



Grupo de Estudo de Subestações e Equipamentos de Alta Tensão-GSE

AVALIAÇÃO DE TRANSFORMADOR DE CORRENTE DE AT APÓS ARMAZENAMENTO INADEQUADO

MARTA MARIA DE ALMEIDA OLIVIERI* (1); FRANCISCO EDUARDO DE ARAÚJO (1); PAULA VIEIRA MACHADO LACERDA (2); ALIN DO AMARAL MARTINS (2); ANTONIO GABRIEL MARQUES MULLER (2); MIGUEL LUIZ CAMPOS FERNANDES (2); LUIZ ALBERTO FERREIRA DA SILVA (1); LEONARDO TORRES (1)

CEPEL(1); FURNAS(2)

RESUMO

Doze transformadores de corrente de alta tensão de 550 kV armazenados por mais de três meses na posição horizontal foram submetidos a ensaios dielétricos para avaliação de desempenho antes de serem colocados em operação. Foram realizados ensaios nos TCs após serem mantidos na posição vertical por diferentes períodos de tempo, de alguns dias a seis meses. Na metodologia apresentada neste trabalho, os ensaios utilizados foram: medição de descargas parciais, aplicação de tensão suportável a seco na frequência industrial e medição de capacitância e fator de perdas dielétricas em 60 Hz. Os resultados foram determinantes para estabelecer que os TCs estavam aptos para operação. Além disso, verificou-se que o tempo necessário de permanência em pé antes dos ensaios foi superior ao indicado por um dos fabricantes dos TCs.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador de corrente de alta tensão (TC), armazenamento de TC, avaliação do dielétrico, descargas parciais

1.0 - INTRODUÇÃO

As empresas de energia elétrica normalmente mantêm componentes de reserva para os equipamentos mais importantes dos seus sistemas, seja de geração, transmissão ou distribuição de energia. Na aquisição destes equipamentos, em geral, há um manual de instrução com os procedimentos indicados para manutenção, instalação e armazenagem. No entanto, podem ocorrer condições de armazenamento que suscitam dúvidas sobre as condições de desempenho do equipamento, se este está armazenado por um longo período e/ou se está armazenado em condições inadequadas. Neste caso, são recomendados alguns ensaios para verificação do desempenho do equipamento antes de ser colocado em serviço.

Nesse contexto, doze transformadores de corrente (TC) de 550 kV, de dois fabricantes distintos, aqui denominados A e B, foram ensaiados pelo Cepel para avaliação do seu dielétrico. Os transformadores faziam parte de reserva técnica, não haviam sido utilizados e encontravam-se armazenados na posição horizontal por mais de três meses. Os TCs de alta tensão são de configuração construtiva similar ao da Figura 1, cujo material de isolamento interno é papel-óleo, os enrolamentos secundários estão próximo ao condutor primário no topo do TC e os condutores secundários passam internamente por uma bucha capacitiva até os terminais localizados na parte inferior do TC.

Quando o transformador de corrente do tipo em questão fica por um longo tempo na posição horizontal, há o risco da perda de impregnação localizada do papel pelo óleo mineral isolante, e, até mesmo, de deformação da parte ativa.

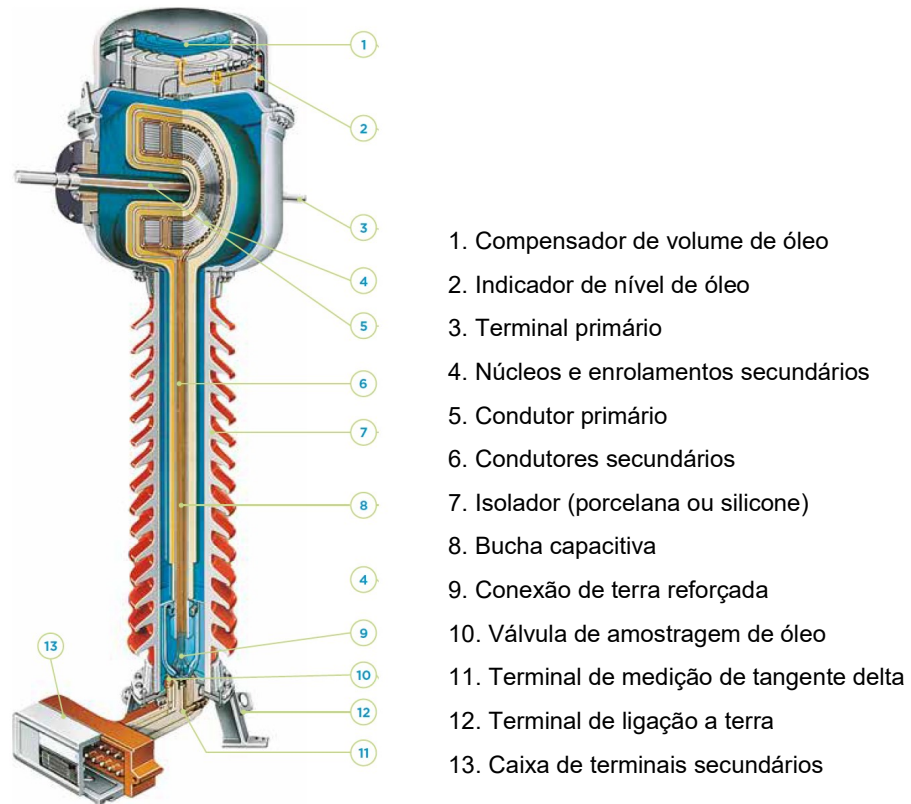


Figura 1 - Configuração construtiva dos TC de 550kV(Fonte:[1])

