XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO -VIII

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

MANOBRA CONTROLADA DE REATORES DE POTÊNCIA: ABORDAGEM TEÓRICA COM PROBLEMAS E SOLUÇÕES PRÁTICAS DA CEMIG

Laís Araujo Falcão de Oliveira
CEMIG GT

Luiz Henrique S. Duarte*
CEMIG GT

Marconis dos Santos Novais
CEMIG D

RESUMO

A manobra controlada de reatores de potência envolve conceitos clássicos, porém difíceis de serem aferidos na prática. O conhecimento dos fenômenos e dos limites da tecnologia atual representa vantagens competitivas para os agentes de transmissão. A estratégia para uma solução efetiva deve ser considerada desde a especificação até o comissionamento dos disjuntores, dispositivos de manobra controlada e reatores. A adoção de critérios inadequados pode implicar redução dos ganhos potenciais ou até o comprometimento da disponibilidade e vida útil dos equipamentos em questão. Este artigo propõe discutir esse contexto com exemplos práticos de problemas e soluções.

1.0 - INTRODUÇÃO

A instalação de reatores de potência fixos, associados a linhas de transmissão, ocorre há várias décadas no Brasil. Entretanto, nas duas últimas décadas, a demanda por reatores passíveis de manobra aumentou consideravelmente, inclusive com a instalação de disjuntores para reatores já existentes. Essa demanda coincide com a maior disponibilidade de disjuntores dotados de dispositivos de manobra controlada.

Para a devida aplicação dessa tecnologia, faz-se necessária a compreensão dos conceitos em torno da manobra de pequenas correntes indutivas, das sobretensões associadas e dos conseqüentes estresses impostos ao disjuntor e aos reatores de potência. Portanto, esses aspectos devem ser considerados, particularmente, na especificação dos reatores, podendo, no caso de reatores ou disjuntores existentes, até inviabilizar a adoção da manobra pretendida.

Por um lado, não se pode abrir mão das vantagens advindas da aplicação dessa tecnologia, por exemplo, a contribuição para uma vida útil operativa adequada aos investimentos correspondentes. Por outro lado, uma aplicação inadequada pode produzir efeito contrário. Isso dependerá da especificação do conjunto disjuntor - dispositivo de manobra controlada – reator – projeto da subestação.

Para a validação da aplicação, faz-se imprescindível a realização de ensaios de campo devidamente especificados e supervisionados, tendo em vista a baixa representatividade dos ensaios previstos em normas para essa manobra.

Propõem-se então, avaliar esses vários aspectos de maneira didática, ilustrando-os através de aplicações reais. Citam-se os seguintes itens de discussão, dentre outros: adequação mecânica e elétrica do disjuntor, adequação mecânica e elétrica dos reatores de potência, variáveis monitoradas durante os ensaios de fábrica, de campo e a vida operativa, requisitos dos dispositivos de manobra controlada, ajustes da abertura e/ou fechamento controlado, filosofia de atuação da proteção da subestação, etc.

São abordadas várias instalações com quatro tipos de disjuntores e dispositivos de manobra controlada diferentes, possibilitando-se uma análise comparativa. Algumas falhas durante os ensaios de campo, solucionadas através de novos ajustes ou até através do reparo ou substituição dos disjuntores serão apresentadas e discutidas.

As análises dos casos práticos são confrontadas com os cálculos e simulações digitais, sendo os eventuais desvios justificados. Existem casos de falhas (reignições) motivadas pelas características

(*) Rua Sandoval Campos, 123, Álvaro Camargos – CEP 30860-100 Belo Horizonte, MG - Brasil
Tel: (+55 31) 34167334 – Cel: (+55 31) 88157384 – Email: lhduarte@cemig.com.br

mecânicas e/ou elétricas do disjuntor, bem como maiores severidades decorrentes das características da instalação. Ilustrações e formas de ondas oscilografadas e calculadas facilitarão essa análise. Algumas falhas puderam ser evidenciadas inclusive pela atuação dos contadores de operação dos pára-raios associados, bem como algumas operações desses contadores não puderam ser associadas a tais falhas. Portanto, ainda existem fenômenos que requerem maior compreensão. Ainda, será relatada uma experiência onde o fechamento controlado tornou-se imprescindível para a operação.

