

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado

Estratégias para Estudos de Recomposição de Sistemas
Elétricos via Análise de Varredura em Frequência

Fernando Antonio Xavier França

Campina Grande - Paraíba - Brasil
© Fernando Antonio Xavier França, Setembro de 2009

Fernando Antonio Xavier França

Estratégias para Estudos de Recomposição de Sistemas
Elétricos via Análise de Varredura em Frequência

*Dissertação de mestrado apresentada à
Coordenação do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande,
em cumprimento às exigências para
obtenção do Grau de Mestre em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento da Energia

Washington Luiz Araújo Neves, Ph.D.

Orientador

Alécio Barreto Fernandes, D.Sc.

Orientador

Campina Grande - Paraíba – Brasil
Setembro de 2009



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFPG

F814e

2009 Franca, Fernando Antonio Xavier

Estratégias para estudos de recomposição de sistemas elétricos via análise de varredura em frequência / Fernando Antonio Xavier Franca. - Campina Grande, 2009.

81 p. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática. Referências.

Orientadores : Prof. Ph.D. Washington Luiz Araujo Neves, Prof. D.Sc. Alécio Barreto Fernandes.

1. Sistemas de Potência. 2. Recomposição. 3. Simulação Digital. 4. Varredura em Frequência I. Título.

CDU621.3.016.2(043
)

**ESTRATÉGIAS PARA ESTUDOS DE RECOMPOSIÇÃO DE SISTEMAS
ELÉTRICOS VIA ANÁLISE DE VARREDURA EM FREQUÊNCIA**

FERNANDO ANTONIO XAVIER FRANÇA

Dissertação Aprovada em 25.09.2009



WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG

Orientador



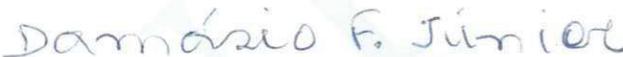
ALÉCIO BARRETO FERNANDES, D.Sc., ONS

Orientador



BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG

Componente da Banca



DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR, D.Sc., UFCG

Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
SETEMBRO - 2009

Aos meus pais Antonio e Marta, DEDICO.
À minha esposa Juliana e minha filha
Maria Fernanda, OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pela sua presença constante em minha vida, por iluminar e abençoar os meus caminhos e me proporcionar mais esta vitória.

À minha esposa Juliana, pelo carinho, compreensão e incentivo, motivando-me nos momentos mais difíceis. À minha filha Maria Fernanda, que sem dúvida é minha maior fonte de inspiração.

Aos meus pais Antonio e Marta, pelo investimento educacional, apoio e confiança depositada nas minhas escolhas, desde sempre.

Ao professor Washington Neves, pela orientação necessária para o desenvolvimento desta dissertação e pelo acréscimo teórico fundamental.

Aos professores Wellington Mota e Benemar Alencar, pelos ensinamentos oferecidos nas disciplinas da pós-graduação.

Ao professor Damásio Fernandes, pelas valiosas contribuições para a melhoria deste trabalho.

Ao amigo e também orientador Alécio Fernandes, pelo tempo dedicado às ricas discussões e sugestões em prol da elaboração do presente estudo.

Aos amigos Antonio Samuel e Gustavo Henrique, pelas oportunas trocas de opiniões e conhecimentos relevantes para a concretização desta etapa.

À minha equipe de trabalho, os amigos André Vidal, Flávia Ferreira, Fábio Medeiros, Roseane Nunes e Alexandre Dantas, pelo auxílio imprescindível na conciliação das atividades profissionais com os estudos, de maneira harmoniosa e responsável.

Aos gestores do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), através da engenheira Graça Camelo, ex-gerente executiva do Núcleo Norte e Nordeste (NNNE) e dos engenheiros Saulo Cisneiros, atual gerente executivo e Laércio Guedes, gerente do Núcleo

Norte e Nordeste (NNNE1), que viabilizaram a minha participação no curso de pós-graduação da UFCG no ano de 2007.

Por fim, aos colegas do ONS que também tiveram a oportunidade de cursar o programa de pós-graduação, Sérgio Souza, Fábio Schuler e Fábio Henrique, compartilhando experiências por vezes difíceis e desafiadoras, porém essenciais para construção deste projeto profissional e de vida.

