



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

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO -XIII

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

**ANÁLISE DAS FALHAS OCORRIDAS COM TRANSFORMADORES ELEVADORES DA UHE GBM - USINA
HIDRELÉTRICA GOVERNADOR BENTO MUNHOZ DA ROCHA**

José Carlos Soares (*)

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA

RESUMO

Este artigo técnico pretende analisar e compreender por qual razão os Transformadores Elevadores da Usina Hidrelétrica Governador Bento Munhoz da Rocha (UHE GBM), a maior usina da COPEL, que através das ferramentas clássicas de análise de desempenho utilizadas no setor elétrico mundial, indicavam condições operacionais satisfatórias e não apresentavam qualquer indício de falha potencial, inexplicavelmente começaram a falhar. Questiona se as técnicas utilizadas atualmente são eficazes na prevenção dessa falhas características e relatará as medidas emergenciais de controle e ações futuras executadas e planejadas pela COPEL.

PALAVRAS-CHAVE

Transformadores, Transformadores Elevadores, Falhas com Transformadores

1.0 - INTRODUÇÃO

A COPEL Geração e Transmissão possui em torno de 100 Transformadores Elevadores instalados em Grandes e Pequenas Centrais Hidrelétricas. Todos esses equipamentos são acompanhados e avaliados periodicamente sob a mesma técnica de manutenção. Em maio de 2001, implantou-se o processo de Manutenção Centrada na Confiabilidade para análise de desempenho dos Transformadores elevadores da UHE GBM.

A Usina Hidrelétrica Governador Bento Munhoz da Rocha (UHE GBM), situado no município de Pinhão, estado do Paraná, possui 04 unidades geradoras com potência nominal de 465 MVA cada, gera com a tensão de 16,5 kV e, através de bancos de transformadores monofásicos de 155 MVA eleva a tensão para 525 kV. No lado de alta tensão há uma bucha tipo óleo/SF₆ (hexafluoreto de enxofre) que conecta o transformador a uma subestação isolada a gás SF₆ em 525 kV. Os transformadores monofásicos são conectados em TRIÂNGULO (DELTA) na baixa tensão e em ESTRELA (IPSOLON) aterrada na alta tensão, com derivações a serem operados sem carga, para as tensões de 500; 512,5; 525; 537,5 e 550 kV. A subestação isolada a gás SF₆ em 525 kV, através de duas linhas transmissão curtas são isoladas para operar até 525 kV, de aproximadamente 13 km de comprimento, conecta a usina a SE AREIA da ELETROSUL parte integrante da rede básica.

Em 28/11/2007 ocorreu atuação das proteções devido à falha no transformador da fase C da unidade 01, retirando a máquina de operação. Este equipamento foi imediatamente substituído pelo transformador reserva.

Em 02/12/2007, apenas 04 dias após ocorre nova falha, no transformador da fase C da unidade 04, devido a inexistência de transformador elevador reserva, a unidade 04 permaneceu indisponível para a operação. A partir desse sinistro, passou-se a monitorar quinzenalmente (antes semestralmente), o teor de gases dissolvidos no óleo mineral isolante de todos os transformadores elevadores da UHE GBM.

(*) Rua José Izidoro Biazetto, n° 158 – sala 234 - Bloco A – CEP 81.200-240 Curitiba, PR – Brasil
Tel: (+55 41) 3331-4692 – Fax: (+55 41) 3331-3666 – Email: jose.carlos.soares@copel.com

Em 15/02/2008, a amostra de óleo para cromatografia gasosa do transformador da fase C da unidade 03 indicou a presença dos gases hidrogênio, etileno e acetileno em níveis preocupantes. Este equipamento foi substituído, preventivamente e urgentemente, pelo transformador fase B da unidade 04 (indisponível-fora de operação). A partir desta ocorrência alterou-se o monitoramento do teor de gases dissolvidos no óleo de quinzenal para semanal.

Durante a abertura do transformador 1C, foi verificado que o defeito ocorreu na BT (baixa tensão) e na altura do enrolamento próximo à chegada do cabo de AT (alta tensão) que vem da bucha (mais ou menos à meia altura do enrolamento), região cujo entrelaçamento das espiras é duplo, ver Figura 1.

Durante a abertura do transformador 4C, foi verificado que o defeito atingiu tanto os enrolamentos de BT quanto o de AT. Também houve quebra das buchas de BT, o tanque foi submetido a tamanha pressão interna, suficiente para a deformação lateral da mesma. O mecanismo da falha pode ter sido semelhante ao do transformador 1C, porém com maior intensidade, ver Figura 2.

