



**XXIII SNTPEE**  
**SEMINÁRIO NACIONAL**  
**DE PRODUÇÃO E**  
**TRANSMISSÃO DE**  
**ENERGIA ELÉTRICA**

AB/GDS/YY  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO - X**

**GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS**

**ANÁLISE APRIMORADA DE SOBRETENSÕES NÃO AMORTECIDAS APLICADA À  
ENERGIZAÇÃO DO AUTOTRANSFORMADOR 230/138/13,8 kV – 150 MVA DA SE JORGE TEIXEIRA**

**Aniela Maria Peixoto Mendes<sup>(\*)</sup>,1,2**  
**Maria Cristina Tavares<sup>2</sup>**

**Leonardo M. N. de Mattos<sup>2,3</sup>**  
**Nilo. S. S. Ribeiro<sup>1</sup>**  
**Elenildo Oliveira da Silva<sup>4</sup>**

**João Ferreira de Lima Filho<sup>3</sup>**  
**Mauro da Silva<sup>4</sup>**

**ELETRONORTE<sup>1</sup>**  
**POTÊNCIA ENGENHARIA<sup>3</sup>**

**UNICAMP<sup>2</sup>**  
**ELETRONORTE ENERGIA<sup>4</sup>**

**RESUMO**

Este artigo propõe um refinamento da metodologia utilizada para análise de sobretensões ocasionadas pela excitação de pontos de ressonância na malha elétrica devido à injeção de correntes harmônicas por equipamentos de características não lineares. Tal refinamento compreende a inclusão do efeito desses equipamentos na varredura em frequência, investigação do conteúdo harmônico, transformação para o domínio de sequência das tensões e/ou correntes de fase e sua posterior decomposição no domínio da frequência ao longo do tempo. Esta metodologia foi aplicada na investigação das causas do comportamento ressonante observado nos estudos de transitórios eletromagnéticos para energização do autotransformador de J. Teixeira.

**PALAVRAS-CHAVE**

Transitórios Eletromagnéticos, Metodologia de Análise, Varredura em Frequência, Representação do Ramo de Magnetização, *Fast Fourier Transform*.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Ao longo dos estudos pré-operacionais de transitórios eletromagnéticos para energização de um dos autotransformadores da subestação (SE) J. Teixeira, que entrou em operação em 2014 no sistema elétrico de Manaus, foram detectados comportamentos não esperados das tensões nos barramentos adjacentes. Tais tensões mostraram-se oscilatórias e não amortecidas, independente do tempo de simulação empregado, o que levou a suspeita de ter-se excitado uma ressonância ou *quasi*-ressonância na malha elétrica, haja vista que uma das causas mais comuns de sobretensões motivadas pelo referido fenômeno é a energização de transformadores com pouca ou nenhuma carga conectados a circuitos radiais [1].

Este tipo de cenário, onde há suspeita de algum elemento não linear excitando um ponto de ressonância na rede, é usualmente investigado através da análise da resposta em frequência da malha elétrica, a qual é comparada com as ordens harmônicas esperadas [2] para os estudos que estejam sendo realizados. Tal comparação pode ainda ser realizada com as ordens harmônicas obtidas por meio da transformação de Fourier de um ciclo [3], ou mesmo empregando-se uma janela deslizante de igual intervalo de tempo [4], das grandezas de tensão e/ou corrente no domínio de fase obtidas do caso sob simulação. Entende-se que esta metodologia, que já se mostrou consolidada no setor elétrico [5] [6], pode ser aprimorada, fornecendo uma compreensão mais aprofundada das características da ressonância observada.

(\*) SCN Quadra 06 Conj. A – sala 1107 – Bloco C – CEP 70716-901 Brasília, DF – Brasil  
Tel: (+55 61) 3429 - 5157 – Fax: (+55 61) 3429 - 6222 – E-mail: aniela@eln.gov.br

Este trabalho versa sobre o procedimento diferenciado efetuado para a investigação e identificação das causas das mencionadas oscilações observadas no estudo pré-operacional em questão, consistindo na inserção de quatro passos à metodologia corrente do setor, quais sejam:

1. Inclusão, mesmo que de maneira simplificada, do efeito da saturação do transformador na varredura em frequência, por meio da reprodução da indutância equivalente do ramo de magnetização quando submetido a uma determinada sobretensão;
2. Levantamento do conteúdo harmônico das correntes injetadas pelos equipamentos de transformação, presentes na simulação, quando submetidos à sobretensões semelhantes às vistas em seus terminais no caso originalmente em estudo, para compreensão de quais pontos de ressonância da malha poderiam vir a ser excitados por esses equipamentos;
3. Transformação do domínio de fase para o de sequência [7] das tensões nos terminais do transformador cuja manobra de energização foi simulada, ao longo do tempo;
4. Decomposição no domínio da frequência das tensões de sequência obtidas no item anterior, aplicando-se a Transformação Rápida de Fourier (FFT), também ao longo do tempo, fazendo uso da técnica de janela deslizante.