RESUMO

Tradicionalmente, nos estudos de recomposição de sistemas elétricos de potência são realizadas simulações de transitórios eletromagnéticos exclusivamente no domínio do tempo, contemplando as diversas configurações, 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 topologias) 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 para definir quais dentre as topologias de rede consideradas nos estudos de transitórios eletromagnéticos para recomposição de sistemas são efetivas, permitindo avaliar de forma mais ágil e segura as diversas configurações contempladas na análise, reduzindo significativamente o número de simulações necessárias. Mostra-se a aplicabilidade da análise de varredura em frequência, resultando em uma considerável redução no tempo de execução dos estudos de transitórios eletromagnéticos, auxiliando o processo de decisão e reduzindo a subjetividade do analista, 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.

ABSTRACT

Traditionally, for power system restoration studies, electromagnetic transient simulations are carried out taking into account different system configurations. The impact of the presence or absence of circuits and equipments on the system as well minimal load restoration, need to be evaluated. Due to the large number of possibilities (different topologies) and switching events to be simulated, restoring studies can take a very long time. In the present work, a technique based on scanning in the frequency domain is applied to power system restoration studies. Its purpose is to quickly evaluate the system restoration due to different configurations. This reduces the number of time-domain simulations, reducing subjectivity analysis that translates into operational safety. The system behavior, when energizing transformers, transmission lines or when switching capacitive devices, is assessed using frequency domain analysis. All the inferences in the frequency-domain are validated using time-domain simulations performed with the Alternative Transients Program (ATP).

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xvi
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	2
1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES	3
1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	7
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	8
2.1 ANÁLISES NO DOMÍNIO DO TEMPO	8
2.1.1 Decomposição em Série de Fourier.....	11
2.2 ANÁLISES NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	14
2.2.1 Resposta em Frequência	14
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA APLICADA.....	18
3.1 FERRAMENTA <i>FREQUENCY SCAN</i>	19
3.2 AFERIÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO	22
3.3 APLICAÇÃO PRÁTICA DA ANÁLISE EM FREQUÊNCIA	23
CAPÍTULO 4 – AFERIÇÃO DA METODOLOGIA	26
4.1 RECOMPOSIÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	26
4.2 ESTUDO DE CASOS	29
4.2.1 Recomposição "ilhada" das SEs 230 kV Eunápolis, Funil e do Consumidor Industrial Veracel, a partir da UHE Itapebi.....	29
4.2.1.1 Análise de Varredura em Frequência das Configurações Alternativas	41
4.2.1.2 Tomada prévia de carga no barramento 138 kV da SE Eunápolis	42
4.2.1.3 Redução da tensão pré-manobra no barramento 230 kV da SE Funil.....	46
4.2.1.4 Energização prévia do segundo circuito 230 kV Itapebi – Funil e de um banco de capacitores 50,5 Mvar na SE 230 kV Funil	47
4.2.2 Recomposição das SEs 230 kV Teresina, Piripiri e Boa Esperança, a partir da SE Teresina II 500 kV	55

4.2.2.1	Análise de Varredura em Frequência das Configurações Alternativas	66
4.2.2.2	Energização prévia da SE Teresina com carga, com e sem um banco de capacitores 50,5 Mvar no barramento 230 kV, energizado e em operação.....	67
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES		75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		78

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Correntes de fase nos enrolamentos 230 kV de um transformador 230/69 kV, 100 MVA.	9
Figura 2.2 – Circuito ressonante.....	10
Figura 2.3 – Formas de onda do sinal distorcido, da componente fundamental e das componentes de 3ª e 7ª harmônicas.	13
Figura 2.4 – Amplitudes obtidas a partir da decomposição em série de Fourier do sinal distorcido e periódico apresentado na Figura 2.3.	13
Figura 2.5 – Circuito RLC no domínio do tempo.	15
Figura 2.6 – Amplitude da resposta em frequência para o circuito RLC da Figura 2.5.....	16
Figura 2.7 – Fase da resposta em frequência para o circuito RLC da Figura 2.5.....	16
Figura 3.1 – Abordagem Tradicional versus Metodologia Aplicada.	19
Figura 3.2 – Injeção de fonte de corrente utilizando a ferramenta <i>FREQUENCY SCAN</i> do Programa ATP.	22
Figura 3.3 – Área Pará do Sistema Norte – Sistema Interligado Nacional.	24
Figura 3.4 – Respostas em frequência (amplitude da impedância de sequência positiva) vistas dos barramentos 500 kV das SEs Imperatriz, Marabá e Tucuruí.	25
Figura 4.1 – Diagrama esquemático com as etapas de realização de um estudo de recomposição típico.	27
Figura 4.2 – Diagrama unifilar para o sistema em estudo – Recomposição “ilhada” das SEs 230 kV Eunápolis, Funil e do Consumidor Industrial Veracel, a partir da UHE Itapebi – Área Sul do Sistema Nordeste.	30

