



**GRUPO X  
SOBRETENSÕES, COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO E INTERFERÊNCIAS (GSI)**

**ANÁLISE DAS FALHAS DOS AUTOTRANSFORMADORES DA SE SÃO GOTARDO 2  
ENFOQUE NA RESSONÂNCIA PARCIAL DE ENROLAMENTO**

**Angélica C.O. Rocha\*  
Hugo N. Gomes  
CEMIG**

**José C. Mendes  
ABB Asea Brown Boveri**

**Ricardo P. D. Ross  
Sérgio L. Varrichio  
CEPEL**

**Gustavo H.C. Oliveira  
LAS/CCET  
PUCPR**

**RESUMO**

Falhas de origem dielétricas de transformadores têm sido associadas à ocorrência de ressonância de parte dos enrolamentos quando solicitados por transitórios provenientes do sistema elétrico. Sob esse enfoque, esse trabalho aborda a falha consecutiva de dois autotransformadores do sistema de extra - alta tensão da CEMIG, apresentando as análises realizadas envolvendo simulações transitórias, inspeções e desmontagens dos equipamentos no campo.

**PALAVRAS-CHAVE**

Falha em transformadores. Ressonância parcial de enrolamento. Funções de transferência entre enrolamentos. Sobretensões transitórias.

**1. 0 - HISTÓRICO**

As falhas dielétricas de dois autotransformadores 500/345-13.8kV,400MVA, instalados na SE São Gotardo 2 do sistema de transmissão da Cemig, no intervalo de uma semana, deram origem a uma série de análises com o objetivo de se determinar as possíveis causas das ocorrências. Os autotransformadores eram de fabricantes diferentes e estavam há três anos em operação, tendo sido aprovados em ensaios dielétricos convencionais conforme especificações e normas internacionais.

As análises preliminares das condições de sistema, durante as contingências, e do histórico de operação e manutenção dos autotransformadores não permitiram uma identificação direta de causa-efeito que justificasse as falhas dielétricas dos equipamentos. Não foi detectada nenhuma perturbação no sistema quando

das ocorrências. Adicionalmente não foi registrada atuação de pára-raios na SE, incluindo aqueles dos autotransformadores. As únicas manobras executadas nos dias das ocorrências foram as dos reatores instalados nos terciários dos autotransformadores para controle de tensão. No momento das falhas, esses reatores estavam em operação.

Discussões posteriores entre CEMIG e ABB (responsável pelo reprojeto e reparo no campo dos autotransformadores), conduziram à hipótese das falhas terem sido de origem dielétrica, função de amplificações de tensões transitórias provenientes do sistema elétrico e que podem ocorrer em pontos internos dos equipamentos. Essas amplificações, denominadas ressonâncias parciais de enrolamento, são originadas quando o espectro de frequências da tensão impostas pelo sistema contiver componentes na região de uma das frequências naturais do autotransformadores. É importante observar que falhas dessa natureza podem estar associadas ao caráter cumulativo dessas solicitações. Falhas dielétricas incipientes provocadas por esse fenômeno durante eventos no sistema podem, também, evoluir para uma falha de isolação de maior grau em condições normais de operação do sistema. Ocorrências dessa natureza em transformadores de grande porte vêm sendo reportadas por concessionárias de diversos países.

A partir dessas considerações, a CEMIG deu início à uma série de ações incluindo medições de resposta em frequência dos autotransformadores no campo e estudos de simulações transitórias, com o objetivo de analisar o efeito de possíveis surtos de tensão impostos aos autotransformadores na operação do sistema. Inspeções internas e desmontagem detalhada dos enrolamentos foram também realizadas com o objetivo

de se determinar a extensão de cada uma das falhas e, em particular, verificar a localização mais provável de ocorrência do início de cada falha.