O procedimento proposto neste trabalho possibilitou a identificação de qual, ou quais, pontos de ressonância da malha foram efetivamente excitados, sejam de sequências zero, positiva ou negativa e por qual equipamento. Além disso, permitiu uma compreensão mais clara do comportamento e a causa do processo ressonante, viabilizando a definição de uma estratégia de mitigação, a verificação de sua efetividade e/ou a tomada de uma medida operativa com melhor embasamento técnico.

As simulações foram feitas no programa *Alternative Transients Program* (ATP) [8]. Ferramentas de propósito específico foram desenvolvidas para calcular as tensões de sequência, sua decomposição na frequência e para o cálculo das indutâncias equivalentes aproximadas do ramo de magnetização dos transformadores quando submetidos a tensões superiores ao joelho da curva de saturação.

## 2.0 - CASO EM ANÁLISE

Na subestação de J. Teixeira, em 2014, havia dois circuitos de 230 kV para Lechuga, dois circuitos de 230 kV para Mauá III, dois autotransformadores de 230/138/13,8 kV - 150 MVA (ATR) cada e o trecho de 138 kV, em circuito duplo, J. Teixeira – Mutirão – Cachoeira Grande – Compensa.

A energização do primeiro ATR, com o segundo desligado, foi realizada pelo seu lado de alta-tensão, radialmente através da UTE Mauá III, via linha de transmissão (LT) 230 kV J. Teixeira – Mauá III de circuito duplo (Figura 1). Sua reatância de dispersão,  $X_{ps}$ , é de 9,40 % na base do ATR. O fator de qualidade considerado para seus enrolamentos foi  $X/R = 50$ .

A LT que liga as barras de 230 kV das SEs Mauá III e J. Teixeira tem comprimento 12,77 km e seus parâmetros estão descritos na Tabela 1. Nos dois terminais desta LT foram colocados para-raios de 192 kV, 4,5 kJ/kV.

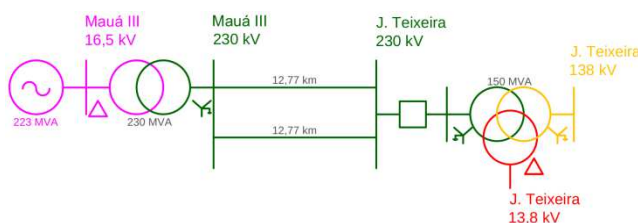


Figura 1 - Diagrama unifilar da malha para energização do autotransformador de 230/138/13,8 kV - 150 MVA da SE J. Teixeira (ATR).

Tabela 1 - Parâmetros da LT 230 kV J. Teixeira – Mauá III - 60 Hz.

	R [Ω/km]	X [Ω/km]	Y [μS/km]
<b>Sequência Zero</b>	0,19470	1,1226	3,0389
<b>Sequência Positiva/Negativa</b>	0,03505	0,32834	4,8763

Na UTE Mauá III, ilustrada na Figura 1, considerou-se em operação uma máquina a gás de 223 MVA gerando em 16,5 kV, inserida no ATP utilizando o modelo 58 para máquinas síncronas trifásicas [8]. O transformador elevador da usina (TF) de 16,5/230 kV - 230 MVA possui  $Z_{ps} = 13,0\%$  na base nominal e  $X/R = 48,75$ . Ambas as curvas de saturação, do TF e do ATR, são mostradas na Figura 2.

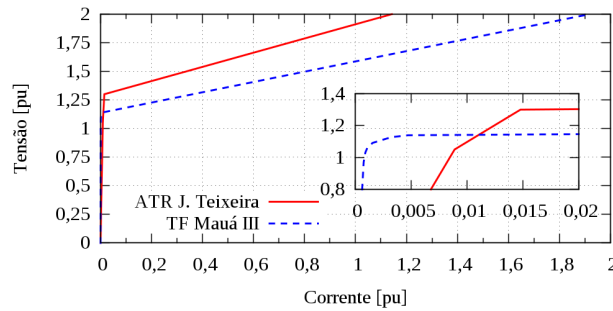


Figura 2 - Curvas de saturação do autotransformador 230/138/13,8 kV – 150 MVA (ATR) da SE J. Teixeira e do transformador 16,5/230 kV – 230 MVA (TF) da SE Mauá III.

Para a determinação dos piores casos para a energização do ATR em termos de sobrecorrentes, sobretensões e energia dissipada pelos para-raios, utilizou-se a energização estatística do ATP, com 200 chaveamentos, desvio padrão de 1,25 ms e passo de integração de 1,0  $\mu$ s. Esse pequeno passo de integração foi necessário, pois a LT 230 kV J. Teixeira – Mauá III é curta e foi representada pelo modelo de Bergeron [8]. Os casos mais críticos, para as referidas variáveis, foram reproduzidos em modo determinístico. A tensão de pré-energização foi de 1,054 pu na barra de J. Teixeira 230 kV.

