

Varredura em Frequência Aplicada a Estudos de Recomposição de Sistemas Elétricos

Fernando A. X. França, Washington L. A. Neves, Alecio B. Fernandes

Resumo-- Nos procedimentos adotados para estudos de recomposição de sistemas elétricos de potência, a realização de simulações de transitórios eletromagnéticos torna-se indispensável, definindo rotas factíveis e as tensões máximas de energização dos equipamentos. Tradicionalmente são realizadas simulações de transitórios eletromagnéticos, exclusivamente no domínio do tempo, contemplando as diversas configurações de sistema, analisando a presença ou a indisponibilidade de circuitos e equipamentos, bem como os patamares mínimos de carga restabelecida. Em virtude do elevado número de possibilidades (diferentes configurações) e das diversas manobras a serem simuladas, considerar todas as topologias da rede quando da energização de equipamentos, torna o estudo praticamente irrealizável. No presente trabalho, utiliza-se a análise de varredura em frequência como ferramenta auxiliar aos estudos de recomposição, permitindo avaliar de forma ágil e segura as diversas configurações (topologias) contempladas na análise, reduzindo significativamente o número de simulações necessárias, resultando na otimização dos estudos de transitórios eletromagnéticos e na redução da subjetividade do analista nas análises, se traduzindo em segurança operativa. As análises de varredura em frequência são validadas por simulações no domínio do tempo, comprovando a potencialidade da metodologia aqui aplicada.

Palavras-Chaves-- sistemas de potência, transitórios eletromagnéticos, varredura em frequência, recomposição de sistemas de potência, segurança operativa, sistema interligado nacional.

I. INTRODUÇÃO

OS sistemas elétricos de potência estão sujeitos a perturbações de diversas naturezas, que podem resultar em desligamentos de equipamentos, instalações e, em alguns casos, de regiões por completo.

Os estudos de recomposição são estruturados e planejados para definir os procedimentos operativos, visando o restabelecimento do sistema após perturbação geral ou parcial.

O processo de recomposição de um sistema ou instalação se processa em duas fases, denominadas de recomposição fluente e recomposição coordenada [1].

Na fase fluente da recomposição os procedimentos opera-

cionais previamente definidos permitem a recomposição de áreas definidas, compatibilizando carga e geração, em uma configuração mínima de rede [2]. Em uma segunda fase, na recomposição coordenada, os centros de operação do sistema controlam a liberação de carga adicional e, quando for o caso, o fechamento de circuitos paralelos ou anéis entre os sistemas restabelecidos na primeira fase da recomposição.

Na definição dos procedimentos de recomposição, torna-se indispensável avaliar as solicitações transitórias impostas aos equipamentos e instalações, nas diferentes topologias em análise, quantificando as sobretensões e sobrecorrentes decorrentes de surtos de manobra, a exemplo das observadas na energização de linhas de transmissão e transformadores de potência [3; 4].

Tradicionalmente nos estudos de recomposição são realizadas simulações de transitórios eletromagnéticos, exclusivamente no domínio do tempo, objetivando definir os procedimentos para as manobras de energização de circuitos e equipamentos em diversas configurações, observando a sequência do processo de recomposição nas várias combinações possíveis, estabelecendo rotas prioritárias e alternativas, quando possível.

O elevado número de possibilidades (diferentes topologias) e as diversas manobras a serem simuladas, demandam um esforço manual considerável, desde a preparação dos casos até a execução das simulações. Some-se a isso, o tempo de análise e compilação dos resultados, fortemente dependentes da subjetividade e da experiência do analista.

A análise de varredura em frequência é utilizada neste trabalho como ferramenta auxiliar aos estudos de recomposição, com intuito de avaliar de forma mais ágil e segura as diversas configurações (topologias) possíveis, determinando alternativas factíveis, permitindo reduzir significativamente o número de simulações necessárias, resultando em uma considerável redução no tempo de execução dos estudos de transitórios eletromagnéticos e da subjetividade do analista, se traduzindo em segurança operativa. As inferências feitas a partir da análise de varredura em frequência são validadas por simulações no domínio do tempo, denotando a viabilidade da metodologia aqui aplicada.

II. METODOLOGIA

Usualmente, após a definição das topologias a serem contempladas nos estudos de transitórios eletromagnéticos, faz-se necessária a realização de um grande número de simulações estatísticas, que requerem a reprodução dos piores

Fernando A. X. França concluiu o seu trabalho de mestrado na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em Campina Grande, PB, Brasil (e-mail: faxfranca@gmail.com).