## 2.0 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

A subestação de São Gotardo 2 faz a interligação do sistema elétrico da região do Paranaíba ao maior centro de consumo de carga do Estado de Minas Gerais (região central). Representa ainda uma importante fonte, juntamente com a Usina de Três Marias e a LT 345kV Neves 1 - Três Marias, para o suprimento de energia à região Norte do Estado. A perda da transformação da SE São Gotardo 2 pode acarretar um esgotamento das demais transformações de 500/345 kV do sistema CEMIG e uma diminuição significativa da confiabilidade de atendimento ao Norte de Minas.

A subestação está interligada à malha de 500kV através das LTs 500kV Emborcação - São Gotardo 2 e Neves 1 - São Gotardo 2 e a malha de 345kV através da LT São Gotardo 2 - Três Marias. O arranjo da subestação é do tipo disjuntor e meio e seu diagrama unifilar está apresentado na Figura 1.

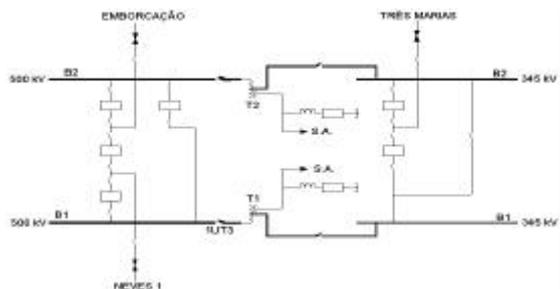


FIGURA 1 – SE SÃO GOTARDO 2

Os dois autotransformadores possuem reator terciário de 50 MVar para controle de tensão.

## 3.0 - INVESTIGAÇÃO DAS FALHAS NO CAMPO

Após a falha, a ABB e a CEMIG realizaram avaliações de campo, incluindo medições e inspeções internas aos autotransformadores.

### 3.1 - Medições e Inspeções Internas

O autotransformador T1, fabricado na Ásia, tem núcleo tipo core e enrolamentos série (ATs), tipo disco entrelaçado, série-regulação (ATr) tipo camadas entrelaçadas e comum (Com) do tipo disco parcialmente entrelaçado.

As medições preliminares pós-falha deste autotransformador não indicaram avaria interna aos enrolamentos, por exemplo curto-circuito permanente. A inspeção interna revelou que o comutador sem carga

de uma das fases apresentava avarias resultantes de descarga elétrica tipo arco. Assim o diagnóstico requeria ensaios adicionais (por exemplo: vazio, descarga parcial, etc) com tensões controladas e mais elevadas. Após a substituição do comutador, o ensaio em vazio revelou a ocorrência de falha interna aos enrolamentos. A localização da falha foi observada durante a desmontagem do enrolamento ATs (1).

O autotransformador T2, fabricado na Europa, tem núcleo tipo core e enrolamentos série (ATs), série-regulação (ATr) e comum (Com) do tipo camadas. As medições e inspeção interna deste autotransformador revelaram avaria generalizada dos enrolamentos (ATs e ATr) incluindo as ligações internas enrolamento-comutador sem carga.

### 3.2. Arranjo dos Enrolamentos e Local da Falha

Como exemplo, a Figura 2 mostra o arranjo dos enrolamentos em relação ao núcleo e o local da falha no enrolamento série do autotransformador T1.

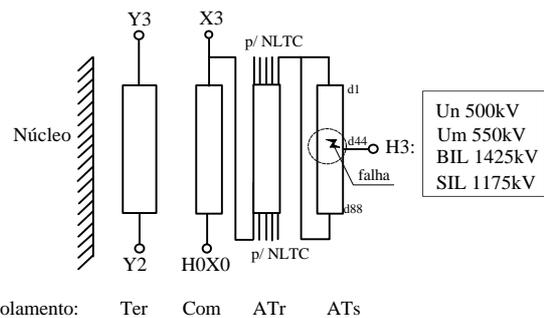


FIGURA 2 - LOCAL DA FALHA

A Figura 3 mostra as ligações internas entre as 2 bobinas duplas entrelaçadas, tipo English Electric, próximas ao terminal H3 e a localização das falhas internas correspondentes.

