



**XXIII SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GSE/05
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – VIII

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

**ANÁLISE DO MECANISMO DE FALHAS PREMATURAS EM COMPONENTES DE DISJUNTORES
DE ALTA TENSÃO NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO**

**Gabriel Angelo de B. Vieira (*)
Leandro Lima
FURNAS**

**Mauro Barbosa Trindade
Helvio Jailson Azevedo Martins
CEPEL**

RESUMO

A ocorrência de falhas prematuras em componentes da parte ativa de um determinado modelo de disjuntor de alta tensão, fornecido por um tradicional fabricante europeu de disjuntores, levou à explosão dos mesmos, em um curto período após a entrada em operação, em empresas de energia elétrica no Brasil: ITAIPU BINACIONAL, FURNAS, CHESF e, no exterior. A existência de elevado risco operativo, ensejou a que essas empresas, com o apoio do CEPEL, iniciassem em conjunto uma detalhada análise das causas destas falhas, apresentadas neste trabalho, bem como a realização de ações corretivas com vistas à mitigação dos riscos de novas ocorrências.

PALAVRAS-CHAVE

Disjuntor de Alta Tensão, Mecanismo de Falha, Resistor de Pré-inserção, Ensaio M2, Falha prematura de disjuntor.

1.0 - INTRODUÇÃO

A existência de elevado risco operativo de um determinado modelo de disjuntor, ensejou a que essas empresas iniciassem uma detalhada análise das causas destas explosões e cobrassem do fabricante a realização de ações corretivas com vistas à mitigação dos riscos de novas ocorrências. Nesse período, buscou-se o esclarecimento de questões técnicas, tais como: Quais os principais componentes responsáveis pela ocorrência das explosões? Há correlação entre as mesmas ou foram provocadas por causas diferentes? Há erros de projeto, de aplicação de materiais, de realização inconsistente dos ensaios de tipo ou todas as situações simultaneamente? As normas internacionais aplicáveis a estes equipamentos nos ensaios de aceitação estariam compatíveis com as condições operativas a que os mesmos estão submetidos? Por que foram aprovados nos ensaios de aceitação? Quais as ações a serem tomadas de forma a mitigar a ocorrência de novas explosões? O fabricante tinha conhecimento de eventuais falhas de projeto ou fabricação?

2.0 - OCORRÊNCIA DE EXPLOSÃO DE DISJUNTOR NA SE SAMAMBAIA DO SISTEMA FURNAS

Em 29/06/2013, após comando de abertura do disjuntor 8048C, ocorreu a explosão da câmara principal A1 e respectiva câmara do resistor de pré-inserção com quebra da coluna suporte e danos generalizados a diversos equipamentos da subestação. Trata-se de um disjuntor da classe de tensão de 362kV, sem capacitor de equalização, e com 2 resistores de pré-inserção de 100 ohms por câmara, totalizando 200 ohms por fase.

Este disjuntor, responsável pela manobra do banco de capacitores shunt BC04 da SE Samambaia, uma das principais subestações de suprimento de energia ao Distrito Federal, foi comissionado em 07/05/2010 pelo fabricante e apresentava um número médio de 1 manobra/dia, totalizando 1.020 manobras, desde a entrada em operação até a explosão, não tendo atingido a periodicidade de manutenção preventiva desde o seu comissionamento.

(*) Rua Real Grandeza, 219, sala 705A, CEP 22.281-900, Rio de Janeiro – RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2528-3069 – Fax: (+55 21) 2528-3111 – Email: gavieira@furnas.com.br

A engenharia de manutenção de FURNAS iniciou o processo de análise da causa desta explosão e teve conhecimento do ocorrido de outras explosões, neste mesmo modelo de disjuntor, nas empresas ITAIPU BINACIONAL, em 2009, e em uma empresa de energia elétrica no México, em 2013. Decorridos alguns meses da explosão do disjuntor em FURNAS, ocorreu nova explosão deste mesmo modelo de disjuntor na empresa CHESF, em 2014. Foi iniciado então um trabalho conjunto entre as empresas FURNAS, ITAIPU BINACIONAL, CHESF, com o apoio do CEPEL para a verificação de um possível modo de falha comum a todas as ocorrências e que pudesse estar ligado a falhas de projeto ou fabricação deste modelo de disjuntor, ampliando os riscos operativos em todo o sistema elétrico que este mesmo modelo de disjuntor estivesse operando.