Washington L. A. Neves é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em Campina Grande, PB, Brasil (e-mail: waneves@dee.ufcg.edu.br).

Alecio B. Fernandes é engenheiro especialista do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em Recife, PE, Brasil (e-mail: alecio@ons.org.br).

casos por simulações determinísticas. Este processo pode tornar-se bastante demorado, a depender do número de possibilidades, uma vez que requer ajustes em regime permanente para cada topologia considerada. A identificação das ressonâncias, por exemplo, considerando o elevado número de casos, torna-se altamente dependente da subjetividade e experiência do analista.

A varredura em frequência tem sido utilizada como ferramenta complementar na realização dos estudos de transitórios eletromagnéticos, especificamente nos estudos de recomposição [5]. Tal análise permite uma triagem e foco nos casos mais críticos, ao se definir similaridades entre distintas topologias de rede, resultando na otimização dos estudos de transitórios eletromagnéticos.

Ao utilizar a impedância de Thévenin nas análises, tem-se um ganho substancial de tempo, pois tal abordagem dispensa a necessidade de ajustes em regime permanente, uma vez que todas as fontes de tensão são curto-circuitadas e todas as fontes de corrente representadas como circuito aberto [5].

As afirmações feitas a partir da análise na frequência são validadas por simulações no domínio do tempo, comprovando as conclusões do analista, resultando em avaliações sistêmicas mais objetivas, que por sua vez, se traduzem em segurança operativa. A Figura 1 apresenta de forma esquemática a abordagem das duas técnicas [5]: tradicional e a aqui aplicada.

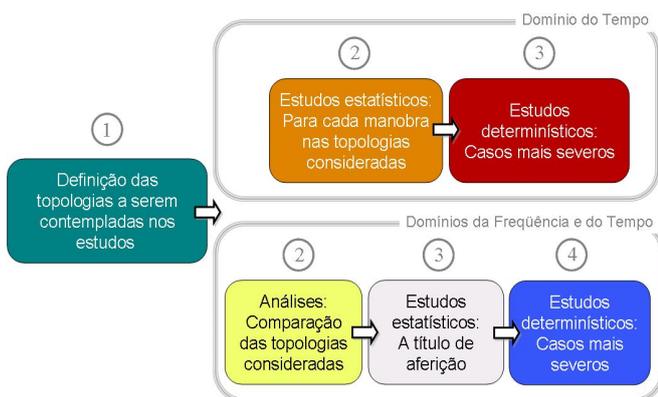


Fig. 1. Abordagem tradicional versus metodologia aplicada.

III. FERRAMENTA *FREQUENCY SCAN*

Dentre as diversas funcionalidades de programas para cálculo de transitórios eletromagnéticos, a exemplo do ATP [6], é possível obter soluções fasoriais de regime permanente a uma dada frequência ou em uma faixa de frequência desejada. Para tanto, o ATP disponibiliza uma ferramenta chamada *FREQUENCY SCAN*, que possibilita a realização de varreduras em frequência para um determinado sistema em estudo, a partir de um ou mais pontos de observação, tornando possível verificar o comportamento da admitância (ou impedância) do sistema em um espectro de frequência [6].

Fazendo uso desta ferramenta é possível verificar o comportamento da admitância (ou impedância) do sistema com a frequência, 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. Esta metodologia se processa da

seguinte forma: considerando uma determinada área sob análise, todas as fontes de tensão são retiradas e seus pontos de conexão aterrados (curto-circuitados), enquanto as fontes de corrente são representadas por circuitos abertos. No ponto de interesse (definido pelo usuário), faz-se a injeção de uma fonte de corrente (seqüências zero e positiva, geralmente com amplitude 1,0 A), cuja frequência será variada automaticamente pela rotina *FREQUENCY SCAN*, no espectro desejado (vide Figura 2) [5; 6].

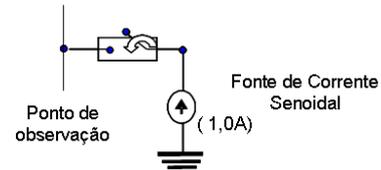


Fig. 2. Injeção de corrente no ponto de interesse - Rotina *FREQUENCY SCAN* disponibilizada pelo programa ATP [6].

