

# Estudo de mitigação de transitórios de chaveamento de capacitores

Os transitórios eletromagnéticos no sistema elétrico de um terminal integrador portuário motivou o estudo aqui apresentado, em que se realizaram 12 simulações computacionais considerando três alternativas de solução para a redução das perturbações, envolvendo reatores e resistores em série com os bancos de capacitores e chave seccionadora a vácuo com sistema de fechamento na passagem pelo zero de tensão. Veja os resultados.

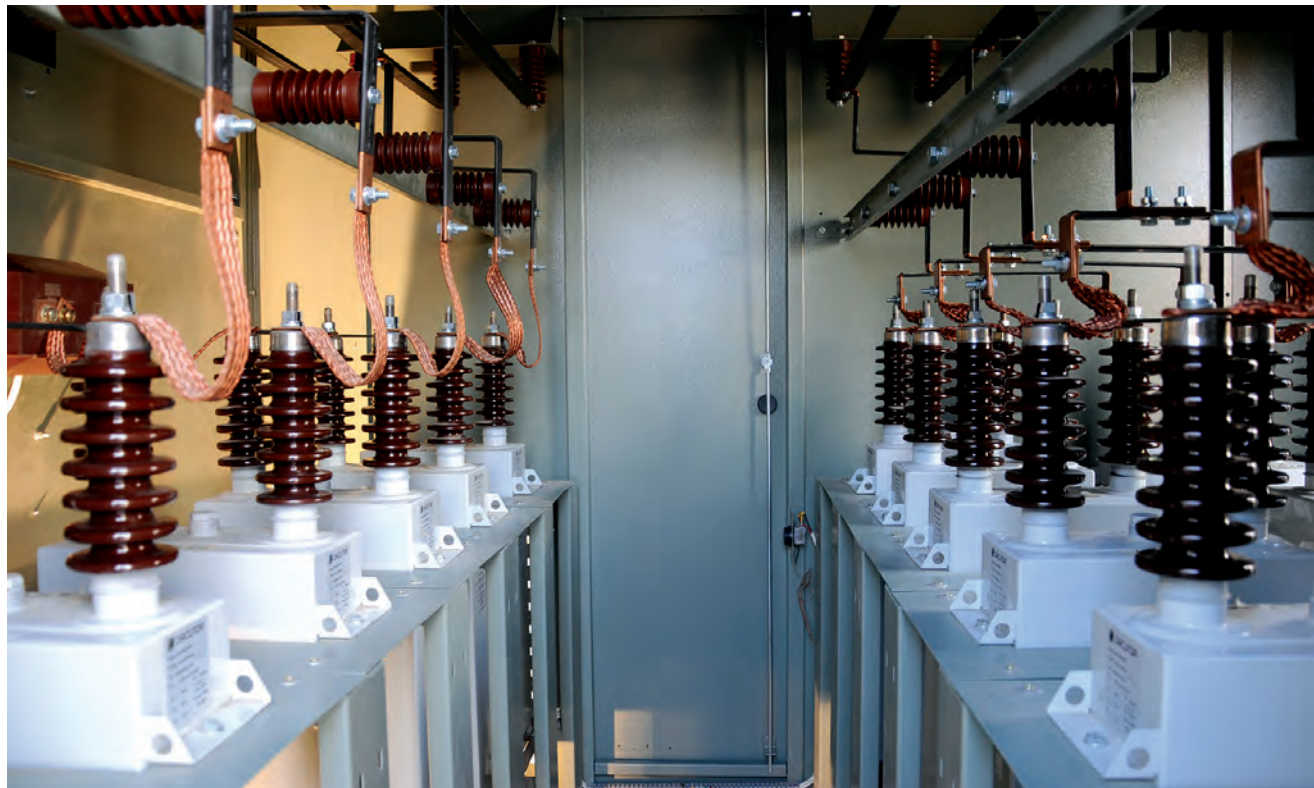
Glássio Costa de Miranda, da Universidade Federal de Minas Gerais, e Henrique Fantoni Primo, da SM&A Sistemas Elétricos

Devido à necessidade da correção do fator de potência na entrada do sistema elétrico analisado neste trabalho, conforme o

Prodlist - Procedimentos de Distribuição da Aneel - Agência Nacional de Energia Elétrica, e a Resolução Aneel nº 414, de 09 de setembro de

2010 (que estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica), fez-se necessária a inclusão de um montante de reativos da

