



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

### DESENVOLVIMENTO DE CONTROLADOR DE MANOBRAS PARA DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO - SOLUÇÃO OTIMIZADA PARA AS NECESSIDADES DE FURNAS

CLAYTON DUARTE PESSOA(1); RICARDO TOZZI DE LIMA(1); HAMILTON BATISTA DE OLIVEIRA(1)  
FURNAS-CENTRAIS ELETRICAS S.A.(1)

#### RESUMO

Este informe técnico irá apresentar um trabalho realizado por FURNAS em relés controladores de manobras de disjuntores. O relé controladores de manobra, também conhecidos como sincronizadores, tema deste trabalho, operam a cerca de quinze anos no sistema elétrico e tiveram uma descontinuidade de produção e assistência pelo fabricante. As falhas neste relé iniciaram muito antes do fim de vida útil previsto para o disjuntor, e isto motivou FURNAS a encontrar uma solução para que a função de sincronismo do disjuntor continuasse funcionando com confiabilidade e segurança através de um novo dispositivo simplificado, atualizado e de domínio próprio.

#### PALAVRAS-CHAVE

Controladores de manobra, chaveamento controlado, sincronizadores.

#### 1.0 INTRODUÇÃO

Para operar de forma confiável e segura toda a energia produzida e transmitida por seu parque de ativos, FURNAS conta hoje, com aproximadamente 1100 disjuntores de alta tensão, com classe de tensão de 69 kV até 800 kV. Os disjuntores são responsáveis por inserir e retirar de operação, equipamentos importantes do Sistema Interligado Nacional – SIN, tais como, transformadores, reatores, banco de capacitores e linhas de transmissão.

Os disjuntores modernos possuem dispositivos eletrônicos denominados **Controladores de Manobras**, que são responsáveis por controlar a abertura e/ou fechamento destes equipamentos em instantes previamente determinados com precisão menor que 1 ms, de tal forma que as cargas capacitivas ou reativas por eles manobradas sejam inseridas ou retiradas sem causar maiores impactos eletromagnéticos no SIN, bem como danos nos contatos principais dos disjuntores causados por reignições e correntes de *inrush*.

FURNAS possui vários tipos de controladores de manobras para disjuntores. Com o avanço tecnológico, alguns modelos se tornaram obsoletos, ou foram descontinuados pelos fabricantes, fazendo com que a assistência técnica não fosse mais viável, devido a inexistência de reposição de peças.

#### 2.0 CHAVEAMENTO CONTROLADO EM EQUIPAMENTOS DE TRANSMISSÃO

O chaveamento controlado em equipamentos de potência é comumente utilizado em banco de capacitores, banco de reatores e banco de transformadores.

##### 2.1 Chaveamento controlado de banco de capacitores.

Os bancos de capacitores são os dispositivos mais chaveados no sistema elétrico (1), pois são utilizados para controle de tensão. Estes disjuntores são considerados de alta cadência devido ao elevado número de operações. O instante mais adequado para o chaveamento controlado do banco de capacitores é onde houver a menor taxa de variação da tensão, que é quando esta grandeza passa pelo zero. Os bancos de capacitores devem estar descarregados antes de serem energizados, evitando assim surtos de corrente com subsequente afundamento de tensão seguido de uma tensão de transitória de recuperação que pode ultrapassar os valores nominais dos equipamentos causando estresse dielétrico. Além disto, uma manobra descontrolada de fechamento em um sistema onde existem vários bancos de capacitores em paralelo, pode gerar uma corrente de surto transitória entre os bancos, pelo efeito *back-to-back*, podendo até causar operação do sistema de proteção e desligar o banco.

## 2.2 Chaveamento controlado de banco de reatores.

Os reatores de potência tem a função de limitar tensão em linhas de transmissão carregadas, especialmente as mais longas que possuem capacitância mais significativa. O objetivo do chaveamento controlado em um reator é evitar seu chaveamento com tensão zero, evitando um *off set dc* com risco de corrente de *inrush* pela saturação do reator. Desta forma, o instante mais adequado é o pico da tensão que resulta em uma corrente zero.