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 comparações, uma vez que as não linearidades são desconsideradas [5].

A partir dos resultados obtidos, é realizada uma comparação das respostas em frequência, admitância (ou impedância), nas diversas topologias consideradas no estudo. As distinções são visualizadas nas amplitudes da admitância (ou impedância) e nos deslocamentos dos picos ressonantes. A partir destas comparações é possível fazer inferências quanto às diferenças entre as topologias observadas.

As constatações obtidas a partir da análise de varredura em frequência devem ser aferidas por simulações no domínio do tempo. Tal comprovação visa validar as análises quando as não linearidades se fazem presentes, uma vez que a ferramenta *FREQUENCY SCAN* desconsidera as não linearidades, mesmo que representadas, e apenas os componentes lineares do sistema são levados em consideração [6].

IV. ESTUDO DE CASO

A recomposição geral da Área Oeste 230 kV do Sistema Nordeste, parte integrante do Sistema Interligado Nacional (SIN), era iniciada unicamente a partir da SE 230 kV Boa Esperança, com a energização da LT 230 kV Boa Esperança – Teresina (04L1 ou 04L2) [7]. Entretanto, na indisponibilidade do autotransformador 05T1 (500/230/13,8 kV, 300 MVA) da SE 500 kV Boa Esperança, o procedimento acima descrito não era possível, uma vez que a SE 230 kV Boa Esperança permanecia desenergizada [7]. O diagrama unifilar com a configuração do sistema em estudo é apresentado na Figura 3.

Diante desta possível indisponibilidade, estudos realizados pelo ONS analisaram a possibilidade de recomposição fluente das SEs 230 kV Teresina, Piripiri e Boa Esperança, a partir da SE 500 kV Teresina II, facultando à operação uma rota alternativa para o restabelecimento das cargas 138 kV, 69 kV e 13,8 kV da Área Oeste do Sistema Nordeste.

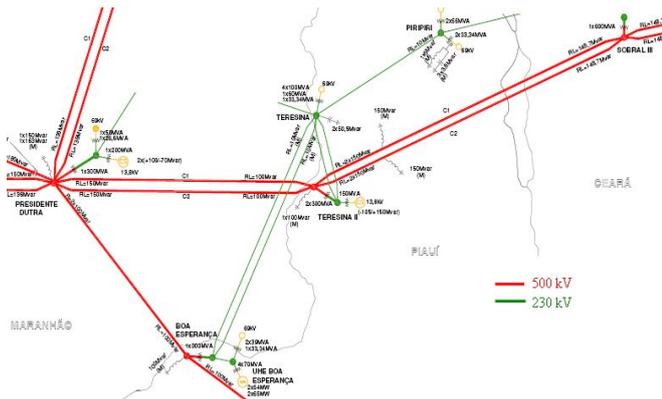


Fig. 3. Área Oeste do Sistema Nordeste do SIN.

Para a recomposição fluente do sistema em estudo, foi necessário definir os procedimentos para energização das linhas de transmissão e transformadores, bem como verificar a necessidade de estabelecer patamares mínimos de carga no processo de recomposição das instalações, tendo por base as solicitações transitórias decorrentes das manobras.

Durante a recomposição da Área Oeste, inicialmente foram verificadas elevadas sobretensões na SE 230 kV Piripiri, quando da energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores 04T1 e 04T2, 230/69/13,8 kV, 33,3 MVA, desta subestação, quando se tinha a SE Teresina e a UHE Boa Esperança energizadas em vazio, interrompendo a fluência do processo de recomposição [7].

Na primeira versão do estudo, onde se definiu outra sequência de recomposição, os problemas de elevadas sobretensões foram verificados nas SEs 230 kV Teresina e Piripiri, quando da energização do transformador 04T4 (ou 04T5), 230/69 kV, 100 MVA, como quarta unidade da SE Teresina [8].

Visando dar continuidade ao processo e garantir a integridade dos equipamentos, foram analisadas alternativas que possibilitassem a energização dos transformadores 04T1 e 04T2 da SE 230 kV Piripiri, sem impor riscos aos equipamentos sob manobra e às instalações vizinhas [7].