Deve-se destacar um caso particular de alteração de desempenho da manobra controlada durante a vida operativa dos equipamentos, o que pôde ser monitorado através de oscilógrafo (RDP) permanente, devidamente configurado na subestação. Aliás, esses registros associados a ensaios simplificados sem tensão, têm sido utilizados como alternativa para o comissionamento de algumas instalações. O critério para a aceitação e eficácia desse ensaio de campo alternativo será discutido nesse artigo.

As grandes contribuições do artigo proposto estão na abordagem didática da manobra controlada de reatores de potência, na aplicação e interpretação pormenorizada da norma IEC 62271-110 – *High-voltage switchgear and controlgear - Part 110: Inductive load switching*, e nos relatos de diversas experiências com sugestões valiosas para futuras especificações e aplicações.a.

2.0 - MANOBRA CONTROLADA DE REATORES DE POTÊNCIA – ABORDAGEM TEÓRICA

2.1 Tipos de reatores quanto ao regime de manobra:

a) Operação fixa – são manobrados com linhas de transmissão e têm a finalidade de controlar a tensão do sistema no regime permanente e do fluxo de potência, e ainda, de reduzir as sobretensões nos dos surtos de manobra.
b) Manobráveis – são manobrados apenas os reatores e com isso há maior flexibilidade no controle das tensões e do fluxo de potência, podendo ainda serem manobrados com as linhas.

2.2 Abertura Controlada

O problema típico do chaveamento de pequena corrente indutiva é a formação de sobretensão de manobra causada pela interrupção prematura dessa corrente, ou seja, antes de sua passagem pelo zero. Este fenômeno é conhecido como “current chopping” e o valor das sobretensões geradas dependem das características do disjuntor e do reator de potência (Figura 1).

Os valores das magnitudes destas sobretensões não são necessariamente severos, tipicamente menores que (1,4 ou 1,6 pu). Contudo, as sobretensões de manobra podem atingir níveis mais elevados, podendo chegar até 2,5 pu, com taxa de crescimento entre a de impulso atmosférico e a de transitórios rápidos, caso ocorra reignição.

As reignições ocorrem, em geral, no início do processo de interrupção, quando a separação entre os contatos do disjuntor não é ainda suficiente para suportar a tensão de restabelecimento transitória, ou seja, quando o tempo de arco é curto. As reignições provocam oscilações de corrente e tensão de diversas freqüências (tipicamente na ordem de centenas de kHz).

Desta forma, o crítico na interrupção de pequena corrente indutiva é a ocorrência de reignições (Figura 2). A taxa de crescimento de tensão (du/dt), gerada pelas reignições, são distribuídas de forma desigual ao longo do enrolamento do reator, podendo afetar o isolamento entre espiras.