## 2.3 Chaveamento controlado de banco de transformadores sem carga.

O objetivo do chaveamento controlado de um banco de transformadores é reduzir ou eliminar a corrente de *inrush* que ocorre na sua energização, porém, o desafio do controle desta manobra é que o fluxo instantâneo durante a energização deve ser igual ao fluxo magnético residual no núcleo do transformador no instante em que ele foi desligado. Desta forma, a medição do fluxo remanescente com objetivo de ajustar o momento ideal para a energização do transformador, que não é tão trivial, torna este caso de maior complexidade. A efetividade de uma manobra controlada em banco de transformadores se dá somente se houver controle na abertura e no fechamento.

## 3.0 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho se deu por conta de sucessivos defeitos e falhas ocorridos em um determinado modelo de controlador de manobras, decorrentes em sua maior parte de problemas com os sensores de monitoramento e *software*. A falha de sensores inabilita o funcionamento do controlador de manobras, sem que haja um defeito real no disjuntor.

As variáveis possíveis que alteram a velocidade de fechamento ou abertura do disjuntor e que foram consideradas no projeto original do controlador de manobras para compensação de tempo foram: pressão do gás SF6 no pólo, pressão do óleo no mecanismo de operação, tensão de comando nos circuitos das bobinas de disparo e temperatura do disjuntor ou ambiente. Porém, nos projetos implantados no Brasil somente foram considerados a tensão nas bobinas de comando e a pressão do gás SF6.

A variação de tensão de acionamento das bobinas prevista no projeto original pode ocorrer de 80 a 140 Vdc, com uma consequente variação de tempo de 0,9 ms no total da faixa, e a variação de pressão de 312 a 375 Bar pode gerar uma variação 1,8 ms no tempo do disjuntor (2). Considerando que a variação de tensão DC em uma subestação é normalmente pequena e o disjuntor dificilmente opera no limite inferior de pressão, estas variáveis, mesmo que se alterem parcialmente, dificilmente farão com que o disjuntor opere fora da janela de instante adequado para abertura ou fechamento.

Além das variáveis que ajustam o tempo, o projeto original também previa e coletava uma série de informações tais como: vários parâmetros das bombas, correntes de linha e medições de tempo de funcionamento dos mecanismos. Essas informações exigiam um esforço computacional considerável e é operado por um *software* bastante desatualizado e incompatível com os sistemas operacionais dos dias atuais, além disto, não há no mercado uma solução consolidada e técnica economicamente viável para substituição dos sensores a atualização dos controladores de manobras.

Uma vez que estes problemas começaram a chamar a atenção, estudos da engenharia de manutenção constataram que a tecnologia de monitoramento acoplada ao dispositivo de chaveamento controlado sob estudo não trazia ganhos relevantes na manutenção disjuntor, muito pelo contrário, a grande maioria das ocorrências diretamente relacionadas ao conjunto chaveamento/monitoramento estava associada justamente ao sistema do próprio controlador de manobras não ao disjuntor.

Estudos detalhados do sistema de controle indicaram a possibilidade de substituição das placas eletrônicas principais, fazendo um aproveitamento parcial da estrutura física existente, tais como cubículo e fiação.

Diante disso, baseado em conhecimento empírico e na literatura, a equipe de FURNAS desenvolveu um dispositivo de chaveamento controlado capaz de executar esta tarefa de modo eficaz e confiável, gerando somente os alarmes mínimos necessários.

Inicialmente, o controlador de manobras desenvolvido por FURNAS, não utiliza correção de tempo pela variação da tensão DC das bobinas de acionamento e nem pela variação da pressão do gás SF6, por considerar que estes parâmetros não contribuem de forma significativa na correção de tempo do disjuntor, além de evitar que possíveis falhas nos transdutores destes sinais inabilitem ou façam com que o controlador não funcione corretamente. Vale ressaltar que estes parâmetros também são monitorados durante a operação do equipamento por outros canais fora do controlador de manobras. Desta forma, foram considerados apenas parâmetros básicos, tais como tensão de referência e auto verificação do funcionamento dos componentes internos.

