



Estudo dos Impactos de Transitórios de Tensão e Corrente Resultantes da Manobra de Paralelismo de Transformadores

Dirceu Bueno de Camargo
ELEKTRO
dcamargo@elektro.com.br

RESUMO

Este estudo faz parte do projeto de P&D, no âmbito dos projetos aprovados pela ANEEL, entre a empresa Elektro Eletricidade e Serviço S.A. (ELEKTRO) e a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e tem como foco o estudo de transitórios de tensão e de corrente resultantes de manobras de paralelismo entre dois alimentadores derivados de transformadores diferentes pertencentes à mesma subestação ou a subestações diferentes. O objetivo principal do estudo é o desenvolvimento de um *software*, a partir da modelagem matemática que representa o sistema físico, que simule com os dados reais de um sistema o comportamento transitório de tensões e correntes durante manobras de paralelismo. A motivação para a realização deste estudo surgiu das preocupações que surgem desse paralelismo. Para quais condições essas manobras podem ser realizadas? Quais os efeitos das tensões e correntes transitórias sobre o sistema, em especial sobre os transformadores e a chave de manobra? Espera-se que futuramente o *software* possa auxiliar os operadores de sistemas elétricos na realização destas manobras, com toda a segurança possível tanto para as equipes de trabalho envolvidas quanto para o próprio sistema.

PALAVRAS-CHAVE

Alimentadores, Distribuição, Paralelismo, Transformadores, Transitórios.

1. INTRODUÇÃO

Apresenta-se neste trabalho os resultados preliminares do estudo de transitórios de tensão e de corrente resultantes de manobras de paralelismo entre dois alimentadores derivados de transformadores diferentes pertencentes à mesma subestação ou a subestações diferentes. O programa Matlab versão 6.5 foi utilizado na realização das simulações do sistema, no desenvolvimento do *software* e para a validação do mesmo. O Matlab foi escolhido por ser uma plataforma de simulação consagrada pela comunidade científica na simulação do desempenho de sistemas de energia elétrica e por possuir excelentes recursos gráficos. A partir dos dados fornecidos pela ELEKTRO do sistema estudado foi implementado o sistema no aplicativo SimPowerSystem do programa Matlab/Simulink. Modelar matematicamente o sistema completo escrevendo as suas equações diferenciais e resolvendo-as numericamente em qualquer linguagem de programação seria uma tarefa árdua e inócua, devido ao grande número de malhas existentes e à complexidade do sistema. Por está razão, o sistema completo

foi reduzido a um modelo equivalente. Após a verificação, através de simulações que o modelo equivalente reduzido representava corretamente o sistema estudado foi elaborada a modelagem matemática do mesmo através de equações diferenciais. Fundamentado nesta modelagem matemática o *software* foi escrito na linguagem Matlab. Novamente através de simulações verificou-se que os resultados obtidos com o *software* estavam de acordo com os obtidos utilizando o SimPowerSystems. A realização de manobras de chaveamento e medições “in loco” das tensões na chave de manobra validaram o *software* desenvolvido e o modelo do sistema implementado no SimPowerSystems, uma vez que os resultados obtidos em simulação estavam de acordo com os resultados obtidos na medição em campo.

2. SISTEMA GUARUJÁ DA ELEKTRO

O sistema estudado é constituído por dois alimentadores GUT40 e GUT47 derivados de dois transformadores de 25MVA e 15MVA, respectivamente, de mesmas tensões nominais de 144,9:13,8 kV, localizados na subestação Guarujá 3. A subestação Guarujá 3 pertence a regional do Guarujá, área de concessão da ELEKTRO, localizada na região litorânea do estado de São Paulo, tem pouco mais de 3,7 mil km de extensão de rede primária atendendo a 203,8 mil unidades consumidoras na cidade do Guarujá, cidade de características turísticas, estes alimentadores servem cargas eminentemente residenciais. Com as informações fornecidas pela ELEKTRO do sistema: parâmetros das linhas, cargas dos alimentadores e características dos transformadores, o modelo do sistema foi implementado no SimPowerSystems, Figura 1. As cargas distribuídas pelos alimentadores, inicialmente dadas em potências complexas foram transformadas em impedância.