A magnitude da máxima corrente de *inrush* encontrada é relativamente pequena no que tange ao que é usualmente obtido na energização de transformadores (Figura 3). O caso que apresentou a sobretensão de maior amplitude, ilustrada na Figura 4, e também o comportamento não amortecido e oscilatório motivador deste trabalho, será analisado utilizando-se a metodologia proposta no item a seguir.

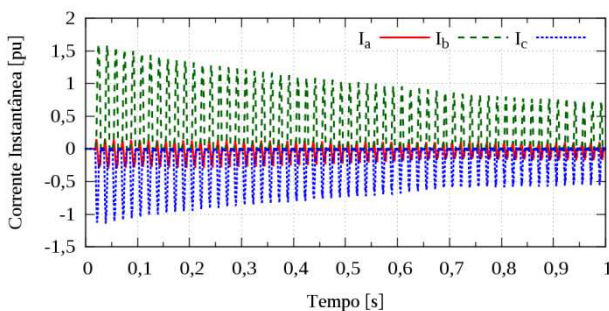


Figura 3 - Corrente nos terminais do lado de alta tensão na energização do autotransformador de 230/138/13,8 kV – 150 MVA (ATR) da SE J. Teixeira.

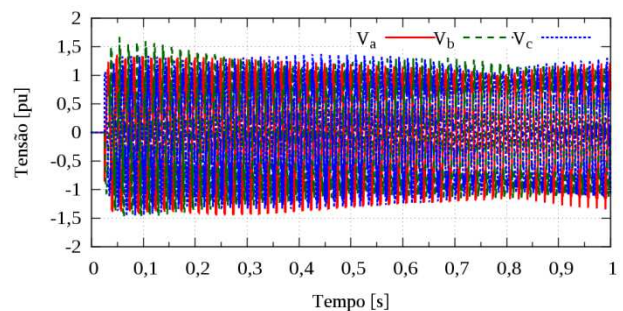


Figura 4 - Tensões fase-terra nos terminais do lado de alta tensão na energização do autotransformador de 230/138/13,8 kV – 150 MVA (ATR) da SE J. Teixeira.

### 3.0 - PASSOS DA METODOLOGIA PROPOSTA APLICADOS AO CASO EM ANÁLISE

#### 3.1 Inclusão do efeito da saturação dos equipamentos de transformação na varredura em frequência

A rotina de varredura em frequência no ATP processa sucessivas soluções fasoriais excursionando, incrementalmente, a frequência das fontes de tensão e/ou corrente presentes no caso dentro de um dado intervalo determinado pelo usuário [8]. Quando o ATP resolve a solução fasorial, também executada para o  $t_0^-$  dos casos a serem processados no domínio do tempo, os elementos não lineares não são integralmente representados [8]. Isso significa que não será possível conhecer a resposta em frequência da malha elétrica de maneira precisa quando a mesma estiver sendo submetida à sobretensões próximas a equipamentos não lineares, como para-raios e transformadores, sempre que as referidas tensões forem superiores à região linear de suas curvas características.

Uma vez que na ressonância encontrada os transformadores representados estavam sendo submetidos à sobretensões da ordem de 1,67 pu, buscou-se uma maneira simplificada de implementar a variação da indutância do ramo de magnetização dos referidos equipamentos na rotina de varredura em frequência.

Para obtenção das reatâncias equivalentes dos ramos de magnetização dos equipamentos de transformação, utilizou-se a curva  $\phi \times I$  gerada pela rotina auxiliar SATURA [8]. Os pares de fluxo magnético e corrente não coincidentes com os valores da curva original foram calculados por interpolação linear [9]. A indutância equivalente para o ramo de magnetização ( $L_{eqv}$ ) pode ser então calculada por (1):

$$L_{eqv} = \frac{\phi}{I} \quad (1)$$

A indutância  $L_{eqv}$  apresenta grande variação de sua magnitude em função da tensão (Figura 5), principalmente na região do joelho da curva de saturação [4].

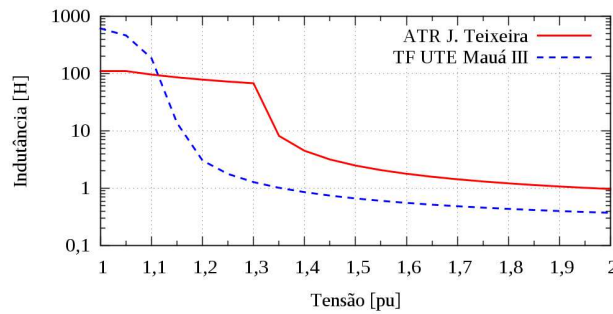


Figura 5 - Variação da indutância equivalente do ramo de magnetização em função da tensão.