É importante destacar que apesar do monitoramento do disjuntor pelo novo controlador de manobras ser apenas pela tensão de referência, todos os alarmes e proteções originais que não envolvem o sincronismo são mantidos.

FURNAS possui um laboratório de tecnologia onde é possível desenvolver aplicações e soluções diferenciadas e não disponíveis no mercado no que tange a manutenção de ativos de transmissão de energia. Na área de disjuntores, vale destacar a excelência da oficina de revitalização de disjuntores onde são recuperados os contatos principais, vedação, pintura, possíveis avarias na porcelana, além de uma central de reciclagem de gás SF6. Além da solução do novo controlador de manobras, o laboratório de tecnologia desenvolveu também um instrumento e o *software* denominados ETD64 (ver Figura 1), próprio para medição de tempos de disjuntor, com precisão de 0,1 ms, totalmente adequado as necessidades levantadas em campo para manutenção preventiva.

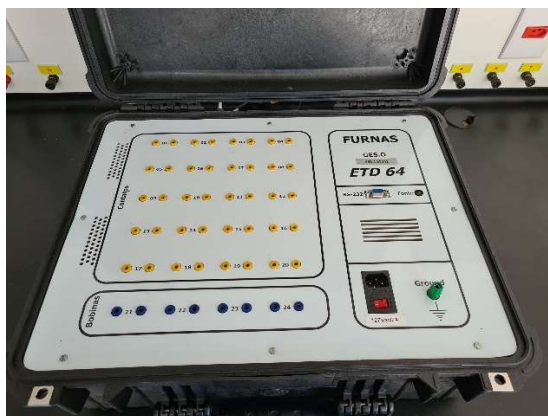


Figura 1

Baseado no projeto original, na estrutura física existente e definidas as funções básicas que seriam mantidas, o novo controlador foi desenvolvido. As duas placas de controle do novo controlador foram desenvolvidas através dos aplicativos: C# para aplicativo do usuário, C para microcontroladores PIC, Multisim para a elaboração e simulação dos circuitos e Ultiboard para layout das placas. A Figura 2 apresenta o resultado final do projeto de uma das placas.

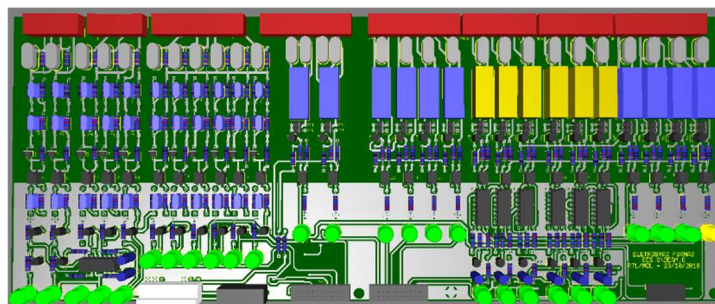


Figura 2

Foi mantido o mesmo tamanho da placa original com objetivo dela ser perfeitamente encaixada na caixa metálica do controlador original. Para otimizar a implantação toda fiação que trazia informações que não seriam utilizadas foi mantida no painel, porém sem destinação nas novas placas. A montagem final do novo controlador de manobras pode ser visto na Figura 3.



Figura 3

A Figura 4 mostra uma das telas do software desenvolvido para o controlador de manobras, onde são inseridos os tempos a atraso após o disparo para cada fase do disjuntor e a sequência de fases.