2.0 - ENSAIOS

Antes da realização dos ensaios, os dois fabricantes dos 12 TCs de 550 kV (Figura 2) sob avaliação foram consultados sobre quais seriam os ensaios e procedimentos sugeridos. As recomendações dos fabricantes foram contraditórias, tanto nos ensaios a serem efetuados, como principalmente quanto ao período de permanência dos TCs na vertical antes dos ensaios: o fabricante A orientou a permanência na vertical por pelo menos 48h, enquanto o fabricante B, por 20 dias. Portanto, decidiu-se proceder a avaliação com base em três ensaios considerados mais significativos conforme a experiência do Cepel e do usuário dos equipamentos e, de forma interativa, verificar o período adequado de permanência dos TCs na vertical. Os ensaios realizados foram: 1. medição de descargas parciais, 2. aplicação de tensão suportável a 60 Hz (se o nível de DP estivesse satisfatório) e 3. medição de capacitância e tangente delta. Para os seis TCs do fabricante A foram ainda efetuadas análise cromatográfica e medição do teor de água do óleo isolante. Os ensaios foram realizados após permanência dos TCs na posição vertical por diferentes períodos: alguns dias (oito a 15 dias) e alguns meses (três, cinco e seis meses).

Os TCs ainda não haviam sido usados, mas estavam fora do período de garantia de fábrica e, dessa forma, foram considerados como equipamento "recuperado", o que influenciou os níveis de tensão aplicados nos ensaios.

Antes dos ensaios dielétricos, a porcelana do isolamento externo foi limpa e foi realizada uma inspeção visual para verificar se não havia nenhum dano externo ou vazamento de óleo. Todos os terminais secundários foram curto-circuitados. A seguir apresenta-se um detalhamento sobre os ensaios.

2.1 Ensaio de Medição de Descargas Parciais

"Descargas Parciais (DP) são caracterizadas como descargas elétricas de pequena intensidade que ocorrem em uma região de imperfeição de um meio dielétrico sujeita a um campo elétrico, onde o caminho formado pelas descargas não une as duas extremidades dessa região de forma completa. A ocorrência de descargas parciais depende da intensidade do campo aplicado nas extremidades desse espaço, além do tipo de tensão aplicada de teste (tensão alternada, tensão contínua, sinal transitório ou impulso)" [2].

Em transformadores, algumas fontes de DP incluem partículas metálicas imersas, contaminações ou bolhas de gás no óleo isolante, assim como imperfeições no material isolante sólido. O efeito em longo prazo de DP é degradante e destrutivo do sistema isolante do equipamento. Nenhum material isolante utilizado em equipamentos de alta

tensão (AT) é isento de DP, por isso, é recomendável que análises periódicas sejam realizadas para verificar o nível da DP e sua evolução ao longo do tempo. Um aumento significativo do nível de DP ou da sua taxa de crescimento pode fornecer uma importante indicação de defeitos em evolução. Diferentes técnicas podem ser usadas para detectar estes fenômenos, como: medição de carga elétrica envolvida do fenômeno, medição de sinais característicos utilizando-se o método acústico ou por meio da análise de gases dissolvidos no óleo isolante.

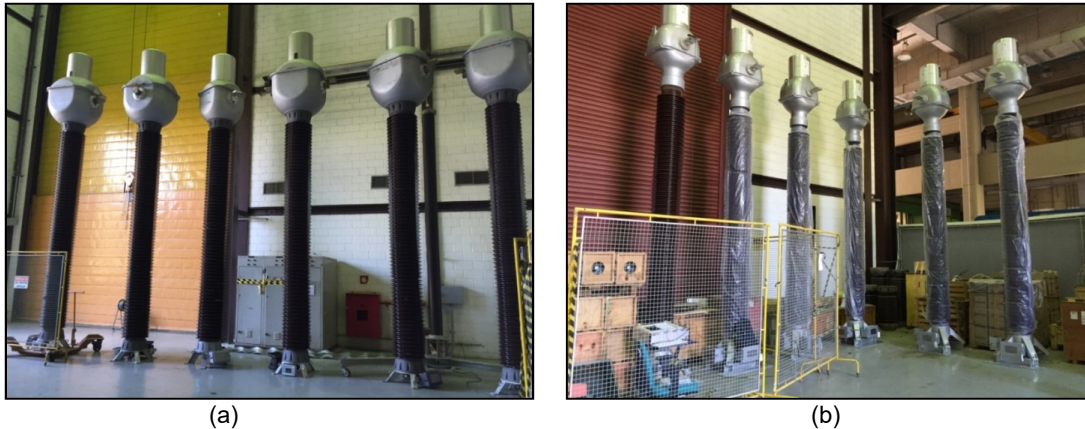


Figura 2 – Fotos dos 12 TCs de 550 kV: (a) fabricante A e (b) fabricante B, em área de armazenagem no Cepel antes dos ensaios.

Neste trabalho, foi utilizado o método elétrico de medição, o qual é muito sensível a falhas do dielétrico e pode ser considerado o "ensaio chave" nesse tipo de avaliação [3].