De posse das indutâncias equivalentes dos ramos de saturação do TF e do ATR, executou-se a varredura em frequência tanto para a malha do caso original, quanto para a rede alterada, onde se substituíram os ramos de magnetização das referidas unidades transformadoras pelas  $L_{eqv}$  calculadas para magnitude da ordem da máxima tensão encontrada na energização em estudo. Ressalta-se que a máquina da UTE Mauá III, representada ao longo do tempo pelo modelo 58, foi substituída no processamento da varredura em frequência por sua reatância subtransitória ( $X''_{d_{ns}} = 0,1790$  pu para  $V < 1,1$  pu e  $X''_{d_s} = 0,1543$  pu para  $V \geq 1,1$  pu) e então aterradas [1] [4].

Os resultados para os módulos das impedâncias de seqüências zero, positiva e negativa, vistas da barra de 230 kV de J. Teixeira, são apresentados nas Figuras 6 e 7, respectivamente. Adicionalmente, são ilustrados os lugares geométricos dos picos ressonantes da malha, para uma variação do ramo de magnetização associada ao intervalo de tensão de 1,0 a 1,9 pu.

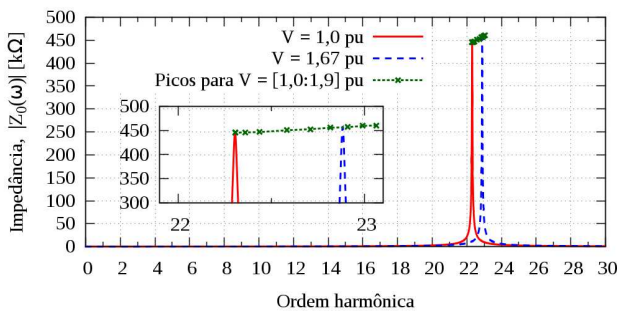


Figura 6 - Sequência zero - Variação do ponto de ressonância da malha elétrica quando considerada a alteração da indutância equivalente do ramo de magnetização com a tensão.

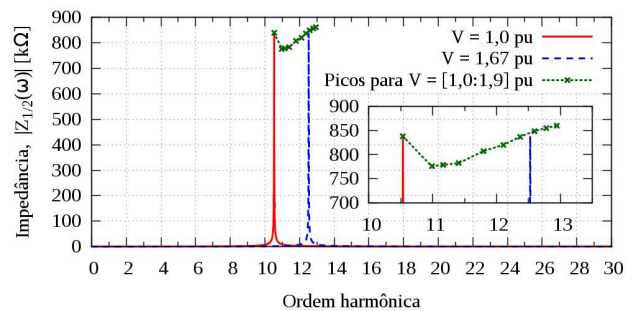


Figura 7 - Sequência positiva/negativa - Variação do ponto de ressonância da malha elétrica quando considerada a alteração da indutância equivalente do ramo de magnetização com a tensão.

Em ambas as figuras acima, pode-se ver claramente que há pontos de ressonância de grande magnitude e bem definidos, tanto na impedância de seqüência zero quanto na positiva/negativa.

Além disso, nota-se que a alteração dos ramos de magnetização para aqueles esperados quando os equipamentos de transformação são submetidos a sobretensões fez uma significativa diferença nos pontos de ressonância, deslocando-os para harmônicas mais elevadas. A impedância de seqüência zero saltou um pouco mais de meia ordem harmônica e a positiva/negativa, aproximadamente duas ordens.

O deslocamento dos picos ressonantes para ordens harmônicas mais elevadas advém do fato de que para um circuito oscilador RLC genérico, a frequência de ressonância é dada por (2):

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

Logo, com a redução do L total do circuito, devido à redução de  $L_{eqv}$  do ATR e do TF, motivada pela elevação da tensão, há o aumento de  $f_{osc}$ . A partir de aproximadamente 1,5 pu de tensão,  $L_{eqv}$  passa a variar mais lentamente para um mesmo  $\Delta V$  (Figura 5), implicando numa menor taxa de aumento de  $f_{osc}$ , conforme pode ser visto pela aproximação dos pontos do local geométrico dos picos ressonantes para  $|Z_0(\omega)|$  e  $|Z_{1/2}(\omega)|$  (Figuras 6 e 7). Este fato também indica que, para uma tensão tendendo ao infinito,  $L_{eqv}$  tenderá ao valor da inclinação do último

segmento da curva  $\varphi \times I$ , resultando no máximo valor teórico de  $f_{osc}$ , que por sua vez delimitará o maior intervalo possível de ressonância da malha motivado pela variação da indutância em questão.

Entretanto, frisa-se a necessidade de calcular  $L_{eqv}$  para o pico da sobretensão efetivamente encontrado no caso de referência, pois caso seja utilizada uma tensão mais elevada, poderá se esperar uma faixa de frequências de ressonância maiores do que a de fato virá a ser excitada na malha (Figuras 6 e 7). Por outro lado, caso se considere uma tensão menor para o cálculo de  $L_{eqv}$ , é possível que se observe somente o valor inferior da faixa de frequências ressonantes existentes na malha elétrica, e, portanto, deixando-se em aberto aquelas mais elevadas que possivelmente poderão ser encontradas na faixa verdadeira.

