



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

CB/GSE/01

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

**A IMPORTÂNCIA DA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DIELÉTRICOS COM ALTA TENSÃO, APÓS GRANDES
MANUTENÇÕES EM SUBESTAÇÃO ISOLADA A GÁS SF₆**

**Aline Furtado de Souza(*)
UFPA**

**Fernando de Souza Brasil
ELETRONORTE**

**Bárbara Medeiros Campos
ELETRONORTE**

RESUMO

As subestações isoladas a gás SF₆, do inglês "*Gas-Insulated Substation*" (GIS), são usadas em usinas hidrelétricas por serem mais compactas e pela eficiência no isolamento. Após montagem, troca de equipamentos ou grandes manutenções, é necessário realizar ensaios dielétricos com alta tensão, para detectar possíveis falhas dielétricas, antes que o sistema seja energizado e a GIS volte a operar.

Neste trabalho, serão apresentados os resultados obtidos durante ensaios de tensão suportável e de descargas parciais, feitos na Usina Hidrelétrica de Tucuruí, após a troca de equipamentos sinistrados na unidade geradora 06, as falhas detectadas e as soluções tomadas, para eliminá-las.

PALAVRAS-CHAVE

Subestação Isolada a Gás, Ensaio Dielétrico, GIS, Tensão Suportável, Descargas Parciais

1.0 - INTRODUÇÃO

O gás hexafluoreto de enxofre (SF₆), é utilizado como isolante elétrico, por sua alta capacidade dielétrica, auto regeneração e eficiência na interrupção de arcos voltaicos. Quando em pressão atmosférica, o SF₆ tem uma rigidez dielétrica 2,5 vezes melhor do que o ar, porém quando usado entre 3 e 5 vezes a pressão atmosférica, pode atingir um patamar de 10 vezes a rigidez dielétrica do ar (1).

De acordo com a norma brasileira que trata sobre recomendações na montagem de uma GIS, define-se que: Subestação blindada isolada a gás é um conjunto de equipamentos de manobra, medição e proteção encapsuladas em invólucro metálico aterrado, incluindo seus dispositivos de operação, comando, controle e proteção, no qual o isolamento é obtido pelo menos parcialmente por um gás isolante que não o ar à pressão atmosférica (2).

Logo no início da introdução do gás SF₆ em subestações isoladas a gás, não eram realizados ensaios dielétricos em campo, porém após muitas pesquisas e experiências, observou-se que a isolação das instalações sofriam tensões de estresse, ocasionadas por diversos tipos de falhas e defeitos provocados por erros do fabricante, montagem e após manutenções.

A baixa necessidade de manutenção preventiva é uma das vantagens também atribuída à utilização de GIS. Entretanto, quando há necessidade de alguma intervenção, seja preventiva ou devido às falhas, a manutenção é complexa, de custo elevado e consome bastante tempo (3).

(*) Rua Paulo Afonso, 02 – Vila Península – CEP 68455-731, Tucuruí, PA – Brasil
Tel: (+55 93) 99903-0145 – Email: aline.f.souza@hotmail.com

2.0 - ENSAIOS DE CAMPO EM SUBESTAÇÕES ISOLADAS A GÁS

Há mais de vinte anos, desde a introdução do gás SF₆ como meio isolante em subestações de alta tensão, métodos de ensaio em campo vêm sendo discutidos. As normas internacionais IEC 60.060 – ensaios com alta tensão e IEC 62.271 – ensaios em subestações blindadas, estabelecem que os equipamentos, quando ensaiados em fábrica e que não tiverem sido completamente montados, os ensaios de recebimento final devem ser realizados em campo (4).

2.1 Subestação Isolada a Gás

Uma subestação isolada a gás é constituída por equipamentos como: disjuntores, transformadores de corrente e potencial, seccionadores, barramentos de interconexão, pára-raios e conexões para o restante do sistema elétrico. Um conjunto de equipamentos, ou de forma individual, é dividido em módulos que representam compartimentos internos preenchidos com gás e isolados dos demais módulos por peças isoladoras. As construções mais comuns são de sistemas trifásicos montados em compartimentos únicos (3).

A GIS da UHE Tucuruí é composta por bays, cujo módulo é monofásico, de acordo com o projeto, para tensões até 550 kV e correntes de curto-circuito de até 63 kA. Seus compartimentos são montados com invólucros metálicos, cotendo as partes condutoras e as juntas de expansão e ajuste. O fabricante envia uma única unidade contendo os invólucros, isoladores e condutores, a fim de reduzir o trabalho durante a fase de montagem dos compartimentos e evitar a contaminação interna destes. A Figura 1, mostra o diagrama geral dos bays 1 e 2, inteligidos para atender as unidades geradoras 05 e 06.