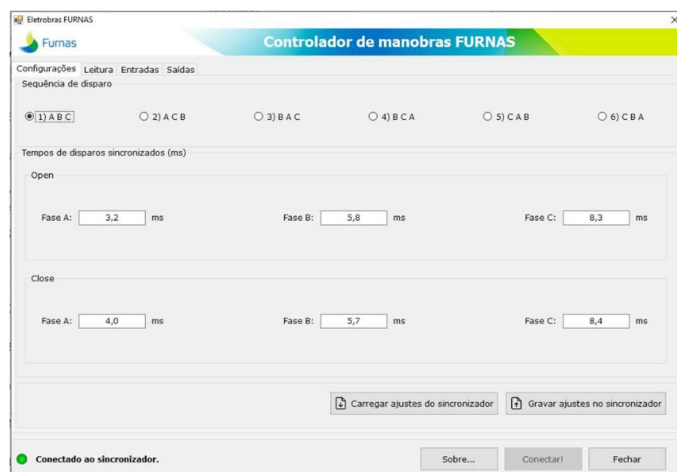


Figura 4

### 3.1 Testes de Campo.

A seguir serão apresentados os resultados de trabalho de campo após a implantação de um controlador de manobras desenvolvido por FURNAS em um reator de 500 kV.

As atividades de campo para substituição dos controladores de manobras consistem em tomada de tempos do disjuntor sem manobra controlada, desativação do controlador original, instalação do novo controlador, nova tomada de tempo com ajuste calculado e possível reajuste após as primeiras manobras controladas.

No ensaio de medição de tempo de abertura, foram oscilografados e medidos os tempos de abertura do disjuntor e calculada a média de 10 manobras. Os tempos medidos estão demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Tempos do disjuntor sem sincronismo

Tempo de funcionamento do DJ na abertura de contatos (ms)			
Manobra	Fase A	Fase B	Fase C
1	18,2	18,9	18,2
2	18,1	18,3	18,1
3	18,3	18,5	18,2
4	18,2	19,0	18,1
5	18,3	19,0	18,2
6	18,3	19,3	18,1
7	18,2	18,4	18,0
8	18,2	18,8	18,2
9	18,2	18,4	18,2
10	18,2	19,2	18,1
<b>Média</b>	<b>18,2</b>	<b>18,8</b>	<b>18,1</b>
Mínimo	18,1	18,3	18,0
Máximo	18,3	19,3	18,2
$\Delta$	0,2	1,0	0,2

Após a tomada de tempo, foi realizado um ensaio simulado com o disjuntor sincronizado e em vazio, ou seja sem a energização efetiva do banco de reatores. Após o ajuste final, foram realizadas 11 manobras de abertura. O tempo de arco estabelecido foi de 6 ms.

Tempo de Arco é o período previsto para extinção do arco elétrico durante a abertura do circuito e deve garantir que a corrente vai passar pelo instante zero logo após a separação mecânica dos contatos, evitando assim a possibilidade de reignição.

Com auxílio do instrumento para Ensaio de Tempo de Disjuntor (ETD 64), que mede o tempo de abertura do disjuntor com relação ao zero da tensão de referência imediatamente anterior a manobra, foram realizados ensaios de abertura simulada com o sincronizador FURNAS em operação. Os tempos e ajustes do controlador de manobras do disjuntor estão registrados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Tabela-2.

Tabela 2 – Tempos do disjuntor com sincronismo

Medição do tempo de abertura dos contatos em relação ao zero da tensão de referência, com uso da EDT64.					
Manobras	Fase A (ms)	Fase B (ms)	Fase C (ms)	Ajuste	Comando
1	3,3	5,7	9,5	1	Local
2	3,3	5,7	9,5	1	Local
3	3,4	5,9	9,6	1	Local
4	3,3	5,8	9,5	1	Local
5	3,3	5,8	9,4	1	Local
6	3,7	6,5	9,3	2	Local
7	3,6	6,4	9,2	2	Local
8	3,4	6,4	9,1	2	Local
9	3,5	6,3	9,1	2	Local
10	3,5	6,4	9,1	2	Local
11	3,6	6,5	9,2	2	Local
12	3,6	6,4	9,2	2	Remoto
13	3,5	6,3	9,1	2	Remoto
14	3,5	6,4	9,1	2	Remoto
15	3,7	6,4	9,2	2	Remoto
16	3,5	6,3	9,1	2	Remoto
	3,3	5,8	9,5	Média Ajuste 1	
	3,6	6,4	9,2	Média Ajuste 2	
	3,7	6,5	9,3	Referência	
	0,1	0,1	0,1	Discrepância em relação a referência após o ajuste final(2)	

Observando a Tabela 2 é possível afirmar que o controlador de manobras, associado ao perfeito funcionamento do disjuntor, asseguram uma discrepância de apenas 0,1 ms em relação ao instante de adequado de abertura calculado (alvo).