Em 02/12/2007, 04 dias após ocorre nova falha, no transformador da fase C da unidade 04, devido a inexistência de transformador elevador reserva, a unidade 04 permaneceu indisponível para a operação. A partir desse sinistro, passou-se a monitorar quinzenalmente (antes semestralmente), o teor de gases dissolvidos no óleo mineral isolante de todos os transformadores elevadores da UHE GBM.

2.0 - ANÁLISE DOS MODOS DE FALHAS

2.1. Falhas em Transformadores

Para uma melhor compreensão dos fenômenos e adoção de um critério de análise das falhas funcionais, modos de falhas, é recomendável utilizar o conceito do “mind map”, sugerido no trabalho do Eng^o Miguel Carlos Medina, coordenador do CE-A2, CIGRÉ-Brasil, referência bibliográfica [2], os quais serão abordados nos itens a seguir.

2.1.1 - Falhas em Buchas

No histórico de acompanhamento das Buchas de Alta Tensão não há variação significativa do valor de Capacitância. O rompimento verificado nas Buchas de Baixa Tensão da Unidade 700591-2 (4C), foi consequência da falha.

2.1.2. Falhas em Comutadores

Em transformadores elevadores não há comutadores sob carga, apenas comutadores a vazio. Pela inspeção realizada nos comutadores descartou-se esta possibilidade, ou seja, os comutadores a vazio dos equipamentos não apresentaram indícios de falha potencial.

2.1.3. Falhas em Dispositivos de Proteção Própria

Não foi o caso nessas ocorrências, não houve falhas evidentes com os dispositivos de proteção.

2.1.4. Parte Ativa

Falhas evidentes nos enrolamentos dos equipamentos sem comprometimento significativo do núcleo.

Transformador 700592-1 (1C): na Figura 01, o local da falha é bem definido.



Figura 1 – Local da falha no enrolamento de BT

Transformador 700591-2 (4C): na Figura 02 , o local da falha é bem definido.



Figura.2 – Falha no enrolamento AT e BT

Transformador 700593-3 (3C): na Figura 3, o local da falha está bem definido no enrolamento de BT.



Figura 3 –Falha no enrolamento de BT.

2.2. Análise das falhas na Parte Ativa dos Transformadores

Uma vez caracterizadas as falhas na PARTE ATIVA dos três transformadores elevadores, estratificou-se as possibilidades que poderiam ter contribuído isoladamente ou não para a falência do equipamento. Procura-se detalhar todos os modos de falhas associados a problemas no circuito magnético, à redução da suportabilidade dielétrica e solicitações superiores à suportabilidade.

2.2.1. Falhas no Circuito Magnético

Pela análise visual, efetuada durante as inspeções, não foram constatados problemas graves com o núcleo magnético, identificadas algumas regiões de aquecimento, decorrentes da idade dos equipamentos. O diagnóstico estabelecido através dos gases dissolvidos no óleo mineral isolante dos equipamentos, confirma a presença de leve aquecimento provável do núcleo, no entanto, insuficiente para ocasionar a falha dos equipamentos.

2.2.2. Falhas por redução da suportabilidade dielétrica

a.- Má distribuição do campo elétrico

É função do projeto original do transformador, cuja eficiência está assegurada pelo tempo em operação dos equipamentos em análise e pela qualidade dos materiais dielétricos da parte ativa, papel e óleo utilizadas , e também pelas boas condições verificadas nas blindagens.

b.-. Incompatibilidade de materiais

No que diz respeito a questão da incompatibilidade de materiais, merece destaque o caso recente do Enxofre Corrosivo. Com o objetivo de eliminar as dúvidas sobre a questão, foi verificado através do teor de DBDS e a corrosividade do óleo, a ausência deste problema.