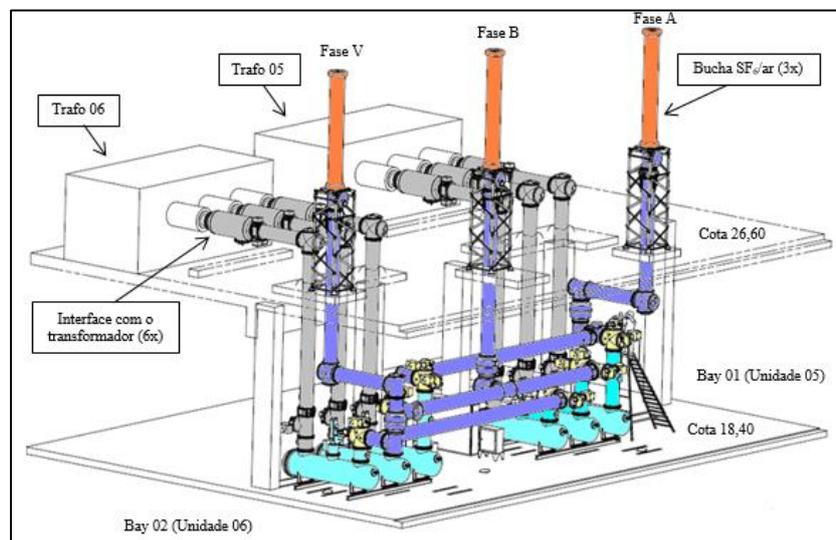


FIGURA 1 – Diagrama Geral dos Bays 01 e 02 das Unidades Geradoras 05 e 06 na UHE Tucuruí.

2.2 Histórico de Falhas Detectadas em GIS

Durante a fase de transporte dos módulos que compõem uma GIS, da fábrica até as instalações do cliente, podem ocorrer anormalidades, avarias impactantes e estresses causados por manobras no embarque, desembarque e trajeto. Além disto, na fase de montagem e manutenção destes módulos/compartimentos, podem ocorrer falhas humanas, devido manipulação de ferramentas, introdução de avarias, ou esquecimento de ferramentas no interior da blindada.

Por esses e outros motivos pesquisados e relatados em diversos países, faz-se necessária a realização de ensaios com alta tensão nas GIS, em campo, como forma de verificação da qualidade dos serviços, pois na existência de alguma das anormalidades mais comuns, citadas na Figura 2, a falha será detectada e corrigida sem danos adicionais. Se a GIS for energizada com falhas, sem a realização dos ensaios, os danos terão custos imprevisíveis, pois a mesma, durante a falha, estará sujeita à potência de curto-circuito do sistema elétrico, conectada a ela.

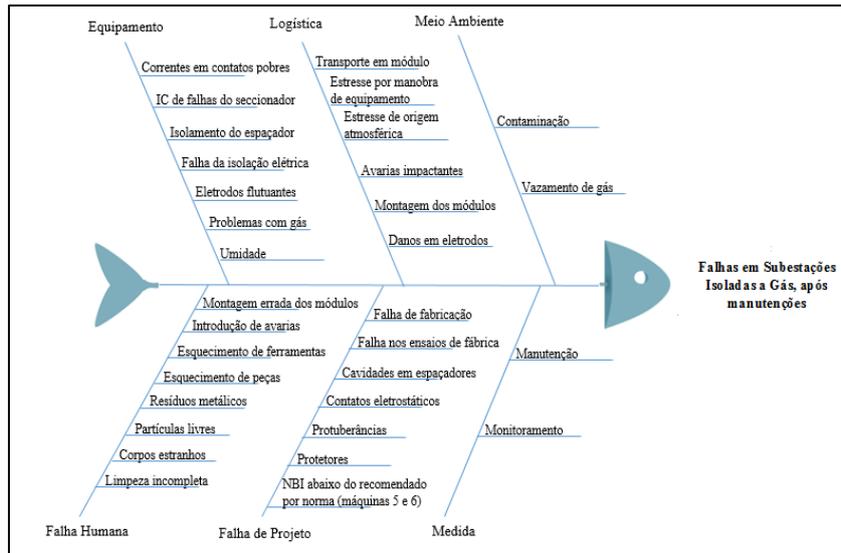


FIGURA 2 – Diagrama de Ishikawa para Falhas em GIS, Detectadas em Ensaaios.

Dentre tantas causas adversas que podem acometer os módulos e equipamentos de uma subestação isolada a gás, na Figura 3 estão ordenadas as principais falhas dielétricas, detectadas durante a realização de ensaios em campo, após pesquisas em diversos países. Os problemas estão priorizados de acordo com a ferramenta diagrama de Pareto, onde mostra que 80% das consequências advêm de 20% das causas.

