

MITIGAÇÃO DE TRANSITÓRIOS DE CHAVEAMENTO DE BANCO DE CAPACITORES: ESTUDO DE CASO

**ÁREA: 1- SISTEMAS DE POTÊNCIA, MÁQUINAS, CONVERSORES E ACIONAMENTOS
ELETRÔNICOS**

Gláássio Costa de Miranda

Professor na Universidade Federal de Minas Gerais

glassio@ufmg.br

(031) 99711-9966 / (031) 3409-4832

Av. Antônio Carlos, 6627, Campus Pampulha

Escola de engenharia / Departamento de Engenharia Elétrica

Henrique Fantoni Primo

Aluno na Universidade Federal de Minas Gerais e Gerente do Departamento de Estudos Elétricos da SM&A Sistemas Elétricos Ltda.

henrique.fantoni@sma-eng.com.br

(031) 99791-1821 / (031) 3292-5113

Av. Prudente de Moraes, 135, 6º andar, Santo Antônio

Belo Horizonte, MG, CEP: 30.350-093

Resumo - Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados das análises de três alternativas para a mitigação dos transitórios eletromagnéticos gerados no chaveamento de bancos de capacitores em um sistema elétrico de potência de uma planta industrial de um Terminal Integrador Portuário. Foram realizadas 12 simulações com o programa ATPDraw, comprovando-se que Alternativa 1, adoção de reatores e resistores em série com os bancos de capacitores, foi a melhor em relação ao custo-benefício, pois além da redução significativa dos níveis de THDv, de 12,2% para 1,3%, obteve-se a mitigação dos transitórios eletromagnéticos para valores de sobretensões de 105% de V_n e sobrecorrentes de $4,47 \times I_n$.

Palavras Chave - Sobretensões de manobra, chaveamento de bancos de capacitores, disjuntores à vácuo, corrente de inrush.

1. INTRODUÇÃO

Com o objetivo de reduzir custos e otimizar o desempenho do sistema de energia elétrica, concessionárias de energia e grandes consumidores comumente utilizam bancos de capacitores como alternativa para regulação de tensão, bem como para correção do fator de potência. Em geral, bancos de capacitores são manobrados diariamente para reagir às condições de carregamento do sistema, sendo este, portanto, um dos eventos mais comuns em sistemas elétricos de potência. “Manobras em bancos de capacitores em derivação podem acarretar em severas solicitações, de tensão e corrente, aos equipamentos do sistema, causando transitórios de frequências elevadas cuja intensidade depende da configuração dos componentes da rede, da potência de curto-circuito, da quantidade de bancos de capacitores e de suas respectivas potências, das reatâncias dos barramentos da subestação, da presença de para-raios e reatores limitadores de corrente, etc.” (Moura; Dantas; Neves; Júnior, 2012, 1p.). Desta forma, observa-se a necessidade de estudos específicos sobre manobras de banco de capacitores para cada sistema elétrico com o intuito de determinar os níveis de sobretensões e sobrecorrentes advindas destas manobras. Tais estudos tornam-se imprescindíveis para o correto dimensionamento de diversos equipamentos do sistema tais como para-raios, disjuntores e transformadores de corrente.

Devido à necessidade da correção do fator de potência na entrada do sistema elétrico analisado neste trabalho, conforme PRODIST (Procedimentos de Distribuição – ANEEL) e Resolução ANEEL nº 414 de 09 de setembro de 2010, fez-se necessária a inclusão de um montante de reativos da ordem de 4,4MVar em 13,8kV. Dividiu-se este montante de reativos em quatro estágios de 1,1MVar cada, sendo os mesmos agrupados dois a dois nas Barras A e C, conforme 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), devido ao chaveamento destes bancos. Estes transitórios duram em torno 150 a 200ms e podem implicar em 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.

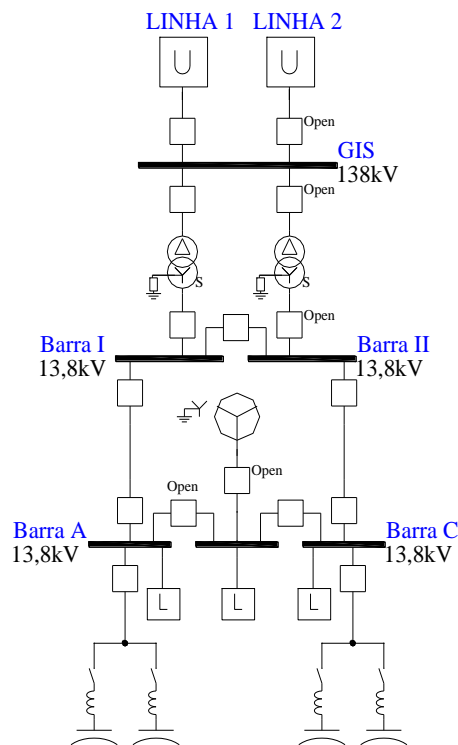


Figura 1. DU Simplificado.

2. 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 surge (1&3), com 13,8kV RMS entre fases e uma corrente de curto-circuito trifásica, calculada conforme Norma IEC 60909 [2], igual 5,2kA.