Tepeco



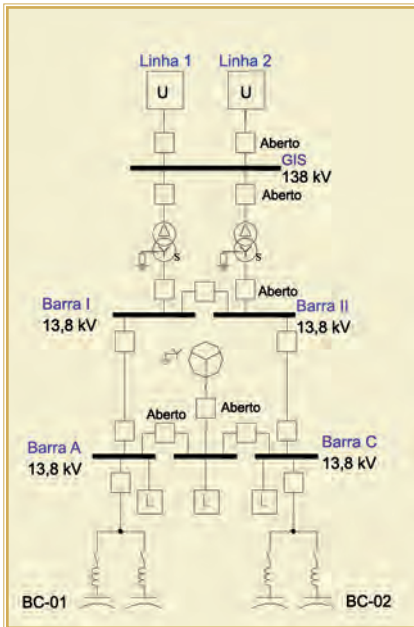


Fig. 1 – Diagrama unifilar do sistema analisado

ordem de 4,4 Mvar em 13,8 kV. Essa potência reativa foi dividida em quatro estágios de 1,1 Mvar cada, agrupados dois a dois nas barras A e C mostradas na figura 1, e chaveados de acordo com a operação das cargas da planta industrial. Neste trabalho são analisadas três alternativas para a mitigação dos transitórios (denominados de oscilatórios pela norma IEEE Std.1159 (2009)

Tab. I – Resultados do fluxo de potência para as cargas alimentadas na barra A

Tensão trifásica	13,8 kVA
Potência aparente (S)	6115,87 kVA
Potência ativa (P)	5016,51 kW
Potência reativa (Q)	3498,36 kvar
Fator de potência (fp)	0,82i
Corrente nominal (In)	255,76 A

Tab. II – Resultados do fluxo de harmônicos

Barra	Tensão (kV)	DHTv (%)	
		Com BC	Com FH
GIS	138	0,7	0,1
I	13,8	12,2	1,1
II	13,8	12,2	1,1
A	13,8	12,7	1,1
B	13,8	12,6	1,3
C	13,8	12,6	1,3

[1]) causados pelo chaveamento desses bancos. Tais transitórios duram em torno 150 a 200 ms e podem provocar desligamentos indevidos de cargas sensíveis (inversores de frequência e equipamentos eletrônicos) e queima de reatores e bancos

de capacitores e outros elementos do sistema elétrico.

### Modelamento do sistema

Modelou-se o sistema elétrico do terminal integrador portuário no programa *ATPDraw*, considerando uma fonte de tensão trifásica a partir do modelo *AC source* (1&3), com 13,8 kV<sub>RMS</sub> entre fases e uma corrente de curto-circuito trifásica igual 5,2 kA, calculada conforme a norma IEC 60909 [2].

As cargas alimentadas na barra A foram modeladas como uma carga equivalente a partir do modelo *RLC 3-ph*, de acordo com os valores apresentados na tabela I.

Utilizaram-se dois estágios com conexão duplo-estrela isolada para o modelamento dos bancos de capacitores BC-01 e BC-02, sendo duas unidades capacitivas de 183,33 kvar em 13,8 kV por fase, totalizando 1,1 Mvar por estágio. As unidades foram modeladas como elementos lineares a partir do modelo *Capacitor*.

O modelo *RLC 3-ph* foi utilizado para a representação dos cabos C-01, C-02 e C-03 da figura 2, considerando-se os parâmetros elétricos obtidos de catálogo de cabo de média