Salienta-se que a metodologia atual do setor para o uso da varredura em frequência, na qual se considera apenas a região linear da curva de saturação, ou valor anterior ao ponto de joelho, incorre na segunda questão descrita no parágrafo anterior.

### 3.2 Levantamento do conteúdo harmônico do transformador e autotransformador envolvidos na simulação

Para confirmar que o ATR e verificar se o TF poderiam vir a excitar os pontos de ressonância na malha elétrica, fez-se o levantamento das possíveis correntes harmônicas que esses elementos poderiam injetar quando submetidos a sobretensões.

Esse procedimento foi realizado por meio de uma simulação em separado, contendo apenas um dos elementos em questão por vez. No lado de alta do ATR a ser energizado conectou-se uma fonte de tensão do Tipo 1 [8]. E, para cada um dos lados do TF, foi ligada uma fonte do mesmo tipo. Os pontos para as fontes do Tipo 1 foram calculados da seguinte maneira:

1. Integraram-se numericamente, por um ciclo, a partir do instante de energização, as tensões obtidas nos terminais dos dois transformadores presentes no estudo para obtenção do fluxo nos referidos equipamentos [1] [2] [4];
2. Em seguida, aplicou-se a FFT nos fluxos obtidos no item anterior;
3. Sintetizou-se, aproximadamente, o fluxo por apenas seus componentes unidirecional e fundamental, utilizando (3):

$$\varphi(t) = |\varphi_0| + |\varphi_1| \cos(\omega_1 t + \angle\varphi_1) \quad (3)$$

Eliminaram-se desta forma as frequências mais elevadas;

4. Então foram calculados os pontos das fontes do Tipo 1 [8] por meio da derivação de (3) no tempo.

No procedimento descrito anteriormente, tentou-se reproduzir os fluxos medidos na simulação de energização, por meio da manipulação das ondas de tensão de maneira simplificada, nos terminais do ATR e TF, para que fossem semelhantes àqueles aos quais esses equipamentos foram submetidos no estudo em questão, mas sem a injeção direta de um fluxo constituído de frequências diferentes da fundamental e unidirecional. Esse procedimento foi adotado a fim garantir que o conteúdo harmônico das correntes em análise seja proveniente unicamente das unidades transformadoras em avaliação.

Quando os transformadores foram submetidos às tensões sintetizadas pelo procedimento descrito acima, o conteúdo harmônico encontrado nas correntes (Figuras 8 e 9) mostrou-se rico estendendo-se por diversas ordens, conforme esperado [6] [10]. Tais ordens abrangem frequências nas quais foram encontrados pontos de ressonância na malha elétrica, havendo, portanto, a possibilidade desses equipamentos estarem excitando as referidas ressonâncias.

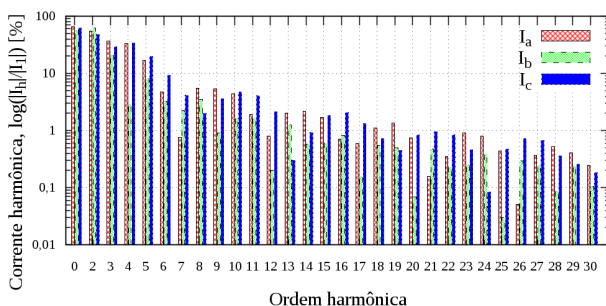


Figura 8 - Resposta harmônica do autotransformador de J. Teixeira (ATR) quando submetido às sobretensões da energização em estudo.

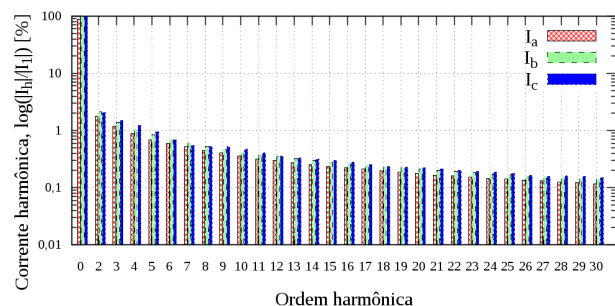


Figura 9 - Resposta harmônica do transformador de Mauá III (TF) quando submetido às sobretensões da energização em estudo.



Entretanto, somente essas informações não são suficientes para realizar a identificação precisa de quais pontos de ressonância estão sendo efetivamente excitados.

### 3.3 Transformação de Fortescue das tensões obtidas na energização

Uma comparação mais efetiva da sobretensão encontrada no caso de referência com os pontos de ressonância da malha, determinados no Item 3.1 no domínio de sequência, pode ser realizada quando as grandezas de fase são transformadas também para este domínio. Isso pode ser realizado aplicando-se a transformação de Fortescue [7].