2.1 Características do Modelo de Disjuntor Sinistrado (ver Figura 1)



Tensão nominal: 362 kV
 Corrente nominal: 5000 A
 Capacidade de interrupção simétrica: 50 kA
 Resistores de pré-inserção: 200 ohms/fase
 Acionamento a mola

Figura 1 – Disjuntor de 362 kV – Comando a mola – Meio de extinção do arco a SF6

2.2 Danos Ocorridos

A explosão da câmara principal da fase A e sua câmara auxiliar (ver Figura 2) provocou a quebra da coluna suporte do mesmo polo e rompimento da haste principal de acionamento. Ocorreram danos generalizados ao mecanismo de acionamento desta fase, quebra de saias isoladoras de vários equipamentos no entorno do disjuntor e danos severos à porcelana das câmaras do disjuntor DJ 8058C, instalado ao lado.



Figura 2 - Câmara da fase A explodida e câmara adjacente da mesma fase.

Observação: Contata-se a gravidade da situação, na qual foram projetados pedaços de porcelana a mais de 150 metros do equipamento, denotando o elevado risco também para as equipes técnicas.

2.1. Análise da causa de falha

Em visita à SE Samambaia, foram realizadas a análise e os ensaios dos componentes falhados com o objetivo de determinarem-se as causas da explosão, tendo sido constatado os seguintes fatos:

2.1.1. Os parafusos de fixação do suporte do contato fixo encontravam-se soltos por arrancamento como consequência da queda da câmara (ver Figura 3).

2.1.2. O mangote de acoplamento do eixo de acionamento do contato auxiliar da câmara RA1 foi quebrado também por consequência da queda da câmara. Não foi observado desgaste do recartilamento destes mangotes de acoplamento nas duas câmaras auxiliares, nem dos respectivos eixos de acionamento, que indicassem falha na transmissão do movimento de rotação entre a biela do cárter e o sistema de acionamento da câmara auxiliar (ver Figura 4).



Figura 3 – Parafusos de fixação do suporte do contato fixo soltos.



Figura 4 – Mangote de acoplamento do eixo de acionamento do contato auxiliar, da câmara RA1 quebrado.

2.1.3. Foi realizada a desmontagem da câmara principal e auxiliar adjacente à câmara explodida, tendo sido encontradas as seguintes evidências:

2.1.3.1. Câmara de resistor auxiliar completamente destruída internamente e contato auxiliar com marcas de arco (ver Figuras 5 e 6).



Figura 5 – Resistor de pré-inserção



Figura 6 - Contato auxiliar adjacente

2.1.3.2. Foi realizada a medição da qualidade do gás SF₆ em todas as câmaras remanescentes do disjuntor não tendo sido encontrado anormalidades, tanto quanto aos valores de umidade, bem com a não presença de SF₂ oriundo de degradação do gás.

2.1.3.3. Foi verificada a condição operativa dos circuitos elétricos, não tendo sido encontrada anormalidades relacionadas diretamente à explosão do disjuntor.

2.2. Hipóteses preliminares apontadas por FURNAS como causadoras da explosão do disjuntor:

Com base na análise em campo das condições operativas do disjuntor antes da falha e dos diversos componentes danificados nos sistemas de acionamento dos contatos principais e auxiliares e, das câmaras explodidas, dois modos de falha principais foram identificados:

Modo de falha 1 - Explosão da câmara auxiliar (resistor de pré-inserção) provocada pela quebra da haste isolante de acionamento do contato auxiliar da câmara RA1, devido a possível deficiência de projeto do sistema de pré-inserção de resistências;

Modo de falha 2 - Explosão da câmara auxiliar (resistor de pré-inserção) provocada pela quebra da haste de aço, suporte do contato amortecedor da câmara RA1 por fadiga, após 1020 manobras do disjuntor.

