

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES
- GTM****OS 16 ANOS DE EXPERIÊNCIA DA CEMIG GT NA PREVENÇÃO DE FALHAS EM TRANSFORMADOR
TRIFÁSICO DE 400 MVA PELA MONITORAÇÃO ON-LINE BUCHAS CAPACITIVAS**

DANIEL CARRIJO POLONIO ARAUJO(1); GABRIEL DE SOUZA(2); MURILO MARQUES PINTO(2); RAFAEL PRUX FEHLBERG(1); MARCOS EDUARDO GUERRA ALVES(2); ROMULO MIRANDA TEIXEIRA(3); LUCAS PAVAN FRITOLI(1); JOSILAINE MENDES GOMES TRETECH TECNOLOGIA LTDA(1); RADICE ENGENHARIA(2); CEMIG GERACAO E TRANSMISSAO S.A(3)

RESUMO

A capacitância e a tangente delta são reconhecidos como parâmetros importantes para o diagnóstico da condição da isolamento de buchas capacitivas. A corrente de fuga vem sendo estudada e utilizada como mais um importante indicador após o advento da monitoração on-line. Este artigo apresentará a experiência e os resultados de 16 anos da Cemig GT com a monitoração on-line da capacitância, tangente delta e corrente de fuga em ativos da companhia, destacando o caso de um autotransformador trifásico de 400 MVA, 550 / 245 kV. Dentre os resultados, temos a prevenção de duas falhas neste mesmo ativo, nos anos de 2011 e 2017, em diferentes buchas.

PALAVRAS-CHAVE

Buchas capacitivas, Capacitância, Tangente delta, Corrente de fuga, Monitoramento on-line

1.0 INTRODUÇÃO

Apesar do custo individual das buchas condensivas ser relativamente baixo comparado ao custo total do equipamento onde está aplicada, uma falha na isolamento de uma bucha pode causar danos severos ao equipamento, como por exemplo, um transformador de potência, podendo iniciar um incêndio que leve à sua perda total, além do risco de danos a equipamentos vizinhos devido aos cacos de porcelana lançados ou quedas das estruturas dos barramentos associados. Ainda pior que isso, falhas desse tipo podem ser extremamente perigosas se houver pessoas próximas ao equipamento.

Um estudo do Cigré datado de 1983 [1] mostra que uma grande parcela das falhas em transformadores de potência tem origem nas buchas condensivas. Apesar de não haver estatísticas atuais sobre o tema, o histórico recente de ocorrências com buchas [2], de certa forma, corrobora esta pesquisa. A Figura 01 ilustra os dados obtidos nos estudos do Cigré [1]. Uma nova pesquisa do Cigré [3], publicada em 2016, traz números que confirmam as estatísticas anteriores, como mostrado na Figura 02.

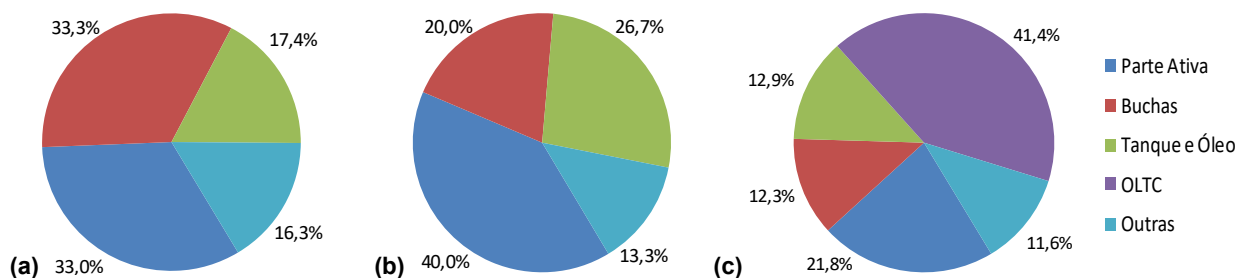


Figura 01: Estatística das causas para saída de serviço de transformadores. (a) transformadores de usinas, sem OLTC; (b) transformadores de subestações, sem OLTC; (c) transformadores de subestações, com OLTC [1].

As alterações nas práticas da manutenção dos ativos, em grande parcela reflexo das novas regras estabelecidas para o setor elétrico, têm levado em conta o paradigma da manutenção baseada no estado real do componente. Este paradigma estipula que o ponto de intervenção ótimo deve ser determinado por técnicas e meios precisos, onde uma parada desnecessária não deve ser realizada. De outra forma, o estado do componente precisa ser verificado continuamente para prevenir falhas abruptas, ocasionada por fatores não previstos.

Neste contexto, a monitoração on-line de buchas ganha um importante papel, que é prevenir possíveis falhas que possam ocorrer entre os intervalos regulares de manutenção e também postergar eventuais manutenções para uma oportunidade economicamente mais conveniente.