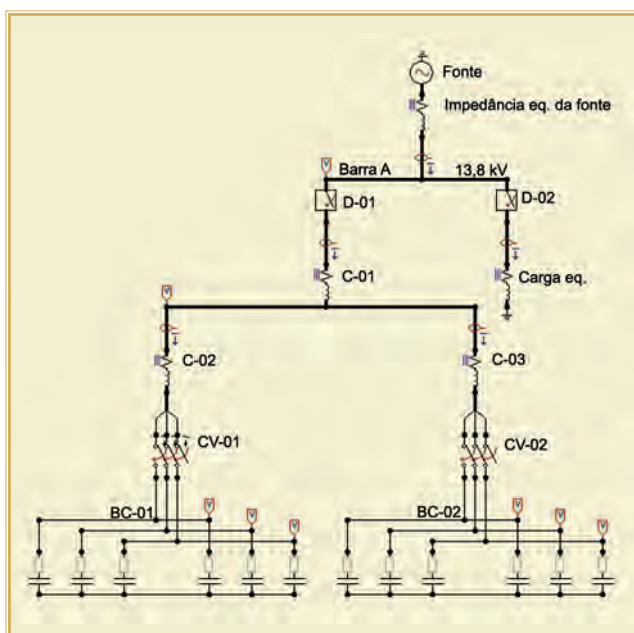


Fig. 2 – Modelamento do sistema elétrico equivalente com bancos de capacitores

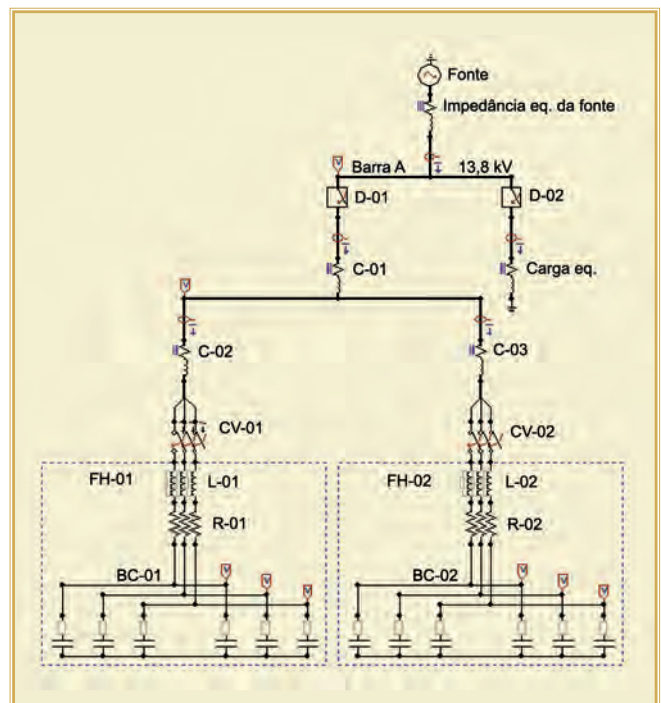


Fig. 3 – Modelamento do sistema elétrico equivalente com filtros de harmônicos



## Transformador Geafol

50 anos de qualidade, confiabilidade e segurança

Aliar eficiência energética à segurança de pessoas e não agressão ao meio ambiente é o desafio básico de todo projeto de distribuição de energia.

O transformador de distribuição a seco Geafol oferece confiabilidade, versatilidade, segurança, sendo adequado a qualquer tipo de instalação, de shopping centers a projetos on e off-shore, passando por projetos de geração renováveis, como eólicos e fotovoltaicos.

A qualidade do Geafol é comprovada por uma história de 50 anos e mais de 120.000 transformadores produzidos mundialmente.

[siemens.com/geafol](http://siemens.com/geafol)

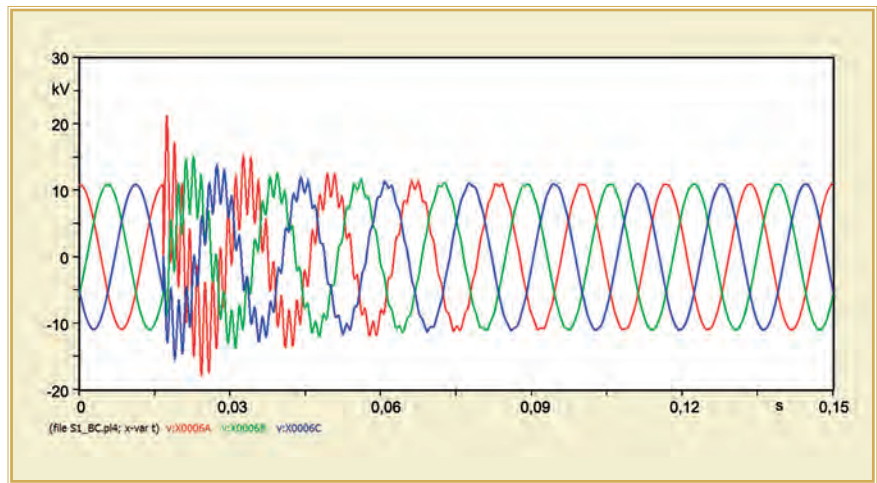


Fig. 4 – Simulação 1: Tensões na Barra A durante a energização do banco de capacitor BC-01

tensão e as seguintes características: modelo *Eprotenax* (Prysmian), um cabo monopolar por fase, seção 50 mm<sup>2</sup>, classe 15 kV e comprimentos de 15 m (C-01) e 5 m (C-02 e C-03).

Para a mitigação dos transitórios eletromagnéticos gerados durante o chaveamento dos bancos de capacitores BC-01 e BC-02, analisaram-se três alternativas, descritas a seguir.

### Alternativa 1: Inclusão de resistores (R-01 e R-02) e reatores (L-01 e L-02) em série com os bancos

Conforme apresenta a tabela II,

os valores das distorções harmônicas de tensão (DHTv) calculados, considerando apenas a inclusão dos bancos BC-01, BC-02, BC-03 e BC-04, estão acima do limite de 5% recomendados pela norma IEEE Std. 519 (2014) [3].

