



## V SBQEE

Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica

17 a 20 de Agosto de 2003

Aracaju – Sergipe – Brasil



Código: AJU 04 151

Tópico: Análise, Diagnósticos e Soluções

### MANOBRA DE BANCOS DE CAPACITORES – RESULTADOS PRÁTICOS DA APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO DE TRANSITÓRIOS

Angélica C. O. Rocha  
Luiz Henrique Silva Duarte  
Marconis dos Santos Novais\*  
CEMIG

Antônio Emílio Angueth de Araújo  
UFMG

#### RESUMO

Neste artigo é descrito como a CEMIG tem tratado a energização de bancos de capacitores, como uma origem de distúrbios que afetam a qualidade de energia elétrica, analisando os transitórios impostos ao sistema, definindo soluções e mensurando os efeitos causados pela aplicação da tecnologia de manobra controlada.

#### PALAVRAS-CHAVE

Qualidade de energia, transitórios, Banco de capacitores, Manobra controlada, Reatores de pré-inserção.

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

O fornecimento de energia elétrica com qualidade pode ser exemplificado pelo fornecimento contínuo de tensão senoidal pura, de amplitude, frequência e fase constantes e dentro de limites acordados. A perda dessa qualidade pode ocorrer, por exemplo, através de distorções, permanentes, temporárias ou transitórias na forma de onda da tensão, causando eventuais danos ou operações inadequadas aos equipamentos do sistema ou às cargas nele conectadas.

Medindo-se a forma da onda de tensão, pode-se avaliar os níveis dessas distorções, e partir de limites estabelecidos, qualificar o suprimento de energia. A demanda pela qualidade de energia tem sido crescente nas últimas décadas e está associada à utilização de cargas mais sensíveis às distorções. A ênfase no aumento da eficiência dos processos industriais, devido ao aumento da

competitividade, e a conscientização dos usuários quanto aos seus direitos como consumidores, são indicadores da necessidade de maiores estudos da qualidade de energia. E como geradoras e fornecedoras da energia elétrica, cabe às concessionárias importante papel nesses estudos.

A investigação de falhas em equipamentos do sistema elétrico e em cargas nele conectadas pode ajudar no levantamento de causas de distorções da energia suprida, e na melhoria da qualidade da energia suprida.

Os transitórios originados na energização de banco de capacitores podem ser classificados, no âmbito da qualidade de energia elétrica, como transitórios oscilatórios. Possuem frequências típicas de até 5kHz e duração de até 50ms. São considerados transitórios de baixa frequência [2].

Para a análise desses fenômenos, atributos diferentes aos de regime permanente são requeridos, como taxa de crescimento, amplitude, duração e faixas de frequências.

#### 2.0 - HISTÓRICO

Desde 1996, a análise das técnicas disponíveis para as manobras de energização de bancos de capacitores passou a ser contemplada nos projetos de subestações da CEMIG. O objetivo foi reduzir os impactos dos transitórios sobre o sistema, criar alternativas às técnicas de resistor e reator de pré-inserção e reatores fixos, e aumentar a confiabilidade, disponibilidade e flexibilidade dessas instalações.

A fim de verificar a eficácia das técnicas e os níveis de mitigação, foram realizados ensaios de

\* Avenida Barbacena, 1200 - 11o andar - CEP 30190-131 - Belo Horizonte - MG - BRASIL  
Tel.: (031) 3299-4150 - Fax: (031) 3299-3791 - E-MAIL: msnovais@cemig.com.br

campo para medição dos transitórios na energização dos bancos.

Comprovada a eficácia da aplicação da manobra controlada, essa opção passou a fazer parte dos estudos de planejamento de instalação dos bancos no sistema.

### 3.0 - ANÁLISE TEÓRICA PARA INSTALAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES NO SISTEMA CEMIG

O objetivo das análises é investigar os transitórios de tensão e corrente de origem nas manobras de bancos de capacitores e que podem ser danosos aos demais componentes do sistema.

