

# Análises no Domínio da Frequência Visando Quantificar o Impacto do Desligamento de Circuitos para Controle de Tensão

Alécio B. Fernandes, *Member, IEEE*, Antonio Samuel Neto

**Resumo** -- Na definição dos procedimentos operativos para energização de equipamentos e instalações faz-se necessário avaliar as solicitações transitórias impostas, nas diversas topologias do sistema, seja em condição normal de operação, seja em uma configuração de rede alterada ou em um processo de recomposição. Com a opção de desligar linhas de transmissão como um recurso para controle de tensão, tem-se diversas topologias a serem analisadas, resultando em um elevado número de simulações, que, por sua vez, se traduzem em recursos humanos e tempo de execução (alocação de homem/hora). No presente trabalho, faz-se uso da análise no domínio da frequência visando quantificar os impactos na resposta em frequência do sistema quando do desligamento de linhas de transmissão para controle de tensão. Assim é possível inferir sobre a possibilidade de extrapolar os procedimentos operativos quando do sistema em condição normal de operação, para as demais configurações analisadas, reduzindo substancialmente o volume de trabalho. As análises no domínio da frequência são referenciadas por simulações no domínio do tempo, denotando a viabilidade da metodologia apresentada.

**Index Terms** -- Interconnected power systems, Electromagnetic transients, Switching transients, Frequency-domain, Voltage control.

## I. INTRODUÇÃO

Durante a operação diária do Sistema Interligado Nacional (SIN), várias são as variações do perfil de tensão, decorrentes basicamente das mudanças nos valores da demanda e/ou das alterações na topologia da rede básica por contingências.

Via de regra, busca-se regular a tensão nas subestações que pertencem a um conjunto mínimo, cujas tensões servem de referência, para o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) supervisionar e atuar na adequação do perfil de tensão no sistema de transmissão.

Desta forma, durante a operação do SIN, várias são as decisões a serem tomadas, em um período de tempo relativamente curto, visando melhorar o estado de operação de modo a não impor riscos à integridade dos equipamentos e

instalações, de forma a não comprometer a segurança operativa e a confiabilidade do sistema interligado.

O controle da tensão pode ser feito remotamente nas usinas, através dos reguladores automáticos de tensão nas máquinas, mas também pode ser efetuado de forma pontual no sistema de transmissão, de subtransmissão e/ou de distribuição. De um modo geral, o controle nas usinas não é suficiente e o controle junto à carga mostra-se bem mais efetivo.

No SIN este controle mais efetivo e pontual pode ser realizado automaticamente por transformadores com controle de comutador (*Load Tap Changing* – LTC), por compensadores síncronos e/ou compensadores estáticos de reativos, e manualmente por meio da conexão ou desconexão de bancos de capacitores e/ou reatores em derivação.

Em determinadas condições operativas e em dados cenários energéticos, sobretudo quando se tem circuitos energizados com baixo carregamento (muito frequente nas interligações em 500kV nos cenários de baixo intercâmbio), faz-se necessário regular o nível de tensão de uma área geoeletrica como um todo. Nestes casos, podem-se esgotar os recursos disponíveis (remotos e próximos à carga) para um controle efetivo da tensão. Uma vez próximo ou esgotado os recursos, utiliza-se o desligamento programado de linhas de transmissão como um recurso efetivo para reduzir o nível das tensões, em períodos de carga leve e/ou cenários de baixo intercâmbio, sem comprometer a confiabilidade do SIN, garantida a operação segura em caso de contingências simples (critério *N-1*).

Com a opção de desligar linhas de transmissão como um recurso factível para o controle da tensão, tem-se diversas topologias ao se considerar as possíveis combinações, desde a condição de operação normal, até a configuração na qual mais de um circuito são desligados simultaneamente.

Na definição dos procedimentos operativos para energização de equipamentos e instalações faz-se necessário avaliar as solicitações transitórias impostas, em todas as possíveis topologias do sistema, de forma a não restringir as condições de manobra em função da configuração do sistema [1, 2, 3]. Para tanto, adicionalmente às condições de operação normal e recomposição, as topologias que se estabelecem com o desligamento de circuitos devem ser analisadas.

Da combinação das possibilidades acima mencionadas, tem-se um elevado número de simulações a serem contempladas nos estudos de transitórios eletromagnéticos,

---

Alécio B. Fernandes é engenheiro especialista do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, Rua Quinze de Março, 50, 50.761-901, Recife, PE, Brasil (e-mail: [alecio@ons.org.br](mailto:alecio@ons.org.br)).