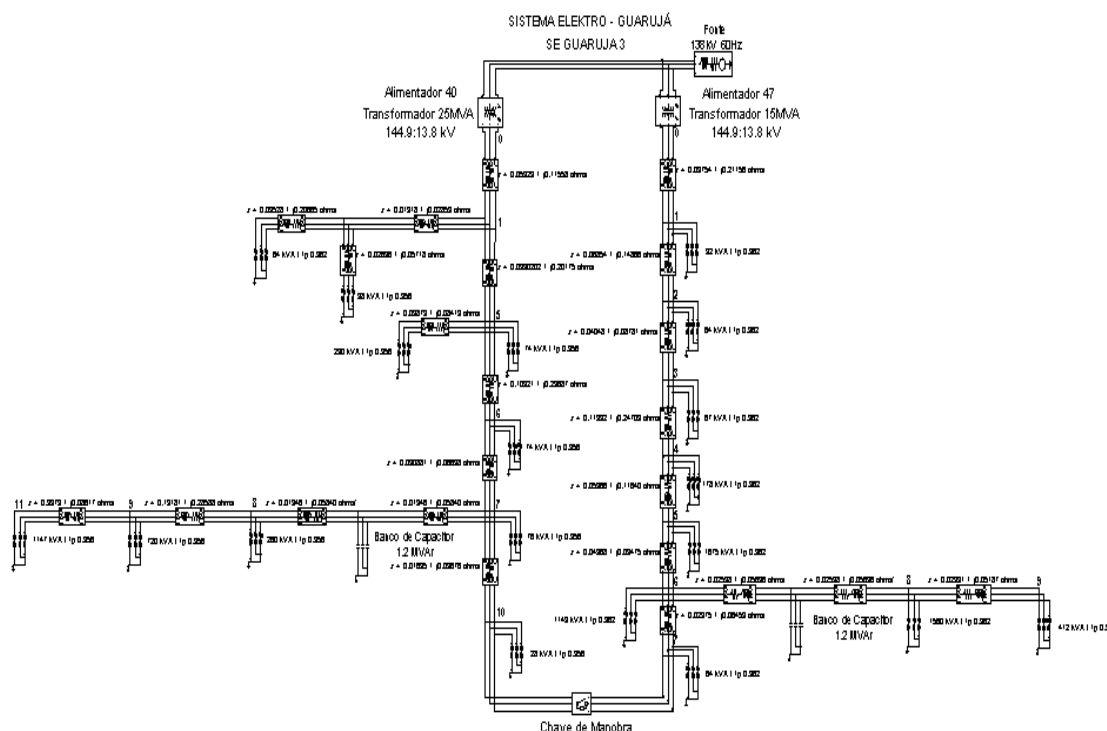


Figura 1. Modelo dos alimentadores GUT40 e GUT47

As manobras de chaveamentos (fechamento do anel) dos alimentadores foram realizadas através da chave localizada na interconexão dos mesmos. Com essa manobra os transformadores de 25MVA (GUT40) e 15MVA (GUT47), passarão a operar em paralelismo. Eventualmente a operação em paralelismo de transformadores é realizada por um período limitado de tempo, normalmente para remanejamento das cargas, mas é de interesse do COD – Centro de Operações da Distribuição, que essa operação permanecesse durante um período indeterminado de tempo. O objetivo é atender as situações contingenciais do sistema de distribuição, evitando interrupções no fornecimento aos

consumidores, principalmente durante os meses de veraneio, quando a demanda de energia aumenta consideravelmente.

3. MODELO EQUIVALENTE REDUZIDO

Uma das facilidades apresentadas pelo SimPowerSystems é sua interface gráfica visual, Figura 1, o sistema Guarujá pode ser implementado por completo com todos os seus elementos (linhas de distribuição, transformadores, banco de capacitores). Mas o objetivo do estudo é o desenvolvimento de um *software* a partir da modelagem matemática que representa os elementos físicos do sistema. Modelar o sistema Guarujá escrevendo as suas equações diferenciais e resolvendo-as numericamente em qualquer linguagem de programação seria uma tarefa árdua e inócua, devido ao grande número de malhas existente e a complexidade do sistema. Por esta razão foi utilizado um programa de redução de circuitos que através de técnicas de equivalentes externos reduziu o sistema completo a um modelo equivalente reduzido π . O sistema Guarujá foi então reduzido a dois equivalentes reduzidos π , correspondentes aos alimentadores GUT40 e GUT47, interligados pela chave de manobra, Figura 2.

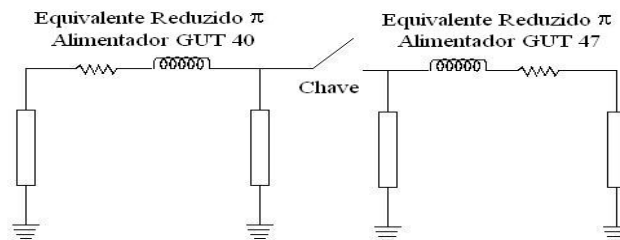


Figura 2. Modelo equivalente reduzido π dos alimentadores GUT40 e GUT47

Entretanto, os alimentadores GUT40 e GUT47 apresentam uma característica que se mostrou muito importante na análise dos transitórios de tensão e corrente, que é a presença de banco de capacitores perto da chave de manobra, Figura 1.

Quando o sistema Guarujá foi reduzido ao equivalente π , a análise das simulações demonstrou que o banco de capacitores não pode ser incluído na redução do circuito, ou seja, o trecho onde está o banco de capacitores deve ser preservado. Porque nos cálculos do equivalente os valores das indutâncias e das capacitâncias tendem a se anularem o que acaba com o efeito do banco de capacitores sobre a chave.

Isso faz com que a redução de sistemas que possuem banco de capacitores seja menor do que a redução de sistemas sem bancos de capacitores. Por esta razão, foram construídos equivalentes por partes do sistema Guarujá preservando-se os trechos onde estão os bancos de capacitores de 1,2 MVar. A Figura 3 apresenta o modelo equivalente reduzido dos alimentadores GUT40 e GUT47 com os bancos de capacitores.

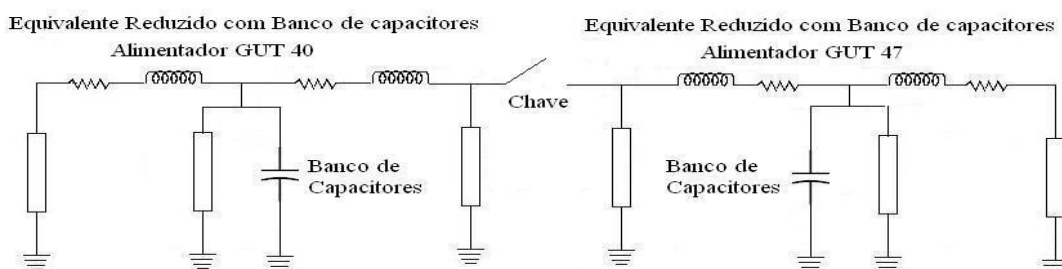


Figura 3. Modelo equivalente reduzido dos alimentadores GUT40 e GUT47 com banco de capacitores

Na Figura 4 apresenta-se o modelo equivalente reduzido implementado no SimPowerSystems.

