

MODELAGEM DE UM SISTEMA REAL E CHAVEAMENTO DE BANCO DE CAPACITORES

Anderson Rodrigo Piccini^{1 2}; Marcelo Lynce Ribeiro Chaves¹; Geraldo Caixeta Guimarães¹

1 - FEELT – Faculdade de Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Uberlândia,

2 - IFPR - Instituto Federal do Paraná – Campus Paranavaí, anderson.piccini@ifpr.edu.br, lynce@ufu.br, gcaixeta@ufu.br

Resumo - O objetivo deste trabalho é apresentar resultados de simulações da modelagem de um projeto de um sistema real instalado em uma instituição de ensino. Esse modelo representa a entrada de energia em média tensão até suas cargas em baixa tensão e expõe o comportamento do sistema e seus transitórios. Quando há o chaveamento do banco de capacitores ligados na linha de baixa tensão, que são utilizados para compensação de fator de potência do sistema, é possível observar situações interessantes que comumente acontecem com esses equipamentos.

Palavras-Chave – chaveamento de banco de capacitor, fator de potência, sobrecorrente, sobretensão, transitórios.

MODELING OF A SYSTEM REAL AND CAPACITORS BANK SWITCHING

Abstract - The objective of this paper is to present results of simulations modeling a real system design installed in an educational institution. This model represents the input power at medium voltage up their loads at low voltage and exposes the system's behavior and its transient. When it has the capacitor bank switching connected to the low voltage line are used for system power factor compensation is possible to observe interesting situations that commonly occur with such equipment.

Keywords - capacitor bank switching, power factor, overcurrent, overvoltage, transient.

I. INTRODUÇÃO

A utilização de bancos de capacitores em sistemas elétricos industriais, comerciais e até mesmo residenciais são grandes, para correção do fator de potência, devido ao fato de se constituir uma de forma simples, prática e econômica [1] e também, porque as variações de demanda por compensação de reativos na maioria dos casos são lentas, o que provoca um pequeno número de manobras diárias dos bancos de capacitores [2]. Entretanto, a sua aplicação necessita de certos cuidados, pois podem ocorrer transitórios elevados e indesejados na rede. A energização de um banco de capacitores provoca distúrbios transitórios oscilatórios resultando em sobretensões e

sobrecorrentes que podem alcançar grandes valores de pico fase-terra e fase-fase. Devido a esses fatos alguns cuidados e atenção devem ser tomados, entre outros, quando se chaveia um banco de capacitores [1] [3].

Desta forma, observa-se a necessidade de estudos específicos sobre manobras de banco de capacitores para cada sistema elétrico. Neste trabalho é apresentado um estudo de um projeto existente para uma instituição de ensino federal do estado do Paraná, com o intuito de verificar os níveis de sobretensões e sobrecorrentes advindas destas manobras. Tais estudos tornam-se imprescindíveis para o correto dimensionamento desses equipamentos [4]. É interessante apresentar alguns dos principais e prováveis fenômenos transitórios que podem aparecer no chaveamento de bancos de capacitores em sistemas elétricos: Sobretensões devido à energização de um banco de capacitores isolado; Sobretensões entre fases em transformadores devido à energização de bancos de capacitores; Surtos de corrente em bancos de capacitores devido ao inrush de energização [4].

Para esse estudo foi utilizada uma ferramenta computacional chamada ATP (Alternative Transients Program). A entrada de dados e a configuração dos parâmetros da simulação foram feitas por meio da utilização de uma ferramenta gráfica denominada de ATPDraw [5]. Nesses estudos, a simulação foi importante para: modelar o sistema desde a entrada de energia passando pelos transformadores, cabos, disjuntores, as cargas e os bancos de capacitores; verificar se todo o sistema modelado confere com os dados fornecidos pelo projeto; entender como os distúrbios podem se propagar na rede; determinar a distorção na forma de onda causada pelos chaveamento dos bancos; quantificar o impacto de distúrbios e verificar se o fator de potência estará dentro da normas específicas pela concessionária local.