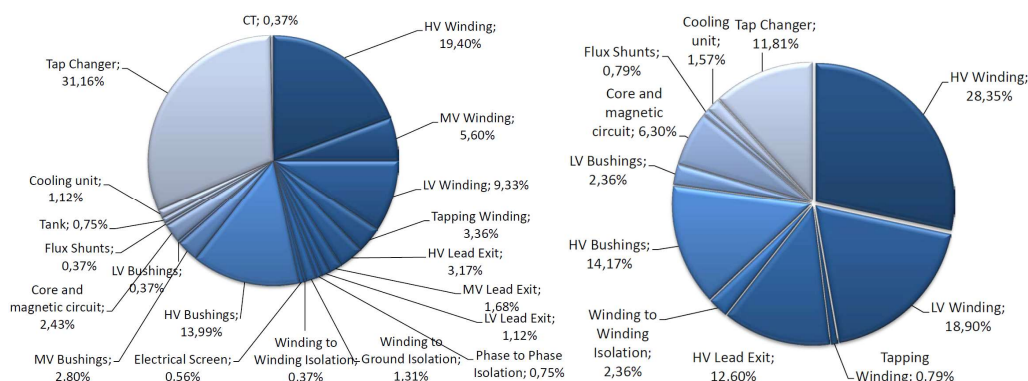


Figura 02 – A esquerda, localização de falhas de transformadores de subestações $U \geq 100$ kV, dados de 536 falhas e a direita, localização de falhas em transformadores elevadores $U \geq 100$ kV, dados de 127 falhas [3]

Outro fator de ganho que a monitoração on-line traz é a obtenção de dados antes não conhecidos acerca do comportamento das buchas em condições reais de utilização, incluindo os momentos que antecedem uma falha. O avanço obtido com a análise destes dados é convertido em novas técnicas para a prevenção destas falhas, como mostrado em [4].

2.0 CONTEXTUALIZAÇÃO DA INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO NA SE MESQUITA – CEMIG GT

A Subestação Mesquita, objeto deste estudo, está localizada no município de Santana do Paraíso – MG, próximo à cidade de Ipatinga na região leste de Minas Gerais. Esta subestação supre a carga de grandes consumidores do sistema elétrico de transmissão como a USIMINAS, ARCELOR MITTAL e CENIBRA. Entrou em operação comercial em junho de 1981. Atualmente a potência de transformação instalada é de 1.200 MVA, sendo composta por três autotransformadores de 500 / 230 kV com 400 MVA cada, duas linhas de transmissão em 500 kV e cinco em 230 kV. A Figura 03 mostra a vista aérea da SE Mesquita.



Figura 03: Vista aérea da SE Mesquita, pertencente a Cemig GT, situada na região leste de Minas Gerais

Em meados de 2005, a Cemig, de forma pioneira, instalou o Monitor de Buchas Condensivas BM da Tretech nas buchas de 550 kV e 245 kV do autotransformador T-2 da SE Mesquita. Nesta oportunidade também foi instalado o sistema em um TC de pedestal de 550 kV que faz parte do mesmo barramento deste autotransformador. A escolha foi motivada pelas suspeitas em relação a uma determinada família de buchas com histórico de falhas no setor elétrico. Na Figura 04 podemos observar detalhes da instalação física do BM no autotransformador e no TC de pedestal.



Figura 04: Detalhe das instalações do Sistema de Monitoração realizadas na SE Mesquita, da Cemig

Adicionalmente a monitoração de buchas, foi instalada no T-2 da SE Mesquita a monitoração de umidade no óleo isolante e a integração da monitoração de temperatura do óleo e enrolamentos. Foi utilizada uma rede sem fio para interligar os sensores no pátio da SE ao sistema de monitoração Sigma que havia sido instalado. A utilização da rede sem fio foi uma forma prática, de baixo custo e segura para a transmissão dos dados dos sensores para o sistema de monitoração.

Desta forma a Cemig tinha fácil acesso a todos os dados e diagnósticos emitidos por estes sensores. Estes dados são utilizados pela manutenção da Cemig para aprimorar o uso do ativo e antever possíveis falhas entre as manutenções e verificações rotineiras.

3.0 METODOLOGIA PARA MONITORAÇÃO ON-LINE DE CAPACITÂNCIA E TANGENTE DELTA

A capacitância e a tangente delta são reconhecidos como alguns dos principais parâmetros para diagnóstico da condição da isolação de buchas, pois estes parâmetros são diretamente afetados pela deterioração da isolação. Por exemplo, camadas de isolação em curto-circuito causam aumento da capacitância, enquanto o ingresso de umidade por falha na estanqueidade causa aumento na tangente delta.

A norma IEEE C57.19.100-1995 [5] que foi publicada anteriormente à popularização do monitoramento on-line, sugere intervalos típicos de 3 a 6 anos para a realização de ensaios off-line de capacitância e tangente delta.

Um estudo comparativo [6] correlacionando os valores obtidos nas medições off-line de capacitância e tangente delta com as análises de gases dissolvidos no óleo de buchas com suspeita de defeitos em evolução comprova a eficácia das medições de capacitância e tangente delta para o diagnóstico de defeitos em buchas.

A monitoração on-line é a resposta à necessidade de verificação contínua destes parâmetros, assegurando o estado operacional da bucha e antevendo defeitos na isolação em estágio inicial. Mas para que a monitoração on-line das buchas possa ocorrer com segurança, precisão e confiabilidade, alguns pontos críticos precisam ser observados, conforme será descrito nos próximos itens:

4.0 A MEDIÇÃO DAS CORRENTES DE FUGA DAS BUCHAS

Para que a medição das correntes de fuga provenientes do tap de teste ou do tap de tensão seja realizada de forma segura e eficaz, são necessários adaptadores que servirão de interface elétrica e mecânica entre o tap e os circuitos elétricos que conduzirão a corrente até o local de medição. Os adaptadores de tap utilizados na aplicação da Cemig possuem todos os requisitos para atender a esta aplicação com desempenho e segurança. Na Figura 05 são mostrados alguns detalhes desta instalação.