Modelou-se as cargas alimentadas na Barra A, como uma carga equivalente a partir do modelo RLC 3-ph, de acordo com os valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados do Fluxo de Potência para as cargas alimentadas na Barra A.

| DESCRIÇÃO | VALORES |
|------------------------|--------------|
| Tensão Trifásica | 13,8kVA |
| Potência Aparente (S) | 6.115,87kVA |
| Potência Ativa (P) | 5.016,51kW |
| Potência Reativa (Q) | 3.498,36kVAr |
| Fator de Potência (fp) | 0,82i |
| Corrente Nominal (In) | 255,76A |

Utilizou-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 183,33kVAr em 13,8kV por fase, totalizando 1,1MVar 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, considerando-se os parâmetros elétricos obtidos de catálogos de cabos de média tensão e as seguintes características:

- Eprotenax;
- 1 cabo monopolar por fase;
- Bitola: 50mm²;
- Comprimentos: C-01 = 15m, C-02 e C-03 = 5m;
- Classe de Isolação: 15kV.

Para a mitigação dos transitórios eletromagnéticos gerados durante o chaveamento dos bancos de capacitores BC-01 e BC-02, analisou-se três alternativas:

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

Conforme apresenta-se na Tabela 2, os valores das Distorções Harmônicas de Tensão (THD_v) 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).

Tabela 2 – Resultados do Fluxo de Harmônicos.

| BARRA | TENSÃO (kV) | THD _v (%) | |
|-------|----------------|----------------------|--------|
| | | 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 |

Desta forma, definiu-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 obter filtros harmônicos (FH-01, FH-2, FH-03 e FH-04) dessintonizados de 3,8ª ordem harmônica e com fator de qualidade igual 40, reduzindo assim os níveis de THDv. Estes elementos foram modelados como elementos lineares a partir dos modelos Resistor e Indutor.

- 2- Utilização de uma chave seccionadora tripolar à vácuo em cada estágio com um sistema de monitoramento denominado Zero Voltage Closing (ZVC).
Este 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. Modelou-se as chaves à vácuo CV-01 e CV-02, como monopolares, a partir do modelo Switch time_controlled;
- 3- Inclusão de resistores (R-01 e R02) e reatores (L-01 e L-02) em série com os bancos e a utilização de uma chave seccionadora tripolar à vácuo em cada estágio com um sistema de monitoramento denominado Zero Voltage Closing (ZVC).

O circuito equivalente utilizado no ATPDraw para as simulações de manobras considerando apenas os bancos de capacitores e as com a adoção alternativa 2 (chave com ZVC) para a mitigação dos transitórios eletromagnéticos, é apresentado na Figura 2.

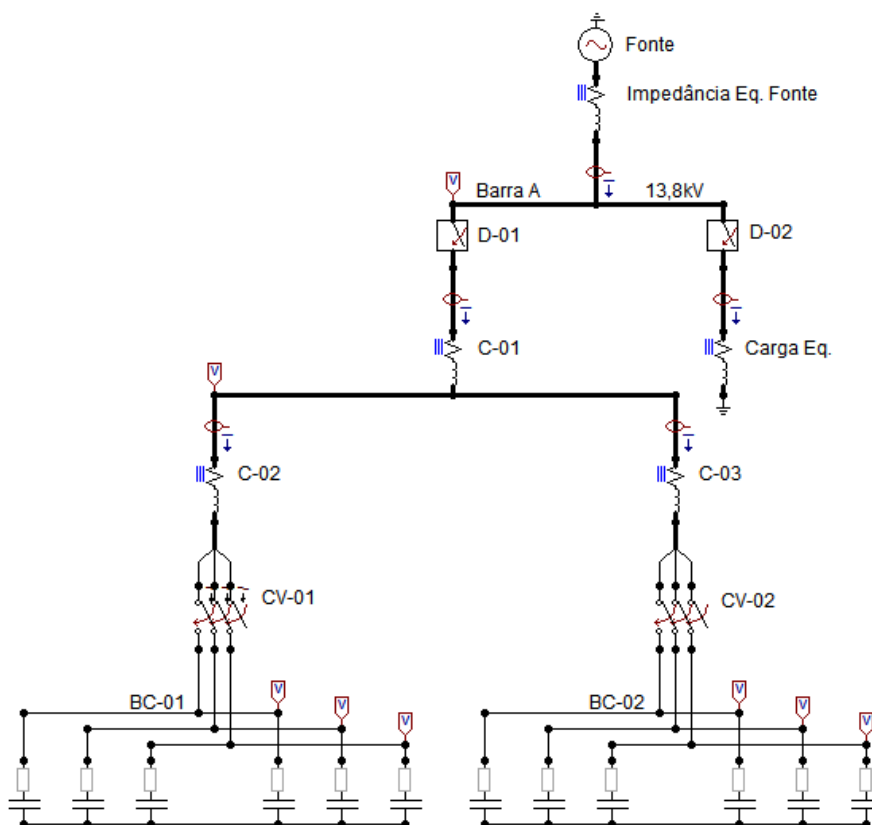


Figura 2. Modelamento do Sistema Elétrico Equivalente com BC.