A Figura 5 representa graficamente a dinâmica de uma manobra controlada de abertura de um disjuntor sincronizado para reator, onde o alvo é o máximo da tensão (zero da corrente), logo após a abertura mecânica dos contatos.

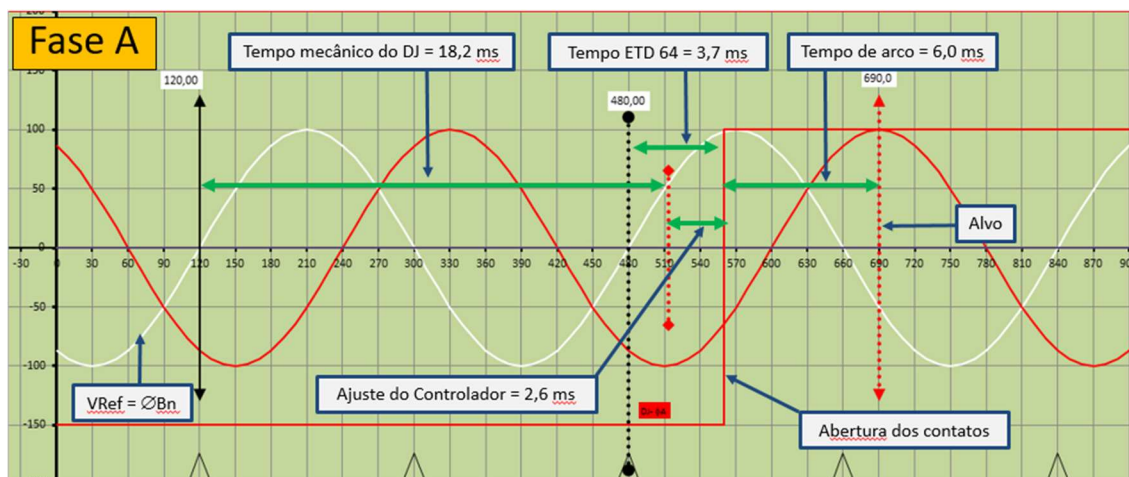


Figura 5

No caso apresentado, a tensão de referência é a B para neutro (cor branca). O controlador de manobra inicia a contagem de tempo de abertura da fase A (cor vermelha) do disjuntor a partir do instante 120°. O alvo da abertura onde se deseja que a o arco elétrico seja extinto é em 690°, precedido de um Tempo de Arco de 6 ms. Assim fica estabelecido que os contatos devem se abrir mecanicamente em 560°. Para que o disjuntor abra exatamente neste ponto, o controlador de manobras deve ser ajustado para atrasar o disparo da bobina de abertura em 2,6 ms. Para conferência deste tempo, a ETD 64 toma como referência, o zero da tensão de referência imediatamente anterior a abertura, sendo assim, o tempo medido neste dispositivo para a fase B é 3,7 ms.

Os ajustes dos controladores de manobra também podem ser realizados com a energização efetiva dos equipamentos manobrados. Para isto, é necessária a instalação de transdutores especiais de alta tensão e TCs de alta frequência no sistema para medição dos transientes de tensão e corrente, bem como para verificar o comportamento do arco elétrico durante as manobras. Este tipo de ensaio demanda deslocamentos para instalação e desinstalação dos transdutores e várias manobras do ativo controlado. FURNAS possui instrumentação e capacidade técnica para este tipo de ensaio, porém, devido as atuais dificuldades de intervenção sistêmica, além dos custos de indisponibilidade, ultimamente tem-se escolhido fazer a substituição do controlador de manobras com deslocamentos mais curtos e somente com ensaios simulados.