II. MODELAGEM DO TRANSFORMADOR

Ensaio a vazio do transformador de potência 300KVA, trifásico, frequência de 60Hz, com ligação dos enrolamentos de média tensão conectados em sistema DELTA, a 03 (três) fios, enrolamentos de baixa tensão conectados em sistema ESTRELA (neutro acessível), a 04 (quatro) fios para tensão de distribuição em 220/127V [6], as características complementares estão descritas na Tabela I, em posse dessas informações é possível calcular os dados da Tabela II, que serão utilizados



XIV CEEL - ISSN 2178-8308
03 a 07 de Outubro de 2016
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

na modelagem do transformador no ATPDraw. Esses dados foram calculados conforme sugerido pelo livro de manual de equipamentos elétricos [7].

Tabela I - Dados do transformador

Potência kVA	Tensão Primário kV Delta	Tensão Secundário kV Estrela	Resistência %	Reatância %	Impedância %
300	13,8	0,127	1,23	4,33	4,5

Tabela II - Dados calculados para o transformador

L1 AT (mH)	R1 AT (ohm)	L2 BT (mH)	R2 BT (ohm)	I(0) (A)	F(0) (Wb-esp)	Rm (ohm)
109,30570 6	11,743 8	0,00925 7	0,00099 5	0,18 4	51,8 0	16000 0

Os oscilogramas a seguir apresentam as formas de ondas de pico-a-pico e nas legendas são informados os valores RMS retirados do ATP.

O oscilograma da figura 1, apresenta as correntes eficazes das três fases dos enrolamentos primários do transformador modelado. Na sequência a figura 2, plota as tensões de entrada do equipamento sendo fornecidas pela concessionária local, na ordem de 13,8kV. A figura 3, demonstra a forma de onda das tensões nos enrolamentos secundário do transformador entre fase e fase. Esses valores eficazes simulados estão de acordo com os níveis determinados pelo fabricante e pela literatura para projeto e simulações desses equipamentos [7] [8].

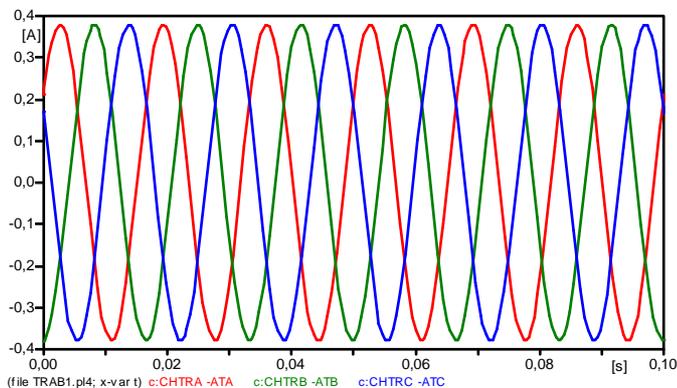


Figura 1. Corrente nos enrolamentos do primário $I_A = I_B = I_C = 0,269$ A (RMS)

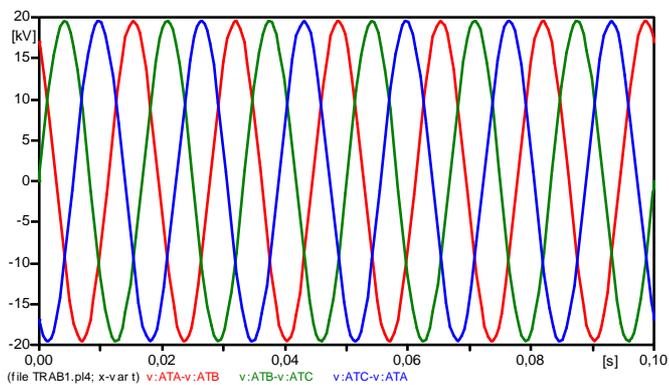


Figura 2. Tensão nos enrolamentos do primário $V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = 13,79$ V (RMS)

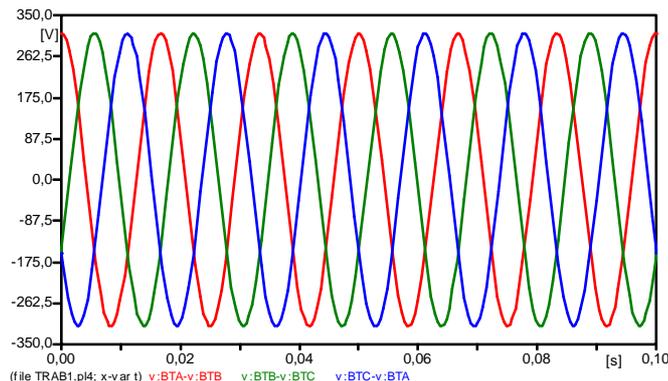


Figura 3. Tensão nos enrolamentos no secundário $V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = 219,4$ V (RMS)