Antonio Samuel Neto é engenheiro do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, Rua Quinze de Março, 50, 50.761-901, Recife, PE, Brasil (e-mail: [asneto@ons.org.br](mailto:asneto@ons.org.br)).

que, por sua vez, se traduzem em recursos humanos e tempo de execução (alocação de homem/hora).

Em um sistema interligado cada vez mais “malhado”, considerar todas as topologias da rede quando da energização de equipamentos, torna o estudo praticamente irrealizável. Por isso, uma metodologia que possibilite uma análise comparativa das diversas topologias a serem contempladas nos estudos, é de grande valia, direcionando-os, e assim proporcionando uma redução significativa de esforço manual e de tempo, na realização dos mesmos.

No presente trabalho, faz-se uso da análise no domínio da frequência visando quantificar os impactos na resposta em frequência do sistema quando do desligamento de linhas de transmissão para controle de tensão. Assim é possível inferir sobre a possibilidade de extrapolar os procedimentos operativos quando do sistema em condição normal de operação, para as demais configurações analisadas (rede alterada), reduzindo substancialmente o número de simulações no domínio do tempo e, por conseguinte, o volume de trabalho.

As inferências realizadas com base nas análises no domínio da frequência são referenciadas por simulações no domínio do tempo, denotando a viabilidade da metodologia apresentada, validando-a.

## II. HISTÓRICO E MOTIVAÇÃO

Com a entrada em operação do segundo autotransformador 550/242/14,5kV, 450MVA, na SE Marabá 500kV (Área Pará do Sistema Norte do SIN), realizaram-se estudos de transitórios eletromagnéticos com o objetivo de definir os procedimentos para a manobra de energização deste equipamento, estando a SE Marabá 500kV em vazio (recomposição da instalação) e em carga, em condições normais de operação. Ou seja, estando em operação todas as linhas de transmissão 500kV e 230kV próximas.

Considerando que existe atualmente a necessidade de retirada de circuitos 500kV para controle de tensão, no trecho entre as SE 500kV Tucuruí, Marabá, Açailândia, Imperatriz e Presidente Dutra (vide Fig. 1), verifica-se a necessidade de realizar estudos complementares, visando não restringir a realização da manobra de energização do segundo autotransformador, extrapolando os procedimentos operativos para todas as configurações operativas possíveis.

## III. PREMISSAS BÁSICAS

Visando restringir a modelagem do sistema à área de interesse, os sistemas em 500kV são representados por equivalentes nas SE 500kV Vila do Conde; Presidente Dutra e Colinas (vide Figura 1). Os equivalentes (dados de resistências e reatâncias, de seqüência zero e positiva, na frequência 60Hz) são obtidos fazendo-se uso do programa ANAFAS (Análise de Faltas Simultâneas) [4].

Nos estudos, considera-se a condição de carga mínima no ano (fevereiro de 2007), para as subestações representadas nos estudos [5].

Consideram-se todos os reatores de linhas e de barramentos, 500kV e 230kV, disponíveis para operação, bem como os compensadores síncronos (CS) das SE 230kV Marabá (01 unidade com potência nominal de -90 a +150Mvar) e Imperatriz (03 unidades com potência nominal de -70 a +100Mvar, cada). Consideram-se ainda os bancos de capacitores série (BCS) e bancos de capacitores controlados a tiristores (TCSC) 500kV, disponíveis para operação nas áreas em estudo.