Dessa forma, definiram-se os valores dos resistores (R-01, R-02, R-03 e R-04) e indutores (L-01, L-02, L-03 e L-03) para se obterem filtros harmônicos (FH-01, FH-2, FH-03 e FH-04) dessintonizados de 3,8ª ordem harmônica e com fator de qualidade igual a 40, reduzindo assim os níveis de DHTv. Tais componentes

Tab. III – Simulações realizadas

Simulação	CV-01	CV-02	Alternativa	R-01, R-02, L-01 e L-02	ZVC
1	Fechamento	Aberta	–	Sem	Sem
2 (back-to-back)	Fechada	Fechamento	–	Sem	Sem
3	Fechamento	Aberta	1	Com	Sem
4 (back-to-back)	Fechada	Fechamento	1	Com	Sem
5	Fechamento	Aberta	2	Sem	Com
6 (back-to-back)	Fechada	Fechamento	2	Sem	Com
7	Fechamento	Aberta	3	Com	Com
8 (back-to-back)	Fechada	Fechamento	3	Com	Com
9	Abertura	Aberta	–	Sem	Sem
10	Fechada	Abertura	–	Sem	Sem
11	Abertura	Aberta	1	Com	Sem
12	Fechada	Abertura	1	Com	Sem

foram modelados como elementos lineares a partir dos modelos *Resistor e Indutor*.

*Alternativa 2 – Utilização de chave seccionadora tripolar a vácuo em cada estágio, com sistema de monitoramento Zero Voltage Closing (ZVC)*

Esse sistema é capaz de realizar a manobra individual de cada fase no instante em que a tensão passa por zero, no momento seguinte ao comando de fechamento. Modelaram-se as chaves a vácuo CV-01 e CV-02 como monopolares, a partir do modelo *Switch time\_controlled*;

*Alternativa 3 – Inclusão de resistores (R-01 e R02) e reatores (L-01 e L-02) em série com os bancos e utilização de uma chave seccionadora tripolar a vácuo em cada estágio com monitoramento Zero Voltage Closing (ZVC)*

Como é evidente, a alternativa 3 é a junção das alternativas 1 e 2.

A figura 2 mostra o circuito equivalente utilizado no *ATPDraw* para as simulações de manobras considerando apenas os bancos de capacitores e também as simulações adotando a alternativa 2 (chave com ZVC).

Já a figura 3 apresenta o circuito equivalente utilizado no *ATPDraw* para as simulações considerando a adoção das alternativas 1 (reatores e resistores) e 3 (reatores, resistores e chave com ZVC).

**Simulações e análises**

De forma a comprovar a eficácia dos métodos descritos acima, e também definir o mais indicado entre eles para o sistema elétrico analisado, realizaram-se 12 simulações, sendo oito manobras de fechamento (energização) e quatro de abertura das chaves CV-01 e CV02. As características dessas simulações são descritas na tabela III, e seus resultados resumidos na tabela IV.

**Inovação está no nosso DNA.**

Produzidos de acordo com a NBR 8182

**CABOS MULTIPLEXADOS DE ALUMÍNIO, PROTEGIDOS E NUS.**

**100% TESTADOS**

**neocable**

**FEICON BATIMAT**  
23º SALÃO INTERNACIONAL DA CONSTRUÇÃO E ARQUITETURA

**SUCESSO TOTAL!**  
Agradecemos a visita de todos.

ISO 9001

Um produto com a qualidade:  
**neocable alumínio**  
Emprego & Inovação em Cabos