Apresentamos um exemplo prático da análise realizada para a subestação Neves 1, onde foi planejada a instalação de três bancos de capacitores de 138kV, 41Mvar, com reatores fixos.

#### 3.1 Metodologia

Com a utilização do programa ATP foram realizadas simulações abordando os seguintes tópicos de estudos:

- Determinação das sobretensões fase-terra e fase-fase na SE Neves 1 e nas SE de 138kV alimentadas por essa SE, para verificar a possibilidade de disparos de pára-raios e superação da suportabilidade dos transformadores;
- Determinação das correntes transitórias de energização para análise de desempenho dos disjuntores e das sobretensões nos reatores de amortecimento.

Foram realizadas simulações estatísticas a fim de determinar os instantes de fechamento dos disjuntores que maximizariam os valores dos transitórios. Na figura 1 é apresentado o diagrama básico do sistema do estudo.

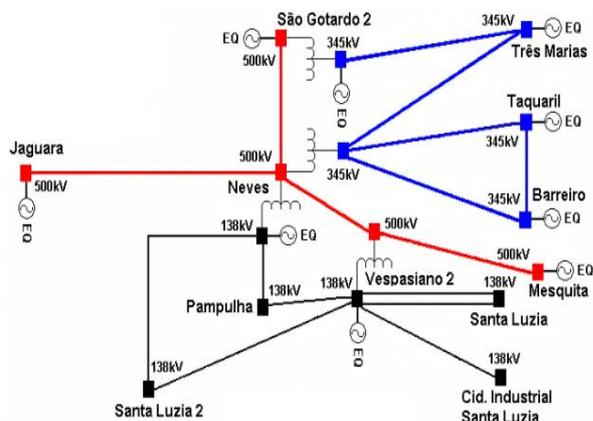


Figura 1 – Sistema Neves 1 – Diagrama unifilar com equivalente do sistema para 2003.

### 3.2 Transitórios resultantes das simulações

As sobretensões das manobras de abertura de bancos de capacitores não são críticas, e nas manobras de fechamento, normalmente, não comprometem a subestação local, mas podem assumir valores críticos em SE remotas. Os valores das sobretensões são maiores para manobras do primeiro banco a ser energizado no mesmo barramento.

A tabela 1 demonstra os resultados dessas simulações.

Tabela 1. Máximas sobretensões fase-terra e fase-fase na energização do primeiro banco.

Tensão		SE Neves 1	SE Matozinhos
Fase-fase	KV crista	284	506
	p.u.	1,46	2,59
Fase-terra	KV crista	197	394
	p.u.	1,75	3,49

Nas figuras 2 e 3 são apresentadas as formas de onda de tensão fase-fase e fase-terra na SE Matozinhos para manobra do primeiro banco.

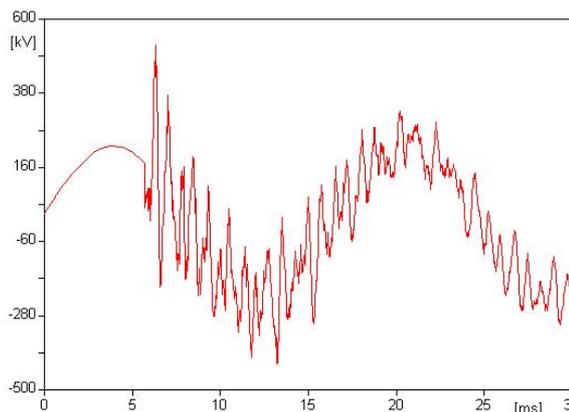


Figura 2 – Tensão fase-fase na SE Matozinhos para manobra do primeiro banco na SE Neves 1.