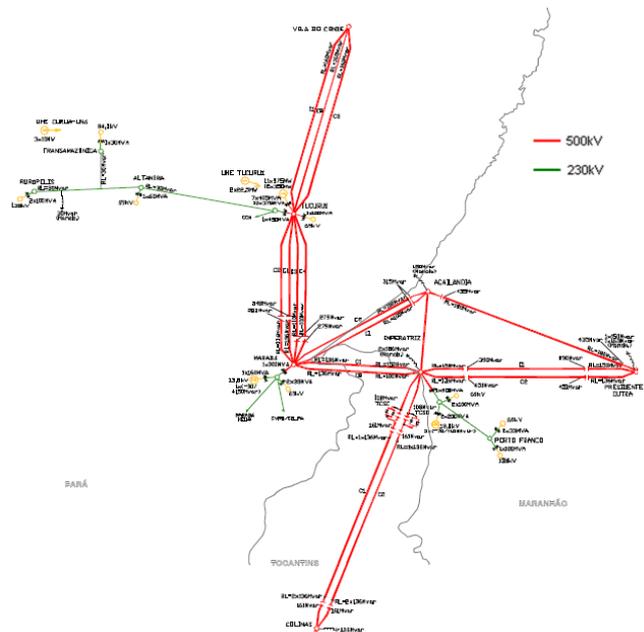


Fig. 1 Área Pará do Sistema Norte (Sistema Interligado Nacional).

## IV. MODELOS COMPUTACIONAIS

As linhas de transmissão 500kV e 230kV são representadas por modelos a parâmetros distribuídos, que consideram os atraso entre tensões (e correntes) em terminais opostos, representando o fenômeno da propagação de ondas [6]. A dependência com a frequência dos parâmetros da linha, por sua vez, é desprezada [1, 6, 7].

Apresentam-se na Fig. 2 as curvas de magnetização dos dois autotransformadores da SE Marabá 500kV.

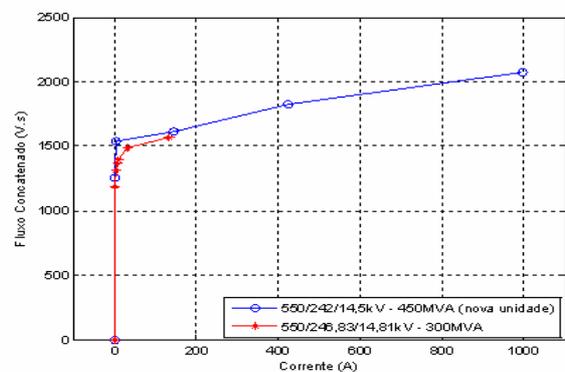


Fig. 2 Curvas de magnetização, referenciadas aos enrolamentos 500kV, dos autotransformadores da SE Marabá 500kV.

Os autotransformadores 550/242/14,5kV, 450MVA (nova unidade) e 550/246,83/14,81kV, 300MVA (unidade existente), da SE Marabá, bem como os demais transformadores contemplados no estudo, são modelados no programa ATP fazendo uso do componente *SATURABLE TRANSFORMER* [8], segundo os dados fornecidos pelos agentes proprietários.

Consideram-se modelos “*type-58*” [8] na representação dos compensadores síncronos (CS) das SE 230kV Marabá (01 unidade) e Imperatriz (03 unidades).

#### V. ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

O programa ATP (*Alternative Transients Program*) disponibiliza uma ferramenta denominada *FREQUENCY SCAN*, que possibilita a realização de varreduras na frequência para um determinado sistema em estudo, a partir de um ou mais pontos de observação [8].

Fazendo uso desta ferramenta é possível verificar o comportamento da impedância do sistema com a frequência,  $Z(j\omega)$ , a partir de um ponto específico, e assim determinar frequências de ressonância, contribuição de equipamentos para a resposta em frequência do sistema, dentre outras possibilidades.

Uma limitação desta ferramenta é o fato de considerar o sistema como sendo linear na solução em regime permanente para cada frequência, desprezando as não linearidades, a exemplo dos efeitos da saturação nos transformadores. Assim, os valores obtidos podem servir como um dado relativo, não sendo um valor absoluto, possibilitando apenas inferir sobre a resposta do sistema de modo comparativo, uma vez que as não linearidades são desconsideradas.

No estudo em questão, faz-se uso da rotina *FREQUENCY-SCAN* no intuito de correlacionar as componentes de frequência, em virtude das não linearidades dos transformadores, com as frequências de ressonância na impedância do sistema (ponto de conexão dos autotransformadores sob manobra).

#### VI. DADOS UTILIZADOS NOS ESTUDOS

Apresenta-se na Tabela I os dados utilizados nos estudos estatísticos, fazendo uso do componente *STATISTIC SWITCH* do programa ATP [8].

TABELA I. Dados utilizados nos estudos estatísticos do programa ATP – Componente *STATISTIC SWITCH*.

