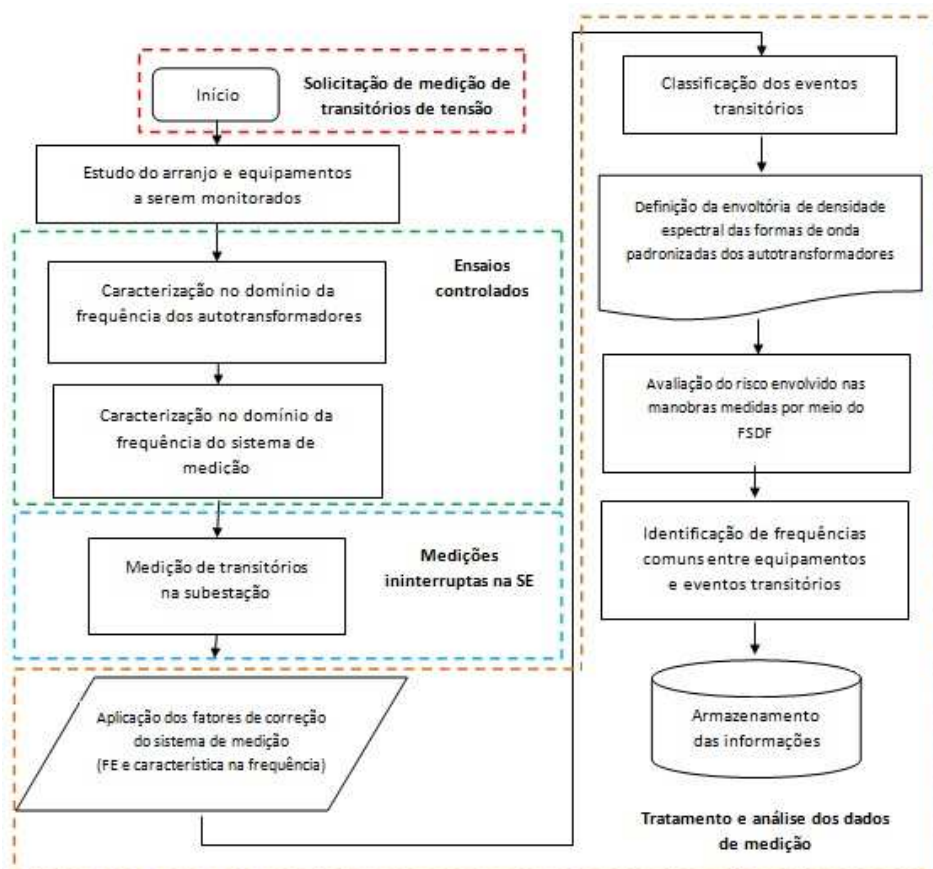


Figura 18 – Síntese do processo de medição remota de transitórios de tensão numa subestação

5.0 - CONCLUSÕES

Usando as características de frequência natural de três autotransformadores diferentes e os espectros de frequência de excitações de tensão capazes de atingir as buchas de alta tensão de 345 kV, foi possível inferir se houve algumas interações entre o banco de autotransformadores e tensões transientes geradas por eventos no interior da subestação.

Analisando as medições obtidas e superpondo informações de caracterização no domínio da frequência dos autotransformadores permitiram-se avaliar as coincidências de componentes de frequências dos eventos transitórios e regiões de ressonâncias dos autotransformadores, bem como a estimativa de transferência de tensão entre enrolamentos dos autotransformadores.

Considerando a avaliação de risco envolvido nestas manobras por meio de um fator de severidade no domínio da frequência (FSDF), proposto pelo Cigré, é possível verificar se os valores máximos de sobretensões geradas num amplo espectro de frequências superam a envoltória de suportabilidade do equipamento em alguma situação.

Estes resultados podem subsidiar pesquisas feitas em parceria com as concessionárias e fabricantes, a fim de esclarecer a razão pela qual alguns autotransformadores falharam durante os últimos anos. O trabalho pode fornecer informações adicionais para futuras especificações técnicas, além de fornecer o suporte aos fabricantes quanto aos transitórios de tensão que o equipamento poderia ser submetido durante sua vida útil.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. C. O. Rocha e outros, "Interação entre transformadores e o sistema elétrico com foco nos transitórios eletromagnéticos de alta frequência" – Brochura Técnica – Grupo de trabalho conjunto JWG A2/C4-03 – CIGRÉ, Brasil – 2010.
- [2] H. J. A. Martins, W. R. Cerqueira, C. Vasques, et. al, "Identifying Interaction between Electric Power System and Autotransformers by Analyzing Transient Voltages Measured Using Bushing Capacitive Taps" CIGRE A2 & D1 2011, KYOTO, JAPAN, 2011
- [3] H. J. A. Martins, Cintia Carraro, Carlos Magno R. Vasques, Ítalo F. Nova, Walter C. Filho, Miguel Michalski, "Sistema de Medição e Análise Remota de Transitórios Eletromagnéticos – SMARTe, XXII SNPTEE, Brasília, 2013

- [4] W. R. Cerqueira, A. Neves and Helvio J. A. Martins, "Frequency response and impedance measurement applied to power transformers diagnostics", 12th International Symposium on High Voltage Engineering, Bangalore, India, August 2001

7.0 - 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.



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

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

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

Luiz Eduardo Dias Santos: Nascido no Rio de Janeiro – RJ, em junho de 1960. Graduou-se na Escola Técnica Federal Celso Suckow da Fonseca – RJ em Eletrotécnica, em 1980. Ingressou na Universidade Veiga de Almeida em 1982 cursando engenharia elétrica até o 5º período. De outubro de 1982 até a presente data, exerce suas atividades no CEPEL, onde inicialmente participou na área de potência ensaiando equipamentos elétricos de alta tensão para o setor elétrico nacional e internacional no período de 1982 até 1999. Atualmente, participa 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: leds@cepel.br