A. Premissas Básicas

Visando restringir a modelagem do sistema à área de interesse, os sistemas em 500 kV foram representados por equivalentes nas SEs 500 kV Imperatriz e Boa Esperança. Os equivalentes (dados de resistências e reatâncias, de sequência zero e positiva, na frequência 60 Hz) foram obtidos fazendo-se uso do programa ANAFAS (Análise de Falhas Simultâneas), do CEPEL [9].

Todos os transformadores considerados no estudo foram modelados no programa ATP fazendo-se uso do componente *SATURABLE TRANSFORMER*, segundo os dados fornecidos pelos agentes proprietários. Os transformadores 04T1 e 04T2 (230/69/13,8 kV, 33,3 MVA) da SE Piripiri, possuem uma única disjunção, sendo assim as duas unidades são sempre energizadas simultaneamente [7].

As linhas de transmissão foram modeladas como sendo linhas a parâmetros distribuídos (um distúrbio se propaga sujeito a atenuações até ser refletido nos terminais da linha,

existindo um atraso entre tensões e correntes em terminais opostos, modelando o fenômeno da propagação de ondas) e constantes na frequência (em que a dependência com a frequência dos parâmetros da linha é desprezada) [10].

B. Dados Utilizados nos Estudos

Apresentam-se na Tabela I os dados utilizados nos estudos estatísticos, fazendo uso do componente *STATISTIC SWITCH* do programa ATP [6].

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)	± 2,5
Desvio (ms)	0,833333
Número de Energizações	200

Nos casos determinísticos, utiliza-se um passo de tempo de 25,0µs, sendo o tempo máximo de simulação 1,0s. Segundo o teorema da amostragem [11], um passo de tempo de 25,0 µs, possibilita a representação de componentes de frequência de até 20,0 kHz (frequência de Nyquist, $f_N=1/2\Delta t$).

V. ESTUDOS REALIZADOS

Com base no caso de regime permanente, obtido com o programa ANAREDE [12], são estabelecidas as condições iniciais (regime permanente), nas diversas topologias em estudo.

A. Análise no Domínio da Frequência

Visando a continuidade fluente do processo de recomposição foram estabelecidas 02 (duas) configurações alternativas (consideradas viáveis), conforme apresentadas na Tabela II.

TABELA II
CONFIGURAÇÕES ALTERNATIVAS INICIALMENTE PROPOSTAS PARA RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DA SE 230 kV PIRIPIRI

1 – Barramento 230 kV da SE Piripiri e a UHE Boa Esperança energizados em vazio e a SE Teresina energizada com carga (50% da carga mínima).
2 – Barramento 230 kV da SE Piripiri e a UHE Boa Esperança energizados em vazio e a SE Teresina energizada com carga (50% da carga mínima) tendo 01 (um) banco de capacitores 230 kV, 50,5 Mvar (04H1 ou 04H2), energizado e em operação.

Fazendo uso destas alternativas, espera-se eliminar a condição ressonante que resultou na amplificação das sobretensões na SE 230 kV Piripiri, quando da manobra de energização simultânea dos transformadores 04T1 e 04T2 desta subestação [7].

Com o objetivo de identificar quais das configurações alternativas propostas (vide Tabela II) são efetivas de forma a possibilitar o processo fluente de recomposição da SE 230 kV Piripiri, estando a Área Oeste do Nordeste em recomposição coordenada a partir da SE 500 kV Presidente Dutra, são realizadas varreduras em frequência.

As varreduras em frequência são aqui utilizadas com o intuito de comparar as configurações alternativas propostas e determinar quais são efetivas ao alterar a resposta em frequência do sistema, vista do barramento 230 kV da SE Piripiri. Para tanto, faz-se uso da rotina *FREQUENCY SCAN* disponibilizada pelo programa ATP [6]. Nas análises em questão, são realizadas varreduras na faixa de frequência de 10,0 Hz a 3,0 kHz. As fontes de tensão são retiradas e os pontos de conexão destas aterrados (curto-circuitados). No ponto de interesse (barramento 230 kV da SE Piripiri), injeta-se uma fonte de corrente (seqüências zero e positiva, amplitude 1,0 A), cuja frequência será variada pela rotina *FREQUENCY SCAN*, no espectro desejado.

Com a topologia da rede em recomposição, estando o barramento 230 kV da SE Piripiri energizado a partir da SE Teresina por 01 circuito 230 kV (04S1), são analisadas as 03 (três) configurações distintas listadas a seguir:

Configuração 1: Barramentos 230 kV da SEs Piripiri e Teresina e a UHE Boa Esperança **energizados em vazio** (configuração proibitiva). Considerada apenas para efeito de comparação.