Figura 05: Detalhe dos adaptadores de tap utilizados no sistema de monitoração de buchas BM

Realizando-se uma análise simplificada, poder-se-ia considerar que o adaptador de tap é apenas uma tomada para permitir o contato elétrico entre o tap da bucha e a entrada de medição do BM. Esta simplificação mostra-se tanto errônea quanto perigosa, já que devemos levar em consideração que o tap da bucha nunca deve permanecer aberto. Dentre as características elétricas que o adaptador deve possuir, para atender aos requisitos de segurança

e desempenho da monitoração, destacam-se o seu desenho mecânico diferenciado e a proteção contra falha na conexão elétrica do circuito de medição ou no caso de ocorrer uma desconexão acidental.

O adaptador de tap utilizado possui em seu interior um circuito de proteção com dupla função. A primeira é a proteção redundante contra abertura do tap em caso de desconexão acidental dos cabos de ligação entre o adaptador e o módulo de medição do BM. Esta proteção tem efeito instantâneo, entrando em ação e limitando a tensão em qualquer parte do circuito secundário do adaptador de tap em ≈ 15 Vac. As proteções utilizadas podem conduzir por tempo indeterminado e são dimensionadas para ensaio de impulso (BIL) 2.050 kV - bucha 765 kV. Além disto, cada adaptador possui dupla proteção, que atuando paralelamente, provê proteção redundante.

Estas características são asseguradas por um desenho mecânico que torna estas proteções inacessíveis durante o manuseio e instalação do adaptador. A segunda função é a proteção primária contra sobrecorrentes (vários kA) e sobretensões associadas, que ocorrem no tap da bucha em caso de sobretensões causadas por manobras de chaveamento ou impulsos atmosféricos. Essa função é complementada pela proteção secundária existente no interior do próprio BM, de tal forma que as proteções primária e secundária atuam em conjunto, de forma coordenada, para evitar danos ao BM e ao adaptador.

5.0 O TRATAMENTO MATEMÁTICO E ESTATÍSTICO DAS MEDIÇÕES PARA EXTRAIR AS INFORMAÇÕES DE CAPACITÂNCIA E TANGENTE DELTA DA ISOLAÇÃO

A medição de grandezas elétricas da ordem de mA e μ A em ambientes eletromagneticamente agressivos, como o de uma subestação de alta tensão, tem sido um desafio constante na elaboração de sistemas precisos e confiáveis para a monitoração de equipamentos elétricos. No caso específico da monitoração de buchas, algumas técnicas são empregadas para abordar este desafio.

Algumas técnicas não são capazes de monitorar a tangente delta. Outras têm como requisito a medição das tensões fase-terra aplicadas às buchas, sendo que muitas vezes não existem transformadores de potencial disponíveis na instalação para prover esta informação. Com isso, a Tretech adotou em seu BM condensivas a técnica da soma vetorial das correntes de fuga das buchas de um conjunto trifásico. Esta técnica apresenta algumas vantagens, como a monitoração on-line de alterações tanto da capacitância quanto da tangente delta, além de não demandar a medição das tensões fase-terra aplicadas às buchas.

Em cada uma das buchas a corrente de fuga flui através da capacitância C1 para terra, passando pelo tap capacitivo, sendo esta corrente função da tensão fase-terra e da impedância da isolação. Uma alteração nesta corrente refletiria uma alteração na impedância da bucha. Em princípio, esta corrente poderia ser utilizada para mensurar esta alteração. Não obstante, a característica predominantemente capacitiva da corrente de fuga e a ordem de grandeza das alterações que se deseja medir levam ao desafio de se medir alterações da ordem de grandeza de 0,6% no fator de dissipação – que pode ser a diferença entre uma bucha nova e uma bucha em risco – sendo que esta alteração praticamente não altera a corrente de fuga total que flui de uma bucha.

A técnica da soma vetorial das correntes de fuga, utilizada para contornar esta dificuldade, tira proveito do fato das três correntes de fuga estarem defasadas entre si em aproximadamente 120° , e normalmente tem a mesma ordem de magnitude. Com isso, a somatória vetorial tende a um valor bastante menor que cada uma das correntes de fuga tomadas individualmente, como ilustrado na Figura 06(a) para uma dada condição inicial de capacitâncias e tangentes deltas.

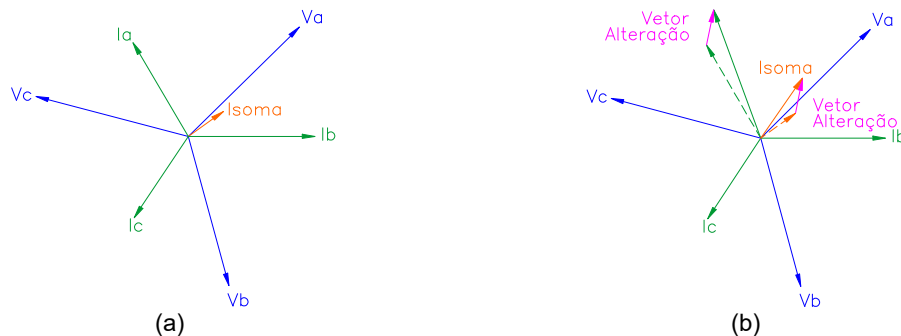


Figura 06: Correntes de fuga de três buchas em um sistema trifásico e sua somatória; (a) Para uma dada condição inicial; (b) Com alteração na capacitância e fator de dissipação da bucha da fase A.