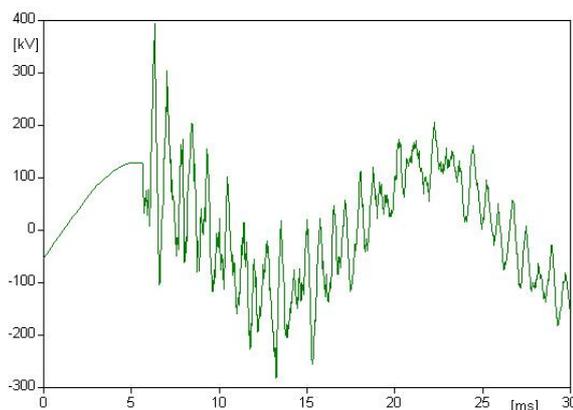


Figura 3 – Tensão fase-terra na SE Matozinhos para do manobra terceiro banco na SE Neves 1.

As frequências predominantes das tensões transitórias simuladas são da ordem de 1kHz

para a manobra do primeiro banco e de 3kHz para a manobra do terceiro.

### 3.3 Análise e diagnóstico dos resultados obtidos

Os critérios para aceitação das solicitações impostas pela manobra de energização dos bancos de capacitores eram:

- A tensão fase-terra máxima de manobra deveria ser limitada a 80% da tensão típica de disparo dos pára-raios (SiC) instalados na SE Matozinhos, 218kV;
- As tensões máximas de manobra entre fases e à terra deveriam ser limitadas a 75% da suportabilidade a surto de manobra dos transformadores, 345kV.

Os resultados obtidos mostraram que ambos os critérios não foram atendidos. No primeiro caso, evidenciou-se a probabilidade de freqüentes disparos dos pára-raios associadas às manobras diárias de bancos dos bancos de capacitores.

No segundo caso, existiria uma excessiva solicitação imposta aos transformadores, principalmente, quando da falha de atuação dos pára-raios de SiC.

Portanto, foi recomendada a utilização da manobra controlada na energização dos bancos de capacitores.

### 4.0 - INVESTIGAÇÕES PRÁTICAS DOS TRANSITÓRIOS

A fim de garantir a eficácia dos dispositivos de manobra controlada e conhecer os seus níveis de mitigação, comparando-os com os transitórios gerados na aplicação de reatores de pré-inserção, foram realizadas medições das tensões e correntes transitórias nas energizações de bancos de capacitores de 138kV durante os ensaios de comissionamento. A escolha dos bancos de capacitores para a realização das medições levou em conta as tecnologias aplicadas na manobra e as potências dos bancos. Aqui são apresentados os resultados das medições de tensão, uma vez que esses parâmetros são de maior influência na qualidade da energia suprida, no caso específico.

### 5.0 - SISTEMAS SOB INVESTIGAÇÃO

A seguir são apresentados os resultados das medições nos sistemas de Alfenas, Caratinga e Neves 1, que possuem as seguintes características:

#### a) Sistema Alfenas

Subestação de 138kV, suprida por uma subestação, e com derivação para uma SE em sistema radial, com banco de capacitores de 138kV, 16,4Mvar, ligação estrela, aterrado, com disjuntor de 145kV com dispositivo de fechamento controlado.

#### b) Sistema Caratinga

Subestação de 138kV, suprida por duas subestações, e com derivação para uma SE em sistema radial com banco de capacitores de 138kV, 16,4Mvar, ligação estrela, aterrado, com interruptor sob carga de 145kV, equipado com reator de pré-inserção.

#### c) Sistema Neves 1

Subestação de 500kV, suprida por três subestações de 500kV, três de 345kV e uma de 138kV, e supre sete saídas de 138kV. Possui três bancos de capacitores de 138kV, 40,5Mvar cada, ligação estrela, aterrado, em paralelo, reatores de 500μH, com disjuntor de 145kV, com dispositivo de fechamento controlado.

## 6.0 - RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

### 6.1 Sobretensões

As máximas sobretensões e suas respectivas freqüências são apresentados por sistema nas tabelas 2, 3 e 4.