Foi considerado que o TC estaria apto para o serviço se as DP não ultrapassassem 10 pC nas tensões de ensaio. A metodologia utilizada no ensaio de DP se baseia na normas ABNT NBR 6856 [4], mas com algumas modificações. O Quadro 1 apresenta o resumo das condições de ensaio de DP de norma (condições 1) e as adotadas para avaliação dos TCs em questão (condições 2).

Em um primeiro momento foram realizadas medições de descargas parciais em três TCs do fabricante A que ficaram na posição vertical por mais de uma semana. O fabricante desses equipamentos havia recomendado a permanência dos TCs na posição vertical por 48h antes da realização dos ensaios. Os valores de DP medidos são apresentados na parte superior da Figura 3.

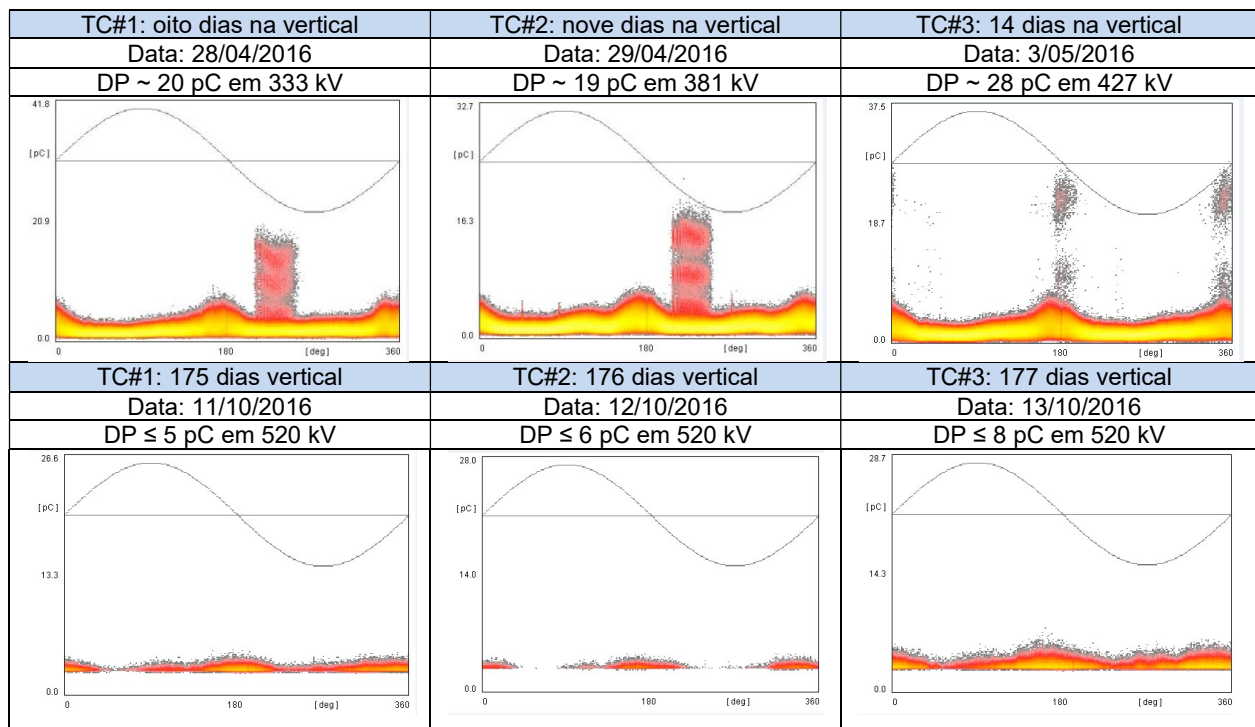


Figura 3 – Valores dos ensaios de DP em três TCs do Fabricante A: gráficos superiores com resultados dos TCs na vertical por alguns dias e gráficos inferiores com os mesmos TCs na vertical por cerca de seis meses.

Verificou-se que a cada período maior de tempo em que os TCs se encontravam na vertical, o nível de DP de cerca de 20-30 pC se iniciava numa tensão maior, respectivamente: 333 kV para o TC#1 após oito dias na vertical, 381 kV para o TC#2 após nove dias e 427 kV para o TC#3 após 14 dias. Com esses resultados os equipamentos não seriam liberados para operação. Entretanto, havia indícios de uma correlação direta entre tempo de repouso na vertical e aumento da tensão de início de descargas, mesmo sendo em TCs distintos, e, por isso, decidiu-se que os mesmos deveriam permanecer em repouso por mais tempo antes da realização dos ensaios. A partir desses resultados iniciais, foi acordado entre usuário e fabricante que as tensões de ensaio seriam inferiores ao indicado na norma, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Condições de ensaio para medição de descargas parciais em TC com isolante líquido: 1. Conforme norma ABNT NBR 6856 e 2. Metodologia adotada neste trabalho