Supondo agora uma alteração na capacitância e no fator de dissipação da bucha da fase A, como mostrado na Figura 06(b), o vetor alteração que expressa o deslocamento da corrente Ia de seu valor inicial até seu valor final se reflete também na corrente somatória, que é alterada em relação a seu valor inicial segundo o mesmo vetor alteração.

Este vetor alteração tem peso praticamente insignificante quando comparado à magnitude da corrente de fuga da fase A. Porém o mesmo não ocorre quando este vetor é comparado à corrente somatória, o que permite sua detecção e, por conseguinte, a detecção da alteração ocorrida na impedância da bucha em questão. Dessa forma, a técnica da soma vetorial das correntes de fuga proporciona um aumento de sensibilidade que viabiliza a monitoração das alterações ocorridas tanto na capacitância quanto na tangente delta da isolação.

No entanto, as correntes de fuga das buchas são função não apenas das suas capacitâncias e tangentes deltas, mas também das tensões fase-terra do sistema. Uma vez que essas últimas frequentemente não estão disponíveis para medição pelo sistema de monitoramento, como explanado anteriormente, a possível influência de variações nas

tensões fase-terra sobre as medições de variações na capacitância e tangente delta é eliminada por técnicas proprietárias avançadas de processamento de sinais, que incluem também tratamentos estatísticos dos dados.

Esses tratamentos estatísticos pressupõem o uso de uma massa de dados, acumulada ao longo do tempo de operação do sistema, a qual é atualizada continuamente com as medições de correntes de fuga e corrente somatória mais recentes. Por esse motivo, o sistema de monitoramento on-line possui um tempo de resposta às variações ocorridas na capacitância e na tangente delta que pode variar de várias horas a alguns dias, a fim de confirmar que a alteração de capacitância e/ou tangente delta é real, e não causada por oscilações nas tensões do sistema elétrico.

As alterações de capacitância e tangente delta são utilizadas para incrementar os valores iniciais programados no BM. Desta forma, com o valor inicial e as alterações ocorridas posteriormente, o BM indica o valor atual da capacitância e tangente delta correspondente ao obtido em um ensaio off-line da bucha.

6.0 ESTUDO DE CASO: PRIMEIRA OCORRÊNCIA NA SE MESQUITA - 2011

Durante o período de 2005 a 2010 o sistema de monitoração esteve em operação contínua. Não foi registrado nenhum alarme sobre o estado da bucha, indicando que até então a bucha apresentara funcionamento normal.

No dia 20/02/2011, domingo, o BM indicou um alarme de tendência de capacitância alta na bucha de 230 kV, fase B. Os operadores da SE Mesquita notificaram a Engenharia de Manutenção da Cemig sobre a ocorrência deste alarme [7]. Os primeiros dados da memória de massa do BM foram obtidos em 22/02/2011. A Tabela 01 mostra estes dados.

Tabela 01: Valores da monitoração de buchas no dia 22/02/2011, no momento da análise

Fase	550 kV		245 kV		TC 550 kV	
	Capacitância	Tangente Delta	Capacitância	Tangente Delta	Capacitância	Tangente Delta
A	583,0 pF	0,202 %	511,0 pF	0,360 %	472,0 pF	0,300 %
B	583,0 pF	0,180 %	529,8 pF	0,454 %	470,0 pF	0,300 %
C	583,0 pF	0,180 %	511,0 pF	0,360 %	475,0 pF	0,300 %

Podemos verificar que houve uma variação de 2,08% na capacitância e 26,11% na tangente delta da bucha de 245 kV fase B. Todas as análises pertinentes foram realizadas e a tendência de crescimento tanto da capacitância quanto da tangente delta foram confirmadas. Após esta confirmação, a equipe de engenharia da Cemig programou um desligamento para o dia 27/02/2011, domingo, para a realização de ensaios off-line que pudessem comprovar a situação da bucha.

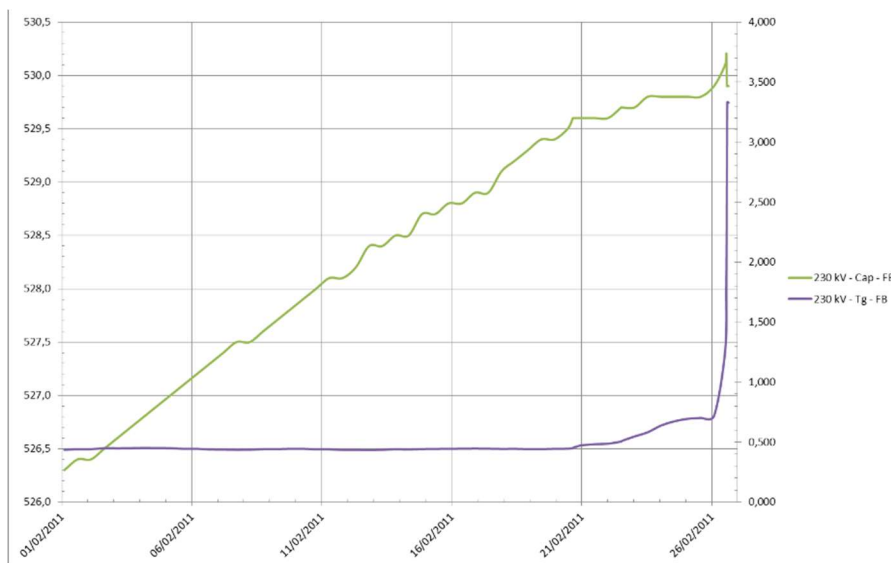


Figura 07 – Detalhe da evolução dos valores monitorados nos momentos que antecederam o desligamento.