Os valores entre parênteses para as freqüências indicam componentes secundárias, de menor amplitude em relação à freqüência predominante no transitório e foram obtidas pelas ondas de corrente.

Os valores entre parênteses das tensões correspondem a sobretensões geradas por indução no instante de fechamento da fase vizinha.

Tabela 2 – Sistema Alfenas

Condição de fechamento	KV crista	p.u.	Freq (Hz)
Não controlado	252	2,2	350 (2400)
Controlado	144 (154)*	1,3 (1,4)*	60 (2400)

Tabela 3 – Sistema Caratinga

Condição de fechamento	KV crista	p.u.	Freq (Hz)
Sem reator	149	1,4	2200
Com reator	131	1,2	300

Tabela 4 – Sistema Neves 1

Condição de fechamento	KV crista	p.u.	Freq (Hz)
Banco único, não controlado	172	1,5	1200
Banco único, controlado	128	1,1	1200
3º banco, não controlado	130	1,1	2800
3º banco, controlado	128 (142)*	1,1 (1,2)*	2800

Os resultados indicados acima foram obtidos através de envelopes envolvendo as cristas das formas de onda das correntes de energização, tendo em vista que a visualização das freqüências nas formas de onda das tensões foram de difícil visualização na maioria dos casos. Com o objetivo de detalhar a análise das freqüências das formas de onda das tensões, utilizou-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Para tal, fez-se necessário definir a ferramenta de cálculo a ser utilizada, tendo como opções os programas ATP e MATLAB. Os dados das simulações eram de origem do programa ATP e os das medições de origem de osciloscópios. Foi definido por utilizar o programa ATP pela facilidade da inserção dos dados dos osciloscópios e por já constarem neste programa parte dos dados gerados.

Confrontando as figuras 4 a 6, demonstra-se que os resultados poderiam ser obtidos com a utilização de qualquer das duas ferramentas, ATP ou MATLAB.

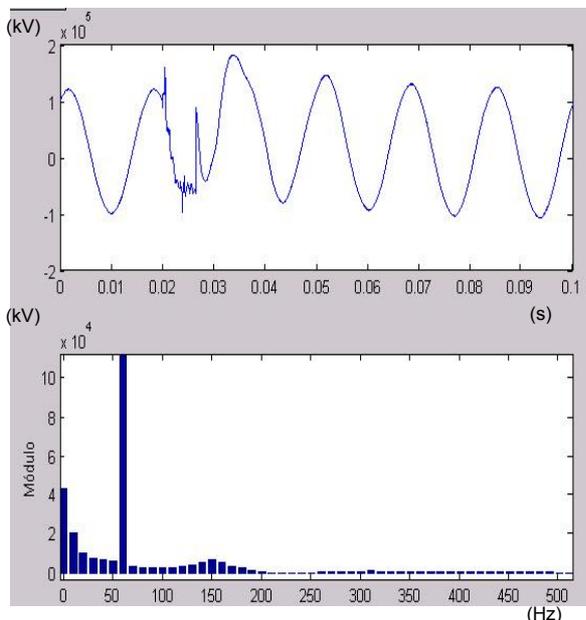


Figura 4 – Tensão fase C na SE Alfenas para fechamento não controlado. Análise das componentes de freqüência através do MATLAB.

A componente CC pela análise no MATLAB apresentou duas vezes o valor real por ter sido corrigida em conjunto com as componentes CA.

## 6.2 Formas de onda das tensões

### 6.2.1 Tensões no sistema Alfenas sem e com a manobra controlada

#### a) Manobra não controlada

As figuras 5 e 6 apresentam uma amostragem das formas de ondas das tensões durante as medições no sistema Alfenas para a condição não controlada.