No ensaio de curto circuito do secundário, no ATP é possível simular com a tensão nominal do transformador 13,8kV, para comparar a impedância percentual fornecida pelo fabricante, mas na prática com o equipamento deve-se reduzir a tensão de entrada e gradualmente deve-se aumentá-la até que obtenha-se a corrente nominal do transformador que nesse caso é de 12,55A, para que não seja danificado o equipamento, a figura 4 traz as formas de onda das correntes nos enrolamentos primários do transformador para um nível de tensão de 620V.

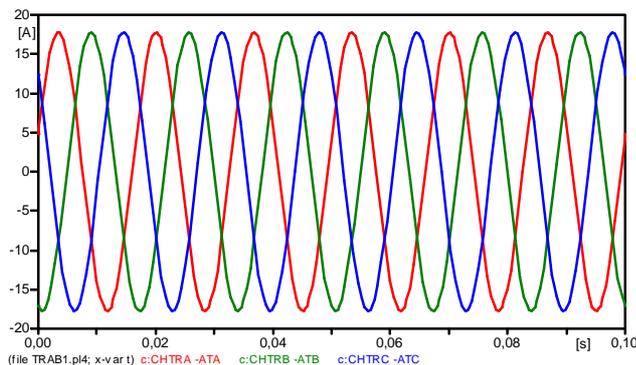


Figura 4. Corrente nos enrolamentos do primário com tensão aplicada de 620V (RMS) corrente por fase de 12,55 A (RMS).

Com esses dados é possível determinar a impedância percentual do transformador, desta forma divide-se a tensão aplicada de 620V pela tensão nominal do transformador, obtendo-se o valor de $Z_{CC} = 4,493\%$, o valor encontrado, está muito próximo do valor apresentado pelos dados do fabricante do transformador.

Corrente de magnetização (corrente de inrush) durante a energização do transformador sem o curto no secundário. Estas correntes aparecem durante a energização do transformador, devido à magnetização e à saturação do seu núcleo, sendo sua magnitude determinada pela declividade da característica de magnetização na região saturada. Nos transformadores de elevada potência, altas correntes de inrush [8], podem ser atingidas como pode ser observado na figura 5, ao fechar a chave na entrada de energia do transformador no tempo 10ms, tem-se um pico de corrente em uma das fases superior a 10 vezes a corrente nominal do transformador, a qual irá sendo amortecida no tempo.

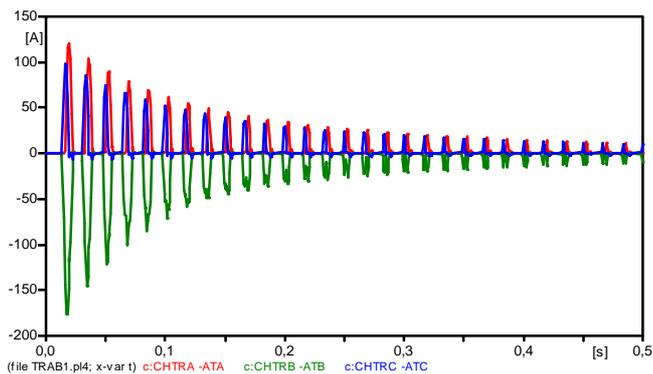


Figura 5. Corrente de Inrush do transformador

III. MODELAGEM DO SISTEMA

Após verificado que o transformador modelado esta equivalente ao instalado fisicamente no local foi inserido no sistema a impedância de curto circuito da rede de distribuição com uma potência na ordem de 500MVA, na parte de alta tensão, no secundário do transformador foi inserido um circuito RL em serie para cada fase representando a impedância do cabo que liga o transformador ao quadro de distribuição das cargas, respeitando as características do modelo do cabo fiter flex 0,6/1kV 95mm² com resistência de 0,23 ohm/km e uma reatância de 0,29 ohm/km, esses cabos tem comprimento de 9 metros para essas ligações. Na sequência foi inserido as chaves que representaram os disjuntores e logo após as cargas representadas por um resistor e indutor em paralelo ligado em estrela no circuito, com os respectivos valores conforme tabela III e IV dados de projeto [6], a figura 6 representa o sistema completo modelado no ATPDraw.