c- Eletrização do óleo

Este problema foi verificado em transformadores fabricados no Japão com tecnologia “Shell Type” entre os anos 80 e 90. Pela inspeção visual não foram identificados sinais de descargas por eletrização

d- Gases dissolvidos no óleo mineral isolante

O histórico resumido da análise e diagnóstico dos gases dissolvidos nos óleos destes transformadores está citado na Tabela 1, comprovando o desempenho operacional satisfatório destes equipamentos. Segundo a Norma NBR 7274, as concentrações dos gases formados pela degradação do óleo ou da isolação sólida, causada por descargas elétricas ou solicitações térmicas, de transformadores imersos em óleo, podem ser interpretadas para diagnosticar o estado de um transformador e sugerir o procedimento futuro. Estes gases encontram-se parcialmente dissolvidos no óleo, porém, eles podem ser removidos de uma amostra de óleo e analisados qualitativa e quantitativamente por cromatografia gasosa. A descoberta de certos gases gerados em um transformadores imerso em óleo quando em serviço freqüentemente é a primeira indicação disponível de um mau funcionamento que pode conduzir eventualmente à falha, se não corrigido. Formação de arco, descarga de corona, centelhamento de baixa energia, sobrecarga severa, falha de motor da bomba e aquecimento no sistema de isolamento, são alguns dos possíveis mecanismos. Estas condições, que acontecem isoladamente ou como vários eventos simultâneos, podem resultar na decomposição dos materiais isolantes e na formação de vários gases combustíveis e não combustíveis. A operação normal também resultará na formação de alguns gases.

Transformador	Data Coleta	Hidrog.	Metano	Monox. Carb.	Dioxido Carb.	Etano	Etil.	Acet.	Gases Comb.	Laudo
TPO-07103 Unid.1C (Falhou em 28/11/2007)	10/07/2007	10	56	404	2757	35	7	0	512	Normal
	28/11/2007	2464	2438	2197	3274	315	2027	734	10175	Descarga interna de alta energia
TPO-07109 Unid.3C (Retirada de operação em 15/12/2008)	30/01/2008	12	76	600	4029	63	10	0	761	Leve Sobreaquecimento
	14/12/2008	968	1534	463	3244	368	2601	28	5962	Sobreaquecimento
	16/12/2008	2107	3654	500	3464	677	4974	66	11978	Sobreaquecimento
TPO-07113 Unid.4C (Falhou em 02/12/2007)	11/07/2007	1	2	15	222	1	0	0	19	Normal
	04/12/2007	3133	7476	739	1639	837	5283	4675	25143	Descarga interna de alta energia

Tabela 1 – Gases dissolvidos no óleo mineral isolante e laudo

Transformador	Data Coleta	Fator Potência	Ac (mgkoh/gol)	Rig. Die. (kV)	Tensão Int. (din/cm)	Teor Água (ppm)	2FAL (mg/L)	Laudo
TPO-07103 Unid.1C (Falhou em 28/11/2007)	09/01/2007	0,86	0,010	56,0	39,1	14		Normal
	10/07/2007	0,46	0,010	59,0	40,9	6		Normal
TPO-07109 Unid.3C	11/07/2007	0,54	0,010	55,0	40,3	5		Normal
	05/12/2007						0,02	Envelhecimento Normal
TPO-07113 Unid.4C (Falhou em 02/12/07)	09/01/2007	0,46	0,010	59,0	41,8	9		Normal
	11/07/2007	0,53	0,010	61,0	39,3	8		Normal

Tabela 02 – Características físico-químicas do óleo e laudo

e- Partículas

A COPEL rotineiramente não acompanha o teor de partículas no óleo, indiretamente são monitoradas pelos resultados das análises de físico químicas do óleo. No entanto inspeção detalhada das moto-bombas foram realizadas para verificar possíveis desgastes mecânicos, que poderiam ter contribuído para o aparecimento de partículas metálicas. Nada foi detectado.

f- Umidade e Oxigênio

O teor de umidade é controlado através das análises físico químicas do óleo. Estes transformadores são selados e com tampa soldada. Ver os bons resultados na Tabela 02.

g- Temperatura Anormal

Os transformadores elevadores da UHE GBM, não trabalham sobrecarregados, o que pode ser comprovado pelo baixo teor dos gases de aquecimento, ver os resultados na Tabela 01.

h- Envelhecimento natural da isolação

Um dos temas mais apaixonantes no que diz respeito a análise de desempenho de equipamentos elétricos, muito particularmente transformadores de potência. O autor já havia iniciado alguns estudos para verificar o estado destes equipamentos, através das técnicas de RVM "The Recovery Voltage Method".