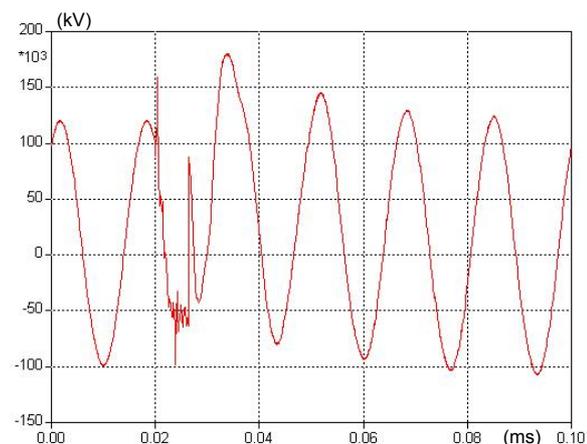


Figura 5 – Tensão fase C na SE Alfenas para fechamento não controlado.

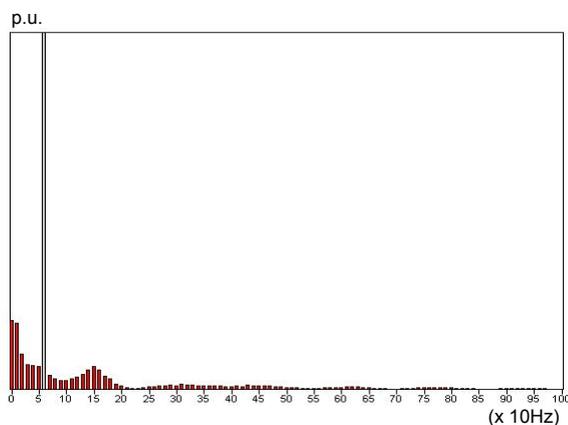


Figura 6 – Freqüências da tensão fase C na SE Alfenas para fechamento não controlado.

A duração da distorção na forma e amplitude da onda durou aproximadamente 35ms, de 25 a 60ms.

Quanto à taxa de crescimento, dois fenômenos devem ser considerados para os surtos de tensão: um devido a energização de outras fases e outro devido a sua própria energização. A taxa de crescimento para os dois primeiros surtos, pois a fase C foi a última a ser fechada, foi de

160kV/ms. Para o fechamento da fase C foi de 90kV/ms.

A frequência de 150Hz e a componente contínua foram de maior influência na distorção.

Para esta medição a crista máxima de tensão chegou a 180kV, ou 1,6p.u..

#### b) Manobra controlada

As figuras 7 e 8 apresentam uma amostragem das formas de ondas das tensões durante as medições no sistema Alfenas para a condição controlada.

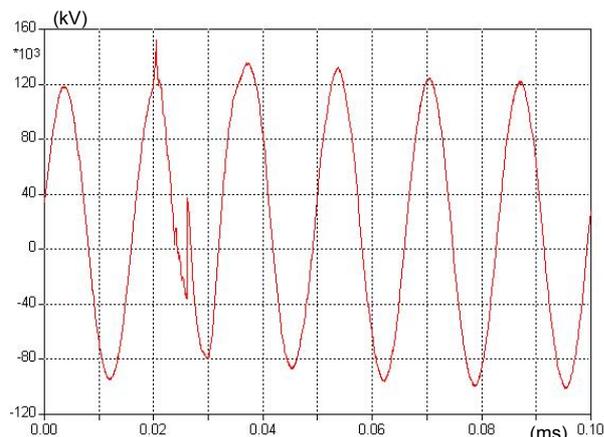


Figura 7 – Tensão fase C na SE Alfenas para fechamento controlado.