Condições de ensaio	Resultado satisfatório
<p>1. Ensaio conforme norma NBR 6856: 2015</p> <p>Não há observações na norma sobre diferentes requisitos em relação a TCs novos ou recuperados. Os requisitos de descargas parciais são aplicáveis aos transformadores de corrente com $U_m \geq 7,2 \text{ kV}^1$.</p> <p>Antes da execução do ensaio de DP deve-se realizar um pré-condicionamento, que pode ser:</p> <p><u>Procedimento A:</u> o ensaio de descargas parciais é realizado ao reduzir-se a tensão, sem interrupção, em seguida ao ensaio de tensão suportável à frequência industrial no primário, até alcançar as tensões de ensaio especificadas para DP.</p> <p><u>Procedimento B:</u> o ensaio de descargas parciais é realizado após o ensaio de tensão suportável à frequência industrial no primário. A tensão aplicada é elevada a 80 % da tensão suportável à 60Hz no primário, mantendo-a por não menos de 60s e então reduzida, sem interrupção, às tensões de ensaio de DP especificadas.</p> <p>A medição de descargas parciais é realizada em 30s durante a aplicação da tensão de ensaio.</p>	<p>Para TC com isolamento líquido:</p> <p>1. Sistema com neutro aterrado: $DP \leq 10 \text{ pC}$ em U_m (550 kV*) e $DP \leq 5 \text{ pC}$ em $1,2 \cdot U_m / \sqrt{3}$ (381 kV*)</p> <p>2. Sistema isolado: $DP \leq 10 \text{ pC}$ em $1,2 \cdot U_m$ (660 kV*) e $DP \leq 5 \text{ pC}$ em $1,2 \cdot U_m / \sqrt{3}$ (381 kV*)</p> <p>Quando o tipo de aterramento do sistema não for definido, convém utilizar os requisitos da condição de sistema isolado.</p> <p>*Obs. Considerando os TCs em questão.</p>
<p>2. <u>Ensaio realizado com tensões conforme acordo entre fabricante e usuário</u></p> <p>Acordou-se por tensões de ensaio inferiores ao da norma NBR 6856 e o mesmo limite de DP nas duas tensões.</p> <p>Concomitantemente realizados os ensaios de medição de DP e aplicação de tensão suportável: baseado no Método de ensaio - Procedimento A da norma ABNT NBR 6856.</p> <p>O nível de DP medido durante a aplicação da tensão suportável a seco: $U_{TS} = 520 \text{ kV}$ por 60 segundos.</p> <p>O nível de DP medido na tensão de ensaio: $U_{DP} = 1,05 \cdot U_m / \sqrt{3} = 333 \text{ kV}$, na descida da aplicação de tensão após ensaio de tensão suportável. Medição do nível de DP por 30 segundos.</p>	<p>Para os 12 TCs 550 kV isolados a óleo:</p> <p>$DP \leq 10 \text{ pC}$ em U_{TS} (520 kV) e $DP \leq 10 \text{ pC}$ em U_{DP} (333 kV)</p>

Após aproximadamente três meses com os equipamentos em repouso na vertical, foram realizados ensaios de DP nos outros três TCs do fabricante A. Os três apresentaram nível de DP menor do que 10 pC tanto na tensão de 520 kV quanto na tensão de 333 kV [5]. Os ensaios nos primeiros três TCs foram repetidos após aproximadamente seis meses da chegada dos TCs ao Cepel e também apresentaram níveis abaixo de 10 pC, como pode ser visto nos gráficos inferiores da Figura 3. Para os seis TCs do fabricante A os valores de DP medidos foram inferiores ou iguais a 8 pC, nas tensões de ensaio.

Os ensaios dos seis TCs do fabricante B também foram realizados após aproximadamente cinco meses dos equipamentos permanecerem na vertical. Os valores de DP foram iguais ou inferiores a 5pC na tensão de ensaio de 333 kV e não superiores a 10 pC em 520 kV.

Ressalta-se que deve ser verificado se os resultados obtidos não estão relacionados a ruído, corona ou DP dos demais equipamentos utilizados no circuito de ensaio. Por isso antes do ensaio com o TC, aplica-se as tensões de ensaio no circuito sem o objeto. A extremidade de conexão do TC deve ser blindada contra corona por meio de um objeto metálico esférico ou toroidal (anti-corona) de tamanho apropriado. Esse mesmo objeto deve permanecer sobre o TC durante o ensaio de DP. Importante ainda é a movimentação do TC entre a área de armazenagem e a área de ensaio. Deve ser realizada da forma mais suave possível, para não se criar bolhas no óleo isolante. Além disso, é recomendável que o TC permaneça em repouso por algumas horas no local antes do ensaio.

¹ U_m - tensão máxima do equipamento: "maior valor eficaz da tensão fase-fase para o qual o transformador é projetado relativamente ao seu isolamento" [4].

2.2 Ensaio de Tensão Suportável à Frequência Industrial

O ensaio de tensão suportável à frequência industrial a seco no primário tem como objetivo verificar a suportabilidade dielétrica do isolamento entre enrolamento primário e secundário e massa do equipamento [4]. No caso, foi considerado avaliar o isolamento interno do TC assumindo-o como um TC recuperado, e dessa forma a tensão aplicada é reduzida, conforme apresentado no Quadro 2.

Decidiu-se que o ensaio de tensão suportável só seria realizado se os níveis de DP estivessem satisfatórios. A tensão foi aplicada gradativamente em *degraus de* 100, 200, 300, 381 e 480 kV. Em cada *degrau* de tensão foi medido o valor de descargas parciais por 30 s. Após o período de repouso, que variou de três a seis meses, os níveis de DP medidos foram satisfatórios para todos os TCs e o ensaio de tensão suportável à frequência industrial foi realizado, aplicando-se a tensão de ensaio de 520 kV por 1 minuto.