3.0 - REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DOS COMPONENTES SINISTRADOS NO CEPEL

O Laboratório de Diagnósticos do CEPEL – Labdig/DLE, em conjunto com o Laboratório de Metalografia - MA3/DLF, participou da análise destas ocorrências, com vistas à identificação das causas das explosões nos disjuntores que explodiram em FURNAS e na CHESF.

Para o trabalho, FURNAS disponibilizou ao CEPEL componentes da fase A, explodida, e o polo da fase C deste mesmo disjuntor, no qual, quando da inspeção realizada em campo, foram identificados componentes do acionamento desta câmara, quebrados.

3.1. Atividades desenvolvidas

Diversas atividades de pesquisa das causas de falhas foram desenvolvidas, tais como: (a) Componentes das câmaras de resistores de pré-inserção dos disjuntores explodidos foram submetidos a exames visuais, mecânicos e metalográficos; (b) análises quanto ao modo de operação dos disjuntores e quanto aos materiais empregados na fabricação de seus componentes; (c) Participação dos representantes das empresas e do fabricante durante a desmontagem e inspeção das câmaras no CEPEL em 24 e 25/10/2013.

3.2. Material examinado no laboratório do CEPEL

a) Contato fixo (conjunto) e contato móvel (apenas a haste metálica) da câmara auxiliar do disjuntor explodido; b) Contato fixo (conjunto) da câmara auxiliar; c) Foram recebidos também, para exames comparativos, os componentes do disjuntor da fase C: c1) câmaras auxiliares; c2) câmaras principais; c3) suporte das câmaras; c4) mecanismo de acionamento; c5) base do disjuntor.

Adicionalmente, FURNAS forneceu ao CEPEL para ensaios comparativos, uma amostra representativa do engastamento e do material, em uso, nas hastes de fibra isolante dos contatos móveis das câmaras auxiliares, e outra com as alterações de projeto introduzidas pelo fabricante.

3.3. Ensaio realizado no laboratório do CEPEL

O CEPEL realizou os seguintes ensaios: a) nas hastes dos contatos fixos das quatro câmaras: análise química, inspeção visual, análise metalográfica e medições de dureza; b) na haste rompida, componente do contato fixo da câmara auxiliar: análise metalográfica; c) nas amostras dos materiais das hastes de fibra do contato móvel, em uso e nova: ensaios de compressão e flexão; d) análise de danos superficiais e ensaios de compressão e flexão, realizados em corpos de prova retirados das hastes de fibra isolantes que foram encontradas quebradas em seus engastamentos nas respectivas partes metálicas, durante a desmontagem das câmaras de resistores de pré-inserção.

3.4. Resultados preliminares dos ensaios no CEPEL

- a) As hastes de aço dos contatos fixos das quatro câmaras foram confeccionadas a partir de materiais com a mesma composição química, correspondente ao aço AISI 4130;
- b) As hastes de aço das câmaras auxiliares, componentes do disjuntor 8048C, da fase A, onde ocorreu a falha, apresentavam microestrutura acicular, constituída de bainita, diferentemente das hastes das câmaras auxiliares, do disjuntor da fase C, cujas microestruturas eram constituídas de ferrita e perlita. Esta constatação revela que, apesar de terem sido fabricadas a partir de materiais com a mesma composição química, estas haviam sido submetidas a tratamentos térmicos diferentes;
- c) As hastes de aço das câmaras auxiliares apresentaram valores de dureza, na região central, superiores aos observados nas hastes das câmaras auxiliares, evidenciando a diferença de tratamento térmico entre os materiais empregados. Já, na superfície das hastes, os valores obtidos foram equivalentes, resultantes de tratamento de endurecimento superficial;
- d) Foi observada a presença de trincas superficiais na haste de aço da câmara auxiliar. O mesmo não ocorreu nas demais hastes;
- e) A análise metalográfica revelou que a fratura da haste de aço do contato fixo da câmara auxiliar, se deu por clivagem, ou seja, sem deformação plástica;
- f) Associada à fratura por clivagem, desta haste, foram observadas indicações da ocorrência de fadiga de baixo ciclo;