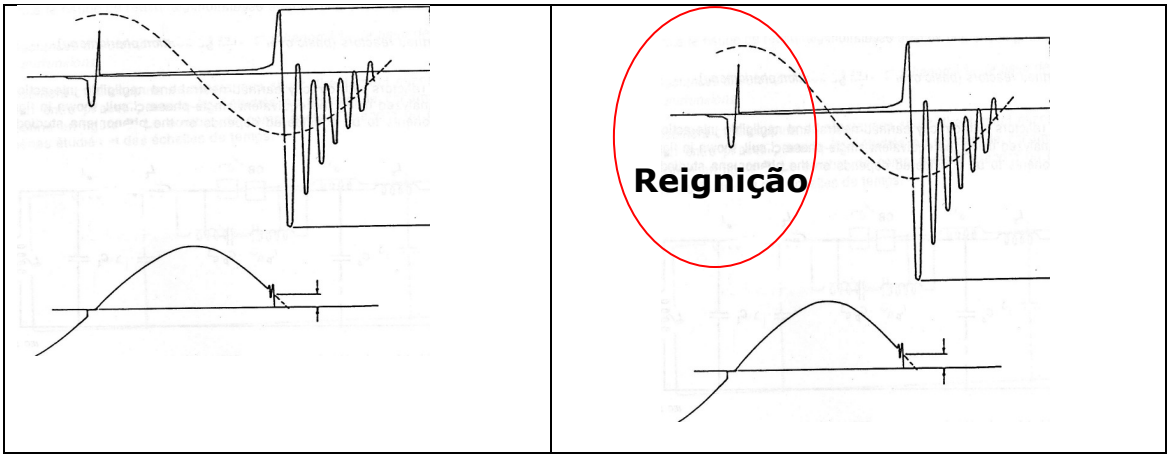

Figura 1 – Corte prematura da corrente e tensão de corte *(chopping current and voltage)*	Figura 2 – Exemplo de reignição em manobra de reatores de potência

A abertura não controlada irá causar, em geral, reignição em no mínimo um dos pólos do disjuntor. O principal objetivo, portanto, da abertura controlada é reduzir ao máximo a possibilidade de ocorrência de reignições. Isso pode ser alcançado estabelecendo-se um tempo de arco de tal forma que seja garantida uma distância mínima de segurança entre os contatos do disjuntor. No entanto, o tempo de arco ajustado, além de ser grande o suficiente para evitar reignições, deve ser também o menor possível para minimizar os níveis de "chopping". Isso porque a sobretensão gerada pela interrupção da corrente de reator antes de sua passagem pelo zero cresce com o aumento do tempo de arco.

O ajuste ótimo para manobras controladas de abertura é função das características de interrupção e repetibilidade do disjuntor, bem como da dispersão dos tempos de abertura. A precisão nos tempos de dispersão dos disjuntores sugerida é de ±1ms a ±2ms, limitando as sobretensões.

2.3 Fechamento Controlado

A energização de reatores, dependendo do instante de fechamento e características dos reatores, apresentam elevados níveis de corrente transitória de alta assimetria (correntes de inrush), com forte presença de componente contínua e constante de tempo elevada, que são funções dependentes da faixa de linearidade do núcleo.

As correntes de inrush provocam efeitos adversos ao equipamento e ao sistema, mesmo os efeitos de saturação não sendo tão severos para o caso de reatores de potência em função dos entreferros nos seus núcleos. As principais conseqüências destas correntes são: danos aos enrolamentos dos reatores por estresses eletromagnéticos aculmulativos, vibrações e atuação indevida da proteção devido às componentes de seqüência zero e saturação do núcleo dos transformadores de corrente.

Estes transitórios de corrente podem ser evitados se o fechamento for estabelecido no pico de tensão. No entanto, quando o instante de estabelecimento ocorre neste instante, tem-se uma solicitação severa imposta aos enrolamentos do equipamento com magnitude significativa e taxas de crescimento muito elevadas, similar a uma reignição na crista da onda da tensão. A Figura 1 apresenta uma forma de onda como exemplo das sobretensões impostas aos reatores de potência durante a energização.

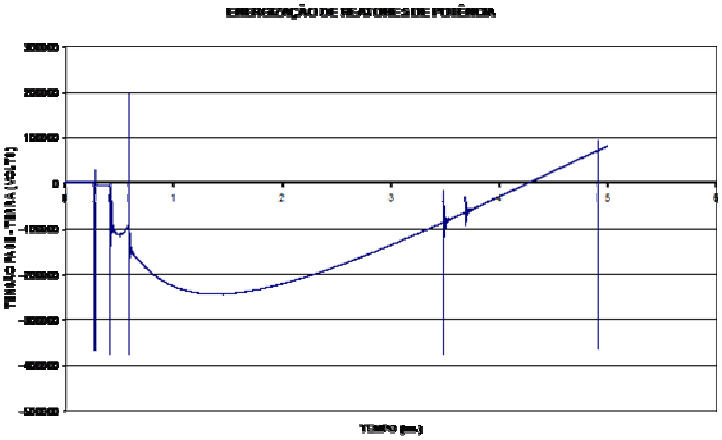

Figura 3 – Sobretensão típica imposta a reatores de potência durante o estabelecimento de corrente.