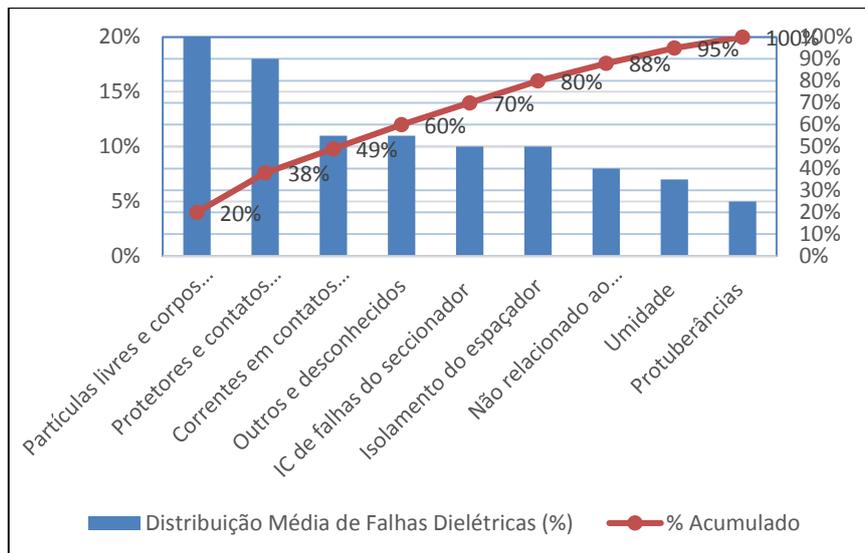


FIGURA 3 – Diagrama de Pareto para Falhas Detectadas em Ensaaios, Após Pesquisas (5).

3.0 - METODOLOGIA APLICADA

Para que algumas das falhas fossem melhor elucidadas, tomou-se como referência a realização dos ensaios de Tensão Aplicada à Frequência Industrial e de Medição de Descargas Parciais, na Subestação Blindada Isolada a Gás SF₆, configurada para a Unidade Geradora 06, na Usina Hidrelétrica de Tucuruí, ambos realizados pelas equipes: Centro de Tecnologia da Eletronorte (Lacen), manutenção elétrica da Eletronorte – OGH e empresa prestadora de serviço Insight, no mês de setembro de 2016.

3.1 Configuração da Subestação Isolada a Gás SF₆ Ensaída

A Figura 4 mostra a configuração da GIS da UGH 06 na UHE Tucuruí, onde os ensaios foram realizados. A área destacada em vermelho representa a parte ensaiada.

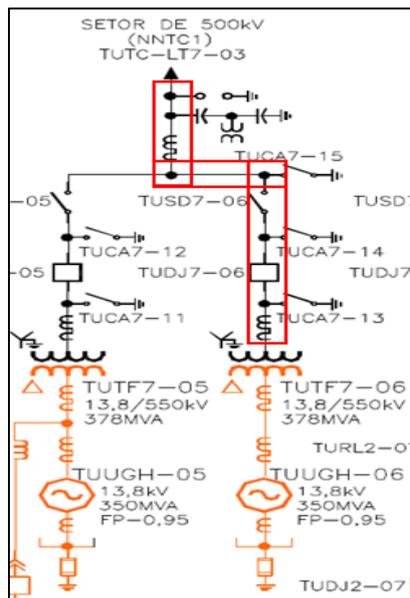


FIGURA 4 – Diagrama Unifilar da Subestação Isolada a Gás SF₆ da UGH 06 na UHE Tucuruí (6).

3.2 Circuito dos Ensaios

O circuito dos ensaios realizados, mostra que a capacitância equivalente do circuito é formada pela capacitância do divisor de tensão em paralelo com a capacitância do objeto sob ensaio, além das capacitâncias parasitas formadas entre partes energizadas e objetos metálicos em suas proximidades, conforme demonstrado na Figura 5 (6).