O circuito equivalente utilizado no ATPDraw para as simulações de manobras considerando a adoção das alternativas 1 (inclusão reatores e resistores) e 3 (inclusão reatores e resistores e chave com ZVC) para a mitigação dos transitórios eletromagnéticos, é apresentado na Figura 3.

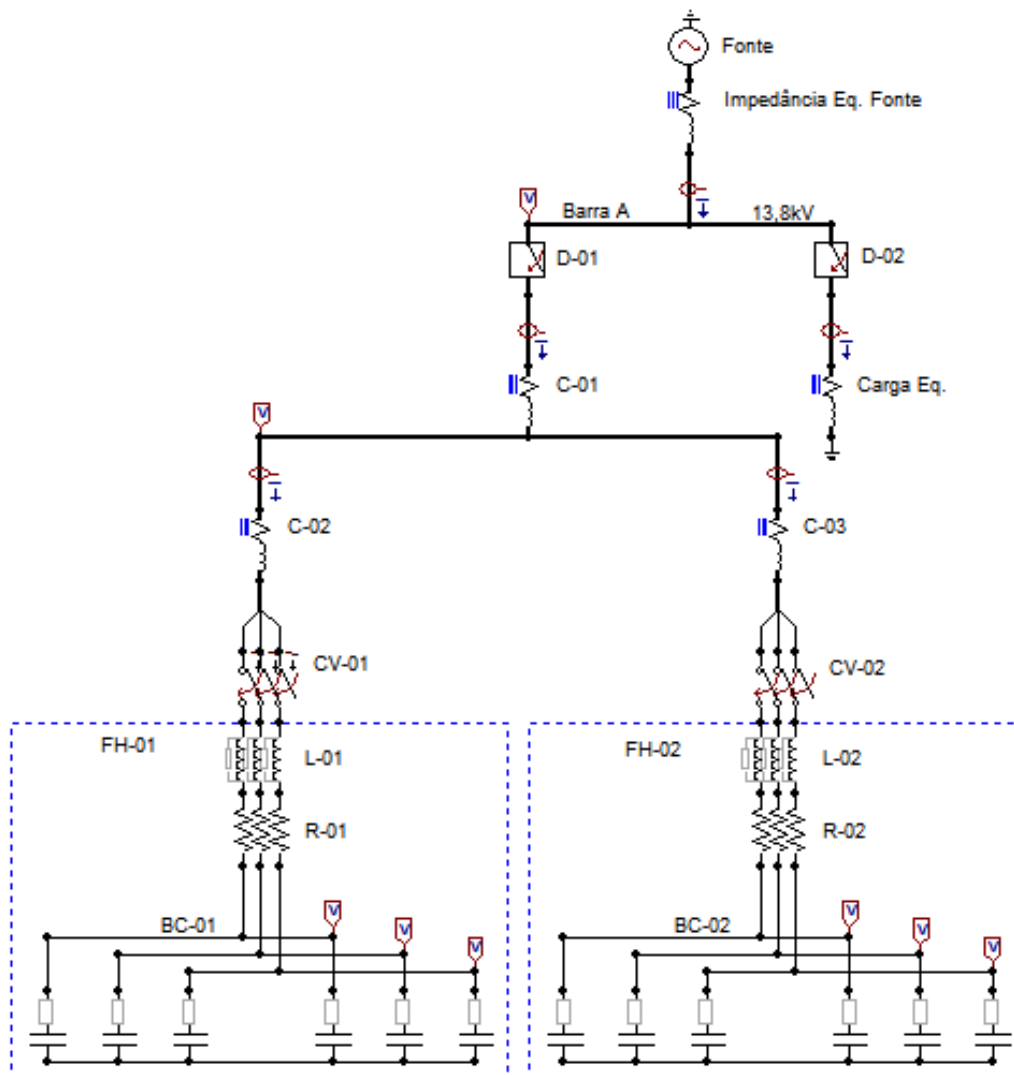


Figura 3. Modelamento do Sistema Elétrico Equivalente com FH.

3. SIMULAÇÕES E ANÁLISES

De forma a comprovar a eficácia dos métodos de mitigação descritos anteriormente, bem como definir qual o mais recomendado para este sistema elétrico analisado, realizou-se 12 simulações, sendo 8 manobras de fechamento (energização) e 4 manobras de abertura das chaves CV-01 e CV-02. As características destas simulações são descritas na Tabela 3.

Conforme pode-se observar nos resultados apresentados na Tabela 4 e na Figura 4, a sobretensão máxima obtida na Barra A foi durante a energização do BC-01, sem a mitigação dos transitórios eletromagnéticos (Simulação 1), chegando 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)” (Garcia; Silva; Almeida; Lemes, 2015, 4p.). Apesar das 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 microssegundos. Conforme a Norma NBR 5282 (1998), a suportabilidade dos capacitores neste caso é extremamente elevada, sendo superior a este valor.