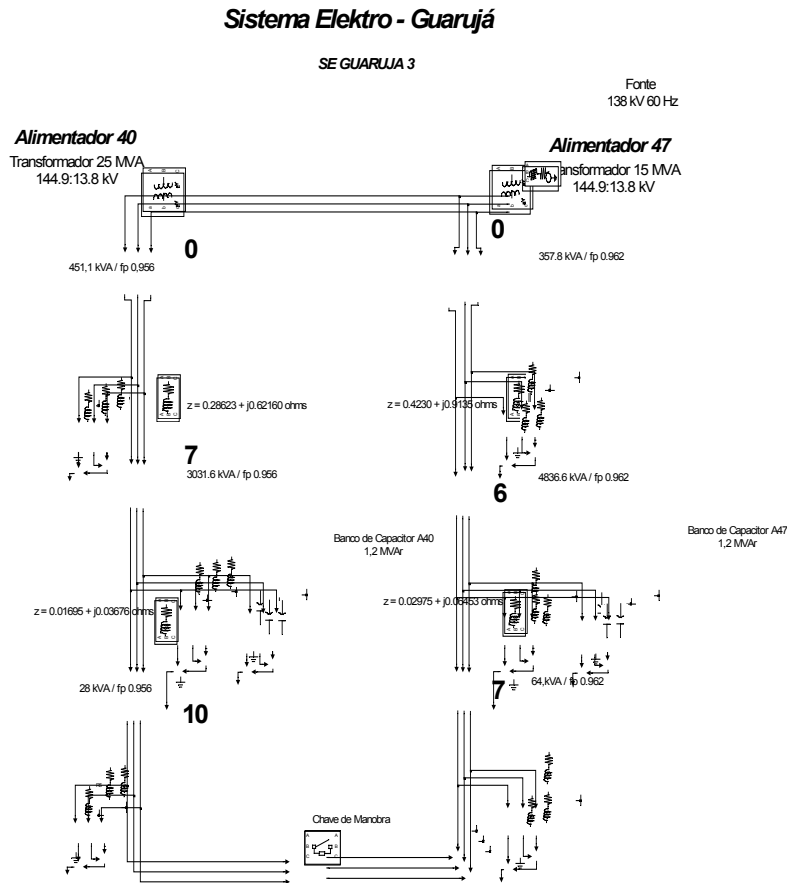
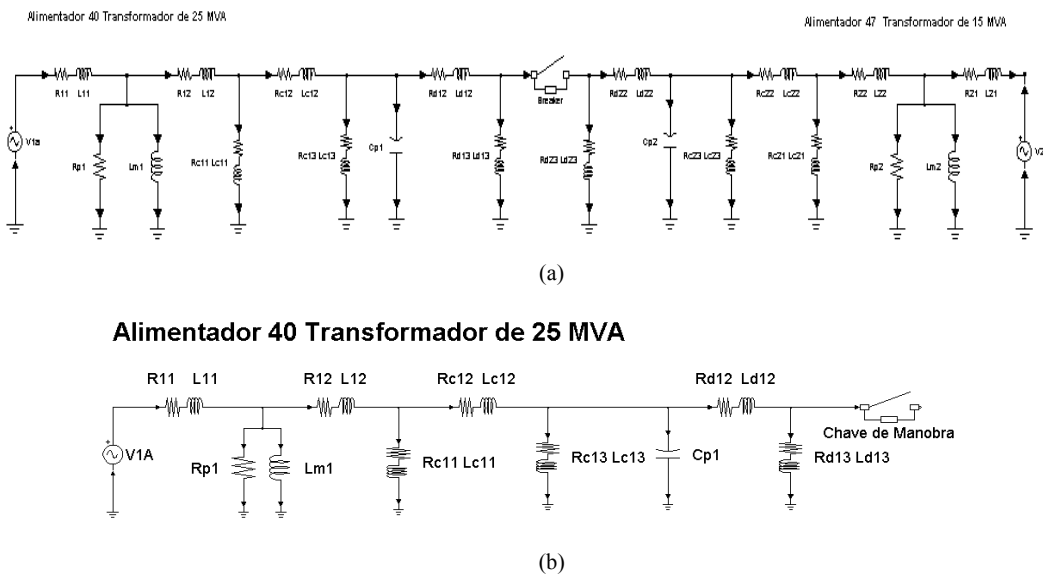


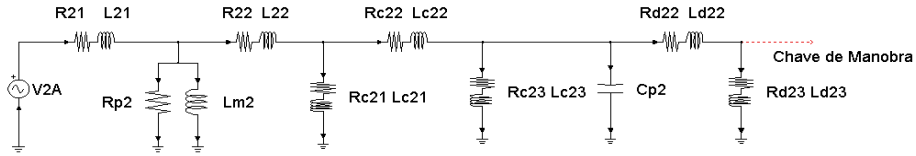
Figura 4. Modelo equivalente reduzido

Após a verificação, através de simulações, que o modelo equivalente reduzido da Figura 4 representava corretamente o sistema Guarujá foi elaborado o equacionamento do mesmo através de equações diferenciais (1).

A Figura 5 apresenta o diagrama unifilar do modelo equivalente reduzido que foi utilizado para validar o equacionamento.



Alimentador 47 Transformador de 15 MVA



(c)

Figura 5. Diagrama unifilar do modelo equivalente reduzido: a) circuito completo, b) parte à esquerda da chave, c) parte à direita da chave.

Na Figura 5a vê-se que nas suas extremidades estão as fontes de tensão (V_{1a} e V_{2a}) que representam a tensão no barramento, onde estão conectados os transformadores de 25 MVA (GUT40) e o de 15 MVA (GUT47) representados pelos seus respectivos equivalentes, em cada lado da chave estão os equivalentes reduzidos dos alimentadores, que conforme explicado anteriormente, são constituídos por um equivalente π , o banco de capacitores e o trecho da linha onde os mesmos estão localizados preservados no cálculo do equivalente.

Considerando-se que o diagrama da Figura 5a represente a fase A do sistema elétrico de distribuição numerou-se as malhas de 1 até 13 (da esquerda para a direita, adotando o mesmo sentido para as correntes de malha). Começando a análise do circuito a partir da fonte de tensão (V_{1a}) têm-se as correntes de malhas de 1 até 6 (i_1A_1, \dots, i_1A_6), Figura 5b. A malha de número 7 é a que contém a chave e sua corrente elétrica foi denotada como i_{ch} . Na seqüência a partir da malha da chave, têm-se as malhas de 8 até 13 (i_2A_6, \dots, i_2A_1) até a fonte de tensão (V_{2a}), Figura 5c.