### 3.4 Decomposição na frequência das tensões de sequência

As tensões de sequência obtidas pela aplicação da transformação de Fortescue nas tensões fase-terra de J. Teixeira 230 kV (Figura 4) foram decompostas na frequência utilizando-se da FFT [11], empregando-se janelas deslizantes de 1 ciclo [4], para todos os passos de simulação. O programa desenvolvido para esta tarefa fez uso do pacote matemático livre [12]. Os resultados são ilustrados na Figura 10.

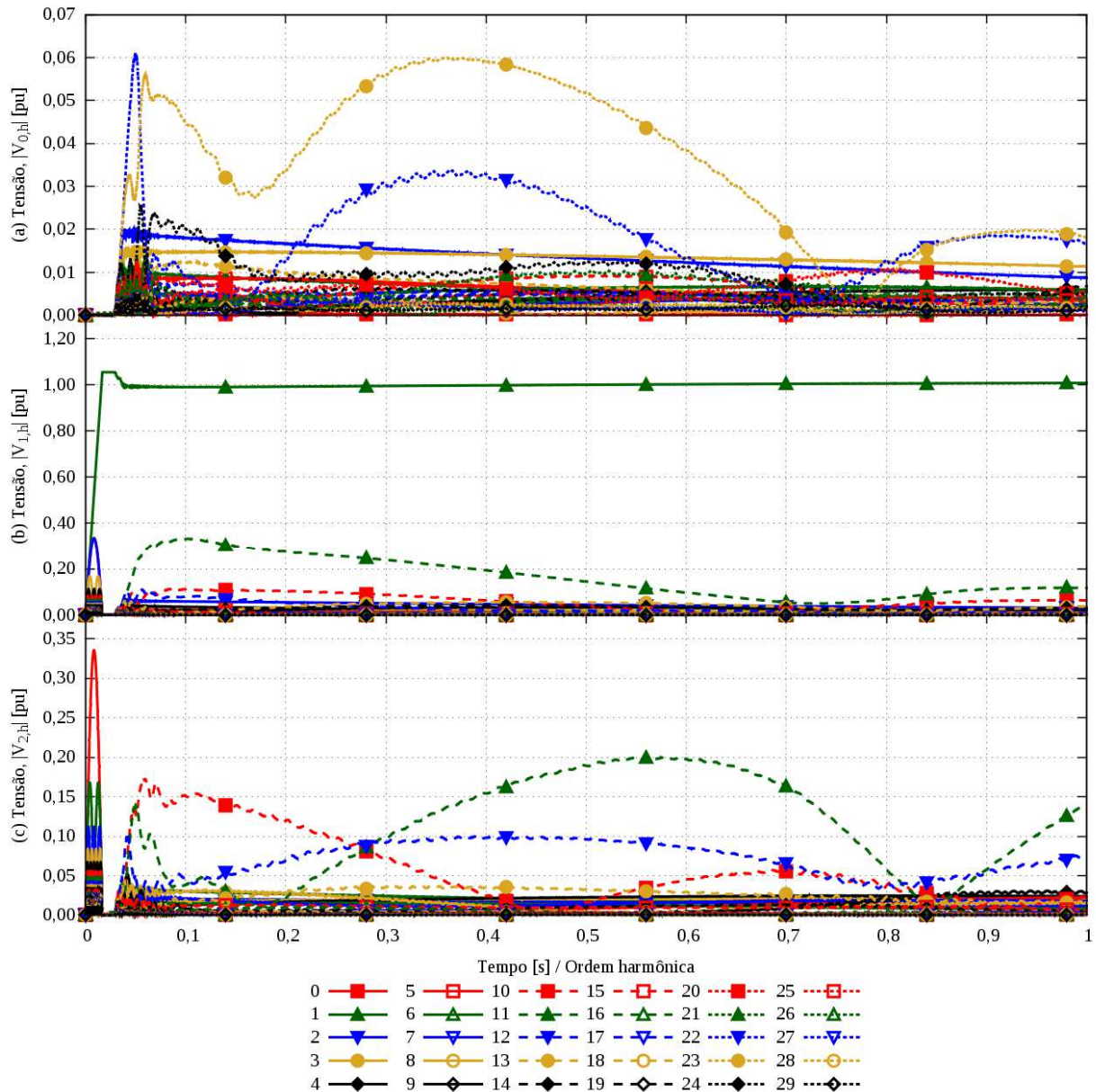


Figura 10 - Tensões de sequência zero (a), positiva (b) e negativa (c) decompostas na frequência ao longo do tempo.

Nas curvas da tensão de sequência zero, decomposta na frequência ao longo do tempo, é possível verificar que duas ordens harmônicas, a 22ª e a 23ª, destacam-se em termos de magnitude em relação às demais (Figura 10-(a)). Considerando-se ainda os picos ressonantes encontrados para  $|Z_0(\omega)|$  (Figura 6) e o perfil de injeção de

correntes do ATR e TF (Figuras 8 e 9), entende-se que a malha está em ressonância em sequência zero nas harmônicas 22 e 23.