- Figura 4.3 – Tensões no barramento 230 kV da SE Itapebi. Energização em vazio e sob falta da LT 230 kV Itapebi – Eunápolis (04N1), a partir da SE Itapebi (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).....36
- Figura 4.4 – Tensões no terminal aberto em Eunápolis. Energização em vazio e sob falta da LT 230 kV Itapebi – Eunápolis (04N1), a partir da SE Itapebi (Referências: $\pm 2,000$ pu e $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).....36
- Figura 4.5 – Tensões no barramento 230 kV da SE Itapebi. Energização em vazio do primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1), da SE Funil (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).....39
- Figura 4.6 – Tensões no barramento 230 kV da SE Eunápolis. Energização em vazio do primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1), da SE Funil (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).39
- Figura 4.7 – Tensões no barramento 230 kV da SE Funil. Energização em vazio do primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1), da SE Funil (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).....40
- Figura 4.8 – Respostas em frequência (amplitude da impedância) vistas do barramento 230 kV da SE Funil – Comparação entre as configurações em análise quanto à tomada de carga na SE Eunápolis.....43
- Figura 4.9 – Tensões no barramento 230 kV da SE Funil (fase A). Comparação entre as configurações em análise quanto à tomada de carga na SE Eunápolis. Energização em vazio do primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1), da SE Funil. (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).44
- Figura 4.10 – Tensões no barramento 230 kV da SE Funil. Energização em vazio do primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1), da SE Funil. Tensão pré-manobra 1,000 pu (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).46

- Figura 4.11 – Respostas em frequência (amplitude da impedância) vistas do barramento 230 kV da SE Funil – Comparação entre as configurações em análise quanto à topologia do sistema e da SE Funil.....48
- Figura 4.12 – Tensões no barramento 230 kV da SE Funil. Energização em vazio do primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1), da SE Funil. Barramento 230 kV da SE Funil energizado a partir da SE Itapebi por 2 circuitos 230 kV (04F6 e 04F7) (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo). 50
- Figura 4.13 – Tensões no barramento 230 kV da SE Funil. Energização em vazio do primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1), da SE Funil. Energização prévia de 1 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230 kV, na SE Funil (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo)..... 51
- Figura 4.14 – Corrente da fase B no enrolamento de 230 kV do transformador 04T1 – Energização em vazio do primeiro transformador (230/138 kV, 100 MVA) da SE Funil – Energização prévia de 1 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230kV, na SE Funil..... 52
- Figura 4.15 – Decomposição em série de Fourier da corrente da fase B no enrolamento de 230 kV do transformador 04T1 – Amplitude em “A” – Energização prévia de 1 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230 kV, na SE Funil..... 53
- Figura 4.16 – Tensões no barramento 230 kV da SE Funil. Energização simultânea, em vazio, da LT 230 kV Funil – Itapebi (04F6), do reator 04E1, 230kV, 20 Mvar e do primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1), da SE Funil (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo). 54
- Figura 4.17 – Diagrama unifilar para o sistema em estudo – Recomposição das SEs 230 kV Teresina, Piripiri e Boa Esperança, a partir da SE 500 kV Teresina II – Área Oeste do Sistema Nordeste. 55

- Figura 4.18 – Tensões no barramento 230 kV da SE Teresina. Energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores 04T1 (230/69/13,8 kV, 33,3 MVA) e 04T2 (230/13,8 kV, 60 MVA) da SE Teresina (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).....62
- Figura 4.19 – Tensões no barramento 230 kV da SE Presidente Dutra. Energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores 04T1 (230/69/13,8 kV, 33,3 MVA) e 04T2 (230/13,8 kV, 60 MVA) da SE Teresina (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).....62
- Figura 4.20 – Tensões no barramento 230 kV da SE Teresina. Energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores 04T1 e 04T2 (230/69/13,8 kV, 33,3 MVA) da SE Piripiri (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).....65
- Figura 4.21 – 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 (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).....65
- Figura 4.22 – Respostas em frequência (amplitude da impedância) vistas do barramento 230 kV da SE Piripiri – Comparação entre as configurações em análise.....68
- Figura 4.23 – 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 Teresina energizada com 50% da carga mínima (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).70
- Figura 4.24 – 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 1 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230 kV, na SE Piripiri (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).71