Ainda no sábado dia 26/02/2011, às 11:55, o BM acusou um aumento súbito do valor de tangente delta da fase B do conjunto de 245 kV. O monitor variou a indicação de tangente delta, em um intervalo de tempo muito curto, de 0,490% para 1,263%, superando os limites do alarme muito alto, enquanto capacitância medida variou pouco, com o valor de 530,1 pF. A equipe Cemig e Tretech que estavam de plantão no local realizaram análises baseadas nas indicações do sistema e verificaram a consistência da indicação.

A equipe Operação e de Engenharia de Manutenção da Cemig em um trabalho conjunto, tomaram ações imediatas e iniciaram as negociações para um desligamento emergencial do autotransformador. Como se trata de um equipamento pertencente à Rede Básica do Sistema Interligado Nacional, o desligamento foi negociado junto ao ONS que autorizou a retirada de operação do autotransformador T-2 às 15:13 pelo CLM 748/201, já que a manobra ocorreu em tempo real.

A Cemig imediatamente enviou uma equipe para realizar as primeiras medições off-line na bucha suspeita, tão logo o autotransformador fosse desligado, para verificar a validade das indicações da monitoração on-line. Durante

esta espera, equipes de ambas as empresas acompanhavam on-line a evolução da tangente delta, que passou a crescer de forma agressiva até o momento do desligamento, atingindo 3,331 % em seu momento mais crítico. A Figura 07 mostra a evolução crítica ocorrida nos momentos que antecederam o desligamento.

Por volta das 15:40 as manobras necessárias para o desligamento foram encerradas e o autotransformador, devidamente isolado teve a bucha suspeita submetida ao ensaio off-line. Seguindo a recomendação da equipe Tretech presente, a equipe da Cemig mensurou os valores de tangente delta tão logo fosse possível, devido ao fato da tangente delta variar com a temperatura.

O comportamento típico é que os valores de tangente delta diminuam com a temperatura para uma mesma condição de deterioração da isolamento. Por isso a importância desta medição ser feita tão logo fosse possível. No momento do desligamento, o BM indicava um valor de capacitância de 529,9 pF e 3,329% para a tangente delta. A Tabela 02 mostra os dados obtidos pelas medições off-line e pelo sistema de monitoração on-line.

Tabela 02: Valores das medições off-line e on-line na bucha suspeita

Fonte	245 kV		
	Capacitância (pF)	Tangente Delta (%)	Observações
Monitor on-line BM	529,90	3,329	-
Medição Off-line	517,28	2,600	Temperatura ambiente: 34 °C Temperatura de Topo do Óleo: 61,3 °C
Contraprova da Medição Off-line	517,60	2,440	Temperatura ambiente: 32 °C Temperatura de Topo do Óleo: 56,4 °C

Após as medições off-line confirmarem as indicações da monitoração on-line, a Cemig decidiu manter o autotransformador desligado até a troca da bucha defeituosa. A troca foi agendada para a segunda-feira, dia 28/02/2011. No domingo, dia 27/02/2011, com a chegada da equipe Cemig que realizaria a troca da bucha no dia seguinte, foram realizadas novas medições off-line com um instrumento de fabricante diferente do utilizado no dia anterior, com a intenção de corroborar os dados anteriormente obtidos. A Tabela 03 mostra os dados desta nova medição.

Tabela 03: Valores da nova verificação off-line realizada.

Fonte	245 kV		
	Capacitância (pF)	Tangente Delta (%)	Observações
Medição Off-line	515,00	0,780	Temperatura ambiente: 31 °C Temperatura de Topo do Óleo: 34,8 °C
Contraprova da Medição Off-line	514,10	0,910	Temperatura ambiente: 31 °C Temperatura de Topo do Óleo: 34,8 °C

Com estas novas medições, verificou-se que a bucha apresentava significativa alteração na tangente delta mesmo nas condições mais favoráveis de temperatura. As variações nas medições foram as esperadas e optou-se por manter o planejamento de troca da bucha.

Para compreender melhor o tipo de falta que ocorreu na bucha e causou a alteração dos seus parâmetros dielétricos, foi coletada amostra do óleo isolante para análise gás-cromatográfica no laboratório da Cemig. Os resultados da análise são mostrados na Tabela 04.

Tabela 04: Resultados da análise gás-cromatográfica no óleo da bucha defeituosa.

Gases Dissolvidos	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	Total de Gases Combustíveis
Concentração em PPM	5.446,0	18.750,0	82.987,0	869,0	130,0	550,0	3,7	325,0	0,0	6.773,0

Isso mostra que a decisão de desligamento foi acertada e que o sistema de monitoramento funcionou corretamente, evitando uma provável explosão de bucha e sérios danos ao autotransformador.

7.0 ESTUDO DE CASO: SEGUNDA OCORRÊNCIA NA SE MESQUITA - 2017

No dia 17/02/2017, o monitoramento das buchas de 550 kV do T-2 emitiu alarme de capacitância e tangente delta elevada para a fase B, azul (H2). Os responsáveis pela operação da SE acionaram a engenharia de manutenção e, no mesmo dia, decidiu-se pelo desligamento imediato do T-2 para evitar uma eventual falha. Cabe aqui destacar a rapidez com que as ações foram tomadas. Essa rapidez foi fundamental para o sucesso deste caso.