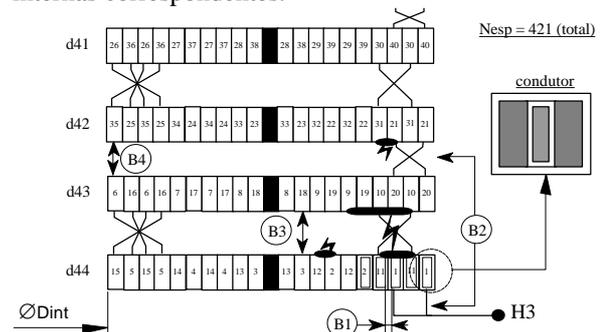


FIGURA 3 - BOBINAS DUPLAS PRÓXIMAS AO TERMINAL DO ENROLAMENTO AT

## 4.0 - ANÁLISE DAS FALHAS SOB O ENFOQUE TRANSITÓRIO

No caso específico da falhas dos autotransformadores da SE São Gotardo 2, a investigação da causa, sob o

ponto de vista de transitórios, foi dificultada pelo fato de terem ocorrido de forma isolada, isto é, sem execução de manobras, curtos-circuitos ou outras condições geradoras de transitórios. Sendo assim, tendo em vista a diversidade das tensões transitórias que atingem uma subestação, optou-se por analisar alguns eventos que precederam às falhas, passíveis de impor solicitações aos enrolamentos dos equipamentos.

#### 4.1 Manobras de seccionadoras de 500kV e 345kV

Durante os três anos anteriores às falhas dos autotransformadores, ocorreram aproximadamente 180 manobras de seccionadoras, sendo que um número significativo delas apresentou interrupções no ciclo de operação, com conseqüente manutenção do arco por um período elevado de tempo. Sabe-se que essas manobras dão origem à frequências elevadas, da ordem de megahertz. A análise para detecção das amplitudes e frequências envolvidas, através de simulações, é bastante complexa para esses casos. Esse tipo de avaliação deverá ser feito, de forma mais confiável, através de medições durante a realização de manobras na subestação.

#### 4.2 Curtos-Circuitos e Descargas Atmosféricas nas LTs

A determinação dos surtos transitórios impostos aos autotransformadores quando da ocorrência de curtos-circuitos e descargas atmosféricas foi realizada através de simulações transitórias utilizando-se o programa ATP. Simulações adicionais foram realizadas pela ABB e serão discutidas no item 5 desse trabalho.

Nas simulações com o ATP, os autotransformadores da SE São Gotardo 2 foram simulados através do modelo Transformer, acrescentando-se capacitâncias entre espiras, entre enrolamentos e entre enrolamentos e terra com valores típicos. Essa modelagem, porém, é aceitável para uma faixa de frequência até alguns kilohertz.

Para uma melhor representação dos autotransformadores, tentou-se inicialmente a modelagem proposta pela referência 2 que utiliza o modelo Transformer porém com  $Z_p$ ,  $Z_s$  e  $Z_t$  respondendo na frequência, através da síntese das curvas medidas no campo das impedâncias de curto-circuito  $Z_{ps}$ ,  $Z_{pt}$  e  $Z_{st}$ .

A experiência com esse modelo apresentou dificuldades para o cálculo de  $Z_p$ ,  $Z_s$  e  $Z_t$  na frequência. A soma das curvas  $Z_p$  com  $Z_s$ , por exemplo, não reproduziu todos os pólos e zeros medidos no campo. Houve também dificuldades de sintetizar os circuitos utilizando-se os programas da

ELETROSUL e MATLAB.