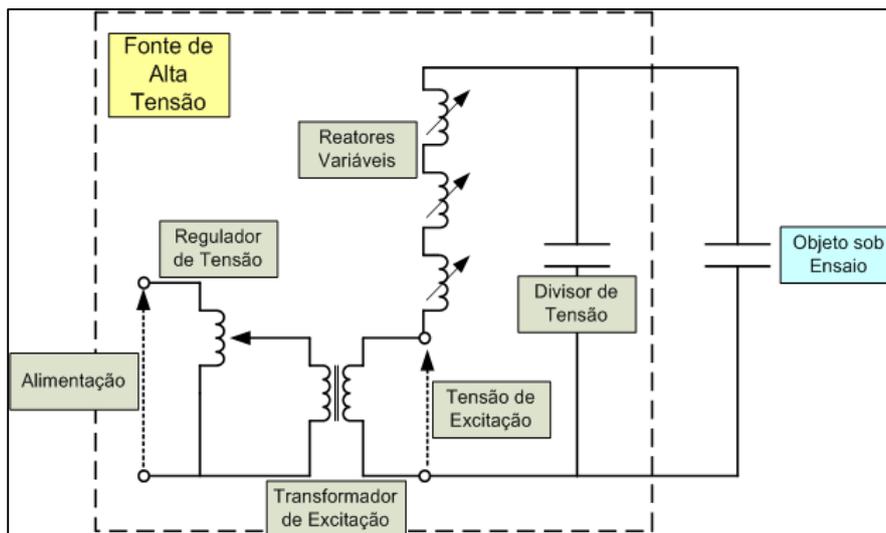


FIGURA 5 – Esquema do Circuito Elétrico do Arranjo dos Ensaios, Usando Fonte Série-Ressonante (7).

3.3 Composição da Fonte de Alta Tensão Série-Ressonante

A Fonte de Alta Tensão Série-Ressonante é constituída por: regulador de tensão, mesa de comando e controle, transformador de excitação, três módulos de reatores variáveis em série, divisor de tensão capacitivo, unidade secundária, multímetro digital e cabo coaxial, conforme esquema demonstrado na Figura 6.

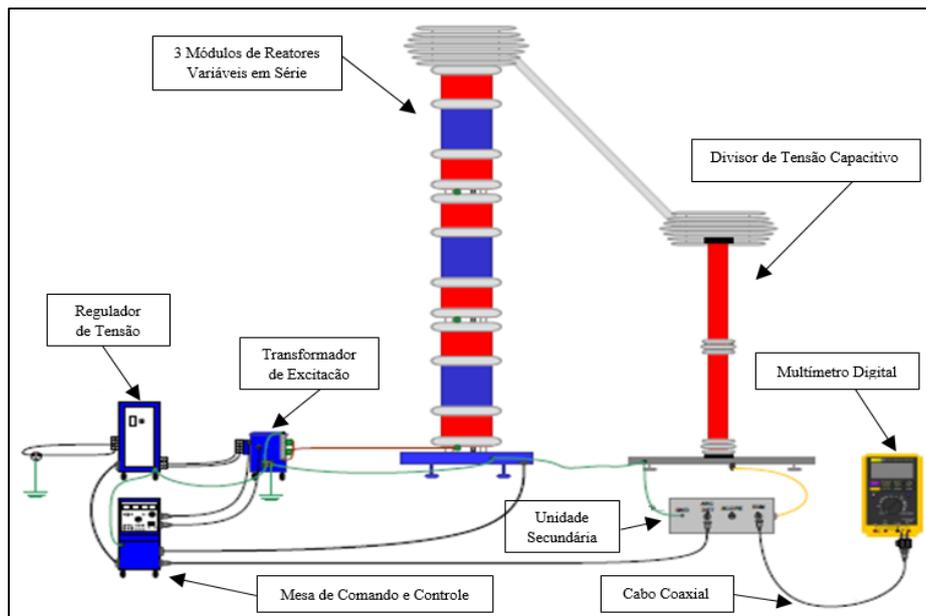


FIGURA 6 – Esquema dos Equipamentos da Fonte Série-Ressonante do Lacen, utilizada nos Ensaios (7).

3.4 Ensaios de Tensão Aplicada à Frequência Industrial

Neste tipo de ensaio, define-se, primeiramente, o valor de tensão que será aplicada na subestação blindada, conforme análise do manual do fabricante e da norma IEC 62271-203 (2003). Este ensaio é do tipo passa ou não passa, logo caso não haja descarga disruptiva, a GIS é considerada aprovada, caso contrário, existem duas possibilidades:

- Primeira opção: se uma descarga disruptiva ocorrer sobre a superfície de uma isolação sólida, sugere-se abrir o compartimento envolvido e inspecionar cuidadosamente a isolação, para detecção de anormalidades como perfuração ou trilhamento elétrico. Após a realização dos reparos e limpeza interna cuidadosa, a GIS deve ser submetida as mesmas condições de ensaio;
- Segunda opção: se uma descarga disruptiva ocorrer no gás, pode ser devido contaminação ou imperfeição da superfície, podendo ser eliminada pela descarga. Neste caso, o ensaio pode ser repetido com a tensão de ensaio especificada. Se houver outra descarga, adota-se a primeira opção.