**(11) 4891-1226**  
**neocable.com.br**

ladob.comunicacao.com.br

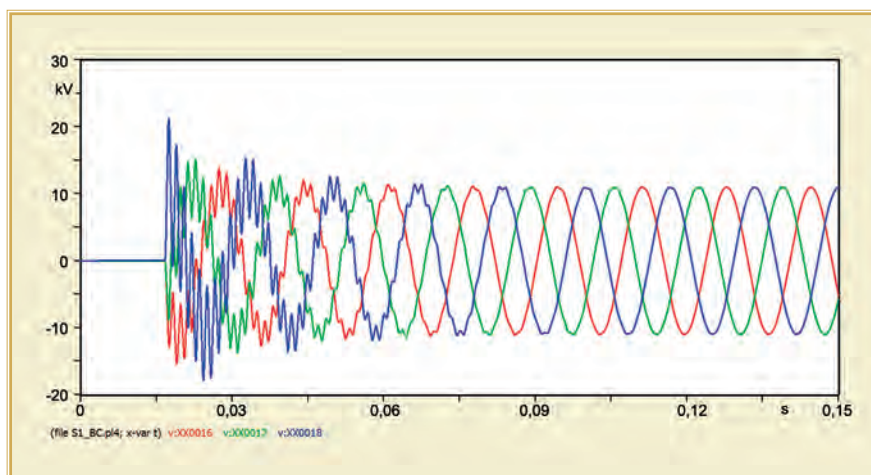


Fig. 5 – Simulação 1: Tensões no BC-01 durante a sua energização

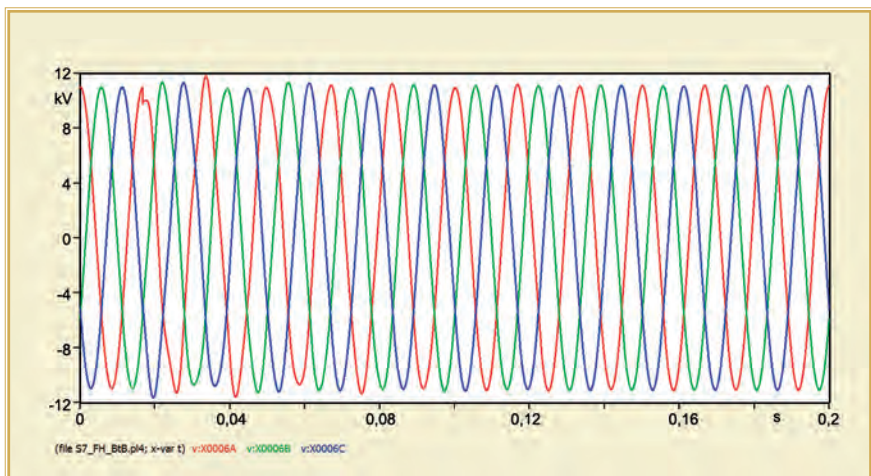


Fig. 6 – Simulação 4: tensões na barra a durante a energização do filtro de harmônicos FH-02

Conforme se observa nesta tabela IV e na figura 4, a sobretensão máxima na barra A durante a energização do BC-01, sem mitigação dos transitórios eletromagnéticos (simulação 1), chega a 186% da tensão nominal ( $V_n$ ). Este valor está bem acima do recomendado pelos fabricantes de inversores de frequência e equipamentos eletrônicos ( $V_{max} < 130\%$ , para transitórios) [4]. Apesar de as sobretensões máximas obtidas no banco de capacitores serem da ordem de 188% de  $V_n$ , pode-se verificar na figura 5 que o tempo é da ordem de milissegundos. Conforme a norma NBR 5282 (1998) [5], a suportabilidade dos capacitores neste caso é

extremamente elevada, situando-se acima deste valor.

Com adoção da alternativa 1 (simulações 3 e 4), pode-se observar, na figura 6, que a inclusão dos reatores e resistores em série com os bancos e capacitores reduziu as sobretensões na barra A para valores em torno de 105% da  $V_n$ . Já a sobretensão máxima obtidas nos bancos de capacitores foi de 185% da  $V_n$ .

Já com a alternativa 2, utilização das chaves a vácuo com ZVC (simulações 5 e 6), as sobretensões máximas na barra A e nos bancos de capacitores foram de 132%  $V_n$ , valores levemente acima do recomendado pelos fabricantes de equipamentos sensíveis.

Nas simulações 7 e 8, observou-se que, com a inclusão dos reatores e resistores em série com os bancos de capacitores e a utilização das chaves a vácuo com ZVC (alternativa 3), as tensões na barra A ficaram próximas à nominal e a sobretensão máxima nos bancos de capacitores foi de 141%  $V_n$ .

Nesta mesma tabela IV se observa que as manobras de abertura das chaves CV-01 e CV-02 (simulações 9 e 10) não provocam sobretensões significativas na barra A, porém, nos bancos de capacitores, o valor máximo obtido foi de 146%  $V_n$ . O

Tab. IV – Sobretensões e sobrecorrentes transitórias máximas obtidas nas simulações

Simulação	Sobretensões (% $V_n$ )			Sobrecorrentes ( $x I_n$ )		
	Barra A	BC-01	BC-02	Barra A	BC-01	BC-02
1	186	188	–	2,53	10,21	–
2	139	148	142	2,08	225,58	225,79
3	105	185	–	1,5	4,47	–
4	105	174	173	1,41	3,25	4,43
5	132	132	–	1,59	4,75	–
6	116	117	118	1,36	91,64	92,23
7	101	139	–	1,18	2,66	–
8	101	136	141	1,18	2,34	2,45
9	102	146	–	–	–	–
10	100	102	146	–	–	–
11	101	155	–	–	–	–
12	102	105	157	–	–	–