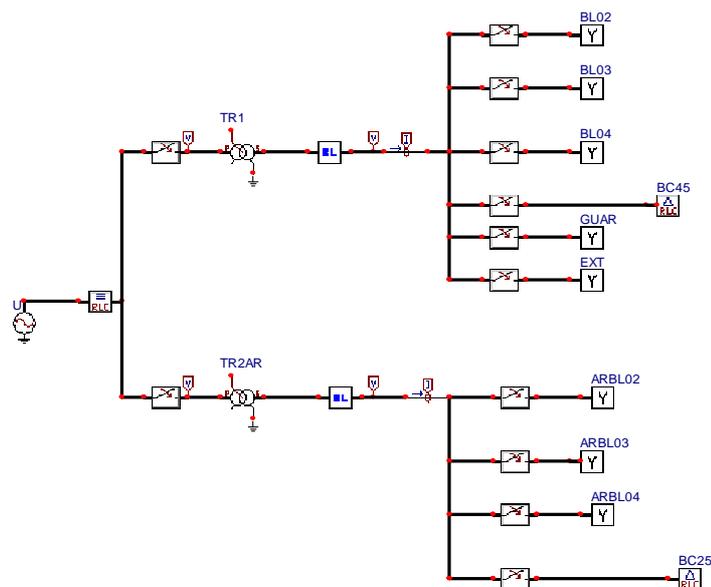


Figura 6. Circuito modelado no ATPDraw

Todas as cargas estão balanceadas conforme projeto e foram conferidas suas potencias simulando uma a uma de maneira isolada. Diante disso, serão apresentadas as simulações para alguns estudos de caso.

IV. SIMULAÇÕES DO CIRCUITO MODELADO NO ATPDRAW

A. CASO 1

Todas as cargas ligadas sem a entrada do banco de capacitor, para apresentar o comportamento do sistema, referente aos níveis de tensão, corrente, potência e fator de potência.

Tabela III - Quadro Geral de Distribuição (QGD 01). Transformador 01 (TR1) S.E. 2

DENOMINAÇÃO	Nº FASE	POT. (W)	POT. (VA)	POT. (VAR)	$R=Vf^2/P*3$ (ohm)	$L=(vf^2/Q*3)/0,377$ (mH)
QDG 01 - TR1-B2 BLOCO 2	3	99032,03	104115,1	55067,27	0,4886	2,3307
QDG 03 - TR1-B3 BLOCO 3	3	55752,63	65571,57	48157,76	0,8679	2,6651
QDG 04 - TR1-B4 BLOCO 4	3	43137,1	44914,81	22659,09	1,1217	5,6643
QDG 06 - TR1-B6 BLOCO 6	3	2905,521	3051,267	1606,092	16,6535	79,9129
QDF-20 - ÁREA EXTERNA	3	6210,721	6716,278	3976,782	7,7909	32,2742

Tabela IV - Quadros Geral de Distribuição Transformador 02 (TR2) S.E. 2 - Ar Condicionado

CIRC. DENOMINAÇÃO	Nº FASE	POT. (W)	POT. (VA)	POT. (VAR)	$R=Vf^2/P*3$ (ohm)	$L=(vf^2/Q*3)/0,377$ (mH)
QDG-1AC AR COND.	3	122930	130493,6	61872	0,3936	2,0744
QDG-3AC AR COND.	3	25831,11	27558,52	13341,73	1,8732	9,6200
QDG-4AC AR COND.	3	21582,92	22910,86	10863,27	2,2419	11,8148

Nos oscilogramas a seguir, é possível observar que as cargas estão balanceadas pois nas figuras 7 e 8 são apresentados os níveis de tensão de cada uma das fases para o secundário do transformador 01 (TR1) e transformador 02 (TR2AR), os valores de tensão eficazes dos respectivos equipamentos são 121,5V e 122,9V, no gráfico como os valores estão muito próximos ficam praticamente iguais. Mas de posse dessas informações é possível verificar que as tensões estão 4,33% e 3,22% abaixo dos valores nominal, mas dentro dos padrões modelados para o transformador. Ao verificar as tensões de linha essas também apresentam tensões mais baixas que a nominal conforme o que foi apresentado anteriormente, tensões de linha em 210,2V e 212,6V RMS.