- g) A ausência de “marcas de praia” na superfície de fratura, características de fratura por fadiga de alto ciclo, é comum em fraturas frágeis de materiais duros, com grãos finos, como é o caso do empregado na confecção da haste da câmara auxiliar. Além disso, a quantidade de manobras, 1.020, a que foi submetida a haste, antes de romper, foi muito baixa, comparada à que foi projetada para suportar, 10.000.

4.0 - RESULTADOS DA CONFIRMAÇÃO DOS MODOS DE FALHA LEVANTADOS POR FURNAS

Durante a visita técnica do fabricante ao laboratório do CEPEL, após tomar conhecimento de todas as ações realizadas até aquele momento para o esclarecimento da causa raiz das explosões dos disjuntores, este informou aos representantes das empresas presentes (FURNAS, ITAIPU BINACIONAL, CHESF e CEPEL) ter conhecimento (não divulgado até a presente data) da existência de falhas de projeto no sistema de fixação das extremidades da haste de fibra isolante, responsável pelo acionamento do contato móvel do resistor de pré-inserção montados na câmara auxiliar do disjuntor e, inclusive já haver realizado modificações no projeto destas hastes para os disjuntores deste modelo fornecidos a partir de 2009, confirmando o “Modo de falha 1”, apontado por FURNAS.

Quanto ao “Modo de falha 2”, apontado por FURNAS, (quebra da haste de aço, suporte do contato fixo), o CEPEL confirma no item 3.4, que existe a probabilidade de ocorrência deste modo de falha.

5.0 - POSIÇÃO DO FABRICANTE QUANTO À CAUSA RAIZ DAS EXPLOSÕES DOS DISJUNTORES

O fabricante aponta em seu relatório “Report nº BT 13-046” como causa raiz para a ocorrência das diversas explosões deste modelo de disjuntor a quebra desta haste isolante de acionamento do contato móvel do resistor de pré-inserção. Informa também no mesmo relatório que a haste isolante foi submetida ao ensaio mecânico tipo M1 (2000 operações) e foi aprovada, mas durante o ensaio mecânico M2 (10000 operações) houve falhas na haste.

Observação: Devido gravidade da questão, principalmente no tocante à segurança de pessoas, equipamentos e sistema, os representantes das empresas se indignaram em relação a postura do fabricante em não informar a todos os clientes envolvidos sobre a necessidade eminente de realização de um recall nas câmaras dos disjuntores em operação.

5.1 Modificações realizadas pelo fabricante no projeto das hastes isolantes de acionamento dos contatos auxiliares:

O novo design (nova versão) da haste de operação isolante para o resistor está informado pelo fabricante em seu relatório “Report nº BT 13-046”. A nova haste foi submetida a dois ensaios mecânicos, em 2012, sendo que no primeiro ensaio, a haste isolante teve um bom desempenho, mas durante o segundo ensaio, a haste falhou após 9.600 operações. Após este segundo ensaio, a rosca do topo da haste isolante foi revisada para melhorar seu desempenho. O ensaio final foi realizado em abril/maio de 2013 com a última revisão da haste isolante. Este ensaio teve seus resultados documentados a cada 2000 operações e desempenho satisfatório.

6.0 - ENSAIO TIPO M2 PARA VALIDAÇÃO DA NOVA HASTE ISOLANTE DE ACIONAMENTO DO RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO

Após a realização de uma reunião entre a ABRATE e o Fabricante, onde foram apresentados os diversos modos de falha deste modelo de disjuntor, relatado pelas empresas associadas à ABRATE, bem como discutida as possíveis soluções para estes problemas, o Fabricante convidou alguns clientes para presenciar a realização dos ensaios de 10.000 operações, conforme a Norma IEC 62271-100, em sua fábrica na Europa.