Tipo de Chave	Distribuição Gaussiana de Probabilidade
Tempo Médio de Fechamento (ms)	100,0
Espaçamento Uniforme do Tempo Médio na Frequência Fundamental (Graus)	0 a 360
Dispersão entre Pólos (ms)	$\pm 2,5$
Desvio (ms)	0,833333
Número de Energizações	100

Nos casos determinísticos, utiliza-se um passo de tempo (*time step*,  $\Delta t$ ) de 25,0 $\mu$ s, sendo o tempo máximo de simulação 1,0s. Segundo o teorema da amostragem [9], um passo de

tempo de 25,0  $\mu$ s, possibilita a representação de componentes de frequência de até 20,0 kHz (frequência de Nyquist,  $f_N=1/2\Delta t$ ).

#### VII. ESTUDOS REALIZADOS

Com base no caso de regime permanente, obtido com o programa ANAREDE [10], são estabelecidas as condições iniciais (regime permanente), nas diversas topologias em estudo. Para tanto, faz-se uso do caso base para o primeiro quadrimestre de 2007 [5].

##### A. Análises no domínio da frequência

Considerando a Área Pará do Sistema Norte em operação normal (sistema íntegro) estando o autotransformador 550/246,83/14,81kV, 300MVA da SE Marabá energizado em vazio e o autotransformador 550/242/14,5kV, 450MVA desenergizado, faz-se uma análise no domínio da frequência visando determinar como o desligamento de linhas de transmissão de 500kV para controle de tensão, pode vir a alterar a resposta em frequência do sistema, vista do barramento 500kV da SE Marabá.

Com base nesta análise pode-se inferir sobre a possibilidade de extrapolar os procedimentos de energização dos autotransformadores, estando o sistema íntegro, para as demais configurações possíveis, em decorrência do desligamento de circuitos 500kV para controle de tensão.

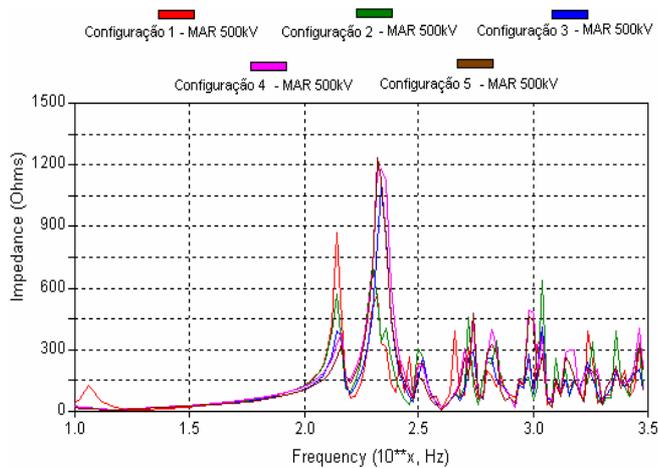
Para tanto, faz-se uso da rotina *FREQUENCY SCAN* do programa ATP. Na análise em questão é realizada uma varredura na faixa de frequência de 10Hz a 3,0kHz. As fontes de tensão são retiradas, e os pontos de conexão destas aterrados. No ponto de interesse (barramento 500kV da SE Marabá), faz-se a injeção de uma fonte de corrente (seqüências zero e positiva, amplitude 1,0A), cuja frequência será variada pela rotina *FREQUENCY SCAN* no espectro desejado.

Com a topologia da rede em questão, foram analisadas 05 (cinco) configurações distintas, decorrentes do desligamento de circuitos 500kV para controle de tensão, listadas a seguir:

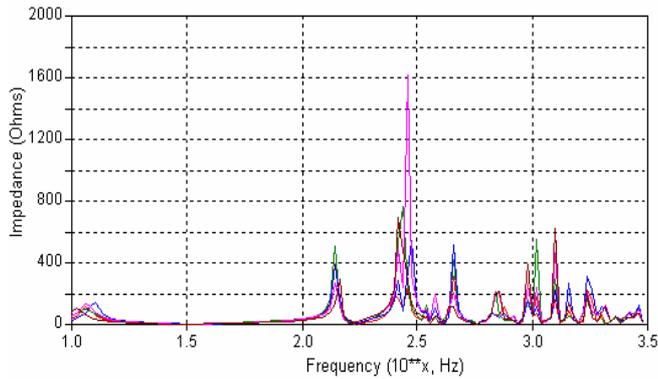
- Configuração 1: Rede completa – Sistema íntegro. Todas as linhas de transmissão 500kV da Área Pará do Sistema Norte energizadas e em operação.
- Configuração 2: Desligamento das LT 500kV Tucuruí – Marabá circuito 3 (TCMB-LA7-03) e Marabá – Imperatriz circuito 2 (MBIZ-LT7-02).
- Configuração 3: Desligamento das LT 500kV Tucuruí – Marabá circuito 3 (TCMB-LA7-03) e Açailândia – Marabá circuito 2 (AÇMB-LI7-02).
- Configuração 4: Desligamento das LT 500kV Tucuruí – Marabá circuito 3 (TCMB-LA7-03), Açailândia – Marabá circuito 2 (AÇMB-LI7-02) e Marabá – Imperatriz circuito 2 (MBIZ-LT7-02).
- Configuração 5: Desligamento das LT 500kV Açailândia – Marabá circuito 2 (AÇMB-LI7-02) e Marabá – Imperatriz circuito 2 (MBIZ-LT7-02).