- Figura 4.25 – 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 1 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230 kV, na SE Piripiri. 72
- Figura 4.26 – Decomposição em série de Fourier da corrente da fase C no enrolamento de 230 kV dos transformadores 04T1 e 04T2 – Amplitude em “A” – Energização prévia de 1 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230 kV, na SE Teresina (50% de carga mínima). 73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros atribuídos ao circuito da Figura 2.5.	15
Tabela 4.1 – Cargas consideradas no estudo – Carga mínima.	31
Tabela 4.2 – Modelos computacionais utilizados no estudo.	31
Tabela 4.3 – Capacidade operativa das unidades geradoras da UHE Itapebi.....	32
Tabela 4.4 – Dados utilizados nos estudos estatísticos, fazendo uso do componente <i>STATISTIC SWITCH</i> do programa ATP – Dados utilizados nas chaves estatísticas.	32
Tabela 4.5 – Critérios adotados para a realização do estudo.....	32
Tabela 4.6 – Condições de sistema adotadas nas simulações.....	33
Tabela 4.7 – Simulações propostas na sequência do processo de recomposição.....	34
Tabela 4.8 – Resultados do estudo estatístico do programa ATP – Chaveamentos que resultaram nos valores máximos das grandezas monitoradas. Energização em vazio e sob falta da LT 230 kV Itapebi – Eunápolis (04N1), a partir da SE Itapebi.	35
Tabela 4.9 – Resultados do estudo estatístico do programa ATP – Chaveamentos que resultaram nos valores máximos das grandezas monitoradas. Energização em vazio do primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1), da SE Funil.	38
Tabela 4.10 – Configurações alternativas propostas para recomposição fluente da SE Funil.	41
Tabela 4.11 – Comparação entre as análises no tempo (tradicional) e na frequência, quanto à tomada de carga na SE Eunápolis.....	45
Tabela 4.12 – Cargas consideradas no estudo – Carga mínima.	56
Tabela 4.13 – Modelos computacionais utilizados no estudo.	57

Tabela 4.14 – Dados utilizados nos estudos estatísticos, fazendo uso do componente <i>STATISTIC SWITCH</i> do programa ATP – Dados utilizados nas chaves estatísticas.	57
Tabela 4.15 – Critérios adotados para a realização do estudo.....	58
Tabela 4.16 – Condições de sistema adotadas nas simulações.....	58
Tabela 4.17 – Simulações propostas na sequência do processo de recomposição.	59
Tabela 4.18 – Resultados do estudo estatístico do programa ATP – Chaveamentos que resultaram nos valores máximos das grandezas monitoradas. Energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores 04T1 (230/69/13,8kV, 33,3MVA) e 04T2 (230/69/13,8kV, 60MVA) da SE Teresina.	60
Tabela 4.19 – Resultados do estudo estatístico do programa ATP – Chaveamentos que resultaram nos valores máximos das grandezas monitoradas. Energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores 04T1 e 04T2 (230/69/13,8kV, 33,3MVA) da SE Piripiri.....	63
Tabela 4.20 – Configurações alternativas propostas para recomposição fluente da SE Piripiri.	66

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência estão sujeitos a distúrbios de diversas características e consequências, podendo resultar em desligamentos de equipamentos, instalações e, em alguns casos, de regiões por completo. Tais desligamentos visam mitigar a perturbação, reduzindo suas consequências e preservando, ao mesmo tempo, a integridade de equipamentos e instalações, de forma a manter íntegra a maior parte do sistema possível, priorizando a continuidade do suprimento.

Uma vez mitigado o defeito, faz-se necessário recompor as instalações, bem como retornar os equipamentos desenergizados (seja corretamente ou indevidamente) quando da ocorrência do distúrbio.

Na definição dos procedimentos de recomposição de sistemas elétricos de potência, torna-se indispensável avaliar as solicitações transitórias impostas aos equipamentos e instalações, em diferentes topologias que se configuram durante os diversos estágios do processo, quantificando as sobretensões e sobrecorrentes decorrentes de surtos de manobra, a exemplo das observadas na energização de linhas de transmissão e transformadores de potência (DOMMEL, 1996; MARTINEZ-VELASCO, 1997).