Neste meio tempo, foram obtidos e analisados pela própria engenharia da Cemig GT os dados de registro do BM. Eles perceberam que a corrente de fuga da fase A, vermelha (H1) apresentava elevada corrente de fuga, muito acima do padrão normal. Isso denotaria risco imediato a operação do autotransformador, motivo pelo qual o desligamento emergencial era necessário. A Figura 08 mostra as correntes normais e as alteradas;

Quanto aos ângulos entre fases, apesar de ter influenciado pouco na ação gerencial tomada e no diagnóstico do defeito da bucha, foi possível constatar o padrão zigue-zague teoricamente inferido para a tangente delta – e, por origem, dos ângulos - previsto quando o defeito evolui para a perda real de camadas capacitivas. A Figura 09 mostra as os ângulos típicos e a ocorrência de um zigue-zague, coincidindo o retorno à normalidade no mesmo ponto onde a corrente de fuga dispara.

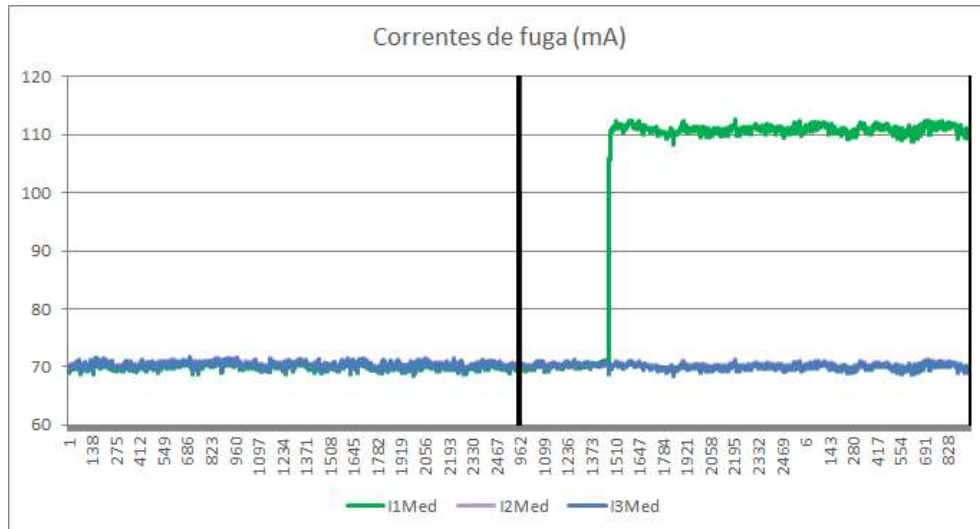


Figura 08 – Valores das correntes de fuga do conjunto de 550 kV, em situação normal e defeituosa

No próprio dia 17/02/2017, foi realizado pela equipe de manutenção os ensaios de capacitância e tangente delta das buchas. Neste ensaio, foi constatado o estado crítico da bucha H1, a mesma que apresentou corrente de fuga alta no monitoramento e foi responsável pela decisão pelo desligamento emergencial. Os resultados deste ensaio estão na Tabela 05.

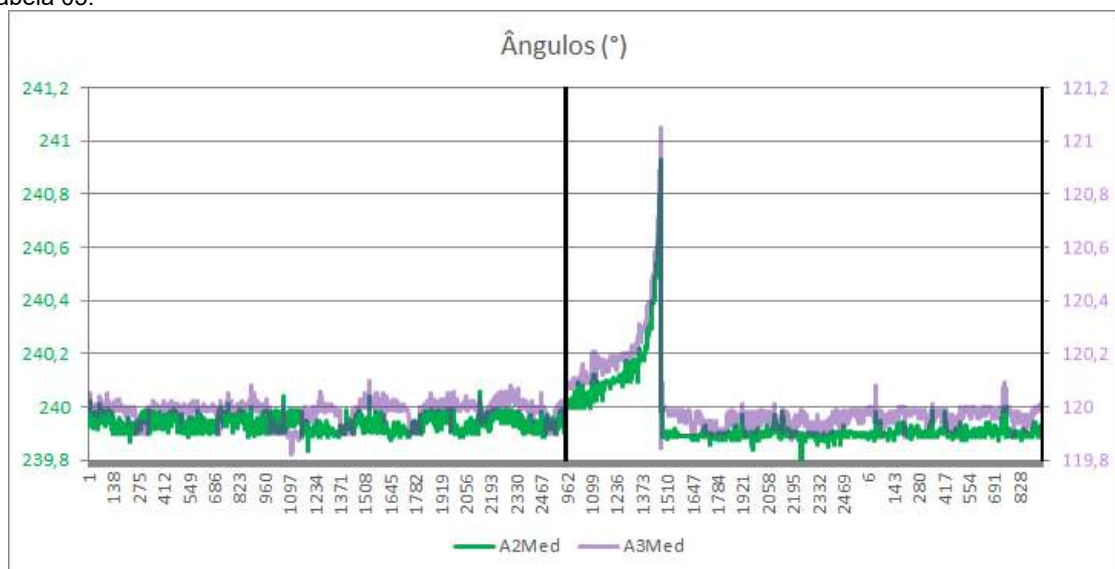


Figura 09 – Valores dos ângulos da corrente fuga do conjunto de 550 kV, em situação normal e defeituosa

No dia 10/03/2017, novos ensaios foram realizados nas buchas, confirmando as medições da monitoração on-line e as obtidas no ensaio offline do dia 17/02/2017. Após a troca da bucha defeituosa, o autotransformador foi colocado novamente em operação.