Configuração 2: Barramento 230 kV da SE Piripiri e a UHE Boa Esperança energizados em vazio e a SE Teresina energizada **com carga** (50% da carga mínima).

Configuração 3: Barramento 230 kV da SE Piripiri e a UHE Boa Esperança energizados em vazio e a SE Teresina energizada com carga (50% da carga mínima). **tendo 01 (um) banco de capacitores 230 kV, 50,5 Mvar** (04H1 ou 04H2), energizado e em operação.

Apresentam-se nas Figs. 4 e 5, 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 230 kV da SE Piripiri. Comparam-se as respostas em frequência para a impedância, $Z(j\omega)$, nas 03 (três) configurações em análise. Dos resultados apresentados nas Figs. 4 e 5, observam-se diferenças significativas na resposta em frequência (impedâncias de seqüência zero e positiva) quanto à topologia do sistema.

Em relação à Configuração 1 (proibitiva), a presença de 01 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230 kV, energizado na SE Teresina (Configuração 3) resulta em um deslocamento do primeiro e segundo picos ressonantes de 240 Hz (quarta harmônica) para 208,9 Hz e de 420 Hz (sétima harmônica) para 398,1 Hz, respectivamente, ambos para a seqüência positiva. O segundo pico, além do deslocamento, também sofre uma atenuação. Diferenças entre essas duas configurações também são visualizadas para valores de frequência superiores a 1 kHz.

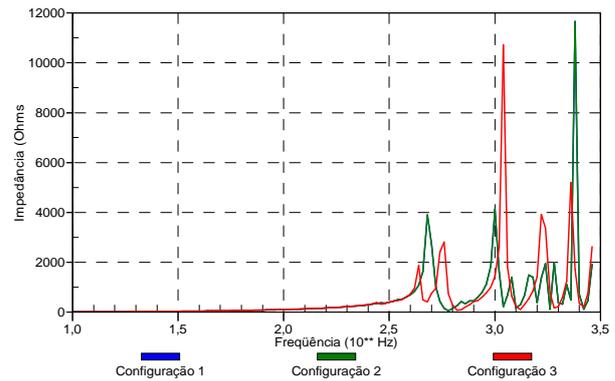


Fig. 4. Amplitude da impedância de seqüência zero – Resposta em frequência vista do barramento 230 kV da SE Piripiri.

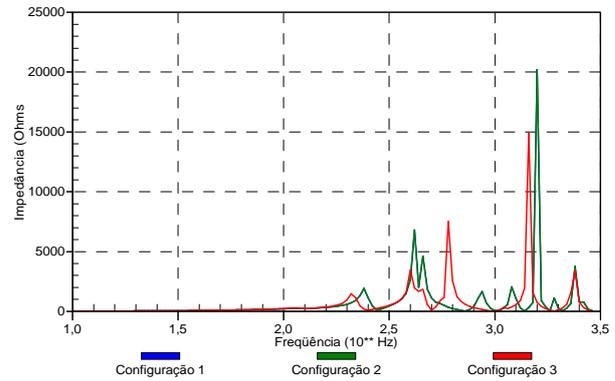


Fig. 5. Amplitude da impedância de seqüência positiva – Resposta em frequência vista do barramento 230 kV da SE Piripiri.

Já na Configuração 2, a verificação de um patamar mínimo de carga restabelecida na SE 230 kV Teresina não altera a resposta em frequência do sistema, quando comparada com a Configuração 1 (SE 230 kV Teresina em vazio).

Pelas alterações na resposta em frequência (impedâncias de seqüência zero e positiva), apenas a alternativa 2 da Tabela II se mostra candidata efetiva para a continuidade do processo fluente de recomposição da SE 230 kV Piripiri.

Caso a corrente transitória decorrente da energização simultânea (única disjunção), no domínio do tempo, dos transformadores 04T1 e 04T2 da SE 230 kV Piripiri, apresente componentes de frequência nos distintos pontos de ressonância, apresentados nas amplitudes das impedâncias (vide Figs. 4 e 5), as sobretensões e sobrecorrentes podem ser significativamente distintas na configuração que se mostra distinta. Caso contrário, se as componentes de frequência não excitarem os pontos de ressonância, as diferenças podem ser desprezíveis.