3.5 Medição de Descargas Parciais

De um ponto de vista mais prático, as descargas parciais podem ser melhor observadas (por métodos de medição) quando o isolador (toda a parte interna dos compartimentos da GIS) estiver submetido a uma elevada tensão (estresse voltaico) e ocorrer uma mudança de configuração de campo elétrico de forma muito rápida. Para que tal atividade seja reconhecida como uma descarga parcial, ela deve ser suficientemente grande (intensa) de modo a ser detectada e ao mesmo tempo deve possuir uma taxa de repetição suficiente de modo a não ser confundida como um ruído aleatório qualquer (8).

A detecção de descargas parciais é uma técnica fundamental para avaliar o estado operativo de praticamente todos os sistemas isolantes utilizados em alta tensão, por ser um dos fenômenos que mais prematuramente consegue diagnosticar uma futura queda de suportabilidade elétrica dos materiais. Os pulsos das DP's em uma GIS geram pulsos de correntes com uma faixa de largura de nanossegundos. Estes pulsos desencadeiam emissões acústicas, emissões de alta-frequência (ou ultra-alta-freqüência), e quimicamente catalisam a quebra das moléculas do gás (8).

Algumas das causas mais comuns com consequências junto ao equipamento de alta tensão, são características destas fontes de descargas parciais: partículas livres (partículas condutoras livres ou partículas saltitantes), partículas flutuantes, elementos condutores nos isoladores (bolha de ar, graxa ou silicone), ou extremidade de uma protuberância.

Em subestações isoladas a gás, a medição de descargas parciais mais comumente utilizada é em Ultra Alta Frequência "Ultra High Frequency" (UHF). No caso da GIS da UGH 06 da Usina de Tucuruí, existem sensores UHF instalados, que possibilitam esta medição.

3.6 Procedimento de Ensaio

O ensaio de tensão aplicada à frequência industrial não substitui os ensaios realizados em fábrica (tipo e rotina), pelo contrário, complementa, pois verifica a integridade da subestação blindada isolada a gás SF₆ por completo, antes da energização.

Foram determinados, em reunião, os níveis de tensão aplicados no ensaio, de acordo com a norma IEC 62271-203 (2003) e manual do fabricante, onde o valor limite para aplicação de tensão suportável foi de 560 kV, devido ao valor de tensão nominal do equipamento ser 550 kV, conforme Figura 7.

62271-203 © IEC:2003 - 95 -

Table 107 – On site test voltages

Rated voltage for equipment U_r kV (r.m.s. value)	On-site short-duration power-frequency withstand voltage U_{ds} kV (r.m.s. value)	On-site switching impulse withstand voltage U_{ss} kV (peak value)	On-site lightning impulse withstand voltage U_{ps} kV (peak value)
(1)	(2) (see Note 1)	(3)	(4)
72,5	120	-	280
100	165	-	360
123	200	-	440
145	235	-	520
170	270	-	600
245	380	680	840
300	380	680	840
362	425	760	940
420	515	840	1 140
550	560	940	1 240
800	760	1140	1 680

NOTE 1 Values of column (2) are only applicable for SF₆ insulation or when SF₆ is a major part of the gas mixture. For other insulation refer to Tables 1 and 2 of IEC 60694, applying a factor 0.8 on column (2).

NOTE 2 The on-site test voltages have been calculated as follows:
 U_{ds} (on-site test value) = $U_p \times 0,45 \times 0,8$ (column 2)
 U_{ss} (on-site test value) = $U_s \times 0,8$ (column 3)
 U_{ps} (on-site test value) = $U_p \times 0,8$ (column 4)
 All values have been rounded up to the next higher modulus 5 kV.

NOTE 3 If other insulation levels than the preferred values of Tables 102 and 103 (e.g. the lower insulation levels of Tables 1 and 2 in IEC 60694) are specified, then the on-site test voltage should be calculated according to Note 2.

FIGURA 7 – Valor de Tensão Suportável Determinado pela Norma IEC 62271-203 (9).

Os procedimentos para a elaboração dos ensaios foram (vide esquema da Figura 8) (6):

- Elevação gradual da tensão até 318 kV e manter esse valor por cinco minutos;
- Elevação gradual da tensão de 318 kV para 476 kV e manter esse valor por três minutos;
- Elevação gradual da tensão de 476 kV para 560 kV e manter esse valor por um minuto;
- Redução gradual da tensão de 560 kV para 381 kV e manter esse valor para a medição de descargas parciais;
- Diminuição gradual da tensão de 381 kV a zero.