Outra tentativa feita foi a utilização da rotina existente no programa EMTP, versão DCG. Para sua utilização foi necessária a medição em frequência das admitâncias do autotransformador. Para tanto foi injetada uma fonte em cada um dos terminais com os demais curto circuitados e medidas todas as correntes. Este procedimento é mais vantajoso do que a medição da impedância pois o próprio valor medido é usado pelo programa para criação da matriz  $Y$  nodal. No entanto, o programa não conseguiu sintetizar as matrizes  $Y$  do autotransformador terminando o processamento com mensagem indicativa de erro. Contatos posteriores mantidos com os desenvolvedores desta rotina mostrou que sua utilização é ainda incipiente e tem dificuldades em sintetizar transformadores com 3 enrolamentos e conexões em delta.

Apesar das limitações do modelo dos autotransformadores utilizado no estudo, considerou-se como válida a realização das simulações com o objetivo de se fazer uma análise preliminar dos resultados e compará-los com os que serão obtidos quando um modelo mais preciso estiver disponível.

##### 4.2.1 Metodologia de análise

A metodologia adotada nessa análise dos possíveis efeitos dos transitórios impostos aos autotransformadores para curtos-circuitos e queda de descargas nas linhas, partiu das seguintes considerações:

1. A inspeção e desmontagem dos autotrafos indicaram que as falhas iniciaram internamente aos enrolamentos
2. Artigos constantes da bibliografia sobre ressonância parcial de enrolamento (3) associam ressonâncias terminais (impedância terminal mínima) à ressonâncias internas.
3. Medições realizadas de resposta em frequência dos autotransformadores no campo (4) permitiram obter as impedâncias terminais do 500kV e 345kV, assim como a função de transferência entre esses terminais e pontos da chave comutadora para o autotransformador T1. Esses resultados estão resumidos na Tabela 1.

Utilizando-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT), foram consideradas potencialmente críticas para os equipamentos as ocorrências que apresentaram espectro com conteúdo significativo de frequências próximas às consideradas de interesse nas medições

realizadas (Tabela 1) e às indicadas na avaliação interna realizada para o autotransformador T1 (item 5.2).

TABELA 1 : RESUMO DAS MEDIÇÕES

Medição	Autotrafo T1	Autotrafo T2
Imped.Terminal 345 kV	Zeros:1 e 100 kHz	Zeros: 3; 6,5 e 100 kHz
Imped.Terminal 500 kV	Zeros:1 e 100 kHz	Zeros: 2,9 e 100 kHz
Transferência 500, 345kV/entre Taps	Pólos:30 kHz Amplif.: 12	

#### 4.2.2 Análise dos resultados

Curtos-Circuitos:

A ocorrência de curtos-circuitos em linhas de transmissão dá origem a tensões transitórias com característica oscilatória as quais ficam submetidos os transformadores conectados a seus terminais

No estudo relativo aos autotransformadores de São Gotardo 2, aplicou-se curtos-circuitos fase C- terra ao longo das linhas conectadas à SE São Gotardo 2 e numa faixa de 3 a 150km, partindo-se da SE.

As tensões transitórias relativas a curtos-circuitos nas linhas de 500kV apresentaram espectros de frequências com componentes, fora da faixa dos 60Hz, muito pequenas, podendo ser consideradas desprezíveis. Esses resultados confirmam que a presença de mais LTs conectadas ao barramento é benéfica provocando um maior amortecimento dos surtos.

Para curtos na linha 345kV São Gotardo 2 - Três Marias, os resultados apresentaram espectro de frequências com componentes significativas, fora da faixa de 60 Hz, no 345kV. Na Tabela 2, essas frequências são apresentadas em função da distância, com suas respectivas densidades espectrais de energia e valores em kV equivalentes.