Tabela 3 – Simulações realizadas.

| SIMULAÇÃO | CV-01 | CV-02 | ALTERNATIVA MITIGAÇÃO | R-01, R-02, L-01 e L-02 | ZVC |
|---------------------|------------|------------|-----------------------|-------------------------|------------------|
| 1 | Fechamento | Aberta | - | Sem a inclusão | Sem a utilização |
| 2 (back-to-back) | Fechada | Fechamento | - | Sem a inclusão | Sem a utilização |
| 3 | Fechamento | Aberta | 1 | Com a inclusão | Sem a utilização |
| 4 (back-to-back) | Fechada | Fechamento | 1 | Com a inclusão | Sem a utilização |
| 5 | Fechamento | Aberta | 2 | Sem a inclusão | Com a utilização |
| 6 (back-to-back) | Fechada | Fechamento | 2 | Sem a inclusão | Com a utilização |
| 7 | Fechamento | Aberta | 3 | Com a inclusão | Com a utilização |
| 8 (back-to-back) | Fechada | Fechamento | 3 | Com a inclusão | Com a utilização |
| 9 | Abertura | Aberta | - | Sem a inclusão | Sem a utilização |
| 10 | Fechada | Abertura | - | Sem a inclusão | Sem a utilização |
| 11 | Abertura | Aberta | 1 | Com a inclusão | Sem a utilização |
| 12 | Fechada | Abertura | 1 | Com a inclusão | Sem a utilização |

Tabela 4 – 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 | - | - | - |

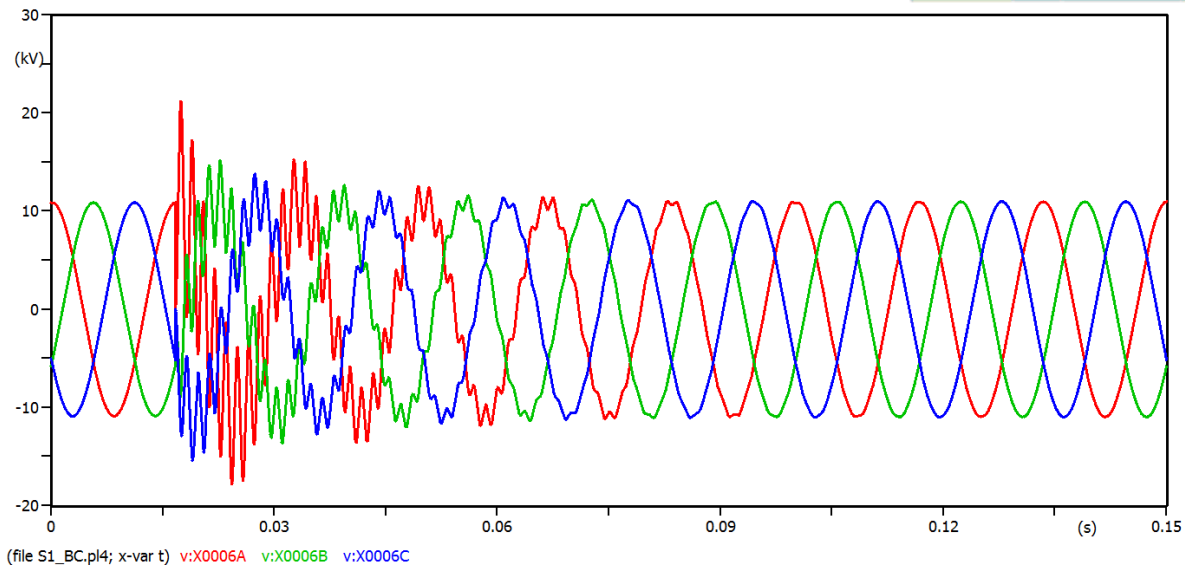


Figura 4. Simulação 1 - Tensões na Barra A durante a energização do Banco de Capacitor BC-01.