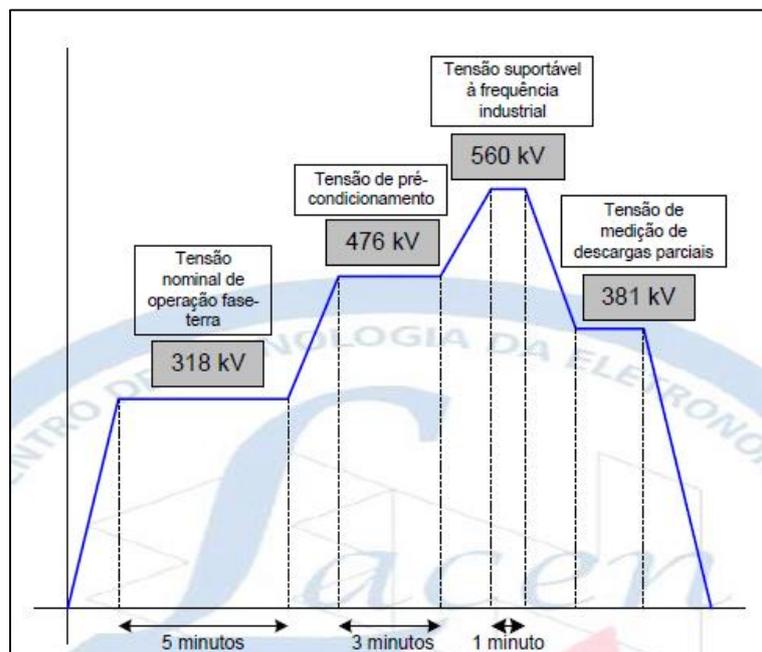


FIGURA 8 – Esquema para Definição dos Níveis de Tensão Usados no Ensaio de Tensão Suportável (6).

4.0 - RESULTADOS OBTIDOS

Elaborou-se um plano de ação, baseado na ferramenta 5W2H, para mostrar as atividades desempenhadas diariamente e as providências tomadas, para eliminação dos problemas, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Plano de Ação 5W2H para Demonstração dos Procedimentos nos Ensaios.

O quê?	Por quê?	Quem?	Quando?	Como?	Onde?	Quanto?
Definição do procedimento, para a realização dos ensaios	Realização prática dos ensaios	Lacen/Eletronorte/Insight	16/09/2016	Reunião	OGH (Tucuruí)	-
Tentativa de elevação de tensão até 560kV, porém, em aproximadamente 500kV ocorreu uma descarga (Fases A e B)	Descarga parcial	Cones da blindada localizados no fim do circuito interrompido (extremidades)	17/09/2016	Abertura e inspeção/Adaptação de esferas anti-corona	Compartimento M (link com o transformador)	-
Colocação do gás SF6 e acomodação do mesmo	Abertura de compartimento	Equipe manutenção OGH	19/09/2016	Abastecimento através dos cilindros de gás SF6	Compartimento M (link com o transformador)	-
Tentativa de elevação de tensão até 560kV, porém, em aproximadamente 555kV ocorreu uma descarga (Fases B e V)	Descarga parcial	Desconhecido	20/09/2016	Abertura e inspeção/Adaptação de esferas anti-corona	Compartimento R	-
Flajelamento nos pontos de aterramento	Descarga parcial	Desconhecido	20/09/2016	Melhoria nos aterramentos da blindada e circuito externo	Compartimento R	-
Colocação do gás SF6 e acomodação do mesmo	Abertura de compartimento	Equipe manutenção OGH	21/09/2016	Abastecimento através dos cilindros de gás SF6	Compartimento R (link com o transformador)	-
Elevação de tensão até 476kV, porém após 20 segundos ocorreu uma descarga (Fase A)	Descarga parcial	Desconhecido	22/09/2016	Abertura e inspeção/Adaptação de esferas anti-corona	Compartimento R	-
Ensaio final da Fase A	Conclusão dos ensaios	Lacen/Eletronorte/Insight	23/09/2016	Seguir cronograma determinado pelos níveis de tensão pré-estabelecidos	Blindada	-

Durante a aplicação dos níveis de tensão suportável no ensaio, houve ocorrência de descargas disruptivas, provocando trilhamento elétrico nas extremidades dos comportimentos M e R, devido a falha de projeto da blindada “protuberância de cerca de 1 cm”, conforme Figura 9. Tomou-se como solução, confeccionar esferas anti-corona (Figura 10), para adaptação nas extremidades dos cones dos compartimentos (Figura 11).

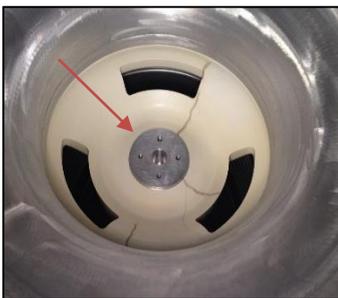


FIGURA 9 – Extremidade do Compartimento M, com Marcas de Descargas Parciais.