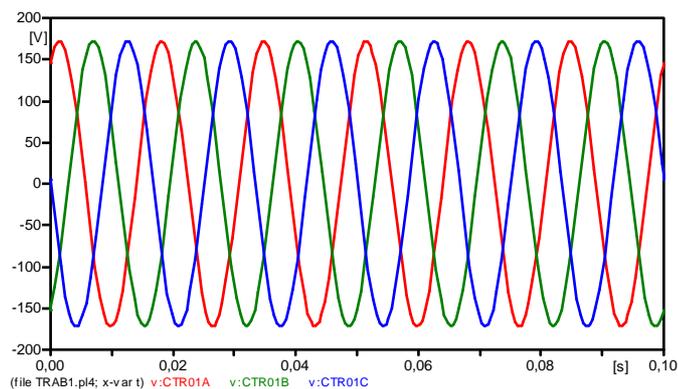


Figura 7. Tensão de fase do secundário TR1 $V_A=V_B=V_C=121,5V$ (RMS)

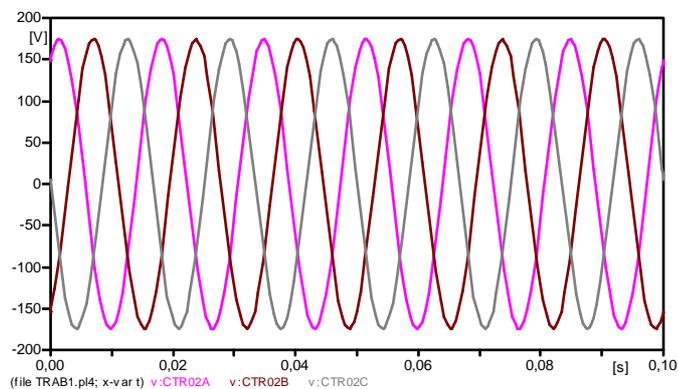


Figura 8. Tensão de fase do secundário TR2AR $V_a=V_b=V_c=122,9V$ (RMS)

Na figura 9, estão plotadas as correntes de fase no secundário do TR1, é possível identificar que estão balanceadas como já mencionado anteriormente, isso também acontece com as correntes no TR2AR, mas com valores menores, conforme: TR01 correntes eficazes das fases para esse caso na ordem de 616,9A, no TR2AR são iguais à 485,5A. Esses valores estão adequados e corretos quando observamos as potências.

Para a figura 10, é apresentado o Fourier da multiplicação de tensão e corrente da fase A para o TR1, mostrando na fundamental 0 o valor da potência ativa para essa fase, 63,28kW, ao ser somada as potências ativa das três fases o valor encontrado é de 189,84kW, na tabela III que são os dados de projeto o valor é igual a 207,04kW. Para o TR2AR o valor da potência ativa da fase A é igual a 53,25kW, ao somar as três fases temos um total de 159,75kW, na tabela IV a soma das potências é

170,34kW. Como foi representado no sistema somente cargas resistivas e indutivas essa diferença fica evidente por que o banco de capacitores ainda não foi acionado no sistema não havendo entrada de nenhuma carga capacitiva. O fator de potência de projeto para o TR1 é de 0,92276 e para o TR2AR é de 0,94132, para simulação o valor encontrado está na ordem de 0,84317 para o TR1 e no TR2AR 0,89077 comprovando que existe a necessidade de instalação do banco de capacitores para compensação de reativo do sistema.

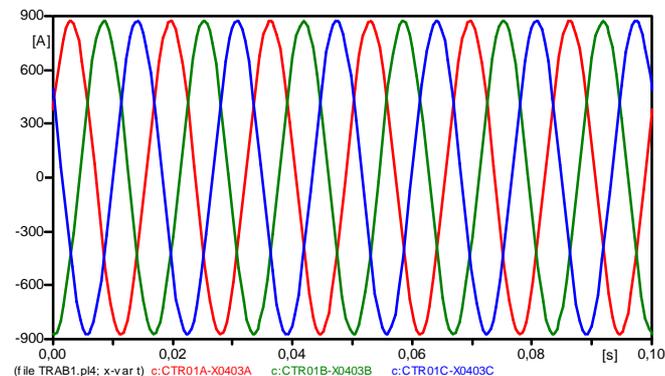


Figura 9. Corrente das Fases $I_A=I_B=I_C=616,9 A$ (RMS)

A 2ª fundamental plota o valor da potência aparente da fase A que é de 75,02kVA.