Apresentam-se a seguir os resultados obtidos para o comportamento da impedância do sistema com a frequência (seqüências zero e positiva), quando da injeção da fonte de

corrente no barramento 500kV da SE Marabá. Comparam-se as respostas em frequência para a impedância,  $Z(j\omega)$ , nas 05 (cinco) configurações em análise.



(a) Amplitude da impedância de seqüência zero



(b) Amplitude da impedância de seqüência positiva

Fig. 3 Resposta em frequência vista no barramento 500kV da SE Marabá.

Dos resultados, pode-se verificar que o desligamento de circuitos 500kV derivados da SE Marabá, nas cinco configurações analisadas, altera a resposta em frequência (impedâncias de seqüência zero e positiva) de forma significativa apenas para frequências superiores a 250,0Hz, sendo pouco expressivas para frequências inferiores.

Com o desligamento de circuitos 500kV não se verificam deslocamentos expressivos nos diversos pontos de ressonância. As distinções se limitam basicamente às amplitudes da impedância,  $Z(j\omega)$ , nas frequências ressonantes.

Caso as correntes transitórias decorrentes da energização dos autotransformadores da SE Marabá 500kV apresentem componentes de frequência nos distintos pontos de ressonância, apresentados nas amplitudes das impedâncias, as sobretensões (e sobrecorrentes) podem ser significativamente distintas nas cinco configurações analisadas. Caso as componentes de frequência não excitem os pontos de ressonância, as diferenças serão desprezíveis.

No intuito de verificar quais as componentes de frequência presentes nas correntes transitórias quando da energização do

autotransformador 500/242/14,5kV, 450MVA, para a fase A (maior amplitude no estudo estatístico, estando todas as linhas de transmissão 500kV da Área Norte energizadas – Configuração 01), faz-se uma decomposição em série de Fourier (*Fourier Decomposition*) da respectiva forma de onda da sobrecorrente transitória, para o primeiro ciclo após a manobra e o último ciclo da simulação.

A corrente transitória verificada na fase A do autotransformador 500/242/14,5kV, 450MVA da SE Marabá, e os resultados da decomposição em série de Fourier, são apresentados nas Fig. 4 e 5, respectivamente.

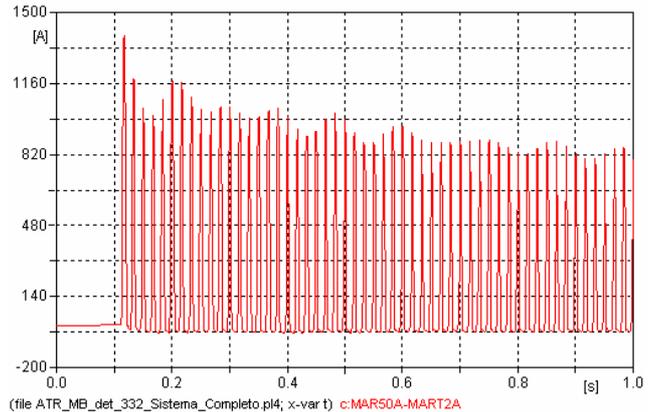
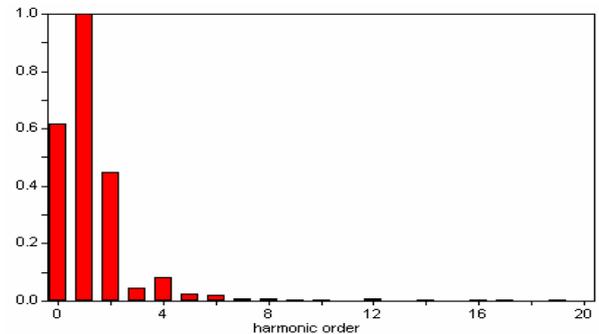
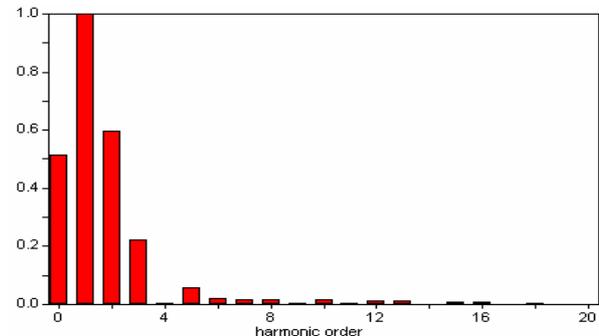