Recentemente o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) vem utilizando a análise de varredura em frequência como ferramenta complementar aos estudos de transitórios eletromagnéticos no auxílio ao processo de tomada de decisão, na triagem dos casos mais severos, na reavaliação de restrições operativas, e na extrapolação de conclusões e

recomendações operativas em casos reais do Sistema Interligado Nacional (SIN), traduzindo-se em segurança operativa (FERNANDES et al., 2007).

As afirmações feitas a partir da análise de varredura em frequência têm sido aferidas por simulações no domínio do tempo, denotando a viabilidade da metodologia.

1.1 MOTIVAÇÃO

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. Usualmente faz-se necessário um grande número de simulações estatísticas, que requerem a reprodução dos piores casos por simulações determinísticas.

Devido ao grande número de equipamentos que compõem os “corredores” de recomposição (rotas preferenciais e alternativas), torna-se fundamental definir nos estudos o maior número de alternativas de tal modo a evitar que, em situações de indisponibilidade simples de equipamentos, o processo de recomposição seja comprometido, ou mesmo interrompido.

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 tem sido utilizada pelo ONS como ferramenta auxiliar nos estudos de transitórios eletromagnéticos e tem apresentado ganhos significativos à segurança operativa do SIN. Quando aplicada aos estudos de recomposição, a análise de varredura em frequência permite avaliar de forma ágil, prática e segura as diversas

estratégias de recomposição que se apresentam nas possíveis configurações da rede (SAMUEL NETO et al., 2008; FERNANDES et al., 2009).

Ao sinalizar quais dentre as alternativas são factíveis e seguras, tem-se a otimização dos estudos de transitórios eletromagnéticos, reduzindo a subjetividade do analista e, de forma significativa, o número de simulações necessárias que, por fim, se traduz na redução de Homem x hora (H x h). No entanto, essa metodologia aplicada a casos reais do SIN ainda não está difundida e devidamente fundamentada no meio acadêmico e nas empresas do setor elétrico, de forma que não existem diretrizes e critérios para tais estudos, a exemplo do Submódulo 23.3 - *Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos* (ONS, 2007b) dos Procedimentos de Rede, conjunto de documentos elaborados pelo ONS, com a participação dos agentes do setor elétrico e aprovados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

O presente trabalho tem por objetivo contribuir para o estabelecimento de diretrizes e critérios para a utilização de análises de varredura em frequência, de forma a consolidar esta metodologia complementar, quando aplicada aos estudos de recomposição de sistemas elétricos de potência, com ênfase prática em casos reais do SIN.

As principais contribuições deste estudo estão relacionadas com a documentação e o embasamento teórico acrescidos à técnica ora utilizada, consolidando-a no meio acadêmico e no ambiente operativo. Espera-se assim, contribuir para uma futura inclusão da mesma nos Procedimentos de Rede e, por consequência, sua difusão no Operador do Sistema e nas empresas do setor elétrico brasileiro.

A viabilidade da metodologia utilizada nesta dissertação é aferida por simulações no domínio do tempo, com programas tipo EMTP (*Eletromagnetic Transients Program*),

especificamente fazendo-se uso do programa ATP (*Alternative Transients Program*) (LEUVEN EMTP CENTER, 1987).

Na forma de um estudo de casos mostra-se a aplicabilidade da análise de varredura em frequência como ferramenta complementar na realização de estudos de transitórios eletromagnéticos para definição dos procedimentos operativos para recomposição das Áreas Oeste e Sul do Sistema Nordeste, partes integrantes do SIN.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Métodos de varredura em frequência têm sido utilizados ao longo dos anos com o objetivo de analisar as respostas em frequência do sistema, permitindo avaliar os efeitos de componentes harmônicas na rede, identificar frequências de ressonância, contribuição de equipamentos para a resposta em frequência do sistema, etc.

No final da década de 70, Agrawal & Farmer (1979) utilizaram as técnicas de varredura em frequência para identificar problemas de ressonâncias sub-síncronas (*Sub-Synchronous Resonance – SSR*) no sistema, provocados pelo uso de capacitores série nas linhas de transmissão, associados à presença de máquinas térmicas eletricamente próximas. Foram apresentadas as principais técnicas para simular e analisar problemas de SSR, dentre as quais se destacou a técnica de varredura em frequência, pela sua eficiência e custo relativamente baixo. Adicionalmente foi feita a descrição da técnica, sua utilização nas análises de problemas de SSR, bem como a correlação com os resultados obtidos de testes de campo, onde ficou evidenciada a eficiência da análise de varredura em frequência.