A tensão de sequência positiva, decomposta na frequência ao longo do tempo, contém componentes não fundamentais de magnitude importante e oscilantes (Figura 10-(b)). As harmônicas mais significativas são a 10ª e a 11ª, mas vê-se também a 12ª com menor módulo. Essas ordens estão na região dos picos ressonantes levantados pela varredura em frequência para  $|Z_{1/2}(\omega)|$  (Figura 7). Como os perfis harmônicos do ATR e do TF (Figuras 8 e 9) sugerem que eles poderão injetar correntes nas supracitadas frequências, entende-se que a malha está em processo ressonante também em sequência positiva nas ordens 10, 11 e 12.

A tensão de sequência negativa (Figura 10-(c)), decomposta na frequência ao longo do tempo, comportou-se semelhantemente a de sequência positiva. As ordens harmônicas de maior destaque, com curvas oscilatórias e pouco amortecidas, foram a 10, 11 e 12. Nessas ordens há pontos de ressonância na malha (Figura 7), sendo ainda harmônicas passíveis de terem sido injetadas pelo ATR e TF (Figuras 8 e 9). Logo, entende-se que a simulação também está em ressonância de sequência negativa, nas mesmas ordens da sequência positiva.

#### 4.0 - CONCLUSÕES

No presente artigo foi apresentado um novo procedimento para estudo de sobretensões oscilatórias não amortecidas observadas na energização de um autotransformador. As principais conclusões são:

- A indutância equivalente do ramo de magnetização do transformador varia significativamente com a tensão, especialmente para tensões na região do joelho da curva de saturação;
- A inclusão da indutância equivalente do ramo de magnetização, calculada em função da tensão, no estudo realizado com a rotina de varredura em frequência, permitiu visualizar que os pontos de ressonância da malha elétrica estudada deslocaram-se expressivamente para frequências maiores quando os transformadores foram submetidos a sobretensões;
- Uma malha que contenha elementos não lineares, cujas características sejam função da tensão, não apresentará pontos de ressonância (se existentes) e sim regiões, devido aos deslocamentos dos picos ressonantes motivados pelas variações de tensão acima da região linear de suas características  $V \times I$ ;
- Para uma tensão tendendo ao infinito nos terminais de um dado transformador, que produz um fluxo tendendo ao infinito, a indutância equivalente do ramo de magnetização tenderá à inclinação do último segmento da curva  $\phi \times I$  e delimitará a maior frequência de ressonância, e, por conseguinte, o maior intervalo de picos ressonantes motivado pela variação da indutância em questão;
- Ressalta-se a importância do cálculo da indutância equivalente do ramo de magnetização para a sobretensão próxima à encontrada no caso em estudo. Do contrário há o risco de se esperar um intervalo de picos ressonantes maior ou menor do que aquele que de fato poderá vir a ser excitado na malha elétrica;
- A metodologia corrente do setor, que utiliza a varredura em frequência considerando apenas a região linear da curva característica de equipamentos não lineares, incorre no problema de visualizar apenas o valor do limite inferior da faixa de frequências de ressonância, deixando-se, portanto, todas as demais negligenciadas;
- Se a variação da indutância não tivesse sido representada na varredura em frequência, a análise das tensões harmônicas decompostas na frequência ao longo do tempo ficaria prejudicada, haja vista que não seria possível explicar de maneira mais conclusiva o aparecimento de algumas harmônicas de ordens mais elevadas e de magnitudes expressivas encontradas;
- A realização da varredura em frequência para sequência zero foi de extrema importância, caso contrário não seria possível explicar sobretensões sustentadas de ordens harmônicas 22 e 23, que porventura aparecessem numa análise realizada no domínio de fase;
- O levantamento da resposta harmônica do transformador que já estava em operação foi importante para identificar se este equipamento também seria capaz de contribuir para a excitação dos pontos de ressonância encontrados na malha, pois já era esperado que o autotransformador sob manobra injetasse correntes harmônicas de todas as ordens em sua energização;
- A transformação das tensões de fase para o domínio de sequência foi muito importante para possibilitar a realização da efetiva análise de qual impedância estava em ressonância, por meio do cruzamento dos resultados das tensões de sequência decompostas na frequência, ao longo do tempo, com os módulos das impedâncias de sequência, obtidos com a varredura em frequência;

Pelos resultados obtidos sugere-se que o procedimento apresentado seja utilizado em futuros estudos de transitórios eletromagnéticos envolvendo elementos não lineares, cujos resultados apresentem oscilações pouco ou não amortecidas.