Fig. 7 – Simulação 12: Tensões transitórias durante o desligamento do banco de capacitor BC-02

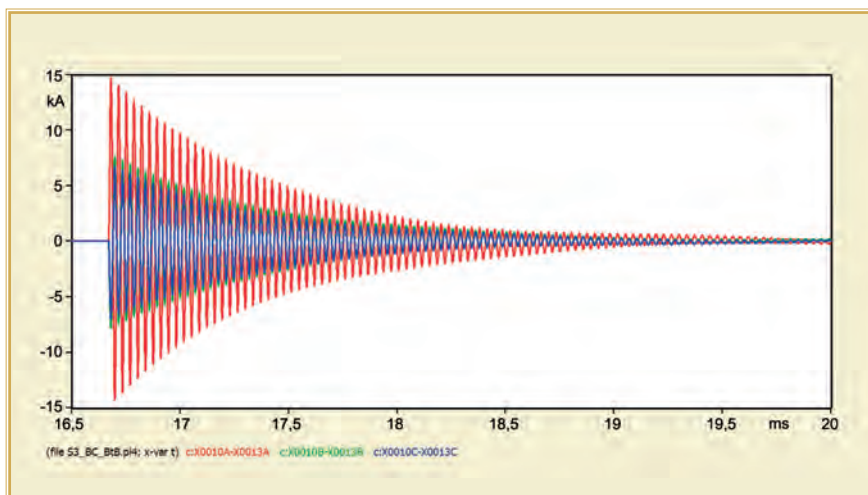


Fig. 8 – Simulação 2: Correntes transitórias durante a energização do banco de capacitores BC-02

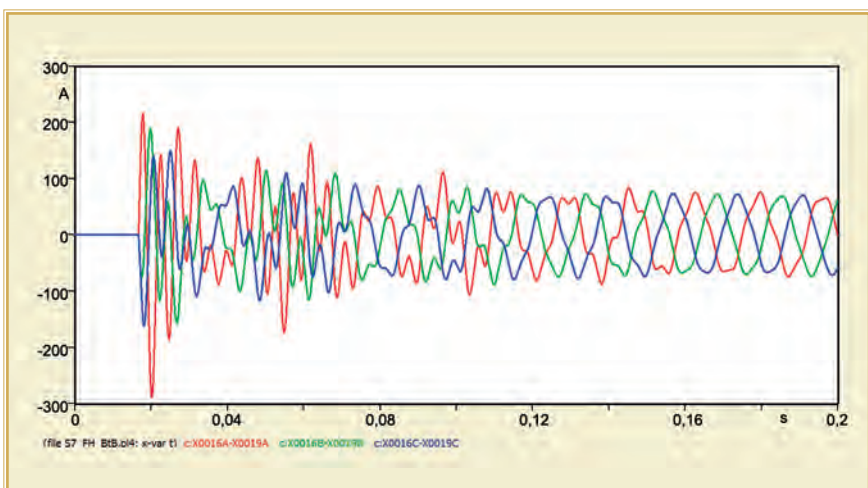


Fig. 9 – Simulação 4: Correntes transitórias durante a energização do filtro de harmônicos FH-02

mesmo se pode afirmar das tensões na barra A em relação às simulações 11 e 12, que contemplam a adoção da alternativa 1 – a sobretensão máxima nos bancos de capacitores foi de 157%  $V_n$  (figura 7).

Em relação às sobrecorrentes transitórias, como era esperado, pôde-se observar nos resultados (tabela IV e figura 8) que o valor máximo foi verificado durante a energização do BC-02, sem mitigação dos transitórios eletromagnéticos e com o BC-01 ligado (simulação 2), chegando a 225,79 vezes a corrente nominal ( $I_n$ ) dos bancos de capacitores. Este valor está bem acima do recomendado, de  $100 \times I_n$ , pela NBR 5282 [5]. Essas correntes extremamente elevadas correspondem a uma troca de energia entre os bancos BC-01 e BC-02, pouco influenciando a contribuição do sistema. Denomina-se de *back-to-back* este tipo de energização de bancos de capacitores em paralelo.

Com a inclusão dos reatores e resistores em série com os bancos (alternativa 1), pode-se observar na figura 9 que as sobrecorrentes máximas de pico obtidas na simulação 4 diminuíram para valores inferiores a  $5 \times I_n$ .

Conforme se verifica na figura 10, as sobrecorrentes máximas obtidas na simulação 6, considerando a utilização das chaves a vácuo com ZVC (alternativa 2), foram reduzidas para  $92,23 \times I_n$ , valores levemente abaixo do recomendado pela NBR 5282 [3].