6.1 Objetivo do ensaio

O ensaio de 10.000 operações é realizado de acordo com a citada norma, para garantir a performance do modelo do equipamento quanto a sua suportabilidade mecânica ao longo de sua vida útil. Os critérios de aceitação estão descritos na norma supracitada. O mesmo foi necessário devido às modificações no projeto realizadas pelo fabricante, principalmente no que tange às alterações dos: material, processo fabril da haste de acionamento do resistores de pré-inserção e design do engaste desta haste à parte metálica do acionamento.

6.2 Condição de realização do ensaio

O ensaio foi realizado em apenas um polo deste modelo de disjuntor e a escolha dos componentes, bem como a montagem do teste, foi de responsabilidade do Fabricante, sem intervenção dos clientes. O laboratório do Fabricante é certificado pela Scandinavian Association for Testing of Electric Power Equipamento – SATS, uma empresa associada a fabricantes e laboratórios de testes independentes na Suécia, Noruega e Finlândia. O inspetor esteve presente no início do ensaio.

FURNAS acompanhou toda a realização do ensaio, entretanto, algumas empresas estiveram presentes no início e/ou fim.

6.3 Problemas ocorridos com o disjuntor durante a realização do ensaio tipo M2

a) operação 2819: desgaste excessivo na escova de um dos motores de carregamento das molas de acionamento do disjuntor, ocasionando inclusive, a queima do comutador. Em função do ocorrido, o ensaio M2 segundo a Norma IEC 62271 não é mais válido, devido à intervenção no disjuntor em teste para substituição dos motores;

b) operação 3235: ocorreu um desvio no valor medido de aceleração do sistema de acionamento, corrigido através da nova parametrização do software de medição pelo Fabricante;

c) operação 3725: a porcelana de uma das câmaras principais quebrou, deslocando o corpo da porcelana de uma das cabeças de extinção de arco do disjuntor para frente. O resistor de pré-inserção desta câmara também sofreu esforços em seu suporte de sustentação do mesmo ao cárter, deslocando-se, em aproximadamente, 20 (vinte) graus em relação ao seu eixo normal.

d) operação 6232: constatado novamente o desgaste excessivo das escovas do motor de acionamento. O Fabricante optou por substituir completamente o sistema de carregamento das molas, para que não houvesse nova ocorrência até a finalização do ensaio.

e) operação 6232: constatado que um dos pinos elásticos de bloqueio do gatilho intermediário se encontrava quebrado, no fundo do cubículo de acionamento. O Fabricante substituiu os pinos (quebrado e são) para a finalização do ensaio. A análise da causa desta falha, também foi realizada por FURNAS.

Apesar de todos os principais defeitos e falhas listados acima, como os resistores de pré-inserção se encontravam intactos, sem danos ou intervenção, as empresas presentes e o Fabricante acordaram dar continuidade até o fim do ensaio, para observar a performance da haste de acionamento dos resistores, causa primária das explosões de disjuntores. É importante salientar que o Fabricante substituiu vários componentes do disjuntor, exceto, o sistema de acionamento, os capacitores de equalização, os resistores de pré-inserção e os anéis anti-coronas durante este ensaio.