Fig. 4 Corrente da fase A no enrolamento de 500kV do autotransformador – 500/242/14,5kV, 450MVA da SE Marabá. Configuração 1- Todas as linhas de transmissão 500kV da Área Norte energizadas



(a) Primeiro ciclo (110,750ms a 127,417ms).



(b) Último ciclo (983,333ms a 1,0 s).

Fig. 5 Decomposição em série de Fourier para a corrente da fase A no enrolamento de 500kV do autotransformador – 500/242/14,5kV, 450MVA da SE Marabá. Configuração 1 - Todas as linhas de transmissão 500kV da Área Norte energizadas.

Pode-se observar que as componentes de frequência mais significativas em relação à componente fundamental são: a componente de ordem zero (ou CC), a segunda harmônica (120,0Hz) e a terceira harmônica (180,0Hz, apenas no último ciclo da simulação); enquanto as demais componentes harmônicas se mostram inferiores a 10% da amplitude da fundamental nas duas “janelas” de observação.

Fazendo a correlação das componentes harmônicas (Fig. 5 (a) e (b)) com as respostas em frequência do sistema em estudo (Fig. 3 (a) e (b)), pode-se inferir que as cinco configurações em análise não devem diferir significativamente, quanto às sobretensões e sobrecorrentes transitórias, decorrentes da energização dos autotransformadores da SE Marabá 500kV.

Com base nas análises no domínio da frequência, espera-se uma boa concordância para as solicitações transitórias quando das simulações no domínio do tempo.

### B. Análise no domínio do tempo

Considerando a Área Pará do Sistema Norte em operação

TABELA II Chaveamentos que resultaram nos valores máximos das grandezas monitoradas – Energização do autotransformador 550/242/14,5kV, 450MVA, da SE Marabá, considerando a saída de circuitos 500kV para controle de tensão.

Energização do autotransformador 550/242/14,5kV – 450MVA, da SE Marabá	Configuração				
	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3	Configuração 4	Configuração 5
Tensões no barramento 500kV da SE Marabá	470,994 kV (1,154pu)	490,995 kV (1,203pu)	478,982 kV (1,173pu)	467,946 kV (1,146pu)	473,266 kV (1,159pu)
Correntes de fase nos enrolamentos 500kV do autotransformador 550/246,83/14,81kV, 300MVA – MBAT7-01 da SE Marabá	24,563 A (0,055pu) ( $I_N = 445,400A$ )	66,734 A (0,150pu) ( $I_N = 445,400A$ )	16,771 A (0,038pu) ( $I_N = 445,400A$ )	20,963 A (0,047pu) ( $I_N = 445,400A$ )	32,098 A (0,072) ( $I_N = 445,400A$ )
Correntes de fase nos enrolamentos 500kV do autotransformador 550/242/14,5kV, 450MVA (nova unidade) da SE Marabá	1.387,130 A (2,077pu) ( $I_N = 668,043A$ )	1.271,501 A (1,903pu) ( $I_N = 668,043A$ )	1.238,355 A (1,854pu) ( $I_N = 668,043A$ )	1.078,814 A (1,615pu) ( $I_N = 668,043A$ )	1.206,520 A (1,806pu) ( $I_N = 668,043A$ )
Correntes de neutro no lado 500kV do autotransformador 550/246,83/14,81kV, 300MVA – MBAT7-01 da SE Marabá	32,715A	66,325A	28,657A	35,964A	37,719A
Correntes de neutro no lado 500kV do autotransformador 550/242/14,5kV, 450MVA (nova unidade) da SE Marabá	1153,804A	990,316A	1006,125A	875,095A	991,737A