Na simulação 8, observa-se que com a inclusão dos reatores e resistores em série com os bancos e capacitores e a utilização das chaves a vácuo com ZVC (alternativa 3), as sobrecorrentes máximas verificadas foram em torno de  $2,45 \times I_n$ .

Conforme mostram os resultados das simulações, das três alternativas analisadas, do ponto de vista estritamente técnico, a melhor para a mitigação dos transitórios eletromagnéticos, de forma a evitar desligamentos indevidos de cargas sensíveis (inversores de frequência e equipamentos eletrônicos) e a quei-

## Analizador de redes

### MAR722

Amplo display LCD colorido  
Memória de 8G (Cartão SD)  
Medição de corrente até 5.000 Amp  
O equipamento é fornecido com 4 alicates; trifásico + neutro



Opções de alicates:

- até 5.000 Amp\* (prazo de entrega 45 dias)
- até 3.000 Amp\*
- até 1.000 Amp\* (prazo de entrega 45 dias)
- até 100 Amp\*
- até 10 Amp\*

\*opcional na compra

## Megôhmetro de 5kV

### MD5075x

Tensões de 0,25 kV a 5 kV em passos de 25 V

Leitura máxima 5 TΩ

Software para análise dos ensaios

Memória para até 4.000 leituras

Medição automática:

Capacitância, Corrente de fuga, Voltímetro CA/CC



## Terrômetro digital

### EM4058

Resolução de 0,01 Ω

Alcance de até 20 kΩ

Medição de resistência de aterramento

Medição da resistividade do solo

Cinco frequências de medição:

270 Hz, 570 Hz, 870 Hz, 1.170Hz e 1.470 Hz

Pode ser controlado através de um dispositivo Android\*



## Microhmímetro até 100 A

### MPK105x

Display alfanumérico

Proteção térmica

Medição a 4 fios

Leitura mínima: 0,1 μΩ

Leitura máxima: 300 mΩ

Leitura direta com até 4½ dígitos

Memória para armazenar 50 registros com 80 medições cada

Impressora incorporada

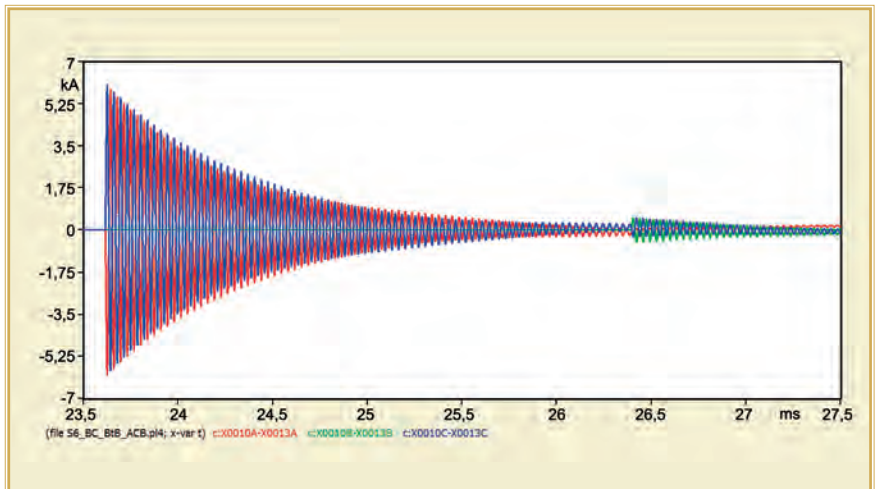


Fig. 10 – Simulação 6: Correntes transitórias durante a energização do banco de capacitor BC-02

ma de reatores, bancos de capacitores e outros elementos, é a alternativa 3, ou seja, a inclusão de reatores e resistores em série, em conjunto com chaves a vácuo com sistema ZVC (simulação 8). Essa solução, no entanto, tem custo elevado, pois uma chave com sistema ZVC chega a ser 140% mais cara do que uma chave comum.

Conforme descrito anteriormente e apresentado na tabela II, os valores de DHTv do sistema analisado, considerando apenas a inclusão dos bancos BC-01, BC-02, BC-03 e BC-04, situam-se acima do limite recomendado pela Norma IEEE Std. 519 [3]. Com a adoção da alternativa 1, que, como vimos, consiste na inclusão de reatores e resistores em série com os bancos de capacitores, obtém-se, além da redução desses níveis para valores inferiores a 5%, também a mitigação dos transitórios eletromagnéticos para valores operacionalmente aceitáveis. Dessa forma, adotou-se esta solução, por ser a que apresenta a melhor relação custo-benefício para o sistema elétrico analisado.