B. Análise no Domínio do Tempo

De posse dos resultados da varredura em frequência, faz-se uma análise no domínio do tempo visando validar as afirmações feitas (inferências) com base nas análises de frequência. Para tanto, simula-se a manobra de energização simultânea, em vazio, dos transformadores 04T1 e 04T2, 230/69/13,8 kV, 33,3 MVA, da SE Piripiri nas Configurações 2 e 3 (a Configuração 1, proibitiva, já foi analisada), conforme apresentadas a seguir.

Configuração 2: Barramento 230 kV da SE Piripiri e a UHE Boa Esperança energizados em vazio e a SE Teresina energizada **com carga** (50% da carga mínima). Apresentam-se a seguir as sobretensões transitórias verificadas na SE 230 kV Piripiri, quando da manobra.

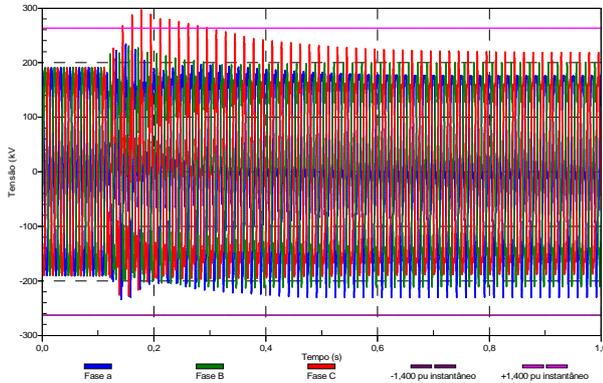


Fig. 6. Tensões no barramento 230 kV da SE Piripiri. Energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores 04T1 e 04T2 (230/69/13,8 kV, 33,3 MVA) da SE Piripiri. SE 230 kV Teresina energizada com 50% da carga mínima (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).

Observam-se sobretensões severas e pouco amortecidas (Fig. 6), que ultrapassam o valor de 1,400 pu por um tempo superior a 10 ciclos na frequência fundamental (suportabilidade considerada nos estudos).

De fato, conforme inferências feitas a partir das análises de varredura em frequência, a presença de carga nos barramentos 69 kV e 13,8 kV da SE Teresina (50% da carga mínima) não é eficaz para possibilitar a realização da manobra sem impor riscos aos equipamentos sob manobra.

Configuração 3: Barramento 230 kV da SE Piripiri e a UHE Boa Esperança energizados em vazio e a SE Teresina energizada com carga (50% da carga mínima). **tendo 01 (um) banco de capacitores 230 kV, 50,5 Mvar** (04H1 ou 04H2), energizado e em operação.

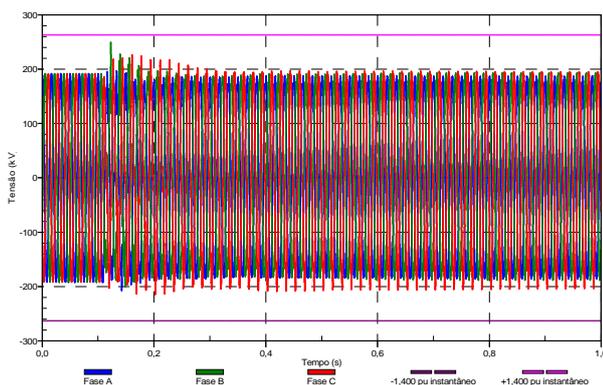


Fig. 7. Tensões no barramento 230 kV da SE Piripiri. Energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores 04T1 e 04T2 (230/69/13,8 kV, 33,3 MVA) da SE Piripiri. Energização prévia de 01 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230 kV, na SE Piripiri (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).

Observam-se na Fig. 7, que as sobretensões instantâneas na SE 230 kV Piripiri são sempre inferiores ao valor de

referência de 1,400 pu, apresentando ainda forte amortecimento.

Verifica-se, portanto, a efetividade em se definir um patamar mínimo de carga restabelecida na SE Teresina, bem como a presença de 01 (um) banco de capacitores 230 kV, 50,5 Mvar, energizado e em operação nesta subestação.

Esta configuração alterou de forma significativa a condição ressonante verificada anteriormente, eliminando-se a amplificação das sobretensões, quando da manobra de energização simultânea dos transformadores 04T1 e 04T2, 230/69/13,8 kV, 33,3 MVA, da SE Piripiri (vide Fig. 7).