Quadro 2 - Condições de ensaio de tensão suportável à frequência industrial a seco no primário do TC

Condições de ensaio	Resultado satisfatório
<p>Ensaio conforme normas ABNT NBR 6856, para a condição de TC recuperado ou usado.</p> <p>"Para enrolamentos com $U_m \geq 362$ kV, o nível de isolamento nominal é determinado pelas tensões suportáveis nominais de impulso de manobra e de impulso atmosférico, e deve ser especificado de acordo com a NBR 6856." [4]</p> <p>Quando há níveis alternativos da tensão de ensaio, deve-se considerar a ABNT NBR 6939 Coordenação do isolamento - Procedimento para escolha da tensão especificada apropriada. Por exemplo, para o TC com $U_m = 550$ kV, as tensões especificadas poderiam ser 630, 650, 680 ou 740 kV. No caso dos TCs em questão, a tensão especificada é de 650 kV.</p> <p>"A tensão deve ser aplicada entre os terminais primários curto-circuitados e a terra. Os terminais secundários curto-circuitados e a massa devem ser conectados à terra." [4]</p> <p>Tensão de ensaio de tensão suportável a frequência industrial (U_{TS}): 80% da tensão de ensaio especificada, na condição de TC recuperado ou usado, que foi acordado entre fabricante e usuário: $U_{TS} = 0,8 \cdot 650$ kV = 520 kV</p>	<p>O TC deve suportar a tensão de 520 kV sem carga disruptiva nem mostrar nenhuma evidência de falha no período de 1 minuto.</p> <p>Obs. <u>Acordo entre fabricante e usuário</u>: o ensaio de tensão suportável só foi realizado porque os níveis de DP se mostraram satisfatórios durante a elevação da tensão.</p>

2.3 Medição de Capacitância e Perdas Dielétricas em 60Hz

É usual a realização de medição do fator de dissipação, chamado também de fator de perdas dielétricas ou tangente delta ($\tan \delta$), para avaliação do isolamento do transformador. Um alto fator de dissipação do isolamento pode ocorrer devido ao seu envelhecimento natural. Caso haja aumento do fator de dissipação ao longo do tempo em relação a um nível normal, há indício de provável contaminação do óleo isolante ou perda gradativa da isolação, o que deve ser investigado [2].

A norma ABNT NBR 6856 descreve que o fator de perdas é um "parâmetro para avaliação da qualidade do isolamento principal do TC por meio da comparação do valor medido em fábrica com os valores obtidos em campo ao longo da vida útil do TC" [4]. Para o TC novo com líquido isolante, o fator de perdas dielétricas deve ser inferior a 0,5%, conforme NBR 6856. Há alguma flexibilidade em literaturas para TC usado, por exemplo, em [6] afirma-se que valores entre 0,5 e 1% podem ser aceitáveis.

Ressalta-se que o fator de dissipação de um material isolante varia em função da temperatura e isso deve ser considerado quando se comparam resultados de medição com ensaios prévios ou valores de fábrica. Historicamente, isso é feito utilizando-se tabelas de correção para temperatura média, mas é mais confiável realizar as medições diagnósticas em uma faixa de temperatura específica e estreita.

Um resumo das condições de ensaio é apresentado no Quadro 3. Os valores medidos de capacitância e $\tan \delta$ na tensão de ensaio de 318 kV, após os ensaios de tensão suportável e medição de DP, encontram-se na Tabela 1 [5]. As temperaturas durante a realização dos ensaios no Cepel foram de $23 \pm 1^\circ\text{C}$ e em fábrica foram de 19°C para o fabricante B. O fabricante A não especifica a temperatura no relatório de ensaio.

Quadro 3 - Condições de ensaio de medição de capacitância e fator de perdas dielétricas ($\text{tg } \delta$)

Condições de ensaio	Resultado satisfatório
<p>Ensaios conforme norma NBR 6856:2015</p> <p>A medição do fator de perdas dielétricas do isolamento deve ser realizada após o ensaio de tensão suportável. Quando solicitado pelo usuário, pode ser feita também antes dos ensaios, para comparação dos resultados.</p> <p>Segundo a norma NBR 6856, a $\text{tg } \delta$ deve ser medida em TC com tensão máxima $\geq 72,5$ kV, mas para TC com óleo isolante mediante acordo entre fabricante e usuário pode ser realizado em TC de menores tensões.</p> <p>As medições devem ser realizadas em 10 kV para ensaios de rotina. Quando este ensaio for realizado como parte dos ensaios de tipo, deve também ser realizada medição a $U_m/\sqrt{3}$.</p> <p>Tensão de ensaio (U_{tg}): $U_{tg} = U_m/\sqrt{3} = 550 \text{ kV}/\sqrt{3} = 318 \text{ kV}$</p> <p>Para os TC em questão, as medições de capacitância e $\text{tg } \delta$ A foram feitas nas tensões de 10, 159 e 318 kV, por um período de 60 segundos em cada nível de tensão.</p>	<p>Para TC novo com líquido isolante $\text{tg } \delta < 0,5\%$, conforme NBR 6856.</p> <p>A capacitância medida para um mesmo lote não deve apresentar variação significativa. Esse limite de variação deve ser acordado entre fabricante e usuário.</p>

Tabela 1 – Valores de Capacitância e $\text{tg } \delta$ dos TCs nos ensaios de fábrica e nos ensaios no Cepel