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 22/06/2016

File TRAB1.pl4 Variable v:CTR01A*c:CTR01A-X0403A [peak]
Initial Time: 0,4833 Final Time: 0,5

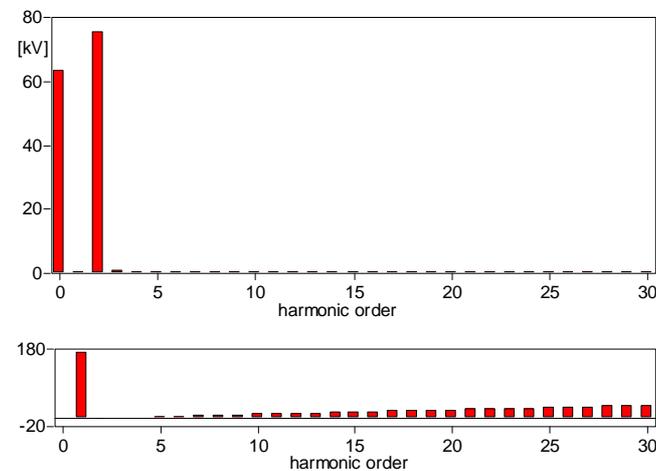


Figura 10. Fourier da multiplicação da tensão e corrente da fase A de TR1.

B. CASO 2

Todas as cargas ligadas com a entrada dos bancos de capacitores trifásicos ligados em delta ao TR1 e TR2AR, com os respectivos valores de 45kVar e 25kVar, no tempo de 0,1 segundos. Serão analisados os mesmos itens anteriores. A conexão dos bancos de capacitores pode ser feita de três formas: delta, estrela com neutro aterrado e estrela com neutro isolado, a conexão em delta é usada especialmente em classes de tensão até 2,4 kV [9].

Essa condição de estarem todas as cargas ligadas acontece normalmente todos os dias durante a semana entre as 19h00 as 22h00, pois é o período de horário de aula, onde todos os blocos, equipamentos e laboratórios estão sendo utilizados área externa iluminada e guarita ocupada.

Os oscilogramas a seguir mostram o comportamento da tensão, corrente, potência ativa e fator de potência, também é possível ver a oscilação da entrada do banco de capacitor.

O comportamento da tensão ficou representado pela figura 11 e 12, após o acionamento do banco do capacitor a tensão eficaz da fase A do TR1 122,5V e no TR2AR 123,5V, apresenta uma melhoria de 1V para o TR1 e de 0,6V para o TR2AR com relação ao CASO 1.

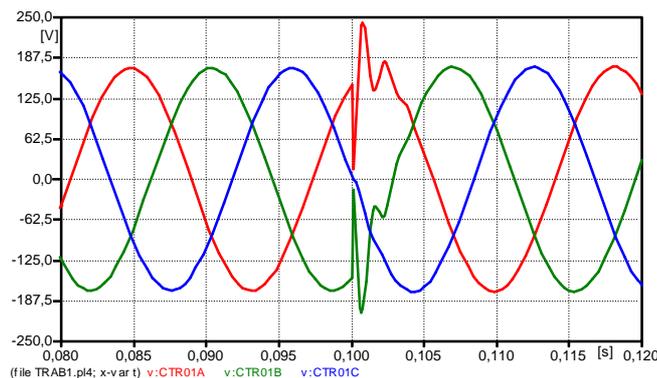


Figura 11. Tensão das três fases do secundário do TR1 com efeito da entrada do banco de capacitor de 45kVar

O chaveamento do banco de capacitor para o TR1 provoca um transitório oscilatório que atinge um pico nas fases do secundário que chega a 242,33V e é amortecido em um tempo de 4ms, tempo esse que represente aproximadamente $\frac{1}{4}$ do ciclo de 60Hz que não influencia a grande maioria de equipamentos ligados ao sistema.