Dos resultados dos estudos estatísticos, observa-se que:

- Para as tensões no barramento 500kV da SE Marabá, a maior diferença observada é de 5,0% (em relação ao menor valor), ou 23,05kV, considerando as 05 configurações analisadas.
- Para as correntes de fase no autotransformador 550/246,83/14,81kV, 300MVA – MBAT7-01 da SE Marabá, a maior diferença observada é de 297,9% (em relação ao menor valor), ou 49,96A, quando se tem a energização do autotransformador 550/242/14,5kV – 450MVA, da SE Marabá nas 05 configurações analisadas.

normal (sistema íntegro) e o autotransformador 550/246,83/14,81kV, 300MVA da SE Marabá energizado em vazio, estando o autotransformador 550/242/14,5kV, 450MVA desenergizado, faz-se um estudo estatístico visando determinar as piores situações possíveis considerando as 05 (cinco) configurações citadas anteriormente, quando da energização do autotransformador 550/242/14,5kV, 450MVA (nova unidade), da SE Marabá, para as tensões e correntes nos seguintes pontos do sistema:

- Tensões: No barramento 500kV da SE Marabá.
- Correntes de fases e neutro: Nos enrolamentos 500kV do autotransformador 550/242/14,5kV, 450MVA e do autotransformador 550/246,83/14,81kV, 300MVA, da SE Marabá.

Os valores máximos para as grandezas monitoradas, e os dados referentes às respectivas energizações, resultado dos diversos estudos estatísticos, são apresentados na Tabela II.

- Apesar de apresentar um elevado índice percentual na diferença de corrente no autotransformador 550/246,83/14,81kV, 300MVA – MBAT7-01 da SE Marabá, os valores das correntes, nas 05 configurações analisadas, são extremamente baixos quando comparado com o valor da corrente nominal ( $I_N = 445,400A$ ).
- Para as correntes de fase no autotransformador 550/242/14,5kV, 450MVA da SE Marabá, a maior diferença observada é de 28,6% (em relação ao menor valor), ou 308,32A, quando se tem a energização do

autotransformador 550/242/14,5kV – 450MVA, da SE Marabá nas 05 configurações analisadas.

- Para as correntes de neutro no autotransformador 550/246,83/14,81kV, 300MVA – MBAT7-01 da SE Marabá, a maior diferença observada foi de 131,4% (em relação ao menor valor), ou 37,67A, quando se tem a energização do autotransformador 550/242/14,5kV, 450MVA, da SE Marabá nas 05 configurações analisadas.
- Para as correntes de neutro no autotransformador 550/242/14,5kV, 450MVA da SE Marabá, a maior diferença observada foi de 31,8% (em relação ao menor valor), ou 278,71A, quando se tem a energização do autotransformador 550/242/14,5kV, 450MVA, da SE Marabá nas 05 configurações analisadas.
- A maior sobrecorrente verificada, decorrente da energização do autotransformador 550/242/14,5kV, 450MVA, da SE Marabá, é obtida quando se tem o sistema completo (íntegro – configuração normal de operação).
- Verifica-se que as sobretensões e sobrecorrentes transitórias, decorrentes da energização do autotransformador 550/242/14,5kV, 450MVA, da SE Marabá, não atinge valores restritivos em nenhuma das 05 configurações analisadas.
- Nas 05 configurações, os resultados não se alteram de forma significativa no domínio do tempo. Tal constatação concorda plenamente com as análises no domínio da frequência.

### VIII. CONCLUSÕES

Para energização do autotransformador 550/242/14,5kV, 450MVA os resultados dos estudos mostram que as manobras de energização não impõem riscos à integridade dos equipamentos, e as solicitações transitórias, não atingem valores restritivos nas 05 configurações analisadas.

Considerando as configurações analisadas (01 sendo a rede completa e 04 topologias de rede alterada), os resultados não se alteram de forma significativa no domínio do tempo. Tal constatação concorda plenamente com as análises realizadas no domínio da frequência.