Fabricante	Identificação	$C_{\text{fábrica}}$ pF	C_{cepel} pF	Variação (%)	$\text{tg } \delta_{\text{fábrica}}$ %	$\text{tg } \delta_{\text{cepel}}$ %
A	#1	1536,9	1492,3	-2,9	0,270	0,275
	#2	(NF)	1036,4	-	(NF)	0,288
	#3	1513,7	1472,8	-2,7	0,272	0,271
	#4	1533,8	1491,3	-2,8	0,269	0,274
	#5	1539,5	1497,6	-2,7	0,268	0,266
	#6	1505,7	1464,9	-2,7	0,261	0,263
B	#1A	967	984,7	1,8	0,248	0,233
	#2B	972	988,7	1,7	0,245	0,206
	#3C	990	1006,8	1,7	0,248	0,208
	#4D	965	982,1	1,8	0,258	0,221
	#5E	972	985,6	1,4	0,237	0,215
	#5F	969	988,9	2,1	0,239	0,210

Legenda: NF – Não Fornecido.

Foto do arranjo para os três ensaios realizados no Laboratório de Alta Tensão, na Unidade de Adrianópolis do Cepel, é apresentada na Figura 4. Alterações da configuração ocorrem por conta de conexões de impedâncias e instrumentação características de cada ensaio.



Figura 4 – Arranjo do circuito de ensaio de DP, tensão suportável a 60 Hz e medição de capacitância e fator de perdas dielétricas no Laboratório de Alta Tensão do Cepel

2.4 Análise Química do Óleo Isolante

Para o caso de equipamentos armazenados por longo período de tempo pode ocorrer penetração de umidade no material isolante, e, dessa forma, podem ser indicadas as análises do teor de água e rigidez dielétrica do óleo. Com uma pequena amostra de óleo isolante é possível identificar o seu teor de água e também realizar análise cromatográfica dos gases dissolvidos (AGD).

Amostras de óleo foram retiradas a partir da válvula de coleta do óleo, que fica na parte inferior dos TCs do fabricante A, com auxílio de um acessório específico para a atividade. As amostras foram retiradas após 10 dias, em média, dos ensaios com aplicação de tensão. O teor de água do óleo medido para as seis amostras foi compatível com valores para transformadores novos e foram inferiores a 13 ppm.

A AGD é uma das técnicas de diagnóstico amplamente empregada em todo o mundo e de boa aceitação por grande parte dos especialistas em transformadores de potência. Entretanto, direcionando a metodologia para a aplicação em transformadores de instrumento (TI), o cenário se modifica pois há uma certa resistência por parte das empresas de energia e dos fabricantes em realizar coletas periódicas de amostra devido ao volume reduzido de óleo nos TI. Porém, atualmente algumas empresas de energia têm avaliado periodicamente o óleo isolante de TI por entenderem que há benefícios nessa informação para mitigação de falhas. A análise do teor de água do óleo e a AGD podem ser realizados em uma amostra de 50 mL (outras análises físico-químicas podem necessitar de um volume maior).

A IEC 599 indica os principais gases de formação no óleo isolante de acordo com o tipo de defeito apresentado no equipamento e valores máximos admissíveis para cada tipo de gás combustível gerado em TIs com isolamento papel-óleo, conforme a Tabela 2 [7].

Tabela 2 – Valores admissíveis de gases dissolvidos para TI com isolamento papel-óleo [7]

Gás (ppm)	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
Nada a Fazer	300	30	2	10	50	300	900
Retirar de Operação	> 1.000	> 200	> 10	> 100	> 500	-	-

No caso da análise cromatográfica do óleo isolante de TC, independentemente dos critérios utilizados, é consenso que suas indicações são mais eficientes a partir de uma curva de evolução dos gases avaliados, alinhada às condições operativas do equipamento [7].

Os valores de gases dissolvidos no óleo dos seis TCs do fabricante A, indicados na Tabela 3, não apresentam indicativo de descargas parciais ou de arco elétrico. As relações de dióxido e monóxido de carbono em todos os equipamentos não indicam comprometimento da isolamento sólida ou do corpo condensivo dos TCs. Isso é coerente e esperado pelo fato dos TCs não terem sido utilizados. A AGD foi realizada para a obtenção de valores de referência para o histórico dos TCs.

Tabela 3 – Teor de gases dissolvidos nos TCs do fabricante A compatível a transformador novo [8]

Gases Analisados	Identificação do TC					
	#1	#2	#3	#4	#5	#6
	Concentração (ppm)					
Hidrogênio (H ₂)	ND	45	ND	ND	ND	ND
Oxigênio (O ₂)	20.000	35.000	24.000	28.000	24.000	21.000
Nitrogênio (N ₂)	81.000	70.000	49.000	75.000	60.000	56.000
Metano (CH ₄)	ND	7	ND	ND	ND	ND
Monóxido de carbono (CO)	66	61	75	57	73	64
Dióxido de carbono (CO ₂)	190	160	160	160	160	150
Etileno (C ₂ H ₄)	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Etano (C ₂ H ₆)	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Acetileno (C ₂ H ₂)	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Total Geral	101.256	105.273	73.235	103.217	84.233	77.214
Total de Gases Combustíveis	66	113	75	57	73	64

Legenda: ND – Não detectado

Os ensaios nas amostras de óleo mineral isolante foram realizados conforme procedimentos baseados em metodologia implantada no Cepel e nas normas PR/3277.53 Rev1 (baseada na ASTM D3612 -02:2009) e PR/3277.75 Rev 0 (baseada na NBR 10710: 2006).