Equacionando o circuito da Figura 5a, conforme sentido adotado da esquerda para a direita a partir da malha 1 até a 13, tem-se:

$$\begin{aligned}
 L_{11}p\dot{i}_1A_1 &= -(R_{11} + R_{p1})\dot{i}_1A_1 + R_{p1}\dot{i}_1A_2 + V_{1A} \\
 L_{m1}p\dot{i}_1A_2 - L_{m1}p\dot{i}_1A_3 &= R_{p1}\dot{i}_1A_1 - R_{p1}\dot{i}_1A_2 \\
 -L_{m1}p\dot{i}_1A_2 + (L_{m1} + L_{12} + L_{c11})p\dot{i}_1A_3 - L_{c11}p\dot{i}_1A_4 &= -(R_{12} + R_{c11})\dot{i}_1A_3 + R_{c11}\dot{i}_1A_4 \\
 -L_{c11}p\dot{i}_1A_3 + (L_{c11} + L_{c12} + L_{c13})p\dot{i}_1A_4 - L_{c13}p\dot{i}_1A_5 &= \\
 R_{c11}\dot{i}_1A_3 - (R_{c12} + R_{c11} + R_{c13})\dot{i}_1A_4 + R_{c13}\dot{i}_1A_5 \\
 -L_{c13}p\dot{i}_1A_4 + L_{c13}p\dot{i}_1A_5 &= R_{c13}\dot{i}_1A_4 - R_{c13}\dot{i}_1A_5 - V_{cpl} \\
 C_{p1}pV_{cpl} &= \dot{i}_1A_5 - \dot{i}_1A_6 \\
 (L_{d12} + L_{d13})p\dot{i}_1A_6 - L_{d13}p\dot{i}_{ch} &= -(R_{d12} + R_{d13})\dot{i}_1A_6 + R_{d13}\dot{i}_{ch} + V_{cpl} \\
 -L_{d13}p\dot{i}_1A_6 + (L_{d13} + L_{d23})p\dot{i}_{ch} - L_{d23}p\dot{i}_2A_6 &= R_{d13}\dot{i}_1A_6 - (R_{d13} + R_{ch} + R_{d23})\dot{i}_{ch} + R_{d23}\dot{i}_2A_6
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
& -L_{d23}p\dot{i}_{ch} + (L_{d23} + L_{d22})p\dot{i}_2A_6 = R_{d23}\dot{i}_{ch} - (R_{d23} + R_{d22})\dot{i}_2A_6 - V_{cp2} \\
& L_{c23}p\dot{i}_2A_5 - L_{c23}p\dot{i}_2A_4 = -R_{c23}\dot{i}_2A_5 + R_{c23}\dot{i}_2A_4 + V_{cp2} \\
& C_{p2}pV_{cp2} = \dot{i}_2A_6 - \dot{i}_2A_5 \\
& -L_{c23}p\dot{i}_2A_5 + (L_{c23} + L_{c22} + L_{c21})p\dot{i}_2A_4 - L_{c21}p\dot{i}_2A_3 = R_{c23}\dot{i}_2A_5 - (R_{c23} + R_{c22} + R_{c21})\dot{i}_2A_4 + R_{c21}\dot{i}_2A_3 \\
& -L_{c21}p\dot{i}_2A_4 + (L_{c21} + L_{22} + L_{m2})p\dot{i}_2A_3 - L_{m2}p\dot{i}_2A_2 = R_{c21}\dot{i}_2A_4 - (R_{c21} + R_{22})\dot{i}_2A_3 \\
& -L_{m2}p\dot{i}_2A_3 + L_{m2}p\dot{i}_2A_2 = -R_{p2}\dot{i}_2A_2 + R_{p2}\dot{i}_2A_1 \\
& L_{21}p\dot{i}_2A_1 = -(R_{21} + R_{p2})\dot{i}_2A_1 + R_{p2}\dot{i}_2A_2 + V_{2A}
\end{aligned}$$

Onde:

R_{11} , L_{11} resistência e indutância do enrolamento primário do transformador 1; R_{12} , L_{12} resistência e indutância do enrolamento secundário do transformador 1, referidas ao primário; R_{p1} , L_{m1} resistência e indutância de dispersão do transformador 1; R_{c11} , L_{c11} resistência paralela do equivalente do alimentador GUT40; R_{c12} , L_{c12} resistência série do equivalente do alimentador GUT40; R_{c13} , L_{c13} resistência paralela do equivalente do alimentador GUT40; C_{p1} capacitor do banco de capacitores do alimentador GUT40; R_{d12} , L_{d12} resistência série do equivalente do alimentador GUT40; R_{d13} , L_{d13} resistência paralela do equivalente do alimentador GUT40;

R_{ch} resistência da chave;

R_{21} , L_{21} resistência e indutância do enrolamento primário do transformador 2; R_{22} , L_{22} resistência e indutância do enrolamento secundário do transformador 2, referidas ao primário; R_{p2} , L_{m2} resistência e indutância de dispersão do transformador 2; R_{c21} , L_{c21} resistência paralela do equivalente do alimentador GUT47; R_{c22} , L_{c22} resistência série do equivalente do alimentador GUT47; R_{c23} , L_{c23} resistência paralela do equivalente do alimentador GUT47; C_{p2} capacitor do banco de capacitores do alimentador GUT47; R_{d22} , L_{d22} resistência série do equivalente do alimentador GUT47; R_{d23} , L_{d23} resistência paralela do equivalente do alimentador GUT47.

Observa-se que além das equações de malhas há 2 equações de ramos relativas aos bancos de capacitores. As variáveis de estado do sistema são, então, as correntes elétricas de cada uma das malhas juntamente com as tensões para a terra em cada banco de capacitores.

Dessa forma as equações gerais de estado (1) podem ser escritas de maneira compacta como em (2), normalmente usadas quando se deseja encontrar as soluções de equações diferenciais por simulações em computador digital.

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= Ax + Bu \\
y &= Cx + Du
\end{aligned} \tag{2}$$

As equações de estado para o sistema em questão, saem diretamente da reordenação dos termos de (1), onde:

$$\begin{aligned}
x &= [i_1A_1, i_1A_2, \dots, i_2A_1, V_{cp1}, V_{cp2}] \\
u &= [V_{1A}, 0, 0, \dots, V_{2A}, 0, 0]
\end{aligned} \tag{3}$$

Como método matemático para solucionar as equações de estado foi utilizado o método trapezoidal:

$$\begin{cases} \bar{x}_{k+1} = \left(I - \frac{T}{2}A\right)^{-1} \left(I + \frac{T}{2}A\right) \bar{x}_k + \frac{T}{2} \left(I - \frac{T}{2}A\right)^{-1} B(\bar{u}_{k+1} + \bar{u}_k) \\ \bar{y}_{k+1} = C \bar{x}_{k+1} + D \bar{u}_{k+1} \end{cases} \tag{4}$$

É importante salientar que tanto os transformadores como as linhas de distribuição foram modeladas sem levar em conta as suas capacitâncias. A referência⁸ recomenda que as linhas de distribuição, pelo menos, sejam modeladas incluindo suas capacitâncias, principalmente quando houver cargas não lineares no sistema.