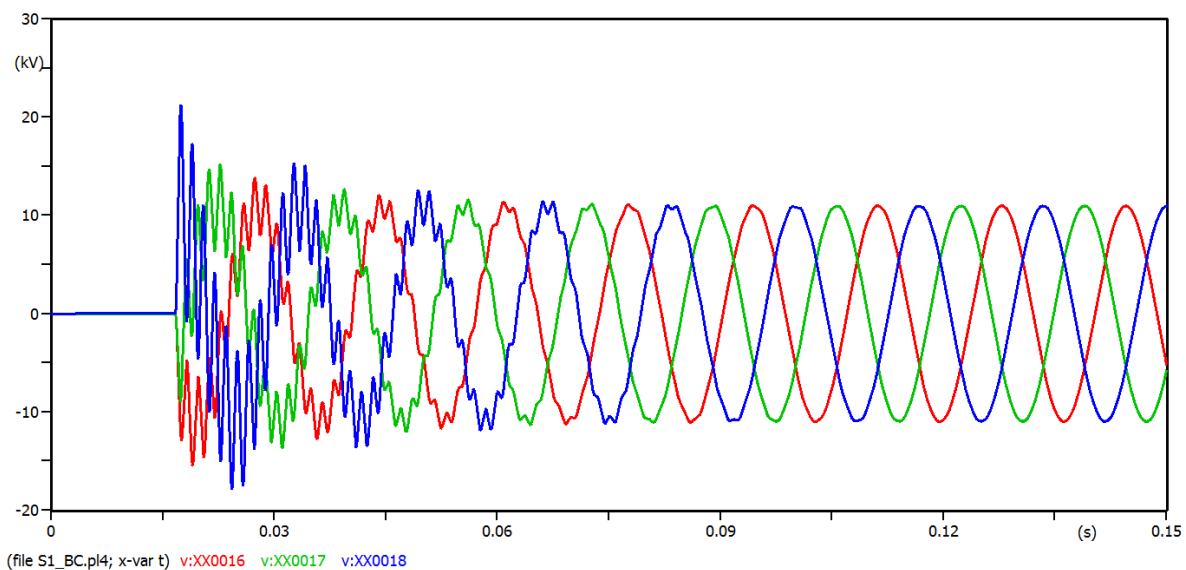


Figura 5. Simulação 1 - Tensões no BC-01 durante a energização do mesmo.

Com a utilização 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% V_n . Já as sobretensões máximas obtidas nos bancos de capacitores foram em torno de 185% V_n .

As sobretensões máximas obtidas na Barra A e nos bancos de capacitores, considerando a utilização das chaves à vácuo com ZVC, Alternativa 2 (Simulações 5 e 6), foram de 132% V_n , valores levemente acima do recomendado pelos fabricantes dos equipamentos sensíveis.

Para as Simulações 7 e 8, pode-se observar que a inclusão dos reatores e resistores em série com os bancos e capacitores e a utilização das chaves à vácuo com ZVC (Alternativa 3) as tensões obtidas na Barra A foram próximas a nominal e as sobretensões máximas nos bancos de capacitores foram de 139% V_n .

Nesta mesma tabela, pode-se verificar que as manobras de abertura das chaves CV-01 e CV-02, Simulações 9, 10, não provocam sobretensões significativas na Barra A, porém nos bancos de capacitores os valores máximos obtidos foram de 146% Vn. O mesmo pode-se afirmar das tensões na Barra A em relação as Simulações 11 e 12, que contemplam a adoção da Alternativa 1. As sobretensões máximas obtidas nos bancos de capacitores foram de 157% Vn, conforme Figura 7.

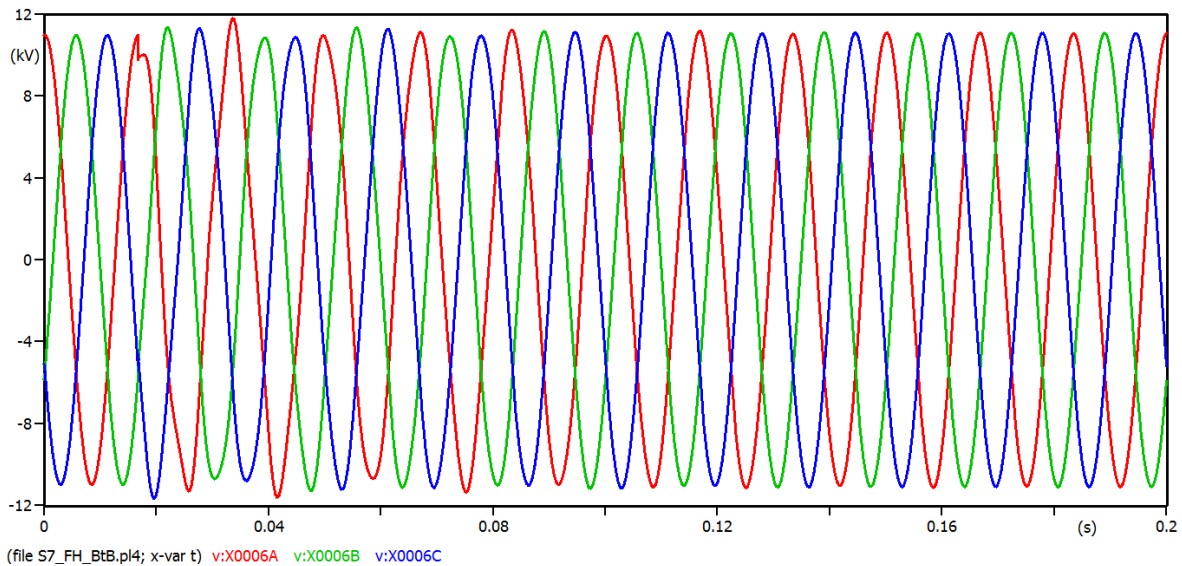


Figura 6. Simulação 4 - Tensões na Barra A durante a energização do Filtro de Harmônicos FH-02.