Dentre as diversas funcionalidades de programas para cálculo de transitórios eletromagnéticos como o ATP, pode-se 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 com a frequência (LEUVEN EMTP CENTER, 1987; KIZILCAY, 1994).

A técnica de varredura em frequência também foi utilizada em estudos de identificação de instabilidades harmônicas em sistemas HVDC (*High Voltage Direct Current*). Em Jiang & Gole (1995), como exemplo da aplicação, foi utilizado um sistema *benchmark* do CIGRÉ para a identificação das frequências de ressonância. Foram apresentadas as principais diferenças entre uma análise simplificada e a de varredura em frequência. Os resultados da simulação comprovaram a eficiência do método, identificando com exatidão as frequências de ressonância que poderiam provocar instabilidades harmônicas no sistema HVDC analisado.

Uma revisão da modelagem e análise da propagação de harmônicas nos sistemas elétricos de potência foi apresentada em Task Force on Harmonics Modeling and Simulation (1996a). Esta força tarefa se dividiu em duas partes: na primeira, foram abordados os conceitos, modelos e técnicas de simulação enquanto na segunda, foram utilizados dois sistemas, derivados dos sistemas testes do IEEE existentes, para ilustrar os estudos de harmônicas. A técnica de varredura em frequência foi descrita em Task Force on Harmonics Modeling and Simulation (1996b).

Recentemente no Brasil, a análise de varredura em frequência foi introduzida pelo ONS e tem sido aplicada em casos reais do SIN. Nesta análise, a varredura em frequência tem sido utilizada como ferramenta complementar ao processo de tomada de decisão quando da realização dos estudos operacionais, proporcionando uma redução significativa no tempo de execução dos mesmos (alocação de Homem x hora), reduzindo a subjetividade da análise, traduzindo-se em segurança operativa.

Vale destacar que a pouca diversidade na citação das referências nacionais, apresentadas a seguir, se deve à dificuldade em encontrar bibliografia relacionada especificamente com a utilização de análises de varredura em frequência nos estudos de transitórios eletromagnéticos, com aplicação prática a sistemas reais.

Em Fernandes et al. (2007) a análise de varredura em frequência auxiliou o processo de extrapolação dos procedimentos operativos definidos em determinada configuração para as demais configurações sob análise. Tal análise foi realizada com a utilização da ferramenta *FREQUENCY SCAN* do programa ATP, que permitiu avaliar de forma prática (ágil) e segura as diversas topologias contempladas no estudo. Com base nessa análise foi possível extrapolar os procedimentos operativos vigentes para duas outras configurações. A viabilidade da aplicação da ferramenta *FREQUENCY SCAN* foi comprovada com a realização de simulações digitais no domínio do tempo.

Fernandes & Silva (2007) aplicaram a análise de varredura em frequência na reavaliação de restrições operativas, no intuito de verificar a permanência ou exclusão destas, frente a alterações na topologia da rede básica, como consequência da expansão do SIN. A identificação das frequências de ressonância, associadas às diferentes topologias do sistema, foi obtida com a ferramenta *FREQUENCY SCAN*. Posteriormente, foi realizada a correlação com as componentes de frequência decorrentes das manobras, possibilitando inferir sobre a determinação da configuração mais adequada da rede elétrica para a manobra dos equipamentos de potência, visando as menores sobretensões transitórias, com o maior amortecimento possível. Mais uma vez, a viabilidade da aplicação desta técnica foi verificada pelas análises no domínio do tempo.

Samuel Neto et al. (2008) e Fernandes et al. (2009) utilizaram a análise de varredura em frequência para avaliar as diferentes configurações de rede (topologia) frente às possíveis alternativas de recomposição, visando identificar quais eram factíveis durante o processo de

restabelecimento das instalações. A utilização da ferramenta *FREQUENCY SCAN* permitiu uma análise ágil e segura das distintas configurações da rede, possibilitando inferir sobre quais configurações eram factíveis para o processo de recomposição em análise, proporcionando rotas alternativas, e assim flexibilidade à operação. As afirmações (inferências) feitas com base na análise em frequência novamente se mostraram corretas, sendo aferidas por simulações no domínio do tempo.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta, além deste capítulo introdutório, de quatro capítulos adicionais, e está organizada da seguinte forma:

No Capítulo 2 apresenta-se a fundamentação teórica do tema a ser desenvolvido, onde é apresentada uma visão geral sobre os conceitos que envolvem a análise de varredura em frequência aplicada a estudos de transitórios eletromagnéticos.