4. SOFTWARE

O *software* foi escrito na linguagem do Matlab 6.5, principalmente por ser uma linguagem simples, que apresenta operações pré-definidas, como por exemplo, inversão de matrizes, que facilitam em muito a programação e também por apresentar excelentes recursos gráficos.

Para validar o *software* foi implementado o circuito da Figura 5a no SimPowerSystems e foram realizadas as seguintes simulações: 1) Tensão na saída do transformador de 25 MVA (GUT40), Figura 6; 2) Corrente na saída do transformador de 25 MVA (GUT47), Figura 7; 3) Corrente na chave, Figura 8; 4) Tensão na chave, Figura 9; 5) Tensão na saída do transformador de 15 MVA (GUT47), Figura 10; 6) Corrente na saída do transformador de 15 MVA (GUT47), Figura 11.

As simulações tiveram como parâmetros: Tempo de simulação de 0,5s; A chave parte da condição inicial de aberta, passando em 0,2s para a condição de fechada, e em 0,4s passando para a condição de aberta novamente; O software desenvolvido utilizou passo de cálculo de 10^{-5} e o SimPowerSystems utilizou passo de cálculo de 10^{-15} .

Nas Figuras de 6 a 11 apresenta-se um comparativo entre os resultados obtidos com o *software* desenvolvido e o SimPowerSystems.

Os gráficos são sempre apresentados na seqüência: no primeiro o resultado obtido com o *software* desenvolvido e no segundo o resultado obtido com o SimPowerSystems.