➔ Ensaios de RVM

Basicamente, as diversas formas de degradação da celulose (térmica, hidrolítica e oxidativa) têm como resultado comum a geração de água. O modelo dielétrico, utilizado para analisar as mudanças no tempo de resposta, em função da presença de água, mostra que o tempo da resposta é menor quanto maior for o teor de umidade da isolação. Este efeito é observado nos processos de polarização dielétrica mais lentos, como a Polarização Interfacial, típica em materiais compostos, como os empregados em transformadores de força. Daí, a importância do método EP (espectro de polarização) que, indiretamente, avalia a resposta dos diversos processos de polarização presentes na isolação excitada com 2000 Vcc, fazendo uma varredura de tempos de carga-descarga que inclui respostas mais lentas às comumente observadas nos ensaios com frequência industrial. O espectro de polarização obtido nos transformadores instalados nas Unidades 1C e 3C apresentam um pico, com valor de 0,8 %. Este valor está situado bem abaixo do limite inferior da faixa de valores esperados para transformadores com 24 anos de idade (1,7 ... 2,9%), indicando um estado excelente da isolação em termos de envelhecimento.

➔ Ensaios de 2 fal

O envelhecimento do papel libera compostos furânicos, através da verificação do teor de furanos (de 2 fal) é possível por comparação e evolução destes teores avaliar o comportamento do papel, ver resultado da Unidade 3C na Tabela 02, valor de concentração baixo, indicando que o equipamento não apresenta envelhecimento acelerado.

➔ Ensaios de GP (Grau de Polimerização)

Medição indireta utilizado na avaliação do efeito da degradação das propriedades mecânicas do papel ou seu envelhecimento. Como o papel é constituído por cerca de 90% de celulose, e esta possui cerca de 1200 monômeros em sua estrutura, a medição do GP, ou quantidade de monômeros, pode indicar o seu envelhecimento. Levando em conta ainda que existe a redução destes valores durante a fabricação, enrolamento e processamento, considera-se que o papel em transformadores novos deve conter unidades de monômeros ou grau de polimerização em torno de 1000. Considera-se ainda que para GP's entre 1000 e 500, a resistência é constante, mas na faixa de 500 a 200, a resistência é diretamente proporcional ao GP. Para GP = 150 ou abaixo, a resistência é inadequada para suportar os esforços mecânicos, o equipamento está em final de vida.

As seguradoras adotam como critério na indenização dos transformadores sinistrados, o valor de GP do papel no cálculo da depreciação dos equipamentos. No caso dos transformadores 700592-1 (1C) e 700591-2 (4C) os valores apurados de GP entre 550 a 700 foram utilizados no cálculo de depreciação pela seguradora, pelos valores apresentados de GP, foi considerada depreciação nula para dois equipamentos. Para o transformador 700593-3 (3C) o valor médio medido foi em média de 500.

2.2.3. Falhas por solicitações superiores à suportabilidade

a- Falha de Coordenação de Isolamento

Ensaios realizados pelo LACTEC, com carga instalada no circuito de baixa tensão (primário) dos transformadores elevadores foi decisiva para a determinação da taxa de transferência para impulsos atmosféricos entre os terminais de alta e de baixa tensão. Taxas de transferência da ordem de 3,65 %, determinadas em média para os transformadores elevadores das unidades 2A e 2C, indicam que, para impulsos atmosféricos transferidos do circuito de AT, os níveis de sobretensão no circuito de 16,5 kV apresentam amplitude reduzida, ou seja, 1550 kV

no circuito de AT, projeta-se para o circuito de BT, um valor da ordem de 62 kV, inferior ao NBI de 150 kV do circuito de BT. Tais resultados não permitem concluir que a taxa de transferência seja a mesma para surtos com componentes de frequência mais elevadas, nem que sobretensões mais severas possam ocorrer ao longo do enrolamento de baixa tensão, decorrentes de ressonâncias localizadas e da distribuição não linear de tensões. Adicionalmente, não se conhece a suportabilidade dielétrica dos enrolamentos. para surtos do tipo VFT.

Os pára-raios da SIG, entradas das LT1 e LT2, dos Transformadores Elevadores, foram testados pelo LACTEC, quando ao funcionamento dos contadores de operação e e miliamperímetro , a avaliação termográfica foram realizada pela DEMG e DEMA, todos estes ensaios não indicaram problemas com o s pára-raios.

b- Correntes de curto-circuito

Não foram registrados curto-circuitos no sistema antes das ocorrências que provocassem as falhas dos transformadores elevadores.