3.0 - CONSIDERAÇÕES

Ensaio de desempenho em equipamentos que estão armazenados há algum tempo são uma forma confiável de avaliar seu estado antes de colocá-los em operação. Muitas vezes a logística dificulta o envio de tais equipamentos para laboratórios, principalmente em se tratando de equipamentos de potência e/ou alta tensão.

De acordo com Levy *et alli* [3], ensaios de DP podem ser realizados na própria subestação (SE) se forem seguidos passos adequados para minimizar o efeito de ruído do local, como: montagem compacta, utilização de circuito de ensaio balanceado, escolha apropriada da frequência e banda de passagem para medição dos sinais etc. São necessários, no entanto, fonte de tensão apropriada, o que pode não ser viável à maioria das SE ou locais de armazenamento.

Já a medição de capacitância e fator de perdas dielétricas pode ser mais acessível nos locais de armazenamento pois pode ser efetuada utilizando-se instrumentos comerciais que aplicam tensões de 10 kV. Dessa forma, Atallah *et alli* [9] recomendam para buchas capacitivas de AT reservas – citam no artigo buchas armazenadas por até 20 anos – a medição de capacitância e fator de perdas dielétricas no próprio local de armazenamento, após a realização de inspeção visual. Segundo os autores [9], a periodicidade adotada para estas medições no campo é da ordem de alguns anos e qualquer anormalidade verificada deve ser confirmada por ensaios em laboratório. As características de isolamento de TC de alta tensão com *tap* capacitivo se assemelham às de buchas capacitivas e por isso essas recomendações também são afetas a esse tipo de TC. Em [6] é indicado ainda que a variação do fator de perdas em função da temperatura pode ser usada como um método de análise do desempenho dielétrico para buchas e transformadores de corrente; é dito que o aumento do fator de dissipação de buchas capacitivas em temperaturas mais altas pode ser um indicador de envelhecimento.

A avaliação do desempenho de TC armazenado é altamente recomendável para diminuir o risco de falha durante sua operação. Exemplos de prejuízos que podem ser mitigados são: restrição operativa, multas por perda de função, custos de substituição e, até mesmo, danos secundários devido a falha catastrófica. A foto da Figura 5 mostra o quanto TCs, disjuntores e seccionadoras podem ficar próximos em uma subestação, com alto risco de serem atingidos por projéteis de um equipamento em explosão.

Para efeito de quantificação dos custos envolvidos pode-se elencar: custos de aquisição e de substituição do equipamento, custo da avaria de equipamentos adjacentes, custos relacionados à parcela variável por indisponibilidade [10] etc. Exemplos de custos de equipamentos de AT e período de substituição são apresentados na Figura 5 [11]. Verifica-se que a falha de um TC pode ocasionar prejuízos na faixa de algumas dezenas de milhares de reais a valores na ordem de milhão de reais, se houver outros equipamentos envolvidos.

	Equipamento de Sistema de 500 kV	Preço do equipamento novo (R\$)	Período de substituição (h)
	Transformador de Corrente	72.000,00	8
	Transformador de potencial e corrente (TPC)	75.000,00	8
	Seccionadora	250.000,00	16
	Disjuntor	800.000,00	32
	Pára-raios	65.000,00	8
	Isolador	15.000,00	6

(Fonte: <http://www.fotosdobrasil.fot.br>)

Figura 5 – Foto parcial de SE de AT; preços de equipamentos de 500 kV e períodos típicos de substituição [11]

4.0 - CONCLUSÕES

Doze transformadores de corrente de 550 kV, que eram equipamentos de reserva e estavam armazenados durante alguns meses na posição horizontal, foram ensaiados no Laboratório de Alta Tensão do Cepel, para avaliação do seu desempenho dielétrico. A metodologia consistiu principalmente na realização de três ensaios: medição de descargas parciais, aplicação de tensão suportável à frequência industrial a seco no primário e medição de capacitância e fator perdas dielétricas ($\tan \delta$) em 60 Hz. O ensaio de tensão suportável só foi efetuado porque o nível de DP ficou abaixo do limite aceito durante a subida da tensão.

Os TCs tinham origem em dois fabricantes, denominados aqui A e B. Os ensaios foram realizados em três TCs do fabricante A após três meses na vertical, em seis TCs do fabricante B após cinco meses na vertical e em três TCs do fabricante A após seis meses na vertical. Os TCs apresentaram resultado satisfatório no ensaio de tensão suportável, níveis de DP inferiores a 10 pC e valores de $\tan \delta < 0,5\%$, nas tensões de ensaio. A partir dos resultados desses ensaios realizados em 2016, os TCs foram considerados aptos para serem colocados em operação e, de acordo com informações recentes, os TCs não apresentaram falhas ou intercorrências até agora.

Os três últimos TCs mencionados anteriormente apresentaram valores de DP acima do limite admissível, quando os ensaios foram realizados após alguns dias de repouso na vertical. Esse período de tempo era superior ao mínimo recomendado pelo fabricante (48h). Esse resultado ratificou a importância dos ensaios dielétricos para avaliação dos TCs e mostraram ser fundamentais para considerações sobre o tempo mínimo de repouso necessário para um TC voltar a sua condição operativa após permanecer armazenado na horizontal por um período acima do aceitável pelo fabricante. Para os três TCs em questão, 15 dias não foram suficientes, mas, sim, seis meses. Pode-se supor um período menor, considerando que os outros TCs, de mesmo fabricante e tipo construtivo, apresentaram resultados satisfatórios em todos os ensaios após o repouso de três meses na vertical.