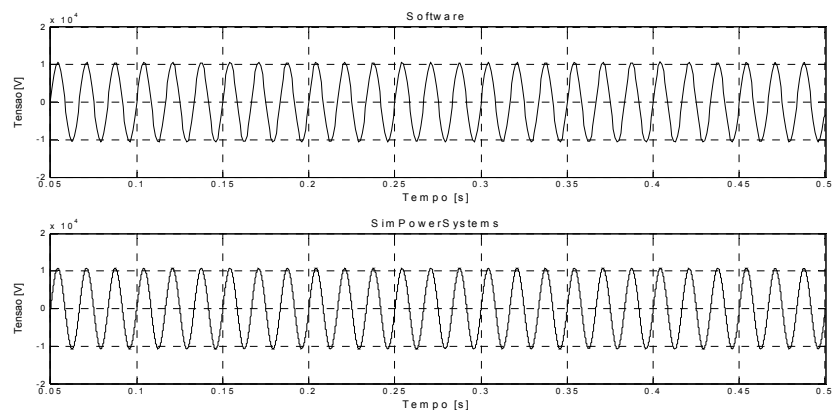


Figura 6. Tensão na saída do transformador de 25MVA

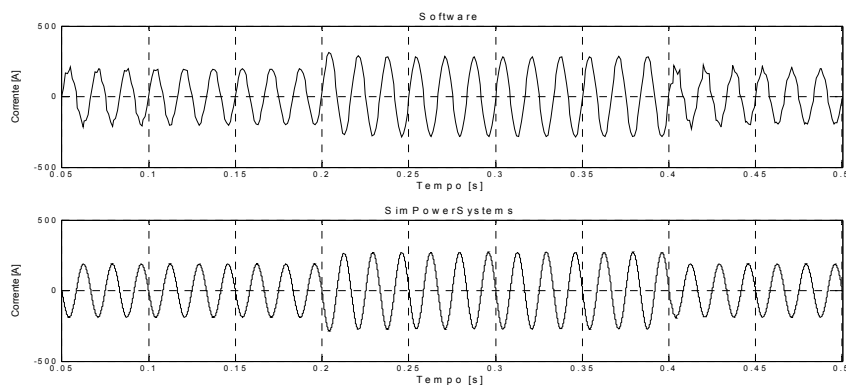


Figura 7. Corrente na saída do transformador de 25MVA

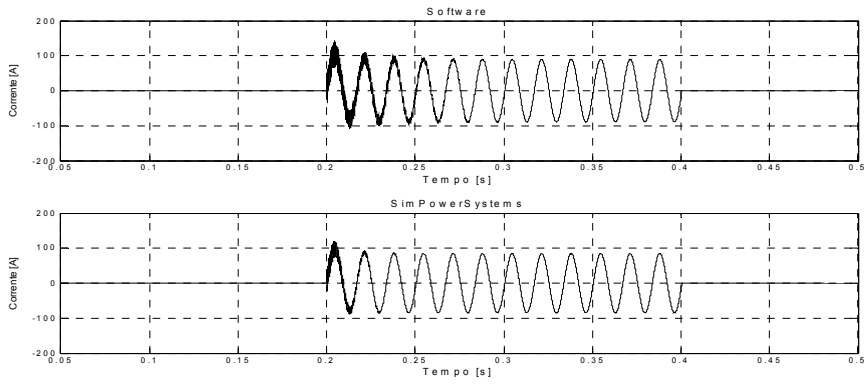


Figura 8. Corrente na chave

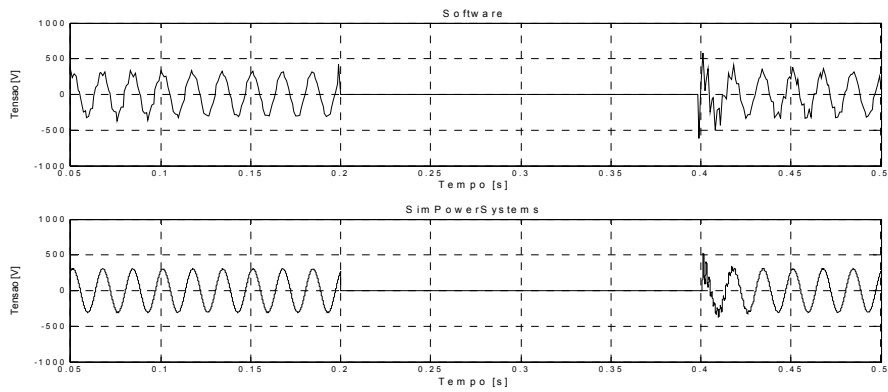


Figura 9. Tensão na chave

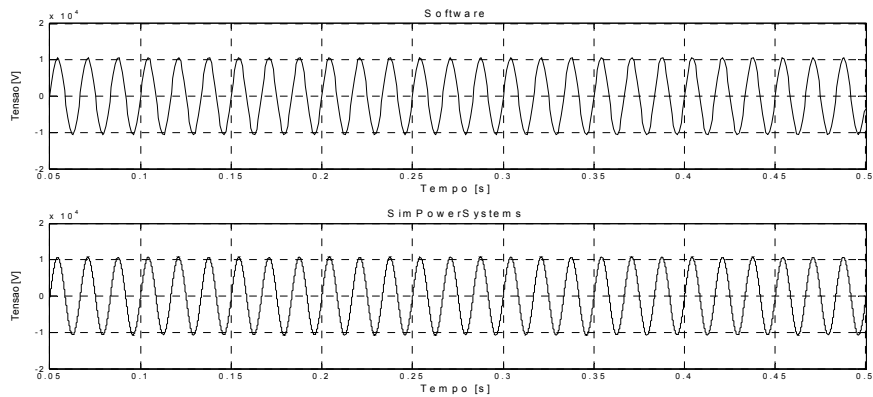


Figura 10. Tensão na saída do transformador de 15MVA

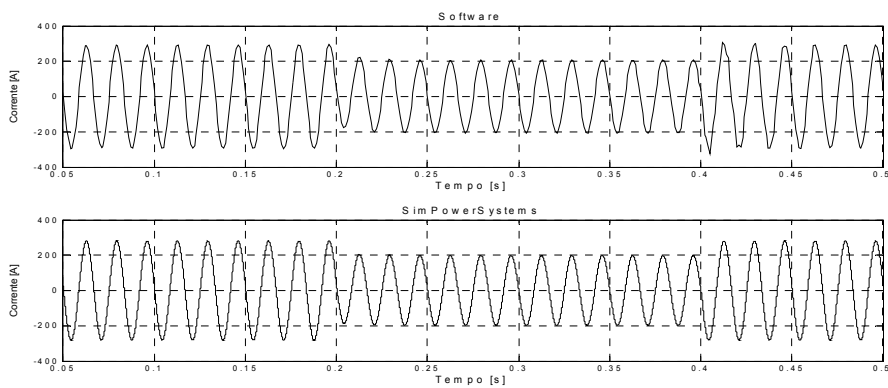


Figura 11. Corrente na saída do transformador de 15MVA

Conforme pode ser observado nos resultados obtidos o *software* está simulando corretamente todos os valores dos transitórios de tensão e corrente resultantes da operação de chaveamento, em todos os elementos do sistema quando comparado com o desempenho do aplicativo SimPowerSystems.

5. MEDIÇÕES

Para validar o modelo do sistema implementado no SimPowerSystems e o modelo matemático adotado no *software* desenvolvido foram realizadas manobras de chaveamento e medições no local da realização do paralelismo, conforme apresentado na Figura 12.

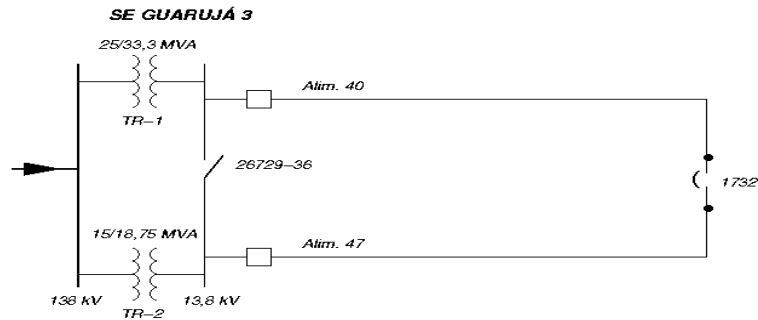


Figura 12. Diagrama simplificado da manobra de chaveamento

As medições foram registradas pelo Registrador Digital de Perturbação de alta resolução Yokogawa DL780E.

A princípio acreditava-se que existiam TP's em ambos os lados da chave 1732, entretanto, na visita "in-loco" constatou-se a existência de TP's (ligação V) somente no lado da chegada do alimentador 40. A instalação de TP's adicionais no lado do alimentador 47 se mostrou inviável, devido à falta de espaço nos postes. Por ser viável, decidiu-se que a medição no lado do alimentador 47 seria efetuada no secundário do transformador de distribuição (ligação Dy-1). Deve-se salientar que, conforme mostrado na Figura 13, às tensões secundárias registradas pelo oscilógrafo são provenientes de equipamentos com características diferentes, isto é, no lado do alimentador 40 a tensão provém de um TP, enquanto que no lado do alimentador 47 provém de um transformador de força comum.

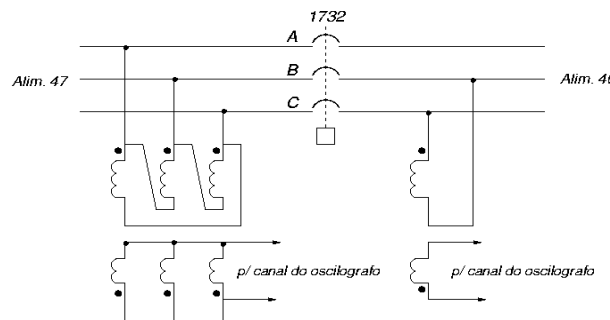


Figura 13. Medições das tensões no oscilógrafo

As manobras e os registro das medições foram realizadas na seguinte seqüência:

- 1) Fechamento da chave 1732 com as barras de 13,8 kV fechadas através da chave 26729-36, Figura 14;
- 2) Abertura da chave 1732 com as barras de 13,8 kV fechadas através da chave 26729-36, Figura 15;
- 3) Fechamento da chave 1732 com as barras de 13,8 kV separadas, Figura 16;
- 4) Abertura da chave 1732 com as barras de 13,8 kV separadas, Figura 17.