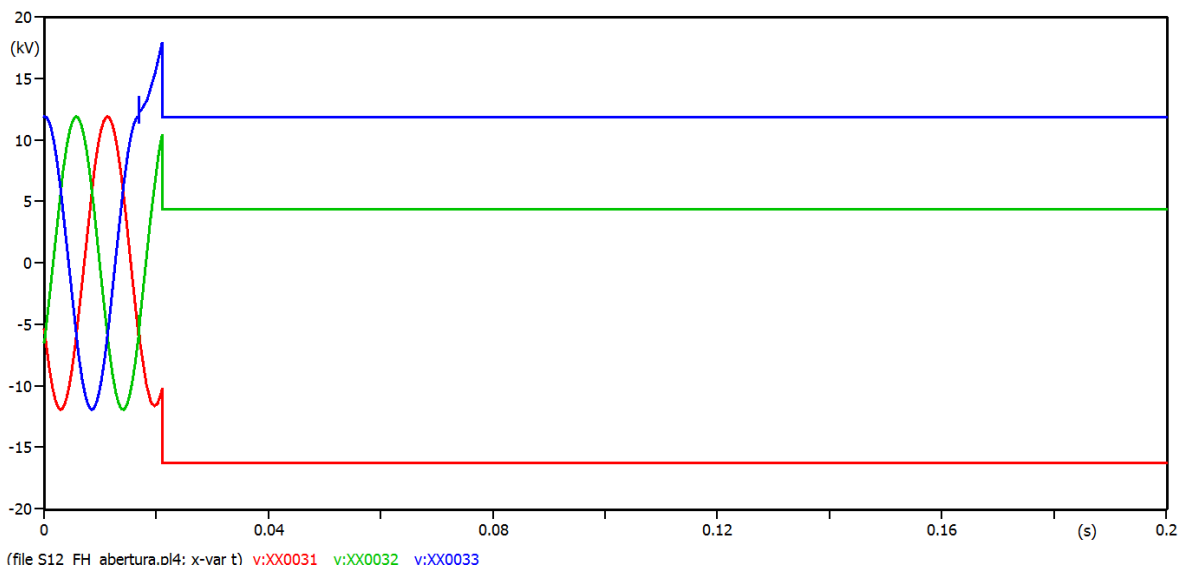


Figura 7. Simulação 12 - Tensões transitórias durante o desligamento do Banco de Capacitor BC-02.

Em relação as sobrecorrentes transitórias, como era esperado, pode-se observar nos resultados apresentados na Tabela 4 e na Figura 8, que o valor máximo obtido foi durante a energização do BC-02, sem a mitigação dos transitórios eletromagnéticos e com o BC-01 ligado (Simulação 2), chegando a 225,79 da corrente nominal (I_n) dos bancos de capacitores. Este valor está bem acima do recomendado, $100 \times I_n$, pela Norma NBR

5282 (1998). Estas correntes extremamente elevadas, correspondem a uma troca de energia entre os bancos BC-01 e BC-02, pouco influenciando a contribuição do sistema. Nomeia-se este tipo de energização de bancos de capacitores em paralelo, como back-to-back.

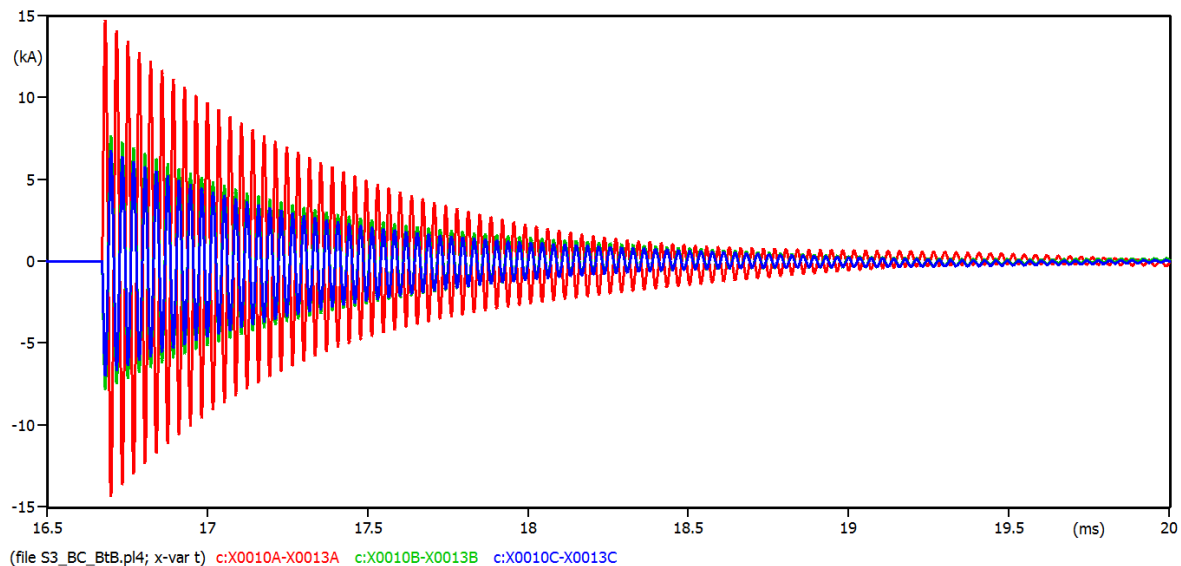


Figura 8. Simulação 2 - Correntes transitórias durante a energização do Banco de Capacitor BC-02.

Com a inclusão dos reatores e resistores em série com os bancos (Alternativa 1), pode-se observar na Figura 9 que as sobrecorrentes máximas obtidas na Simulação 4 reduziram para valores inferiores a $5 \times I_n$.