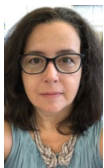
Diante da reconhecida dificuldade logística para o envio dos equipamentos para ensaios em laboratório, foram apresentados alguns exemplos de ensaios dielétricos recomendados e realizáveis de forma prática em campo.

O recomendável para equipamentos reserva com isolamento líquido é armazená-los na mesma posição de operação. Em qualquer caso, mesmo estando armazenado na vertical, é importante a movimentação o mais suave quanto possível do equipamento para o local de operação. Se houver tempo hábil, é recomendável ainda aguardar algumas horas antes da sua energização, mitigando a ocorrência de descargas parciais devido a bolhas de ar no óleo isolante.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Artech, *Catálogo Transformadores de Instrumentos - Alta Tensão*. Acesso em abril de 2019 em <https://www.artech.com/pt/produtos/transformadores-de-corrente>
- (2) Cigré-Brasil GT A2.05, *Guia de Manutenção para Transformadores de Potência*. Novembro 2013.
- (3) Levy, Alain S. F.; Nascimento, Lidio F. A.; Sanz, Jacques P. M.; De Carvalho, J.D.; Tostes, Jorge A. S. *Uma experiência bem sucedida de medição de campo de descargas parciais em TC's para sistemas de 550 kV*. XIX SNTPEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, RJ. 14 a 17 de Outubro de 2007.
- (4) ABNT NBR 6856:2015, *Transformador de corrente - Especificação e ensaios*. ISBN 978-85-07-05432-0.
- (5) Cepel, *Relatório de Ensaio DLA-1860/2017 – Ensaio dielétrico em transformador de corrente na tensão nominal de 550 kV*. 2017.
- (6) INMR, *Using Dielectric Frequency Response to Assess Bushing & Instruments Transformer Insulation*. Feb, 2016. Acesso em 15/07/2016, em <http://www.inmr.com/experience-using-dielectric-frequency-response-techniques-insulation-assessment-bushings-instrument-transformers/>.
- (7) Cigré Study Comitee A3, *State of the Art of Instrument Transformers*. October 2009.
- (8) Cepel, *Relatório de Ensaio DLF-1914/2017 - Análise físico-químico e teor de gases dissolvidos em amostras de óleo mineral isolante*. 2017.
- (9) C. M. Atallah, M.; Borges Filho, Orsino; T. Futino, E.; C. C. Santos, E.; Zirbes, R.; I. Lopes, J.; M. Gontijo, G.; C. C. Brandão, J.; De Abreu, Fábio. *Avaliação de buchas capacitivas para transformadores e reatores por meio de ensaios em alta tensão*. DOI: 10.13140/RG.2.2.30095.79526. III ENEAT - Encontro Nacional de Engenharia de Alta Tensão. Campina Grande, PB. 4 de Junho de 2000.
- (10) Aneel, *Resolução Normativa N° 729*, de 28 de junho de 2016.
- (11) Furnas, *Banco de Dados de Obra de Transmissão (BDOT)*, base abril de 2019.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Marta M. A. Olivieri, nascida no Rio de Janeiro, em 1967. Graduada em Engenharia Elétrica pelo CEFET-RJ, em 1993. Mestrado na área de materiais na COPPE-UFRJ, em 1999. Trabalha no Cepel desde 1986, inicialmente em Laboratórios de Ensaio de Equipamentos de Alta Tensão e atualmente é pesquisadora do Departamento de Materiais, Eficiência Energética e Geração Complementar, atuando na área de energia solar fotovoltaica desde 2005.

Francisco Eduardo Rodrigues de Araújo, nascido no Rio de Janeiro, em 1984. Graduado em Engenharia Elétrica pela UERJ, em 2011. Mestrado da COPPE-UFRJ, na área de Sistemas de Energia. Trabalha no Cepel desde 2006, é pesquisador do Departamento de Laboratórios de Adrianópolis e responsável pelo Laboratório de Ensaio de Equipamentos de Alta Tensão.

Alin A. A. Martins, nascida em Uberlândia, em 1986. Graduada em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia-MG, em 2009. Mestrado na área de eletromagnetismo pela Universidade Federal de Uberlândia, em 2012. Trabalha em Furnas desde 2012, atuando na área de projetos de equipamentos elétricos de alta tensão de subestações de transmissão de energia elétrica.

Paula V. M. Lacerda, nascida em Volta Redonda, em 1988. Graduada em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense-RJ, em 2010. Mestrado na área de Sistemas de Energia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, em 2014. Trabalha em Furnas desde 2011, atuando na área de projetos de equipamentos elétricos de alta tensão e subestações de transmissão de energia elétrica.

Antônio G. M. Muller, nascido no Rio de Janeiro, em 1983. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Veiga de Almeida, em 2011. Mestrado na área de Sistemas de Transmissão, Universidade Federal de Itajubá, MBA em Gerenciamento de Projetos, FGV Rio em 2019. Trabalha em Furnas desde 2004, inicialmente em sistemas de gestão da qualidade e atualmente atua na área de projetos eletromecânicos de usinas e subestações de alta tensão.