#### 4.0 CONCLUSÕES

Os problemas com as falhas e a obsolescência dos controladores de manobras de FURNAS foram superados através de uma solução eficiente, desenvolvida com recursos próprios, independente de fabricantes e com baixíssimo custo. Além disso, o domínio tecnológico sobre os novos dispositivos controladores de manobras desenvolvidos, permite que a assistência técnica e manutenção seja realizada de forma quase imediata dentro da empresa, aumentando a disponibilidade dos equipamentos do SEP e minimizando as perdas financeiras.

Além disto, este trabalho possui outros ganhos financeiros relevantes, considerando que manutenção do controlador de manobras do disjuntor, permite que ele opere com segurança até o fim da sua vida útil, por conseguinte evitando as seguintes perdas econômicas pela substituição precoce do disjuntor, por obsolescência do seu controlador de manobras, que pode custar mais de 600 mil reais por unidade. Custo evitado por indisponibilidade de banco de capacitores, reatores e linhas de transmissão devido a falha no controlador de manobras;

Os resultados obtidos nos ensaios de oscilografia durante manobras de teste na implantação apresentaram resultados satisfatórios, uma vez que a discrepância entre o instante adequado de abertura calculado e o medido foi de 0,1 ms.

#### 5.0 BIBLIOGRAFIA

- (1) BENMOUYAL, G., FISCHER, N., TAYLOR, D., TALBOTT, M., CHOWDHURY, R., Uma Abordagem Simplificada para Chaveamento Controlado dos Equipamentos de Potência, 72th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, 2018, Atlanta, Georgia.
- (2) JUNIOR, A. R., MACHADO, W. G., Sincronizador de Disjuntores a SF6, Manual Técnico de Campo, FURNAS, Rio de Janeiro, 2003.





## DADOS BIOGRÁFICOS



(1) Clayton Duarte Pessoa, nascido em Nova Lima – MG em 23 de Março de 1978. Trabalha com ensaios especiais em disjuntores, transformadores de potência e para instrumentos em FURNAS desde 2008. Demais experiências e formações: Trabalhos apresentados nos principais seminários do setor, nas áreas de linha viva em subestações, tratamento de óleo em transformadores energizados e descargas parciais. Especialização em Manutenção do Sistema Elétrico - UNIFEI 2013. Engenharia de Manutenção de Linhas de Transmissão – FURNAS 2004-2008. Graduação em Engenharia Elétrica – PUC Minas 2002. Técnico em Mecânica – CEFET MG – 1996. Manutenção em Linhas de Transmissão - CEMIG 1995/2004.

(2) Ricardo Tozzi de Lima, nascido em Alpinópolis – MG em 25 de junho de 1979. Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Trabalha com ensaios especiais em equipamentos de alta tensão, desenvolvimento de produtos/aplicativos e automação em FURNAS desde 1998. Demais experiências e formações: Especialização em Sistemas HVDC – UNIFEI. Manutenção em Linhas de Transmissão - FURNAS 1998-1999. Manutenção em Equipamentos de Alta Tensão - FURNAS 1999-2005. Técnico em Eletrotécnica - Escola Estadual de FURNAS. Graduação em Informática - UEMG Passos MG. Graduação em Engenharia Elétrica - Centro Universitário Claretiano Batatais

(3) Hamilton Batista de Oliveira - Engenheiro Eletricista formado pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC/MG (2002), possui pós graduação em Manutenção de Sistemas Elétricos pela Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI (2011) e MBA em Gestão Empresarial pela Fundação Getúlio Vargas - FGV (2020). Trabalhou na TOSHIBA DO BRASIL S/A, na área de ensaios elétricos em transformadores e reatores (1995 a 2004). Desde 2004 trabalha em FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS, onde atuou como engenheiro especialista na área de ensaios elétricos em equipamentos de transmissão (2004 a 2013). Atualmente gerencia a Divisão de Ensaios e Apoio à Manutenção em FURNAS.