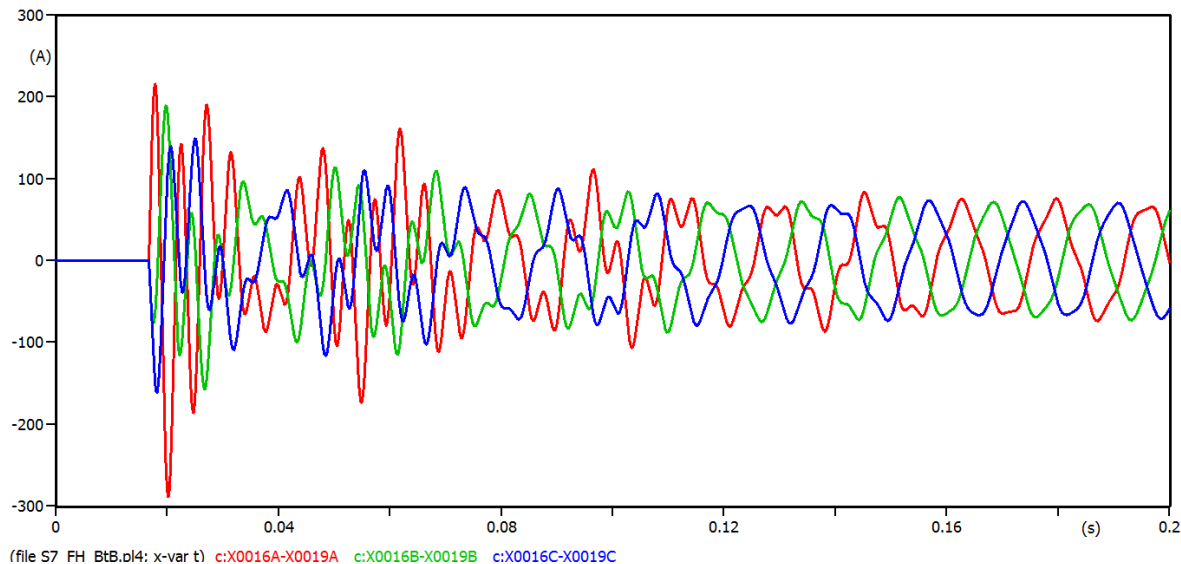


Figura 9. Simulação 4 - Correntes transitórias durante a energização do Filtro de Harmônicos FH-02.

Conforme Figura 10, as sobrecorrentes máximas obtidas na Simulação 6, considerando a utilização das chaves à vácuo com ZVC (Alternativa 2), foram reduzidas para $92,23 \times I_n$, valores levemente abaixo do recomendado pela Norma NBR 5282 (1998).

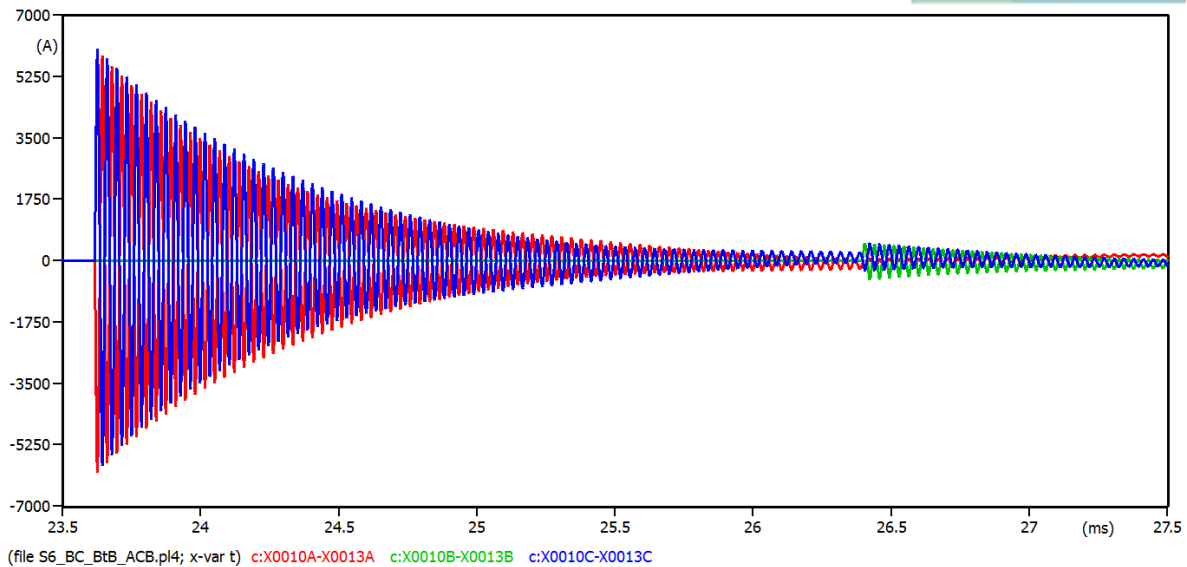


Figura 10. Simulação 6 - Correntes transitórias durante a energização do Banco de Capacitor BC-02.

Para a Simulação 8, pode-se observar que a inclusão dos reatores e resistores em série com os bancos e capacitores e a utilização das chaves à vácuo com ZVC (Alternativa 3) as sobrecorrentes máximas obtidas foram em torno de $2,45 \times I_n$.