Neste ponto, cabe atentar para o fato de o primeiro alarme de capacitância e tangente delta do BM ter sido emitido para a fase H2, sendo que claramente, pelos próprios dados do monitor o defeito encontrava-se na fase H1. Temos dois pontos: Primeiro, os alarmes da H2 no lugar da H1 foram causados pela oscilação angular abrupta, que fez com que em um primeiro momento a bucha sinalizada fosse a H2. Por outro lado, o alarme de corrente de fuga, decisivo para o desligamento do autotransformador, foi emitido corretamente para a bucha H1. Os dados apontam que, caso o autotransformador tivesse sido mantido em operação por mais algum tempo, a influência da grande oscilação angular seria compensada e os alarmes de capacitância e tangente delta iriam para a H1, juntando-se com o alarme de corrente de fuga alta.

Tabela 05: Resultados ensaio capacitância e tangente delta

	H1 – Fase Vm	H2 – Fase Az	H3 – Fase Br
Capacitância (pF) medida	928,00	599,38	600,18
Capacitância (pF) inicial	595,30	597,90	594,00

Tgδ(%) medida	0,868	0,238	0,186
Tgδ(%) Inicial	0,166	0,259	0,215

Temperatura ambiente: 35 °C / Temperatura do óleo: 61 °C

8.0 A EXPERIÊNCIA ADQUIRIDA DURANTE OS 16 ANOS DE MONITORAMENTO CONTÍNUO DE BUCHAS

Um sistema de monitoramento de buchas confiável, durável e de fácil operação é uma ferramenta inestimável para que a engenharia de manutenção possa conhecer melhor a condição do ativo, além de servir como para a operação como um alerta de risco operativo iminente, como no caso do aumento abrupto da corrente de fuga de uma determinada bucha.

O BM instalado na SE Mesquita foi o pioneiro, sendo que nos anos seguintes a tecnologia foi amplamente aplicada em outros ativos do parque da Cemig GT, além da exigência desta tecnologia em novos fornecimentos de transformadores através de especificação técnica.

A Cemig reconheceu que para tirar total proveito dos sistemas de monitoramento de buchas adquiridos ao longo do tempo, era preciso treinamento e capacitação adequados.

Em 2015, houve um treinamento corporativo realizado na Univercemig, mostrado na Figura 10, onde professores foram capacitados como multiplicadores e foram treinados ao todo 57 profissionais de 7 gerências distintas, o que corresponde a cerca de 90% dos colaboradores envolvidos em atividades relacionadas a monitores de buchas. Em 2016, a engenharia recebeu um treinamento avançado em análise de dados do BM. Este treinamento ensinava, além de modos de falhas das buchas e do funcionamento do BM, como obter identificar e interpretar os dados, extraindo deles os pontos críticos para determinar a criticidade daquela bucha.

Durante os 16 anos de operação deste sistema, a Cemig GT se capacitou e se aperfeiçoou tanto na análise e interpretação dos dados dos monitores de buchas, o que a fez tomar as rápidas decisões e ações no caso de 2017, possivelmente impedindo que um defeito evoluísse para uma falha com viés catastrófico.

Neste contexto, é importante destacar a evolução do papel da corrente de fuga como o principal fator na tomada de decisão operativa, ou seja, decisões que interfiram na capacidade operativa imediata do ativo. Hoje, a corrente de fuga ajuda o especialista a determinar se é possível realizar um desligamento programado, qual seria o prazo de programação seguro e se não for possível, qual a urgência desde desligamento, além de servir de base técnica para justificar o desligamento junto aos órgãos responsáveis, como ONS e ANEEL. Foi a corrente de fuga que embasou a correta decisão tomada pela Cemig GT.



Figura 10: Treinamento realizado pela Cemig GT, ministrado pela Univercemig e Treotech.

9.0 CONCLUSÃO

Em meio a crescente exigência por melhores índices de qualidade, disponibilidade e confiabilidade a Cemig, motivada pelas suspeitas em relação a uma determinada família de buchas com histórico de falhas no setor elétrico, instalou na SE Mesquita o Monitor de Buchas Condensivas BM da Treotech nas buchas de 550 kV e 245 kV do autotransformador T-2 e também em um TC de pedestal de 550 kV.

Além deste fator motivador, sabe-se que o monitoramento on-line de buchas pode contribuir para a redução dos custos de manutenção através de melhorias no processo de planejamento da manutenção e na utilização intensiva do paradigma da manutenção sob condição, reduzindo os desligamentos para ensaios de rotina.

Adicionalmente, a monitoração on-line tem fornecido dados valiosos sobre a forma e tempo de evolução dos defeitos neste componente. A instalação do sistema de monitoração de buchas condensivas BM proporcionou diversas vantagens, sendo que os objetivos primordiais abaixo listados foram plenamente atendidos:

- A redução de risco de falhas com o diagnóstico das buchas em tempo real;

- O aumento de disponibilidade por meio da realização de manutenção preditiva ao invés da manutenção preventiva (redução de desligamentos para manutenção);
- Permitir que a engenharia de manutenção possa aumentar o intervalo entre as manutenções preventivas nos ativos. Isso aconteceu no caso do T-2 da SE Mesquita;
- A redução dos custos de manutenção ao se evitarem manutenções desnecessárias;
- A preservação e melhora da imagem corporativa com a redução de desligamentos e de falhas catastróficas.

A experiência da Cemig GT durante os 16 anos de uso ininterrupto desta tecnologia, que culminou em sua aplicação corporativa, mostra que a mesma é uma excelente ferramenta não apenas para a engenharia de manutenção, mas também para a tomada de decisão em nível operativo, com o aperfeiçoamento do uso da corrente de fuga como uma forma consistente e fidedigna de se avaliar, em última instância, o risco operativo em tempo real.