TABELA 2 – CURTOS-CIRCUITOS LT 345KV SÃO GOTARDO 2 – TRÊS MARIAS

Localização Curto-circuito [km]	Frequência [kHz]	Densidade Espectral Energia	Tensão [kV]
7	9,8	$0,61 \times 10^{13}$	10,80
12	6,5	$0,26 \times 10^{14}$	22,24
16	4,2	$0,13 \times 10^{13}$	15,50
26	2,8	$1,15 \times 10^{14}$	46,91
75	1,3	$0,30 \times 10^{14}$	24,14

Uma comparação dos valores encontrados de frequência apresentados nas Tabelas 1 e 2, indica que curtos-circuitos em pontos diversos da LT podem gerar

surtos com componentes de frequência significativas, sob o ponto de vista de ressonâncias parciais internas.

As Figuras 4 e 5 apresentam as curvas de tensão transitória para um dos casos estudados e a respectiva FFT para a fase C. Observa-se a característica oscilatória da tensão com frequência dominante em 4,2 kHz.

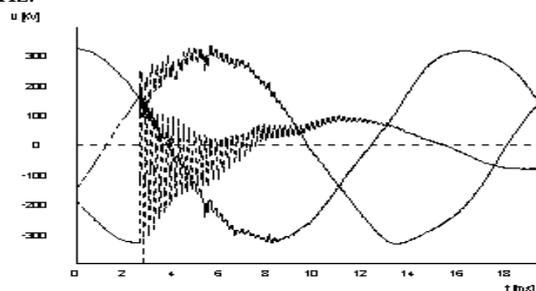


FIGURA 4 – CURTO A 16 KM DA SE

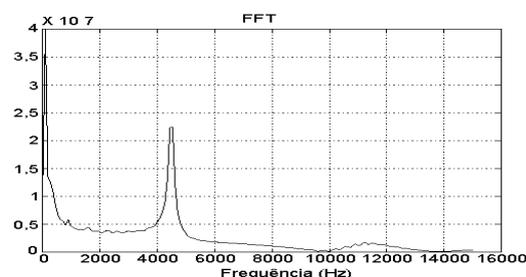


FIGURA 5 – RESULTADO FFT TENSÃO FASE C

Descargas Atmosféricas:

A análise das tensões transitórias na SE São Gotardo 2, quando da ocorrência de descargas atmosféricas nas linhas, foi realizada considerando dois fenômenos distintos:

- Injeção de surto rápido em uma das fases da linha devido a ruptura da cadeia de isoladores (back-flashover).
- Tensão induzida nas fases devido a queda de descarga em uma das torres.

Buscou-se reproduzir com essas simulações surtos transitórios com tempos de frente e cauda diferentes dos considerados em testes de fábrica.

Avaliou-se as duas situações citadas acima para a LT 500kV Emborcação - São Gotardo 2, que apresentou o maior número de saídas devido às descargas e a LT 345kV São Gotardo 2 - Três Marias.

Somente os casos relativos ao back-flashover apresentaram tensões transitórias com componentes significativas numa grande faixa de frequência, englobando as de interesse.

A Figura 6 apresenta a tensão ( $\cong 8/30\mu s$ ) em São Gotardo 2 para ruptura da cadeia de isoladores fase

C na LT 500kV Emborcação – São Gotardo 2, a 7 km da SE.

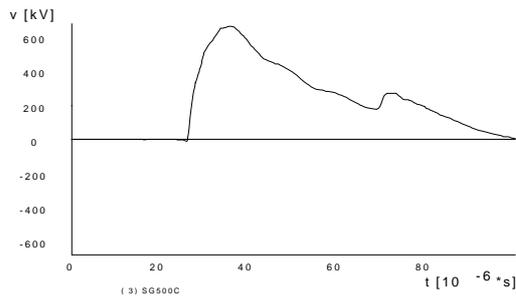


FIGURA 6 – TENSÃO BARRA 500KV DA SE

## 5.0 – ANÁLISE DE SURTOS INTERNOS AO AUTOTRANSFORMADOR T1

A ABB realizou um conjunto de simulações e análises da suportabilidade interna do sistema de isolamento dos enrolamentos do autotransformador T1. Foram consideradas solicitações, impostas ao terminal de entrada do enrolamento ATs, com formas de onda e amplitudes das tensões transitórias normalizadas especificadas para o autotransformador e outras formas de ondas não convencionais. O objetivo foi identificar a resposta do sistema de enrolamentos do autotransformador, incluindo amplificações por ressonâncias e solicitações dielétricas internas.