No intuito de verificar quais as componentes de frequência presentes na corrente transitória, apresentada na Fig. 8, quando da energização simultânea dos transformadores 04T1 e 04T2, para a fase C (maior amplitude no estudo estatístico, com um patamar mínimo de carga restabelecida na SE Teresina), que resultou nas sobretensões na SE 230 kV Piripiri, considerando a presença de 01 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230 kV, comumente aplica-se a decomposição em série de Fourier (*Fourier Decomposition*) à respectiva forma de onda para o primeiro ciclo da corrente após a energização e o último ciclo da simulação.

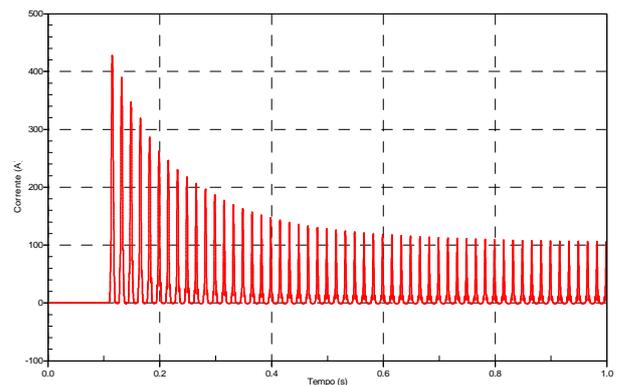
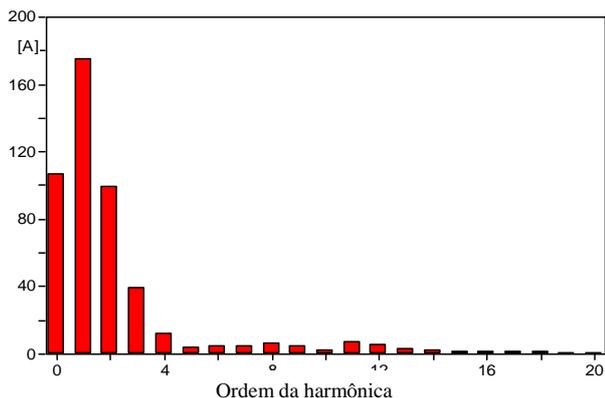


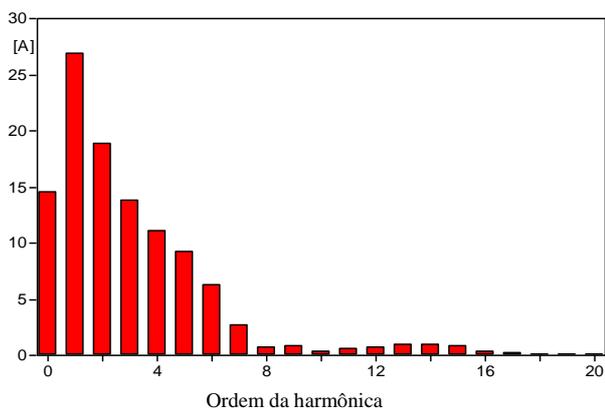
Fig. 8. Corrente da fase C no enrolamento de 230 kV dos transformadores 04T1 e 04T2. Energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores (230/69/13,8 kV, 33,3 MVA) da SE Piripiri. Energização prévia de 01 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230 kV, na SE Piripiri.

Os resultados da decomposição em série de Fourier, apresentados na Fig. 9, revelam que a presença do banco de capacitores na SE 230 kV Teresina, ao alterar a resposta em frequência vista do barramento 230 kV da SE Piripiri, não entra em ressonância com as componentes de frequência presentes nas sobrecorrentes transitórias, eliminando a condição ressonante que resultou na amplificação das sobretensões na SE Piripiri (vide Fig. 7). Também a partir da decomposição em série de Fourier constata-se que as diferenças verificadas nas amplitudes e deslocamentos dos picos ressonantes para valores de frequência superiores a 1 kHz (vide Figs. 4 e 5) são desprezíveis.

De fato, apenas a alternativa (2) da Tabela II se mostra efetiva para a recomposição fluente da SE 230 kV Piripiri.



(a) Primeiro ciclo (108,020 ms à 124,690 ms) após a energização.