## 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. Sadeghkhani, A. Ketabi e R. Feuillet, "New approach to harmonic overvoltages reduction during transformer energization via controlled switching," em *Intelligent System Applications to Power Systems, 2009. ISAP'09. 15th International Conference on*, 2009.
- [2] J. Arrillaga e N. R. Watson, *Power system harmonics*, John Wiley & Sons, 2004.
- [3] X. Jiang e A. Gole, "A frequency scanning method for the identification of harmonic instabilities in {HVDC} systems," *#IEEE\_J\_PWRD#*, vol. 10, n. 4, pp. 1875-1881, 1995.
- [4] R. Turner e K. Smith, "Resonance Excited by Transformer Inrush Current in Inter-connected Offshore Power Systems," em *Industry Applications Society Annual Meeting, 2008. IAS'08. IEEE*, 2008.
- [5] G. Sybille, M. Gavrilovic, J. Belanger e V. Do, "Transformer saturation effects on EHV system overvoltages," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, n. 3, pp. 671-680, 1985.
- [6] J. Witte, F. DeCesaro e S. Mendis, "Damaging long-term overvoltages on industrial capacitor banks due to transformer energization inrush currents," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 30, n. 4, pp. 1107-1115, 1994.
- [7] C. Fortescue, "Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, n. 2, pp. 1027-1140, 1918.
- [8] H. Dommel, "Electromagnetic Transients Program-Rule Book," *Oregon, USA*, 1984.
- [9] "Scipy Reference Guide," 2014.
- [10] H. Bronzeado, P. Brogan e R. Yacamini, "Harmonic analysis of transient currents during sympathetic interaction," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 11, n. 4, pp. 2051-2056, 1996.
- [11] J. W. Cooley e J. W. Tukey, "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series," *Mathematics of computation*, vol. 19, n. 90, pp. 297-301, 1965.
- [12] "NumPy Reference," 2014.

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Aniela Maria Peixoto Mendes;** Nascida em Brasília em 28 de agosto de 1981, engenheira eletrícista pela Universidade de Brasília (2006). Atualmente é aluna de mestrado na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da Universidade Estadual de Campinas. Trabalha na Gerência de Estudos Elétricos da Operação de Sistema da Eletrobras Eletronorte como Engenheira de Operação, atuando principalmente nos seguintes temas: sistemas de transmissão de alta tensão, estudos de fluxo de potência, transitórios eletromagnéticos e transitórios eletromecânicos.



**Leonardo M. N. de Mattos;** Nascido no Rio de Janeiro em 22 de julho de 1987, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília (2012), mestrando em Engenharia Elétrica, com ênfase em transitórios eletromagnéticos, pela Universidade Estadual de Campinas. Atualmente trabalha na área de estudos para o planejamento da operação de sistemas elétricos na empresa Potência Engenharia. Áreas de interesse: sistemas elétricos de potência, transitórios eletromagnéticos e computação de alta performance.



**João Ferreira de Lima Filho,** Nascido em Pernambuco em 06 de janeiro de 1950, possui graduação Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica de Pernambuco (1973); Possui pós-graduação em Sistemas de Potência pela COPPE-UFRJ (1979). Atualmente é sócio-proprietário da Potência Engenharia. Áreas de interesse: Sistemas elétricos de potência, estudos de regime, curto-circuito, estabilidade, transitórios eletromagnéticos.



**Maria C. Tavares,** Engenheira eletrícista (1984) pela UFRJ, M.Sc (1991) - COPPE/UFRJ, D.Sc.(1998) - UNICAMP. Trabalhou em firmas de consultoria em engenharia elétrica com análise de sistemas de potência, HVDC e planejamento de transmissão elétrica. Atualmente é professora Associada na Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas. Suas áreas de interesse são transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência, transmissão à longa distância e estudo do religamento tripolar e monopolar.



**Nilo Sérgio Soares Ribeiro,** Nascido em Brasília, DF em 28 de novembro de 1978. É engenheiro eletrícista formado pela Universidade Federal de Mato Grosso (2004) e mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia e atualmente é engenheiro das Centrais Elétricas do Norte do Brasil – ELETRONORTE.



**Mauro da Silva,** Nasceu em 09 de setembro de 1958 em Andradina/SP. Graduiu-se em Engenharia Elétrica em 1985 na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira/UNESP e concluiu mestrado em 2002 na UnB abordando estabilidade de sistema isolados. Trabalhou de 1986 a 1992 na área de estudo de proteção da ELN. De 1992 a 1998 na operação de sistema da Amazonas Energia e de 1998 a até a presente data na área de estudos elétricos da Amazonas energia. Área de interesse proteção de sistemas elétricos, estabilidade de sistemas de potência e transitórios eletromagnéticos.





**Elenildo Oliveira da Silva**, Nascido em Manaus/AM, no dia 08/02/1975. Graduado na Universidade Federal do Amazonas (2003), possui especialização em Sistema de Proteção pela COOPE-UFRJ (2011). Atualmente é funcionário da Eletrobras Amazonas Energia no setor de Pré, Pós-Operação da Alta-tensão (DOEA). Área de interesse: Sistemas elétricos de potência, estudos de regime permanente, curto-circuito e estabilidade.