O detalhamento da metodologia aplicada neste trabalho é apresentado no Capítulo 3. Neste capítulo ainda é feito um comparativo com a técnica tradicionalmente utilizada nos estudos de recomposição.

Os resultados obtidos com a aplicação da análise de varredura em frequência, bem como sua validação através de simulações digitais no domínio do tempo, são apresentados no Capítulo 4, utilizando-se como estudo de casos, dois sistemas reais do SIN.

No Capítulo 5, finalizando a dissertação, são reunidas as principais conclusões e propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ANÁLISES NO DOMÍNIO DO TEMPO

Os sistemas elétricos de potência embora operem em regime permanente durante grande parte do tempo, devem ser projetados para suportar solicitações extremas de tensão e corrente, denominadas de sobretensões e sobrecorrentes, respectivamente.

As sobretensões são definidas como tensões cujo valor supera o valor nominal de operação do sistema. Tais sobretensões são geradas por efeitos externos ao sistema elétrico, como descargas atmosféricas, ou pelo próprio sistema, como sobretensões internas causadas por manobras, resultantes de alterações na topologia da rede como energização, desenergização e religamento de linhas de transmissão, chaveamento de cargas indutivas e capacitivas, eliminação de faltas, rejeição de carga, etc. (ARAÚJO; NEVES, 2005).

As sobrecorrentes são definidas como correntes cujo valor excede o valor nominal. Tais sobrecorrentes resultam da energização de equipamentos (transformadores, bancos de capacitores, etc.) e de faltas no sistema. Uma diferença observada entre as duas situações é que na primeira existe a presença de conteúdo harmônico em uma extensa faixa de frequência, enquanto que na segunda situação geralmente verificam-se poucas componentes de alta frequência (ZANETTA JÚNIOR, 2003).

A análise dos fenômenos transitórios é fundamental, pois nestas circunstâncias, os equipamentos elétricos são submetidos a condições muito severas que podem ultrapassar suas suportabilidades nominais, colocando em risco a integridade destes. Mesmo que esses sistemas operem quase a totalidade do tempo em regime permanente, é muito importante que

possam resistir às solicitações transitórias (fenômenos que surgem na transição entre duas condições de regime permanente) sem sofrerem danos. Para tanto, a determinação da amplitude, da duração e do amortecimento destes fenômenos permite verificar se existe necessidade de instalação de equipamentos de proteção (resistores de abertura e pré-inserção, pararraios, etc.) e quando da existência destes, se de fato são efetivos na proteção dos equipamentos e instalações.

A título de exemplo, as manobras de energização de transformadores podem gerar elevadas correntes transitórias de magnetização – também conhecidas como correntes de *inrush* – que atingem picos de até 10 vezes o valor da corrente nominal (ARAÚJO; NEVES, 2005).

A Figura 2.1 ilustra as sobrecorrentes obtidas por simulação digital, geradas a partir de uma manobra de energização, em vazio, de um transformador 230/69 kV, 100 MVA, composto por 3 unidades monofásicas.

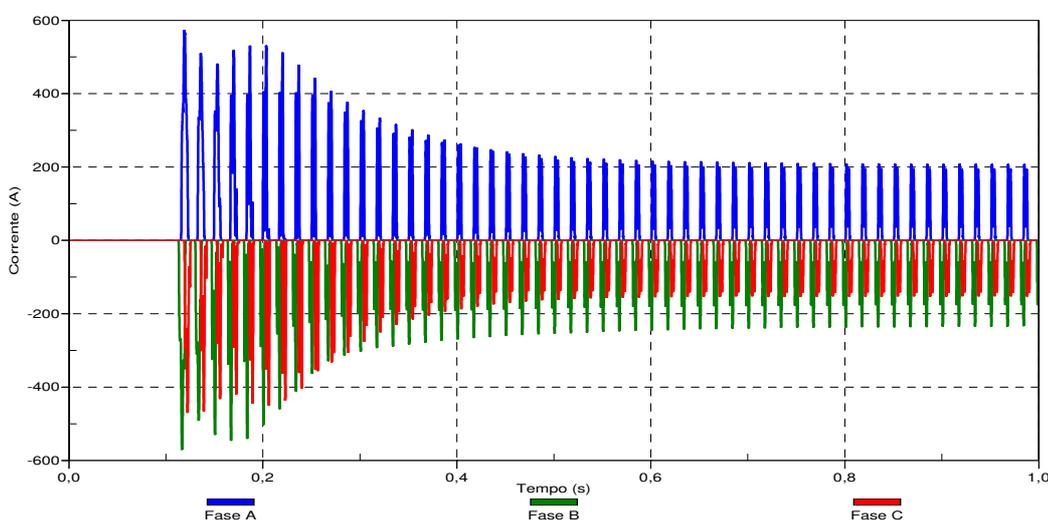


Figura 2.1 – Correntes de fase nos enrolamentos 230 kV de um transformador 230/69 kV, 100 MVA.