O fechamento e a abertura da chave 1732 foram executados pelo COD - Centro de Operação da Distribuição da ELEKTRO, localizado em Campinas.

Obviamente, as tensões simuladas também correspondem as de linha (C-B), Figura 13.

Nos gráficos das Figuras 14 a 17 são comparados os resultados obtidos nas medições em campo com os resultados obtidos nas simulações com o SimPowerSystems. Assim como nos gráficos obtidos através das medições, nos gráficos das simulações foram salientados somente os instantes de interesse das curvas, isto é, à região em que se visualiza a transposição de cada manobra.

Os gráficos são sempre apresentados na seqüência: à esquerda o resultado obtido nas medições e à direita o resultado obtido com a simulação.

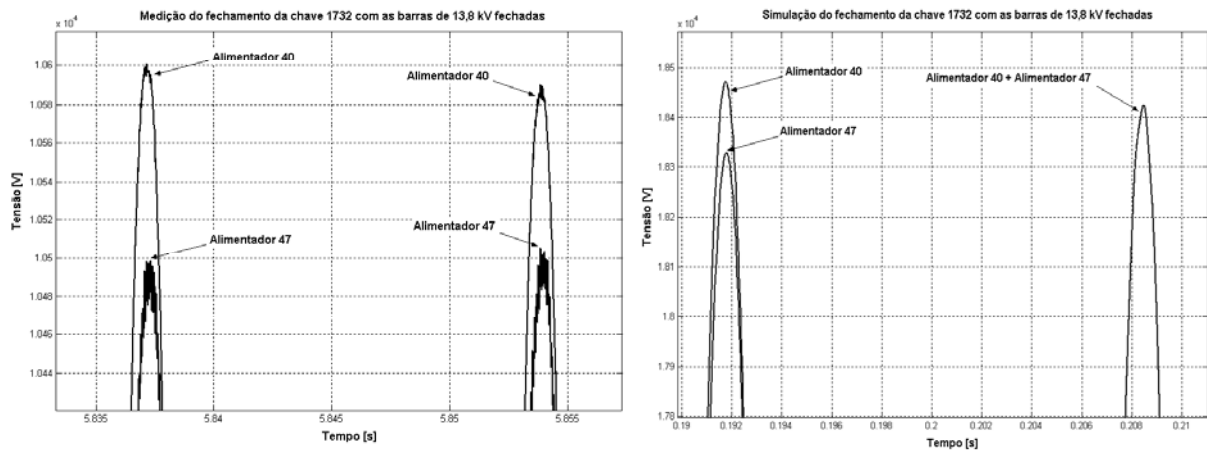


Figura 14. Fechamento da chave 1732 com as barras de 13,8 kV fechadas

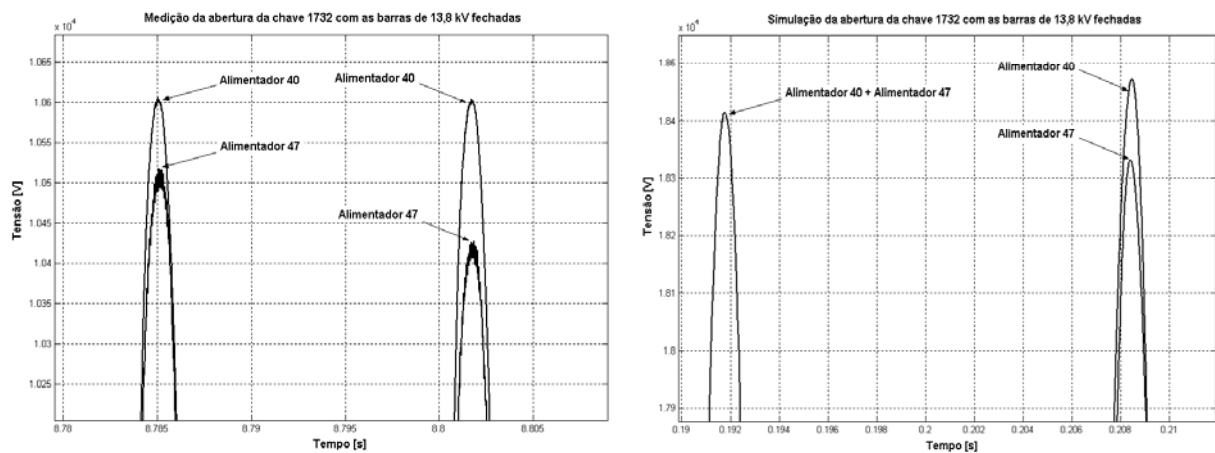


Figura 15. Abertura da chave 1732 com as barras de 13,8 kV fechadas

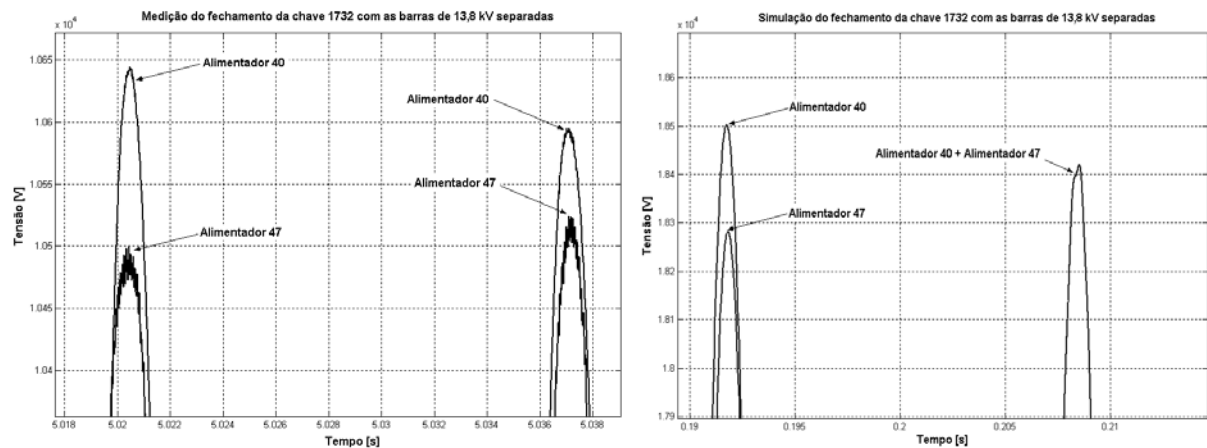


Figura 16. Fechamento da chave 1732 com as barras de 13,8 kV separadas

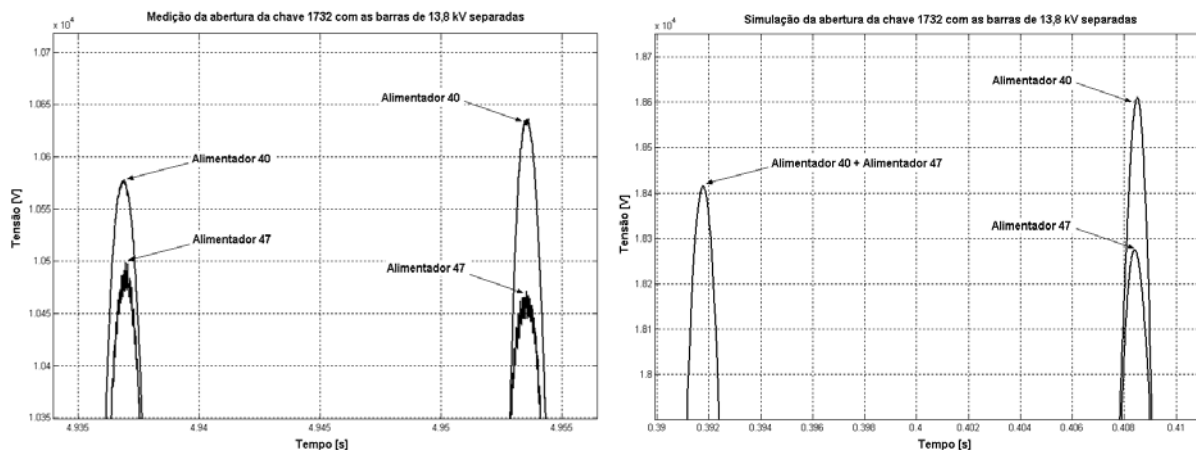


Figura 17. Abertura da chave 1732 com as barras de 13,8 kV separadas

Nos gráficos resultantes das medições devem ser feitas as seguintes considerações: 1) Oscilações na região do valor de pico da tensão do alimentador GUT47 - podem ser explicadas pelo fato da tensão deste alimentador ser proveniente de um transformador de distribuição e não de um TP, como é no caso do alimentador GUT40. O TP é um equipamento apropriado para a medição, o que não se pode afirmar para o transformador de força comum; 2) Diferenças nas tensões nos dois lados da chave após o seu fechamento - pode-se afirmar que as tensões primárias em ambos os lados da chave serão iguais após o seu fechamento, assim para explicar esta diferença deve-se considerar que as relações de transformação do TP e do transformador de força são diferentes, o que pode reproduzir os valores secundários diferentes; 3) As escalas da tensão nos gráficos resultantes das medições foram parametrizadas para a tensão de fase. Assim sendo, para ser compatível com os gráficos resultantes das simulações basta multiplicar por 1,7321.

6. CONCLUSÕES

A análise dos resultados das medições demonstra que o modelo implementado no SimPowerSystems e o *software* desenvolvido apresentam comportamentos bastante semelhantes aos encontrados na medição em campo, o que valida o modelo matemático adotado para a representação dos componentes da rede primária de distribuição.