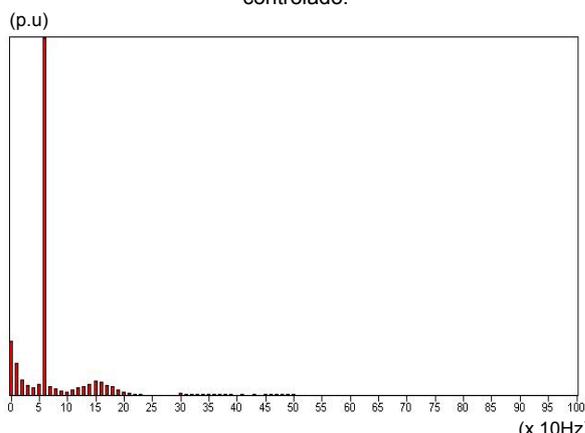


Figura 8 – Frequências da tensão fase C na SE Alfenas para fechamento controlado.

A duração da distorção na forma e amplitude da onda durou aproximadamente 15ms, de 25 a 40ms.

As taxas de crescimento foram de 90kV/ms e 32kV/ms.

A frequência de 150Hz e a componente contínua foram de maior influência na distorção. Porém, comparada com a manobra não controlada, tiveram menores amplitudes.

Para esta medição a crista máxima de tensão chegou a 150kV, ou 1,3p.u..

6.2.2 Tensões no sistema Caratinga sem e com os reatores de pré-inserção

#### a) Sem reatores de pré-inserção

As figuras 9 e 10 apresentam uma amostragem das formas de ondas das tensões durante as medições no sistema Caratinga sem os reatores de pré-inserção.

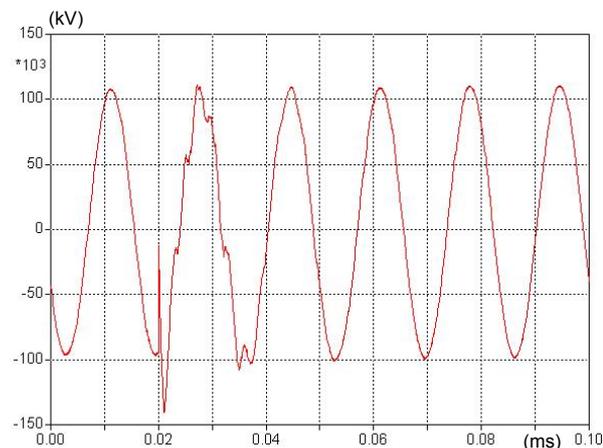


Figura 9 – Tensão fase B na SE Caratinga para fechamento sem reator de pré-inserção.

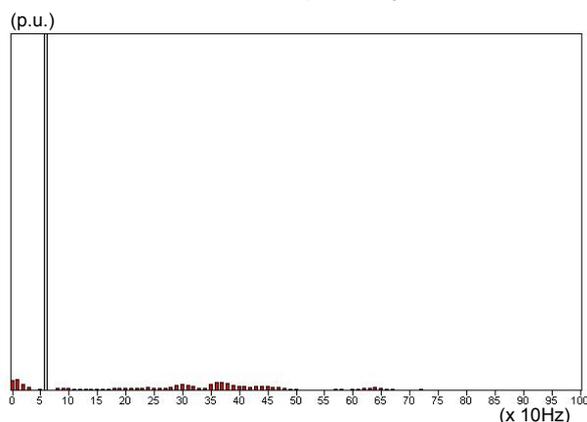


Figura 10 – Frequências da tensão fase B na SE Caratinga para fechamento sem reator de pré-inserção.

A duração da distorção na forma e amplitude da onda durou aproximadamente 20ms, de 20 a 40ms.

A taxa de crescimento foi de 125kV/ms.

A frequência de 370Hz e a componente contínua foram de maior influência na distorção.

Para esta medição a crista máxima de tensão chegou a 140kV, ou 1,2p.u..

#### b) Com reatores de pré-inserção

As figuras 11 e 12 apresentam uma amostragem das formas de ondas das tensões durante as medições no sistema Caratinga com os reatores de pré-inserção. As componentes de alta frequência presentes ao longo da onda senoidal

são ruídos do sistema de medição, e portanto, devem ser desprezadas.