(b) Último ciclo (983,333 ms à 1,000 ms) da simulação.

Fig. 9. Decomposição em série de Fourier da corrente da fase C no enrolamento de 230 kV dos transformadores 04T1 e 04T2 da SE Piripiri – Amplitude em “A” – Energização prévia de 01 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230 kV, na SE Teresina (50% de carga mínima).

A Energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores 04T1 e 04T2 (230/69/13,8 kV, 33,3 MVA) da SE Piripiri, a partir da SE Teresina energizada com carga (50% da carga mínima) tendo 01 (um) banco de capacitores 230 kV, 50,5 Mvar (04H1 ou 04H2), energizado e em operação, não impõe riscos aos equipamentos da SE Piripiri e às instalações circunvizinhas.

VI. CONCLUSÕES

As análises realizadas a partir da avaliação do comportamento da admitância (ou impedância) do sistema com a frequência permitiram qualificar as alternativas factíveis através de análises comparativas, sem a necessidade de ajustes em regime permanente, simulações estatísticas e determinísticas, promovendo a otimização dos estudos de transitórios eletromagnéticos, se traduzindo em segurança operativa. Quando utilizada, a decomposição em série de Fourier possibilitou avaliar com clareza os resultados obtidos na frequência, identificando as componentes de frequência que contribuíram para amplificar ou eliminar as ressonâncias.

Os resultados dos estudos mostraram que a alternativa 2 é a única efetiva, permitindo a energização dos transformadores 04T1 e 04T2 (230/69/13,8 kV, 33,3 MVA) da SE Piripiri, dando continuidade ao processo fluente de recomposição.

As inferências feitas a partir da análise de varredura em frequência, utilizando a ferramenta *FREQUENCY SCAN*, foram validadas por simulações digitais no domínio do tempo, com a utilização do programa ATP, comprovando a potencialidade da metodologia aqui aplicada.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, *Submódulo 23.3: Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos – Módulo 23: Critérios para Estudos*, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [2] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, *Módulo 20: Definições e Glossário*, Brasil, 2001.
- [3] H. W. Dommel, *Electromagnetic Transients Program Reference Manual: EMTP Theory Book*, Portland, BPA: [s.n.], 1996.
- [4] J. A. Martinez-Velasco, *Computer Analysis of Electrical Power System Transients: Selected Readings*, Piscataway: IEEE Press, 1997.
- [5] França, F. A. X., *Estratégias para Estudos de Recomposição de Sistemas Elétricos via Análise de Varredura em Frequência*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, 2009.
- [6] Leuven EMTP Center, *ATP - Alternative Transient Program - Rule Book*, Herverlee, Belgium, 1987.
- [7] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, *Estudo de Transitórios Eletromagnéticos: Recomposição das SE 230kV Teresina, Piripiri e Boa Esperança, a partir da SE Teresina II 500kV*, RE 3/090/2007, 2007.
- [8] Samuel Neto, A.; França, F. A. X.; Fernandes, A. B. *Comparação das Estratégias para Recomposição de Subestações via Domínio da Frequência*, II SBSE – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Belo Horizonte, MG, Brasil, 27 a 30 de Abril 2008.
- [9] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, *ANAFAS – Análise de Falhas Simultâneas*, V3.0. Rio de Janeiro, Brasil, 1998.
- [10] Fernandes, A. B., *Linhas de Transmissão: Um Modelo no Domínio de Fases Preciso e Eficiente*, Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Brasil, 2001.
- [11] IEEE Working Group 15.08.09, *Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Programs*, Piscataway: IEEE PES Special Publication, 1998.
- [12] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, *ANAREDE – Programa de Análise de Redes*, V08. Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

VIII. BIOGRAFIAS

Fernando A. X. França recebeu o título de B.Sc. em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em 2002, e o título de M.Sc. pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCCG), em 2009. Desde 2003 é engenheiro do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) em Recife, PE, Brasil.

Washington L. A. Neves recebeu os títulos de B.Sc. e M.Sc. em engenharia elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB) em 1979 e 1982, respectivamente, e o título de Ph.D. pela University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, em 1995. De 1982 à 1985, foi professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Joinville, SC, Brasil. Desde 1985 é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCCG), PB, Brasil.

Alécio B. Fernandes recebeu os títulos de B.Sc., M.Sc. e D.Sc. 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), 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.