As tensões, tanto no fechamento como na abertura do anel com as barras de 13,8 kV da subestação fechadas ou abertas, não apresentaram variações muito diferentes. Tanto nas medições como nas simulações não foram notadas alterações transitórias relevantes nas tensões nos momentos do fechamento ou da abertura da chave.

Os resultados demonstram que o paralelismo de dois alimentadores provenientes da mesma subestação é uma manobra que pode ser executada sem qualquer risco e que certamente poderá trazer série de benefício, caso seja incorporado nos Procedimentos da Operação.

O próximo passo seria efetuar a manobra de paralelismo entre alimentadores pertencentes a subestações diferentes. Pelos resultados obtidos através das simulações no Matlab nos levam a concluir que o comportamento do sistema não deve diferir muito dos casos obtidos nas manobras efetuadas.

7. CO-AUTORIA

O presente trabalho foi desenvolvido em conjunto com a Universidade de Campinas UNICAMP, no escopo do projeto de P&D MANOBRA, tendo como co-autores:

Alexandre B. J. Soares

UNICAMP

alexandresoares@yahoo.com.br

Marcus César Person

UNICAMP

marcuscesarperson@yahoo.com.br

José Pissolato Filho

UNICAMP

pisso@dsce.fee.unicamp.br

Ernesto Ruppert Filho

UNICAMP

ruppert@fee.unicamp.br

Fujio Sato

UNICAMP

sato@dsce.fee.unicamp.br

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Daniel Ioan, Irina Munteanu, *Models for Capacitive Effects in Iron Core Transformers*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 36, nº. 4, July 2000.
- 2 Francisco de León, Adam Semlyen, *Complete Transformer Model for Electromagnetic Transients*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, nº. 1, January 1994.
- 3 Hossein Mokhtari, M. Reza Iravani, Shashi B. Dewan, *Transient Behavior of Load Transformer During Subcycle Bus Transfer*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, nº. 4, October 2003.
- 4 K. K. Palueff, *Effect of Transient Voltages on Power Transformers Design III*, Winter Convention of the A.I.E.E., New York, January 26-30,1931.
- 5 K. K. Palueff, *Effect of Transient Voltages on Power Transformers Design IV*, Winter Convention of the A.I.E.E., New York, January 25-29,1932.
- 6 O. Ozgonenel, G. Onbilgin, *Simulation of Power Transformers using State Variables*, IEEE Power Engineering Review, October 2002.
- 7 R. C. Degeneff, W. Neugebauer, J. Panek, *Transformer Response to System Switching Voltages*, IEEE PES Summer Meeting, Portland, Oregon, July 26-31, 1981.
- 8 P. Jintakonsonwit, H. Fujita, H. Akagi, *Control and performance of a fully-digital-controlled shunt activefilter for installation on a power distribution system*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.17, nº.1, Janeiro 2002.