A utilização de fechamento controlado na manobra de reatores consiste na escolha do instante ótimo para o fechamento, com o intuito de mitigar as correntes de inrush, o qual deve ocorrer na crista de tensão. Apesar das sobretensões geradas na energização próxima à crista de tensão, normalmente o ajuste é feito nesta região. A precisão nos tempos de dispersão dos disjuntores sugerida para a manobra de fechamento é também de ±1ms a ±2ms. As correntes de inrush são funções das dispersões de tempo de operação dos pólos dos disjuntores em relação aos instantes ajustados.

As condições do aterramento do reator, se estrela aterrada, reator não aterrado ou reator aterrado através de reator de neutro, influenciam o instante ótimo de fechamento do disjuntor. Para o caso da configuração estrela aterrada, o fechamento é realizado nas cristas das tensões das três fases, portanto, com defasamento de 60º elétricos entre os pólos. Para reator não aterrado, estabelecem-se duas fases com a maior diferença de tensão entre elas e a terceira, 90º elétricos após, quando seu valor estará na crista. Para a configuração reator aterrado.

3.0 - ESPECIFICAÇÃO DE MANOBRA CONTROLADA – DISJUNTORES, DFAC E REATORES DE POTÊNCIA

A especificação de disjuntores de alta tensão para a manobra controlada de reatores inclui pré-requisitos elétricos e mecânicos. Adicionalmente, a eficácia da manobra depende do sistema de controle, que deve ser considerado parte do disjuntor, ou seja, deve-se especificar o conjunto disjuntor-sincronizador, ou nesse artigo, disjuntor-DFAC (Dispositivo de Fechamento e Manobra Controlada), tendo em vista que as suas atribuições contemplam mais do que uma sincronização.

Eletricamente, o disjuntor deve ser capaz de suportar os estresses elétricos descrito no item xx, considerando a aplicação em questão. Uma avaliação completa passaria pela análise da curva ou característica fria do disjuntor, da apuração do número de corte correspondente à respectiva corrente indutiva e da freqüência de oscilação, resultante do projeto do reator e dos detalhes eletromecânicos da conexão entre o disjuntor e o reator.

Portanto, uma avaliação completa e exata requer informações não necessariamente disponíveis no primeiro momento, e ainda estudos específicos para cada instalação. Dessa forma, alguns aspectos e diretrizes valem ser comentados:

- ✓ Os ensaios de tipo “manobra de pequenas correntes indutivas” podem ser muito importantes e úteis para a obtenção de dados para análise comparativa, mas muitas vezes não representam adequadamente a aplicação.
- ✓ Alguns critérios de projeto da instalação contribuem muito para a eficácia e sucesso da manobra controlada.
- ✓ A realização de ensaios mecânicos do disjuntor e de manobra controlada, sem carga, do conjunto disjuntor-DFAC contribuem são fortemente recomendados.
- ✓ Em algumas aplicações, essas análises prévias não se tornam suficientes, sendo necessária a realização de ensaios especiais de campo, com medições de grandezas de alta tensão.

Tendo em vista a interação já discutida entre o disjuntor e o reator a ser manobrado, torna-se fundamental a especificação desses de maneira consoante com a especificação de manobra controlada. A mitigação ou presença de estresses através da manobra controlada deve ser descrita a fim de ser tratada no projeto do reator.

Por exemplo, a manobra controlada presumiria a não ocorrência de reignições e decorrentes severas solicitações dielétricas, bem como poderia prever estresses elétricos devido ao estabelecimento da corrente na crista da forma de onda da tensão (fechamento controlado). Formas de onda reais típicas da manobra controlada fazem parte da especificação, e são dados de entrada para estudos específicos a serem desenvolvidos pelo projetista do reator. Esses estudos consideram a verificação da suportabilidade a estresses com formas de onda diferentes das padronizadas e da possibilidade de ressonâncias internas aos enrolamentos devido aos transitórios de manobra.