As afirmações feitas com base nas análises em frequência (impedância  $Z(j\omega)$ ) se mostraram corretas, sendo validadas por simulações no domínio do tempo, demonstrando a potencialidade da metodologia de análise apresentada.

Conclui-se, portanto, ser possível adotar os mesmos procedimentos operativos para energização dos autotransformadores na SE Marabá 500kV, em qualquer topologia da rede, mesmo considerando o desligamento de circuitos 500kV para controle de tensão, restritas às 05 configurações aqui analisadas.

Tradicionalmente, as simulações de manobra são realizadas exclusivamente no domínio do tempo, contemplando as diversas topologias da rede, analisando a presença e a indisponibilidade de circuitos e equipamentos. Via de regra, a investigação tem início com um estudo estatístico, seguido da reprodução dos casos mais críticos (estudo determinístico), nas situações mais severas, para cada uma das grandezas monitoradas.

A montagem dos casos, os ajustes, a execução das simulações e a elaboração do relatório, são tarefas que devem ser contabilizadas em termos de homens/hora (ou dias úteis).

Desta forma, se o presente estudo fosse realizado da forma tradicional (análises unicamente no domínio do tempo), estima-se o triplo do tempo de execução (homens/hora). Portanto, a aplicação da metodologia de análise no domínio da frequência, ao se contemplar todas as topologias aqui consideradas, proporcionou uma economia (estimada) de aproximadamente 66% no tempo necessário à realização dos estudos.

### IX. REFERÊNCIAS

- [1] H. W. Dommel, *Electromagnetic Transients Program Reference Manual*, Vancouver: Department of Electrical Engineering, The University of British Columbia, Canada, 1996.
- [2] J. A. Martinez-Velasco, *Computer Analysis of Electrical Power System Transients: Selected Readings*, Piscataway: IEEE Press, 1997.
- [3] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, *Submódulo 23.3: Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos – Módulo 23: Critérios para Estudos*, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
- [4] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, *ANAFAS – Análise de Falhas Simultâneas*, V3.0. Rio de Janeiro, Brasil, 1998.
- [5] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, *Planejamento da Operação Elétrica do Sistema Interligado Nacional - Quadrimestre Jan-Abr/2007, Regiões Norte e Nordeste, RE 3/365/2006*, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.
- [6] A. B. Fernandes, *Linhas de Transmissão: Um Modelo no Domínio de Fases Preciso e Eficiente*, Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Brasil, 2001.
- [7] A. B. Fernandes, W. L. A. Neves, *Phase-Domain Transmission Line Models Considering Frequency-Dependent Transformation Matrices*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 2, pp. 708-714, April 2004.
- [8] Leuven EMTP Center, *ATP - Alternative Transient Program - Rule Book*, Herverlee, Belgium, 1987.
- [9] IEEE Working Group 15.08.09, *Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Programs*, Piscataway: IEEE PES Special Publication, 1998.
- [10] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, *ANAREDE – Programa de Análise de Redes*, V08. Rio de Janeiro, Brasil, 2003.
- [11] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, S. H. Nawab, *Signals and Systems – Second Edition*. New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1992.

### X. BIOGRAFIAS

**Alécio Barreto Fernandes** (S'1999-M'2002) nasceu em Brasília, Brasil, em 1971. Recebeu os títulos de B.Sc., M.Sc. e Ph.D. em engenharia elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB) em 1994, 1996 e 2001, respectivamente. De 1996 a 1998 trabalhou como engenheiro do Consórcio de Alumínio do Maranhão (ALUMAR) em São Luis, Brasil. De 2001 a 2003 esteve como Diretor de Pesquisas do NEPEN (Núcleo de Estudos e Pesquisas do Nordeste) e atuou como professor e coordenador do curso de graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade Pio Décimo, em Aracaju, SE, Brasil. De 2003 a 2005 trabalhou como consultor do Operador Nacional do Sistema Elétrico, ONS. Desde 2005 é engenheiro do ONS, em Recife, PE, Brasil. Membro do IEEE e do CIGRÉ, seus principais interesses incluem transitórios eletromagnéticos e modelagem computacional de equipamentos de sistemas de potência.

**Antonio S. Neto** nasceu em Recife, Brasil em 1979. Recebeu os títulos de B.Sc. e M.Sc. em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em 2003 e 2005, respectivamente. Desde 2005, trabalha como engenheiro do Operador Nacional do Sistema Elétrico, ONS, em Recife, PE, Brasil.