10.0REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ELECTRA, "An International Survey on Failures in Large Power Transformers in Service", Paris, CIGRE, Ref. no. 88, 1983.
- [2] Melo, Marcos A. C., Alves, Marcos, "Experiência com Monitoração On-Line de capacitância e tangente delta de Buchas Condensivas", XIX SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [3] ELECTRA, "Transformer reliability survey", Paris, CIGRÉ WG A2.37, Ref. no. 284, 2016
- [4] Alves, Marcos, Pena, Miguel C Medina, Severino, Cláudio "DEFEITOS DE EVOLUÇÃO RÁPIDA E MUITO RÁPIDA EM BUCHAS DETECTADOS POR MONITORAMENTO ON-LINE", XXI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Florianópolis, Brasil, 2011.
- [5] The Institute of Electrical and Electronic Engineers, ANSI/IEEE Std C57.19.100-1995, "IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings", Março/1995
- [6] Melo, Marcos A. C., "Investigação de Ocorrências em Buchas de Transformadores e Reatores Utilizando o Doble M-4000", IV Conferência da Doble Brasil – Cemig. Belo Horizonte, Brasil, 2003.
- [7] Relatório Técnico de Ocorrência – SE Mesquita – 04/2011

DADOS BIOGRÁFICOS



Graduado em Engenharia Elétrica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (2006), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (2008) e Doutorado na Universidade de São Paulo (2021), na área de Sistemas Dinâmicos. É Diretor de Engenharia / PD&I na Treotech e Pesquisador Especialista na Radice. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, ênfase em Máquinas Elétricas e Dispositivos de Potência e Alta Tensão, atuando nos temas: Monitoração Online, Sensoriamento Remoto, Subestações, Técnicas e Metodologias de Manutenção para Equipamentos de Alta Tensão, Transformadores e Reatores, Buchas Condensivas, Inteligência Computacional, Sistemas Inteligentes, Processamento Digital de Sinais.

(2) **GABRIEL DE SOUZA**
Graduado com Honra ao Mérito em Engenharia Eletrônica e Mestre em Engenharia Elétrica pela UNIFEI. Doutorando em Sistemas Inteligentes pela EESC-USP.

(3) **MURILO MARQUES PINTO**
Murilo Marques é graduado em Engenharia Eletrônica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e cursando mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (2021). Atualmente trabalha na Radice Tecnologia. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica/Eletrônica, nas áreas de programação, Data Science, inteligência artificial, processamento digital de sinais, projetos de circuitos eletrônicos, diagnóstico de falhas e sistemas de potência.

(4) **RAFAEL PRUX FEHLBERG**
Mestrando em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, possui graduação em Engenharia de Controle e Automação pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (2003) e MBA em Gerenciamento de Projetos pela Unilasalle Canoas (2016). Atualmente é Engenheiro Eletricista Senior na Treotech Sistemas Digitais e Gestor de Projetos pela Radice Tecnologia. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em subestações de energia, transformadores de potência, disjuntores e seccionadores. Também possui experiência com gestão de projetos e certificação PMP.

(5) **MARCOS EDUARDO GUERRA ALVES**
Marcos Alves é Doutor em Ciências desde 2013 pela USP/IEE, Mestre em Ciências (2005) pela USP/Poli e Engenheiro Eletricista pela USJT (2001). É Diretor de P&D na Radice Tecnologia, onde supervisiona projetos de PD&I, e Diretor de Tecnologia na Treotech Tecnologia, onde atua desde 1992. É especializado em sistemas de sensoriamento, diagnóstico e prognóstico de estado e gestão de equipamentos de alta tensão. Tem larga experiência em sensores eletrônicos inteligentes (IEDs) e sistemas de monitoramento on-line, gestão de manutenção e gestão de ativos. É membro do IEEE/PES desde 2007 e do Cigré desde 2001.

(6) **ROMULO MIRANDA TEIXEIRA**
Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG (2006), pós graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (2010). É Engenheiro de Planejamento de Manutenção Elétrica da Transmissão na Cemig. Tem experiência na área de planejamento de manutenção de equipamentos de alta tensão de subestações, atuando nos temas de diagnóstico da condição operativa de equipamentos, planejamento de manutenção a longo prazo, metodologias de manutenção, inovações tecnológicas de manutenção e monitoramento de ativos.

(7) **JOSILAINE MENDES GOMES**
Graduada em Engenharia Elétrica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (2013). Trabalha na Cemig Geração e Transmissão como engenheira de planejamento e manutenção da transmissão, atuando nos temas: técnicas e metodologias de manutenção, transformadores e reatores de potência, buchas condensivas, transformadores para instrumentos e monitoramento de ativos.

(8) **LUCAS PAVAN FRITOLI**
Engenheiro Eletricista pela Universidade São Francisco (USF) e formado em Comunicação Social pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), possui estudos em Automação Industrial (Intep), Protocolo de Comunicação IEC 61850 (SEL), Sistemas de Monitoramento de Equipamentos de Alta Tensão (Treotech) e Gestão de Ativos (Grupo iREP). Colaborador da Engenharia de Aplicação da Treotech com 13 anos de trabalhos no setor elétrico, com ênfase em projetos na Indústria eletrointensiva e de GTD. Participa no Comitê de Gestão de Ativos CEE 251 da ABNT, com vários artigos publicados sobre modernização de subestações industriais e mudanças de cultura de manutenção no setor elétrico.