### 5.1 Resposta Transitória de Enrolamentos

A resposta transitória de um enrolamento pode ser determinada no domínio da frequência e transformada, depois, no domínio do tempo.

O modelo do enrolamento é estabelecido pela associação de quadripolos  $\pi$  adequados. Cada quadripolo representa uma espira ou grupo de espiras do enrolamento naqueles segmentos de interesse de análise(5).

A Figura 7 mostra o esquema elétrico genérico de um enrolamento e dois terminais de interesse.

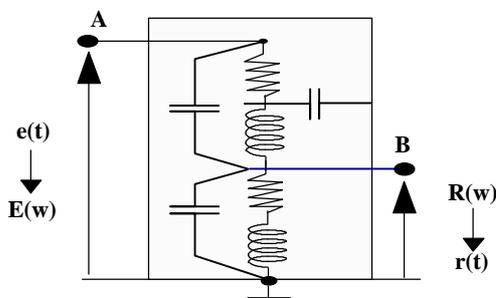


FIGURA 7 – ESQUEMA DE ENROLAMENTO

Para cada forma de onda aplicada ao terminal do enrolamento, são calculadas as respostas internas aos

discos correspondentes às duas bobinas duplas da entrada. Os locais de interesse B1 (entre espiras), B2 (externa, entre discos), B3 (interna entre discos) e B4 (entre bobinas duplas) são indicados na Figura 3.

Neste método, a tensão de entrada no domínio do tempo é transformada para o domínio da frequência sendo as tensões, correntes e admitâncias internas e terminais calculadas neste domínio. Depois, as tensões de saída de interesse são anti-transformadas para o domínio do tempo onde as suportabilidades correspondentes são avaliadas.

### 5.2 Solicitações Internas

Na análise das solicitações internas, a tensão de saída, no domínio do tempo, é comparada com a tensão interna suportável. Essa tensão é um valor estatístico com 0.1% de probabilidade de falha para a isolamento do local de interesse. Estes são valores dependentes do estado da arte da tecnologia do fabricante, nesse estudo, são aqueles do grupo ABB.

As simulações, realizadas para o conhecimento dessas solicitações nos locais de interesse para o autotransformador T1, indicaram fatores de segurança (Usuportável / Usolicitação) menores que um para B1 quando da aplicação de impulso atmosférico normalizado e impulso não convencional rápido (10/5000ns; 1.5 e 2 vezes tensão fase-terra).

Esse resultado demonstra uma possível vulnerabilidade desse local, que coincide com a região de localização da falha principal (entre espiras e entre discos próximos ao terminal de entrada do enrolamento ATs), para essas formas de onda. Sendo assim, surtos rápidos devido a disrupção da cadeia de isoladores, conforme mostrado no item 4.2.2, poderiam ter provocado um stress cumulativo na isolamento. Por exemplo, só a LT 500kV Emborcação - São Gotardo 2 teve 9 saídas por descarga anteriores às falhas.

Tendo em vista o local da falha no autotransformador T1, foi de interesse identificar, a partir da função de transferência (módulo e fase) entre o terminal de entrada e a primeira espira da bobina de entrada, as frequências de ressonâncias. Elas correspondem à 4.2kHz e 9.8kHz com índices de méritos de 4.5pu e 15.1pu respectivamente:

A Tabela 3 mostra os fatores de segurança para solicitações entre espiras, impostas por ondas de tensão transitória do tipo impulso de manobra aplicada ao terminal de entrada do enrolamento ATs.