Essas análises são de responsabilidade do fabricante, mas são detalhadamente verificadas durante as atividades de revisão do projeto *(design review)* pela CEMIG GT. Como importante subproduto, obtêm-se modelo(s) particular(es) para o estudo de transitórios, permitindo, assim reavaliar as premissas consideradas para a manobra controlada, as quais subsidiaram a especificação e análise do disjuntor-DFAC,

Em condições ideais, todos os requisitos especificados são verificados através de ensaios de campo, onde as seguintes grandezas e eventos são medidas / supervisionados:

- ✓ tensão da barra de 500kv (fonte) e dos reatores de potência (carga);
- ✓ correntes do vão do reator, fases a, b e c;
- ✓ Tempos de arco e instantes de estabelecimento,
- ✓ Tensões de restabelecimento e de corte.

Portanto, mais dois aspectos merecem ênfase:

- ✓ A interação entre os processos de especificação e aquisição dos disjuntores-DFAC e reatores, previstos na especificação, e possíveis de serem praticados, particularmente em contratos por empreitada global;
- ✓ Os reatores de potência sujeitos a manobra controlada devem considerados como projetos particulares. Ou seja, a migração de reatores de linha para reatores manobrados implica riscos consideráveis de falha a médio ou longo prazo.

4.0 - CASOS PRÁTICOS – EXEMPLOS E CONTRA-EXEMPLOS

A seguir são descritas sucintamente algumas das aplicações do sistema CEMIG com ênfase nas ocorrências encontradas e medidas corretivas, visando o funcionamento adequado da manobra controlada.

4.1 SE "A"

Trata-se de um banco de reatores de 525kV, conexão estrela aterrada, manobrado por um disjuntor SF6, duas câmeras, com dispositivo para manobra controlada para fechamento e abertura.

Devido à indisponibilidade de laboratório para os ensaios de alta tensão em campo, optou-se por efetuar um ensaio primeiramente simplificado, em duas etapas, após a aferição dos ajustes do DFAC.

Na primeira etapa, realizam-se ensaios de manobra controlada em vazio, amostrando-se através de oscilógrafo a tensão e o contato auxiliar de referência para o DFAC, e os contatos principais do disjuntor. As formas de ondas medidas permitem verificar os instantes de fechamento, sendo necessário estimar os instantes de estabelecimento, considerando-se a curva de decrescimento da suportabilidade elétrica através dos contatos do disjuntor. Também, pode-se verificar o tempo de arco pressumido para a operação de interrupção, para cada fase.

Obviamente, as sobretensões de manobra não podem ser aferidas, mas, considerando-se a característica fria do disjuntor e analisando-se as sobretensões de corte medidas em ensaios de tipo realizados para outros clientes, pode-se inferir sobre o tempo de arco favorável para aquela condição de manobra.

Numa segunda etapa, efetuam-se manobras em carga, amostrando-se as formas de onda das tensões e correntes do vão do banco de reatores. Essa medição permite verificar se a seqüência de abertura das fases ocorre conforme programado, bem como a defasagem entre os "zeros" de corrente pode contribuem para apurar eventual reignição. Ver Figura xx, que indica uma manobra controlada bem sucedida.

A primeira etapa desse ensaio simplificado já indicou desvios entre os tempos de operação ajustados e medidos. As aferições dos ajustes do DFAC e dos tempos de operação do disjuntor não mostraram a causa desse desvio. Após análise detalhada de todo o processo de ajuste, verificou-se que os desvios de tempos de operação, necessariamente medidos entre os contatos principais e auxiliar, não representavam a realizada. Ou melhor, representavam a realidade para uma chave de contatos auxiliares, mas não para a chave de contatos auxiliares instalada em paralelo, a qual fornecia a entrada para o DFAC, indicando indiretamente o instante de abertura e fechamento dos contatos principais.