Conforme resultados apresentados na Tabela 2, para o sistema analisado é necessária a utilização de uma das três alternativas de mitigação dos transitórios eletromagnéticos, de forma a evitar desligamentos indevidos de cargas sensíveis (inversores de frequência e equipamentos eletrônicos) e a queima de reatores e bancos de capacitores e outros elementos do sistema elétrico.

Tecnicamente a melhor solução para a mitigação destes gerados no chaveamento dos bancos de capacitores é a Alternativa 3, ou seja, a inclusão de reatores e resistores em série, bem com a adoção de chaves à vácuo com o sistema ZVC, conforme resultados apresentados na Simulação 8.

Em relação a questão financeira, pode-se afirmar que a solução descrita acima, possui um elevado custo, uma vez que além da inclusão dos resistores e reatores, o valor das chaves com o sistema ZVC chega a 140% do custo de uma comum.

Conforme descrito anteriormente e apresentado na Tabela 2, os valores de THDv do sistema analisado, considerando apenas a inclusão dos bancos BC-01, BC-02, BC-03 e BC-04, estão acima do limite recomendado pela Norma IEEE Std. 519 (2014). Com a adoção da Alternativa 1, inclusão de reatores e resistores em série com os bancos de capacitores, além da redução destes níveis para valores inferiores a 5%, temos a mitigação dos transitórios eletromagnéticos para valores operacionalmente aceitáveis. Desta forma, adotou-se a utilização da Alternativa 1 por se tratar da melhor relação custo-benefício, para este sistema elétrico analisado.

4. CONCLUSÕES

Mediante os resultados obtidos a partir das 12 simulações realizadas, observa-se a importância dos estudos relativos à análise das alternativas para mitigar as solicitações transitórias de tensão e corrente as quais o sistema elétrico pode ser submetido devido às manobras de fechamento e abertura de bancos de capacitores.

Verificou-se que a forma (monopolar ou tripolar) e o instante de fechamento das chaves à 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 elevado custo de implementação, a mesma deverá ser adotada apenas quando não for necessária a redução dos níveis de THDv

ou quando mesmo com a inclusão dos reatores e resistores em série com os bancos de capacitores (Alternativa 1), os valores das sobretensões e sobrecorrentes transitórias possam causar desligamentos indevidos de cargas sensíveis (inversores de frequência e equipamentos eletrônicos) ou a queima de reatores e bancos de capacitores e outros elementos do sistema elétrico.

De maneira geral, utiliza-se chaves à vácuo para manobras de bancos de capacitores de até 36kV. Há uma nova tecnologia em manobra de correntes capacitivas, conhecida com chave livre de transientes. Basicamente, é uma chave à vácuo com diodos em paralelo a cada polo. No momento que a tensão passa por zero e está na mesma polaridade dos diodos, ela passa a conduzir, e logo em seguida o polo principal se fecha. Resultado: manobra do banco sem produção de transientes. Atualmente estas chaves estão disponíveis apenas para instalação em ambiente interno e tensões de 15kV, mas existem trabalhos em desenvolvimento para aplicação desta tecnologia em ambiente externo com ranges de até 36kV.

Para tensões superiores a 36kV, tais como 145kV, 245kV e 500kV, utiliza-se na prática, disjuntores de uso externo sem e com sincronismo (dispositivo com função similar ao ZVC) para os chaveamentos dos bancos de capacitores e/ou filtros harmônicos.

Neste artigo, comprovou-se que com a adoção da Alternativa 1, os filtros harmônicos definidos minimizaram 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 reduzirem os níveis de THDv de 12,2% para 1,3%, valores inferiores ao limite de 5% recomendado pela Norma IEEE Std. 519 (2014).

Pode-se concluir que para o sistema elétrico analisado, recomenda-se a correção de reativos através da inclusão dos filtros harmônicos dessintonizados de 3,8ª ordem harmônica.

5. REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 5282 – JUN – 1998. **Capacitores de Potência em Derivação para Sistemas de Tensão Nominal acima de 1000V - Especificação.** 1998;
- ANSI C37.012-1979. **Application Guide for Capacitance Current Switching for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis.** 1979;
- Araújo, A. E.; Neves, W. L. A.. **Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistema de Energia.** 1ª ed., BH: Ed. UFMG, 2005, 260p.;
- 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, CBQEEE, 2015;
- IEC 60909-2001; **“Short-circuit Currents In Tree-Phase A.C. Systems.** 2001;
- IEEE Std. 1159-2009. **IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.** 2009;
- IEEE Std. 519-2014. **IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.** 2014;
- Júnior, L. C. Z.. **Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência.** 1ª ed., SP: Ed. Livraria da Física, 2006, 312p.;
- Júnior, L. C. Z.. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência.** Vol. 52, SP: Ed. Edusp – Editora da Universidade de São Paulo, 2003, 712p.;
- Moura, D. F. P.; Dantas, K. M. C.; Neves W. L. A.; Júnior D. F.. **Estudo de Surtos Decorrentes de Manobras em Bancos de Capacitores – Procedimentos Computacionais e Medidas Mitigadoras.** 96708 SBSE 2012, 6p..

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos (e inteiramente) responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.