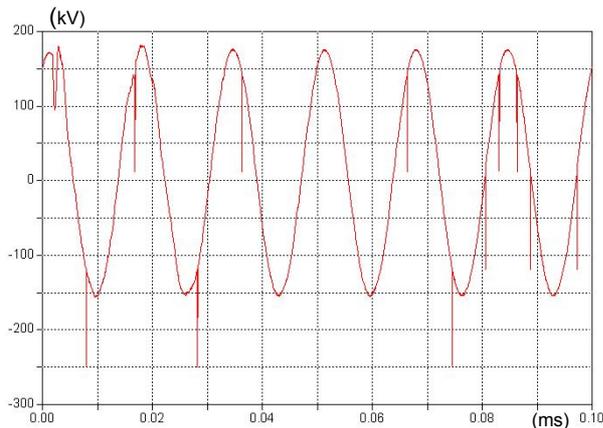


Figura 11 – Tensão fase B na SE Caratinga para fechamento com reator de pré-inserção.

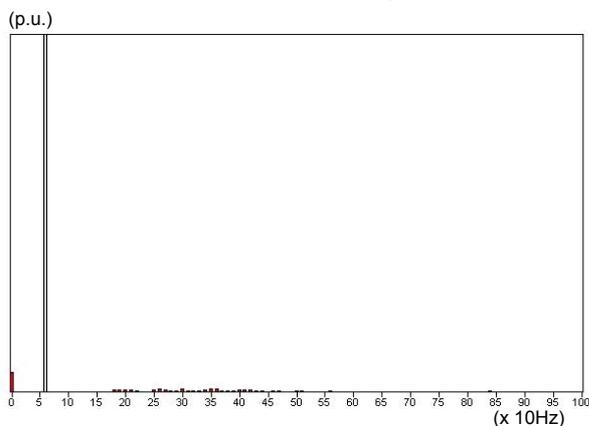


Figura 12 – Frequências da tensão fase B na SE Caratinga para fechamento com reator de pré-inserção.

A duração da distorção na forma e amplitude da onda equivale praticamente ao tempo de carga do banco.

A taxa de crescimento foi de 25kV/ms.

A frequência de 350Hz e a componente contínua foram de maior influência na distorção. Porém, a ordem de grandeza das componentes alternadas passou para valores bem inferiores aos da manobra sem reatores.

Para esta medição a crista máxima de tensão chegou a 116kV, ou 1,03p.u..

## 7.0 - AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos ao professor Wallace do Couto Boaventura e ao graduando Leonardo Aquino Costa do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG.

## 8.0 - CONCLUSÕES

A aplicação do fechamento controlado para disjuntores na manobra de bancos de capacitores se mostrou eficaz na redução dos transitórios impostos ao sistema. Houve redução tanto na crista máxima da tensão transitória quanto nas componentes de frequência geradas pelas manobras.

Foi possível, na prática, conhecer os níveis de mitigação oferecidos pela técnica convencional de reatores de pré-inserção na energização com resultados superiores aos obtidos na manobra controlada em alguns casos.

As simulações digitais mostraram-se eficazes para a caracterização de eventuais distúrbios de tensão no sistema elétrico associado quando da energização de banco de capacitores.

Os resultados da investigação prática ajudaram na consolidação das técnicas de mitigação convencionais e de manobra controlada, demonstrando as respectivas contribuições para a qualidade da energia suprida.

## 9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Luiz Henrique S. Duarte, Francisco Castro Junior, Marconis S. Novais, "Investigação Comparativa de Tecnologias Aplicáveis a Manobra de Bancos de Capacitores de Alta Tensão", XVII SNPTEE, Uberlândia, 2003.
- [2] Roger C. Dugan, "Electral Power Systems Quality", McGraw-Hill, 1996.
- [3] Glássio Costa Miranda, Selênio Rocha Silva, "Qualidade de Energia Elétrica", Curso de Extensão em Engenharia SEE, dezembro de 1998.