Essa falha foi corrigida, o que permitiu a evolução dos ensaios e energização dos reatores. Certamente, os desvios anteriormente encontrados comprometiam a eficácia da manobra controlada, especialmente, levando a ocorrência de reignições.

Após algumas semanas de operação e disponibilidade de laboratório especial, foram realizados os ensaios de manobra controlada com carga e medição de grandezas transitórias de alta tensão, para aferir os ajustes iniciais, bem como as sobretensões provenientes da manobra. Esses ensaios indicaram que os ajustes para a abertura controlada foram plenamente satisfatórios. Ainda, possibilitaram um melhor ajuste da manobra de fechamento controlado, ou seja, do instante de estabelecimento da corrente.

4.2 SE "B"

Trata-se de um banco de reatores de 525kV, conexão estrela aterrada, manobrado por um disjuntor SF6, duas câmeras, com dispositivo para manobra controlada para fechamento e abertura.

Nesse caso, devido à disponibilidade de laboratório para os ensaios de alta tensão em campo, realizou-se toda a seqüência de ensaios especificada, ou seja, a aferição dos ajustes do DFAC, a manobra controlada em vazio e a manobra controlada em carga, medindo-se as grandezas transitórias.

As medições efetuadas permitiram:

- ✓ corrigir e validar os ajustes efetuados para o DFAC,
- ✓ ajuste fino e validação dos tempos de arco presumidos, e
- ✓ comprovar que as sobretensões de corte estavam abaixo do especificado.

Entretanto, mostraram alguma instabilidade dos instantes de estabelecimento das correntes. Esse comportamento parece característico do projeto do disjuntor, que apresenta projeto bastante diferenciado para os contatos de arco. Esse deve ser ponto de atenção onde a precisão do instante de estabelecimento é de vital importância para a manobra controlada. No caso dessa aplicação, a variação verificada não compromete o desempenho especificado no contexto disjuntor-DFAC-reator.

4.3 SE "C"

Trata-se de reatores trifásicos de 138kV, conexão estrela aterrada, manobrado por um disjuntor SF6 de câmara, com dispositivo para manobra controlada para fechamento e abertura.

Devido à indisponibilidade de laboratório para os ensaios de alta tensão em campo e outros aspectos contratuais, optou-se por efetuar apenas o ensaio simplificado sem e com carga, em duas etapas, após a aferição dos ajustes do DFAC.

A empresa responsável pelo fornecimento global da instalação, em conjunto com o fabricante do disjuntor-DFAC apresentaram relatório de ensaio com resultados incompatíveis com a especificação técnica CEMIG, bem como com as técnicas adequadas de fechamento e abertura controlada.

Novos ensaios foram realizados com a supervisão da CEMIG, identificando procedimentos incorretos ou insuficientes, permitindo posteriormente a ratificação e validação dos ajustes do disjuntor-DFAC.

Considerando a não realização posterior do ensaio com medições de grandezas transitórias, um maior detalhamento das medições foram necessárias, utilizando-se inclusive de reduzidas manobras propositalmente em instantes inadequados.

4.4 SE "D"

Trata-se de um banco de reatores de 525kV, conexão estrela aterrada, manobrado por um disjuntor SF6, duas câmeras, com dispositivo para manobra controlada para fechamento e abertura.

Nesse caso, devido à disponibilidade de laboratório para os ensaios de alta tensão em campo, realizou-se toda a seqüência de ensaios especificada, ou seja, a aferição dos ajustes do DFAC, a manobra controlada em vazio e a manobra controlada em carga, medindo-se as grandezas transitórias.

As medições efetuadas mostraram a ineficácia do conjunto disjuntor-DFAC, com a ocorrência de reignições de corrente.