TABELA 3 - RESSONÂNCIA INTERNA E SOLICITAÇÕES ENTRE ESPIRAS - LOCAL B1

(FIGURA 3)

Tensão U Entrada		freq kHz	$Q_j^{(2)}$ pu	FSeg pu
Uman1.5 675kV	(1)	4.2	4.5	1.01
Uman 810kV	-			0.85
Uman 1175kV	-			0.58
Uman1.5 675kV	(1)	9.8	15.1	0.31
Uman 810kV	-			0.26
Uman 1175kV	-			0.18

## NOTAS:

1. Impulso de manobra com forma de onda 100/850 $\mu$ s e amplitude de 675kV correspondente a 1.5 vezes o valor de crista da tensão fase-terra máxima de operação; e
2. O índice de mérito é uma medida indireta do amortecimento interno correspondente à cada uma das frequências naturais do enrolamento.

Dos resultados, observa-se baixos fatores de segurança para isolação entre espiras nas frequências de ressonância. A Tabela 2 mostra a possibilidade dessas frequências ocorrerem, com conteúdo significativo, para curtos na LT 345kV São Gotardo 2 –Três Marias.

## 6.0 – CONCLUSÃO

Fundamentado nos resultados das análises realizadas, conclusões preliminares podem ser estabelecidas:

- Para tensões descritas por ondas tipo impulso atmosférico e impulso rápido, com amplitudes superiores a determinados valores, a margem de segurança da isolação entre espiras (local da falha) pode não ter sido adequada para o autotransformador T1. Formas de onda desse tipo são passíveis de ocorrer quando de back-flashover nas linhas.
- Frequências naturais de ressonância de 4.2kHz e 9.8kHz foram identificadas na função de transferência para a primeira espira da bobina de entrada. A avaliação do comportamento ressonante da isolação entre espiras indica margens de segurança inadequadas para tensões transitórias do tipo manobra e amplitudes superior a 1.5 vezes a tensão máxima fase-terra do enrolamento AT. Curtos no 345kV são passíveis de gerar tensões com alto conteúdo nessas frequências que são transferidos para alta tensão.
- Frequências associadas à ressonâncias terminais, para ambos os autotransformadores, são detectadas de forma significativa para curtos-circuitos na linha 345kV São Gotardo 2 – Três Marias.

No sentido de prevenir novas falhas, o projeto de reparo dos autotransformadores utilizou recursos para melhorar as margens de segurança da isolação tais como o aumento da capacitância série dos

enrolamentos.

Como medidas operativas, a Cemig retirou de operação os reatores terciários, cujas manobras também contribuem para injeção de altas frequências nos autotransformadores, além de minimizar o número de manobras de chaves seccionadoras na SE.

A complexidade da análise envolvendo falhas dielétricas em transformadores reforça à importância de uma interação maior entre fabricantes, usuários e centros de pesquisas no sentido de prevenir os problemas associados à sobretensões nesses equipamentos. As novas especificações da Cemig contemplam avaliações nesse sentido, visando uma melhor identificação do comportamento dos transformadores a serem instalados em seu sistema.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ABB Asea Brown Boveri. Desmontagem da Parte Ativa do Autotransformador 400MVA CEMIG. Relatório Técnico 1ZBR96-020. São Paulo, 1996-04-01;
- (2) J.R. Martí, S. Chimklai. Simplified Three-Phase Transformer Model for Electromagnetic Transients Studies; IEEE Trans. PWRD, vol. 10, no. 3, July 1995
- (3) R.C. Degeneff. A General Method for Determining Resonances in Transformer Windings; IEEE, vol. PAS-96, March/April 1977
- (4) Oliveira, O B., Cerqueira, W.R., Rocha, ACO, Mendes, J.C. Medições de Ressonâncias em Transformadores de Potência. XIV SNPTEE. Belém, PA, Out, 1997.
- (5) Mendes, J.C. Redução de Falhas em Grandes Transformadores de Alta Tensão; Tese de Doutorado. São Paulo, 1995. 166p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.