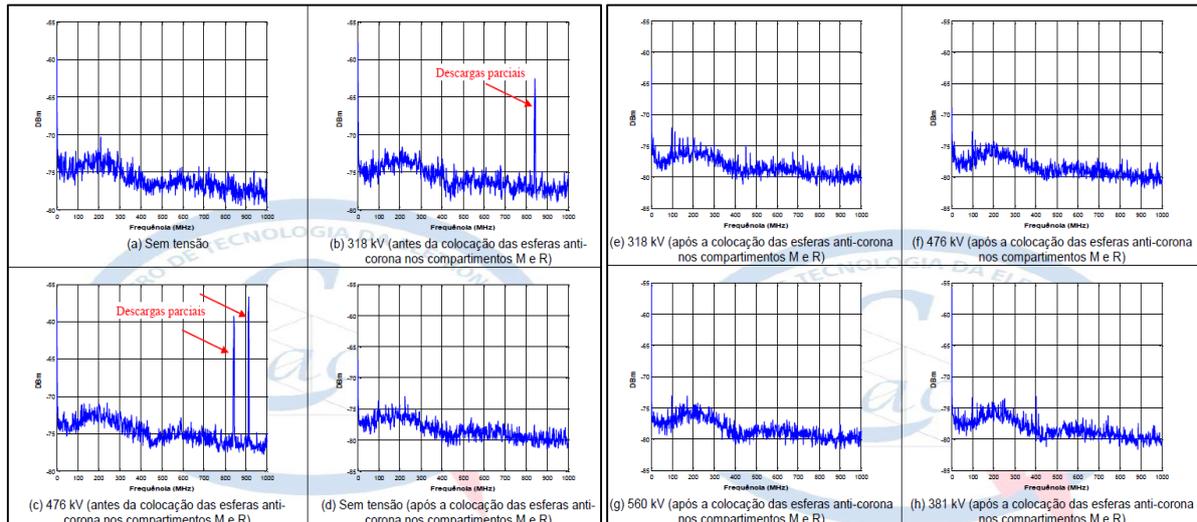


FIGURA 10 – Esfera Anti-Corona Confeccionada.



FIGURA 11 – Esfera Anti-Corona Adaptada ao Compartimento M.

Essas descargas foram detectadas durante as medições de descargas parciais, através do aparecimento dos sinais de alta frequência, no osciloscópio digital, operando na faixa até 1 GHz (vide Figuras 12, 13 e 14). O analisador de espectro, mediu os sinais oriundos dos sensores, durante os diferentes níveis de tensão, identificando a presença ou não de descargas parciais, porém não permitiu quantificar e nem qualificar (o tipo de descarga parcial detectada). Para isso seria necessária a utilização de um medidor de descargas parciais em UHF, que realiza a medição no domínio do tempo.



FIGURAS 12 E 13 – Medição de Descargas Parciais na Fase A – Após o Disjuntor (Compartmento R) (6).

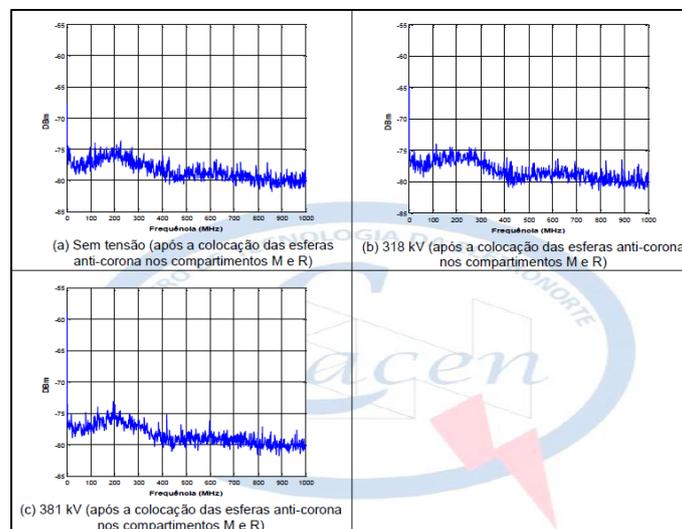


FIGURA 14 – Medição de Descargas Parciais na Fase A – Antes do Disjuntor (Compartmento M) (6).

5.0 - CONCLUSÃO

Após todas as modificações e adequações feitas durante os ensaios de tensão aplicada à frequência industrial e de medição de descargas parciais, a GIS da UGH 06 foi considerada apta a funcionar.

Em relação ao ensaio de tensão suportável, afirmou-se que as três fases da blindada (A, B e V) estavam dentro das condições normativa, pois suportaram a tensão de 560 kV, aplicada por um minuto, em cada uma delas. Sobre a medição de descargas parciais, nos primeiros ensaios realizados nas fases A e B, detectaram-se sinais de alta frequência, oriundos das descargas disruptivas, que foram corrigidas através das adaptações dos anéis anti-corona e melhoria nos aterramentos da blindada e do circuito externo do ensaio.