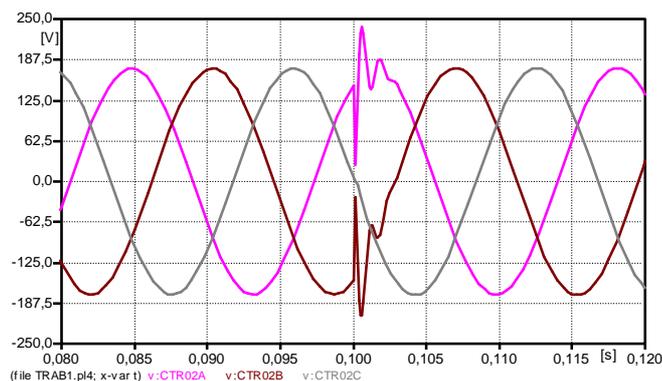


Figura 12. Tensão das três fases do secundário do TR2AR com efeito da entrada do banco de capacitor de 25kVar

Ainda na figura 12, é possível observar que o chaveamento do banco capacitor ligado ao TR2AR, também provoca um transitório nas fases do secundário com tensão 237,62V e é amortecido no tempo de 3,1ms, sendo mais rápido que o banco ligado ao TR1.

No caso da corrente das fases o comportamento das mesmas fica mais evidente, o transitório no chaveamento do banco, e após o amortecimento as correntes ficam em valores eficazes mais baixos que no CASO 1, como pode ser visto na

figura 13, as correntes no TR1 ficam em média 568A queda de aproximadamente 49A. No TR2AR o mesmo fenômeno também é identificado com correntes eficazes próximas aos 462A, diferença de aproximadamente 23A. Isso se deve a compensação de reativo no sistema.

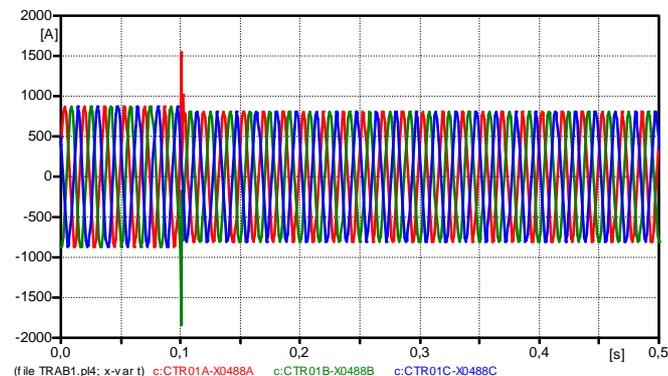


Figura 13. Corrente nas fases A, B e C do secundário do TR1

No caso de transitórios da corrente de inrush sobre os bancos de capacitores figura 14, é possível observar picos de 1211A, mais de 10 vezes a corrente de regime permanente que é de 114A, com tempo de amortecimento de 5,2ms para o banco de 45KVar e para o banco de 25KVar temos as seguintes situações, picos de 881,6A superiores a 9 vezes a corrente em regime permanente na ordem de 90,2A, tempo de amortecimento de 4,6ms. Na figura 15, apresenta a forma de onda com mais detalhes apenas da fase A, referente as informações anteriores.

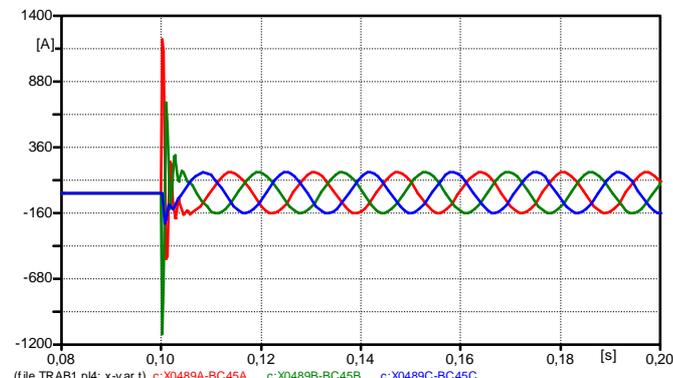


Figura 14. Transitórios de correntes no banco de capacitor de 45 kVar em 220V no momento do chaveamento.

A potência ativa para a fase A do TR1 apresenta o valor de 64,3kW, potência aparente de 69,83kVA e fator de potência fica em 0,9208. Para o TR2AR a potência ativa está no valor de 53,75kW, a potência aparente está em 57,23kVA, portanto o fator de potência deste sistema está em 0,9392, agora os dois circuitos alimentados pelos seus respectivos transformadores estão dentro dos padrões especificados pela concessionária que determina que o fator de potência da unidade consumidora deve ser superior a 0,92.