Todas as ações e variações de ajustes cabíveis foram estudadas em campo, mas sem sucesso. Uma intensa investigação foi desenvolvida incluindo avaliação do disjuntor incluindo:

- ✓ ensaios de campo para verificação dos tempos de operação e percurso mecânico do disjuntor, com ênfase para a velocidade média dos contatos durante a operação de abertura, e da qualidade do gás SF6;
- ✓ investigação do disjuntor na fábrica com a desmontagem e análise detalhada dos pólos do disjuntor ensaiado, buscando indícios que pudessem justificar uma significativa redução das características dielétricas das câmaras de interrupção;
- ✓ investigação relativa ao projeto do disjuntor e a sua aplicação na função proposta. Tratando-se de uma aplicação cuja solicitação dielétrica é fator preponderante, buscou-se caracterizar e mensurar a suportabilidade dielétrica dinâmica a frio da câmara de interrupção. Para tal, foram desenvolvidos procedimentos de cálculos e análises teóricas, bem como ensaios especiais de laboratório.
- ✓ o fenômeno de formação de vale na curva de suportabilidade dielétrica em instantes próximos aos tempos de arcos requeridos na aplicação em foco foi confirmado, partindo-se para a

proposição de melhoria do projeto de interrupção do disjuntor (otimização do perfil do bocal de sopro).

Resumidamente, os ensaios de campo com medições de grandezas transitórias demonstraram que o disjuntor não apresentava características elétricas (curva dielétrica característica a frio) apropriadas para a manobra controlada conforme especificado, ou seja, sem a ocorrência de reignições. Salienta-se que o mesmo modelo de disjuntor já havia sido submetido ensaios de manobra de pequenas correntes indutivas em laboratório. Essa falha foi mitigada através da alteração parcial do projeto de interrupção do disjuntor.

Ainda, após curto-período de operação, o disjuntor apresentou desempenho mecânico instável, comprometendo a manobra controlada. Ensaios simplificados com medições de grandezas, amostrando-se as formas de onda das tensões e correntes do vão do banco de reatores demonstraram essa ineficácia. Uma revisão completa do mecanismo fez-se necessária para a conformidade.

Vale destacar o fundamental papel cumprido nessa aplicação pelo fechamento controlado, reduzindo os estresses elétricos impostos aos reatores por período suficiente para a sua adequação. Esse ajuste não-convencional demonstrou bastante eficácia nos ensaios de comissionamento do conjunto disjuntor-DFAC-reator.

5.0 - COMENTÁRIOS FINAIS

Os casos práticos apresentados permitiram a aplicação dos conceitos teóricos fundamentais da manobra controlada de reatores. Ainda, indicaram aspectos práticos desde a especificação técnica até os ensaios de comissionamento. Esses tópicos são importantes lições aprendidas que podem ser aplicadas em projetos futuros.

A compreensão da interação entre o disjuntor – DFAC, reator de potência e instalação (disposição eletromecânica) contribui fortemente para o sucesso de cada aplicação.

Considerando a dificuldade operacional e custos envolvidos na realização de ensaios de manobra controlada em campo com medições de transitórios, pré-estudos e ensaios alternativos tornam importantes ferramentas de validação dos equipamentos e ajustes implantados.

Uma aplicação adequadamente conduzida da tecnologia de manobra controlada de reatores normalmente implica numa vida útil prolongada dos equipamentos. Falhas ou inobservâncias nessa implantação podem produzir efeito contrário.

6.0 - BIBLIOGRAFIA

(1) ADEQUAÇÃO DE PROJETO DE DISJUNTOR DE 550KV PARA APLICAÇÃO NA MANOBRA DE INTERRUPÇÃO DE CORRENTES INDUTIVAS LEROY, G., DOURY, M.C. Instructions on how to present a manuscript for the CIGRÉ session; CIGRÉ- França.

(2) IEC 62271-110 – High-voltage switchgear and controlgear - Part 110: Inductive load switching

(3) Duarte, L.H.S.; Novais, M.S.; Adequação de projeto de disjuntor para aplicação na manobra de interrupção de correntes capacitivas, XVIII SNPTEE, Curitiba, 2005.