c- Tensões Transitórias Rápidas

Algumas operações de manobra e algumas condições de falta em um Sistema Elétrico são reconhecidas como causa de tensões transitórias rápidas que solicitam os equipamentos a ele conectados. A resposta de enrolamentos de transformadores a fenômenos transitórios é assunto de vários trabalhos científicos desde o início deste século. Porém, a resposta destes enrolamentos a tensões transitórias rápidas é de interesse recente associada ao reconhecimento da natureza e características destes transitórios nos sistemas elétricos. Um número restrito de trabalhos científicos foram publicados até agora, abordando de maneira limitada o assunto. A indústria de transformadores utiliza, para a análise da resposta transitória e projeto da isolação de enrolamentos, técnicas avançadas de modelamento matemático e de resolução através de métodos adequados em computador. Todavia a validade dos modelos convencionais está limitada a frequências de até algumas centenas de kHz. Em conseqüência, o desempenho do equipamento correspondente pode ser comprometido quando submetido a tensões transitórias rápidas em operação. Quando o tempo da frente de onda é inferior a 1µs, estes fenômenos são considerados transitórios rápidos.

Ensaio preliminares realizados pelo LACTEC nas instalações da UHE GBM, indicam a presença do fenômeno, ver Figura 4.

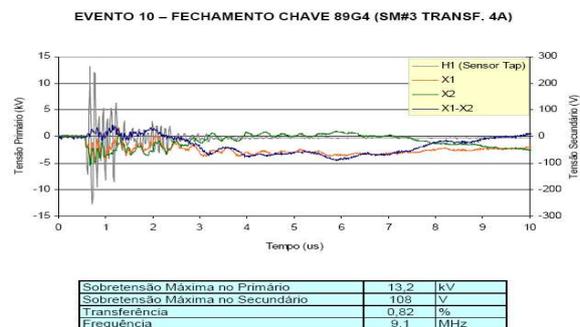


Figura 4 Tensões Transitórias .

d-.Sobretensões Ressonantes

O transformador deve suportar, além da tensão de operação em regime permanente, tensões transitórias de várias formas de onda e amplitudes envolvendo frequências na faixa de Hertz até Megahertz. A natureza eletromagnética do arranjo de enrolamentos forma uma estrutura ressonante, com várias frequências naturais que podem ser excitadas por tensões transitórias estabelecidas no sistema, com conseqüências perigosas para o transformador devido a amplificações internas localizadas de tensão. Projetar um transformador não-ressonante é inviável. Porém a combinação de esforços entre especificação-projeto (cliente-fabricante) pode contribuir para a proteção adequada do transformador em uma certa faixa de frequências, minimizando riscos de amplificações internas de tensões e solicitações dielétricas excessivas. Esta área de estudo deverá ser avaliada pela COPEL futuramente.

3.0 - CONCLUSÃO

Após a análise dos modos de falhas possíveis e relatados, pode-se afirmar que estes equipamentos falharam por solicitações superiores à sua suportabilidade.

As técnicas de acompanhamento clássicas para a análise de desempenho dos Transformadores Elevadores interligados à Subestação isolada a SF₆, não são eficazes para a detecção de falhas com as características mencionadas anteriormente. Técnicas de medição para tensões transitórias rápidas e sobretensões ressonantes, carecem de difusão.

È muito provável que a isolação dos condutores dos transformadores elevadores foi "stressada", de forma acumulativa e progressiva, devido a distúrbios elétricos acontecidos ao longo do tempo em operação, até a ocorrência dos sinistros.

A COPEL prosseguirá com estudos e investigações visando o desenvolvimento de sistemas de medição e avaliação das sobretensões originadas na SIG da UHE GBM.

Na aquisição de novos transformadores elevadores reserva da UHE GBM, a COPEL especificou ensaios para verificar a suportabilidade à sobretensões rápidas.

Merece atenção e análise aprofundada, o aumento de manobras observadas no sistema interligado, e o comportamento das cargas.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) COPEL, Relatórios de Ocorrência SOM-098 e 099/2007.
- (2) PENA, MIGUEL CARLOS MEDINA, Falhas em Transformadores de Potência, Itajubá (MG) – UNIFEI, 2003.
- (3) MENDES, JOSÉ CARLOS, Redução de falhas em grandes Transformadores, São Paulo (SP) – USP, 1995.
- (4) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Interpretação de gases dissolvidos em OMI -NBR 7274. Brasil.
- (5) LACTEC, Relatório 3725/2008, Ensaio de Transferência de Surtos sob Impulso Atmosférico.
- (6) LACTEC, Relatório 3768/2008, Medição de Transientes de Manobra.