Algumas outras simulações foram realizadas executou-se o desligamento dos bancos de capacitores, observou-se que a tensão sobre os bancos dobra seu valor, mas no próximo chaveamento ao ligar novamente eles assumem as mesmas características já apresentadas.

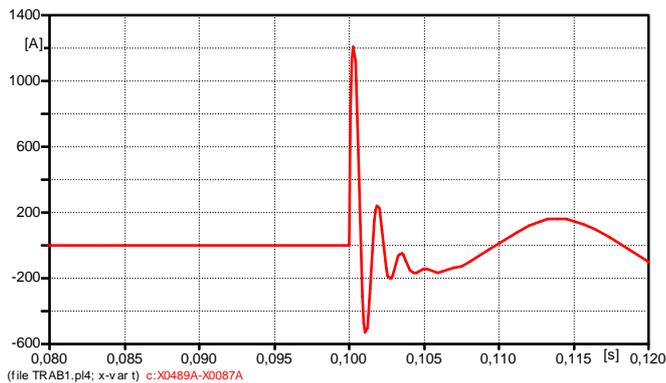


Figura 15. Corrente de inrush na partida do banco de capacitor de 45kVar fase A.

Outras possibilidades foi realizar a simulação desligando algumas cargas como na situação em um horário após o término das aulas onde apenas as cargas da área externa e guarita estão ligadas, nessas condições os bancos devem ser desligados pois as cargas são mais resistivas e não há necessidade de correção do fator de potência do sistema. E a última situação é durante o período do dia, onde os bancos devem permanecer ligados para a correção do fator de potencias, devido à grande utilização de cargas com características indutivas ligadas, havendo a necessidade da correção e compensação do fator de potência.

V. CONCLUSÕES

Mediante os resultados obtidos a partir das simulações realizadas utilizando a ATP, foi apresentado um estudo de sobretensões e sobrecorrentes transitórias, potencias e correção do fator de potência resultantes de manobras de bancos de capacitores.

A análise quanto ao sistema projetado, indica que os bancos estão corretamente dimensionados não apresentando nenhuma condição que esteja em desacordo com as normas e a literatura, foi possível concluir que esses chaveamentos de banco de capacitor na baixa tensão não expõem o sistema a nenhuma condição crítica, lembrando que todas as cargas estão balanceadas.

A próxima etapa deve ser a adequação desse modelo para as reais condições de cargas instaladas, realizar as medições no local e verificar qual a potência instalada e se o sistema encontra-se balanceado ou não, para assim efetivar novamente os ensaios e analisa-los para as devidas consideração.

REFERÊNCIAS

1. MARDEGAN, C. Capítulo XIII - Proteção de bancos de capacitores Shunt. **O SETOR ELÉTRICO**, p. 26 a 35, fev. 2011.
2. FRANCO, G. J.; SILVA, M. I.; SILVA, S. M. Operação dinâmica de bancos de capacitores com eliminação de correntes de inrush. **O Setor Elétrico**, n. Edição 53, jun. 2010.
3. PAMPLONA, F. M. P.; SILVA, M. J. G.; COSTA, R. C. **SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS**

DECORRENTES DE MANOBRAS DE BANCOS DE CAPACITORES. I CONNEPI - Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica. Natal: [s.n.]. 2006.

4. MOURA, D. F. P. D. et al. **Estudo de Surtos Decorrentes de Manobras em Bancos de Capacitores – Procedimentos Computacionais e Medidas Mitigadoras**. IV SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Goiânia: [s.n.]. 2012.
5. TAMASHIRO, M. A. et al. Comparative Study of TACS/DBM and MODELS of ATP-EMTP Applied to Power Systems Computer Simulation. **IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS**, v. 14, p. 704 - 712, fev. 2016.
6. ARAUJO, H. D.; NEGRÃO, S. **MEMORIAL TÉCNICO DESCRITIVO**. INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PARANÁ - CAMPUS PARANAVALÍ. CURITIBA. 2009.
7. FILHO, J. M. **MANUAL DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.
8. GREENWOOD, A. **Electrical Transients in Power Systems**. 2ª. ed. [S.I.]: [s.n.], 1923.
9. KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. D.; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. [S.I.]: Editora Edgard Blücher, 2005, 328 páginas p.