7.0 - CONCLUSÕES FINAIS

- Quanto ao resultado das análises das causas das explosões, identificaram-se falhas de projeto e de especificação de materiais empregados nas hastes isolantes de acionamento dos contatos auxiliares dos resistores de pré-inserção.
- Entre as principais ações tomadas pelo fabricante, o mesmo realizou alteração de projeto e reespecificou os materiais empregados nestas hastes. Após estas modificações, o fabricante convidou as empresas envolvidas para acompanharem a realização de ensaio de 10.000 operações (M2), em sua fábrica na Europa, deste novo projeto de câmara auxiliar de pré-inserção, onde durante a realização do mesmo, novos modos de falha foram identificados, inclusive ocorrência de falhas no mecanismo de acionamento do disjuntor sob ensaio.
- O disjuntor ensaiado não foi aprovado neste ensaio de tipo M2 conforme a Norma IEC 62271-100, porém o novo projeto de acionamento dos contatos da câmara dos resistores auxiliares atendeu às expectativas das empresas.
- Em novas aquisições, para este tipo de disjuntor, as empresas devem exigir a realização de novo ensaio de tipo M2 mesmo que o Fabricante apresente certificados de ensaios anteriores.
- Ficou constatada a necessidade de que todo ensaio mecânico M2 (10.000 operações), para qualquer tipo de equipamento, deverá ser acompanhado durante todo o período pelo cliente, visto a importância e frequência das falhas que ocorrem durante este tipo de ensaio, sem o que, não seriam evidenciadas.
- Como documentação comprobatória dos ensaios M2, os fabricantes deverão fornecer, juntamente com o certificado de ensaio, o log de todos os eventos (manobras) do ensaio produzido pelo sistema automático de monitoramento do ensaio, com as respectivas datas e horas, bem como as ocorrências e justificativas de todas as eventuais paralisações.
- O fabricante deverá fornecer relatório fotográfico do ensaio, registrando todas as ocorrências durante o mesmo.
- As empresas envolvidas participaram ativamente deste processo de validação das modificações realizadas no projeto das câmaras auxiliares, informando, baseadas em suas experiências, sobre solicitações especiais a que estes componentes poderiam vir a estar submetidos em campo.

- Quanto aos reais motivos para a omissão por parte do Fabricante dos disjuntores, em informar a tempo quanto à identificação pelo mesmo de eventuais falhas de projeto ou fabricação de componentes que já se encontram em operação nas respectivas empresas de energia, é uma questão que permanecerá em aberto.
- Atualmente, o novo projeto da haste isolante de acionamento dos resistores de pré-inserção é confiável para FURNAS e, as empresas associadas a ABRATE têm realizado acompanhamento semestral junto ao Fabricante em relação a todo e qualquer tipo de problema existente nos equipamentos em operação, inclusive demais modelos de disjuntores.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RICHERSON, David W. Modern ceramic engineering: properties, processing, and use in design. 2.ed. New York: M. Dekker, 1992. 860p.
- [2] General Electric Company. Locke Insulator Catalog and Engineering Handbook No. 55. 1955
- [3] LIEBERMANN, J. S. Bauxite Porcelain: A New High-Tech Product For High-Voltage Insulation, American Ceramic Society Bulletin, Vol. 812, n.2. p.33-38, 2002.
- [4] BRAGANÇA, S. R.; BERGMANN, C. P. Aspectos teóricos e práticos sobre a resistência mecânica de porcelanas. Cerâmica. v.50, p.145-155, 2004.
- [5] ASTM E384-05a, "Standard Test Methods for Microindentation Hardness of Materials", 2006.
- [6] ASTM D790-03, "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials", 2006.
- [7] ASTM D695-02a, "Standard Test Methods for Compressive Properties of Rigid Plastics", 2006.
- [8] ASM Handbook, Volume 1, "Properties and Selection: Irons and Steels", 1978.
- [9] ASM Handbook, Volume 7, "Atlas of Microstructures of industrial Alloys", 1978.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



- **Nome:** *Gabriel Ângelo de Barros Vieira*
- **Nascimento:** 28/02/1964 - Rio Preto, MG
- **Nacionalidade:** Brasileira
- **Formação Universitária - Graduação 1987** - Curso de Engenharia Elétrica, Ênfase em Eletrotécnica, Escola de Engenharia Veiga de Almeida, Rio de Janeiro; **1988** - Complementação da Ênfase de Engenharia Elétrica em Sistemas de Potência.
- **Pós- Graduação - 2006** - Mestrado em Processos Tecnológicos – CENTRO FEDERAL CELSO SUCKOW DA FONSECA - Conclusão Out./2008
- **Lato sensu 2011** – **CEMSE** - Curso de Especialização em Manutenção de Sistemas Elétricos – Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI; **2013** – Curso de Docência no Ensino Fundamental e Médio – UNIVERSIDADE CANDIDO MENDES – AVM