Pode-se citar também como melhoria, a monitoração da SE Isolada a Gás SF₆, para acompanhamento contínuo e garantia de maior confiabilidade do equipamento; diminuição nos intervalos de inspeção dos equipamentos e medição da qualidade do gás SF₆, para verificação precoce de problemas futuros; realizar medições de descargas parciais periodicamente, visto que a unidade dispõe de medidor fixo, porém estava inoperável, durante o ensaio.

Portanto, este trabalho foi realizado a fim de mostrar a necessidade em realizar ensaios de campo nas GIS e a importância em manter a monitoração constante, pois os prejuízos provocados pela parada de máquina e sinistros em equipamentos são imensos, por se tratarem de peças caras e que são fabricadas sob encomenda, requerendo muito tempo e gastos financeiros, que podem chegar na casa de milhões de reais.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) GIRARDI, M. D., “Análise do Desempenho dos Disjuntores de Alta Tensão Instalados na Subestação Isolada a Gás SF₆ da Usina Hidrelétrica de Itaipu”. Relatório de Estágio (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, 2013.
- (2) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 10019, “Subestação Blindada Isolada a Gás para Tensões Nominais Iguais ou Superiores a 72,5 kV”, São Paulo, 1987.
- (3) OGIBOSKI, LUCIANO, “Extensão de ciclo de vida de uma Subestação Isolada a Gás por meio de um sistema de monitoramento de tempo real”, São Paulo, 2013.
- (4) RELATÓRIO TÉCNICO ELETROBRAS ELETRONORTE, “Subestações Blindadas Isoladas a Gás SF₆ – Generalidades, Confiabilidade, Ensaios e Monitoramento”, Belém, 2008.
- (5) CIGRÉ 525 – Working Group D1.03, “Risk Assessment on Defects in GIS based on PD Diagnostics”, 2012.
- (6) RELATÓRIO TÉCNICO ELETROBRAS ELETRONORTE, “Relatório de Ensaio de Tensão Aplicada à Frequência Industrial e Medição de Descargas Parciais na Subestação Blindada Isolada a Gás SF₆ Configurada para a Unidade Geradora 06 da Usina Hidrelétrica de Tucuruí”, Belém, 2016.
- (7) TREINAMENTO ENSAIOS COM ALTA TENSÃO, “Avaliação Dielétrica de Equipamentos de Alta Tensão com Ênfase em Ensaios com Alta Tensão”, Belém, 2016.
- (8) PAULO, A.R.G.S., “Diagnóstico de Descargas Parciais em Subestações Isoladas a Gás SF₆ Utilizando Redes Neurais Artificiais”, Santa Catarina, 2006.
- (9) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC 62271-203, “High-voltage switchgear and controlgear – Part 203: Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV”, Genebra, 2003.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Aline Furtado de Souza, nascida em Tucuruí – PA, em 1987. Formanda em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Pará, na cidade de Tucuruí, Pará. Conquistou o primeiro lugar no programa Painel do Estagiário, da empresa Eletrobras Eletronorte, sobre o mesmo tema deste IT, em 2016. Atualmente, é estagiária na empresa Consórcio Construtor Belo Monte, em Altamira, Pará, acompanhando processos de montagem eletromecânico das máquinas, montagem elétrica dos painéis de baixa, média e alta tensão, cabeamento, transformadores elevadores, construção da subestação blindada (antes do trafo elevador) e subestação isolada a gás SF₆ (após trafo elevador), turbina, gerador, ensaios e comissionamento das máquinas.



Fernando de Souza Brasil, nascido em Belém – PA, em 1983. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2006), graduação em Licenciatura Plena em Matemática pela Universidade do Estado do Pará (2005), Especialização em Engenharia de Produção pela Universidade do Estado do Pará (2012), Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2013) e Doutorado em Engenharia Elétrica (2016). Atualmente é engenheiro de manutenção elétrica das Centrais Elétricas do Norte do Brasil - Eletrobras Eletronorte, atuando nas áreas de ensaios com alta tensão em equipamentos elétricos e monitoração e diagnóstico de transformadores e hidrogeradores.



Bárbara Medeiros Campos, nascida em Belém – PA, 1981. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará em 2003. Concluiu Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará em 2005. Atualmente trabalha como Engenheira de Manutenção Elétrica no Centro de Tecnologia da Eletrobras Eletronorte, atuando na área de Engenharia de Alta Tensão e Tecnologias de Transmissão em Corrente Contínua.