## Conclusões

Mediante os resultados das 12 simulações realizadas, observa-se a importância dos estudos de análise de alternativas para mitigar as solicitações transitórias de tensão e cor-

rente ao sistema elétrico, devidas a manobras em bancos de capacitores.

A forma (monopolar ou tripolar) e o instante de fechamento das chaves a vácuo influem diretamente nos valores das sobretensões e sobrecorrentes transitórias geradas no sistema. Os resultados obtidos com a utilização do sistema de monitoramento ZVC (simulações 5, 6, 7 e 8) apresentaram valores inferiores aos das simulações com fechamento tripolar (simulações 1, 2, 3 e 4). Entretanto, devido ao seu elevado custo, a chave com sistema ZVC deve ser adotada apenas quando não for necessária a redução dos níveis de DHTv, ou quando apenas a adoção dos filtros harmônicos (alternativa 1) não reduzir significativamente os valores das sobretensões e sobrecorrentes transitórias.

De maneira geral, utilizam-se chaves a vácuo para manobras de bancos de capacitores de até 36 kV. Há uma nova tecnologia em manobra de correntes capacitivas, conhecida como chave livre de transientes. Basicamente, é uma chave a vácuo com diodos em paralelo em cada polo. No momento em que a tensão passa por zero e está na mesma polaridade dos diodos, a chave passa a conduzir e, logo em seguida, o polo principal se fecha. Resultado: manobra do banco sem produção de transientes. Atualmente, essas chaves estão dis-

poníveis apenas para instalação em ambiente interno e para tensões de 15 kV, mas existem trabalhos em desenvolvimento para aplicação dessa tecnologia em ambiente externo em até 36 kV.

Para tensões superiores a 36 kV (145 kV, 245 kV, 500 kV...), utilizam-se, na prática, disjuntores de uso externo sem e com sincronismo (dispositivo com função similar ao controle ZVC), para o chaveamento de bancos de capacitores e/ou filtros harmônicos.

Neste artigo, comprovou-se que a implementação dos filtros harmônicos (alternativa 1) minimizou consideravelmente os valores das sobretensões, para 105% de  $V_n$ , e das sobrecorrentes transitórias na configuração *back-to-back*, para  $4,47 \times I_n$ , além de reduzir os níveis de DHTv de 12,2% para 1,3%, valor inferior ao limite de 5% recomendado pela normalização.

Para o sistema elétrico analisado, portanto, a opção mais indicada é a correção de reativos através da inclusão dos filtros harmônicos dessintonizados de 3,8ª ordem harmônica.

## Referências

- [1] IEEE Std. 1159-2009. *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. 2009.
- [2] IEC 60909-2001; *Short-circuit Currents In Three-Phase A.C. Systems*. 2001.
- [3] IEEE Std. 519-2014. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. 2014
- [4] Garcia, F. R.; Silva, A. M.; Almeida, P. R.; Lemes, M. I., *Aplicação de Equipamentos de Compensação Reativa em Sistemas Industriais sob os Aspectos de Harmônicos e Transitórios de Manobra: Estudo de Casos Reais*. Revisão E, CBOEEE, 2015.
- [5] ABNT NBR 5282 (1998): *Capacitores de Potência em Derivação para Sistemas de Tensão Nominal acima de 1000V – Especificação*. 1998.
- [6] ANSI C37.012-1979 – *Application Guide for Capacitance Current Switching for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis*. 1979.
- [7] Araújo, A. E.; Neves, W. L. A.: *Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistema de Energia*. 1ª ed., BH: Ed. UFMG, 2005, 260p.
- [8] Zanetta Júnior, L. C.: *Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência*. 1ª ed., SP: Ed. Livraria da Física, 2006, 312p.
- [9] Zanetta Júnior, L. C.: *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. Vol. 52, SP: Ed. Edusp – Editora da Universidade de São Paulo, 2003, 712p.
- [10] Moura, D. F. P.; Dantas, K. M. C.; Neves W. L. A.; Fernandes Júnior, D.: *Estudo de Surtos Decorrentes de Manobras em Bancos de Capacitores – Procedimentos Computacionais e Medidas Mitigadoras*. 96708, SBSE 2012.

# ENERGIA PARA UM MUNDO DE APLICAÇÕES.



Liberty 1000



LONG DURATION SERIES

BATTERY®  
CS3



CHANGHONG®

FirstPower®



Tel: +55 11 5541-5120  
Av. Engenheiro Eusébio Stevaux - 1276  
Jurubatuba - CEP: 04696-000 - São Paulo/SP  
comercial@secpower.com.br

secpower

ENERGIA CONFIÁVEL.