As distorções verificadas na forma de onda das sobrecorrentes transitórias se devem às não linearidades introduzidas pelos transformadores e são tratadas com simulações

no tempo, levando em conta a presença do ramo de magnetização (ZANETTA JÚNIOR, 2003).

Essas sobrecorrentes possuem um elevado conteúdo de harmônicas que ao encontrarem circuitos ressonantes, podem gerar sobretensões que, por sua vez, podem impor riscos à integridade de equipamentos e instalações (CHANG; RIBEIRO, 1998; ARAÚJO; NEVES, 2005).

A Figura 2.2 ilustra o efeito da ressonância (amplificação da resposta do sistema) paralela quando da injeção de uma fonte de harmônicas.

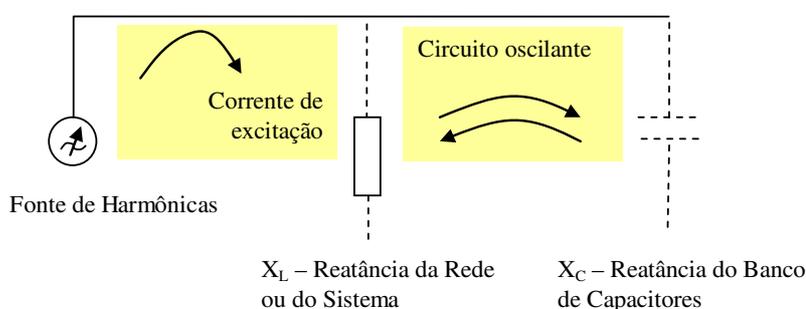


Figura 2.2 – Circuito ressonante.

Na situação apresentada na Figura 2.2, caso as componentes harmônicas – presentes na corrente de excitação – coincidam com a frequência de oscilação do sistema ($f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$), as sobretensões geradas podem ser bastante elevadas (FERNANDES e SILVA, 2007). O circuito oscilante representa a troca de energia entre os elementos lineares indutivos e capacitivos do sistema.

No intuito de identificar quais as componentes de frequência (harmônicas) presentes nos sinais distorcidos das sobretensões e sobrecorrentes transitórias, comumente aplica-se a decomposição em série de Fourier (*Fourier Decomposition*) (OPPENHEIM et al., 1992), conforme apresentado a seguir.

2.1.1 Decomposição em Série de Fourier

De acordo com a teoria de Fourier, qualquer função periódica, por mais complicada que seja, pode ser representada como a soma de várias funções seno e cosseno com amplitudes, fases e períodos escolhidos convenientemente.

Uma função periódica pode ser definida como toda função em que:

$$f(t) = f(t + hT) \quad (2.1)$$

para qualquer h inteiro e positivo. O menor número real positivo T com esta característica é chamado período fundamental de f .

A expansão em série de Fourier de uma função periódica é a decomposição da função em termos das suas componentes de várias frequências.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) + b_n \text{sen}\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) \right] \quad (2.2)$$

Onde:

$$\begin{cases} a_0 = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt, \\ a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) dt & n > 0 \\ b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \text{sen}\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) dt & n > 0. \end{cases} \quad (2.3)$$

A série representada pela equação (2.2) com coeficientes dados pelas equações (2.3) é denominada de expansão em série de Fourier da função (ou sinal) $f(t)$ na forma trigonométrica. Em notação exponencial (ou complexa) a série de Fourier da função $f(t)$ pode ser escrita como:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} F_n e^{j \frac{2n\pi t}{T}} \quad (2.4)$$

Onde:

$$F_n = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) e^{-j\frac{2n\pi}{T}t} dt, \quad (2.5)$$

Fazendo $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$, tem-se:

$$F_n = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \quad (2.6)$$

O conjunto de todos os coeficientes de Fourier $F_n, n \in Z$ é chamado de espectro da função $f(t)$. A partir da função $f(t)$ pode-se encontrar seu espectro. Reciprocamente, se o espectro for conhecido pode-se encontrar a função $f(t)$ correspondente.

A representação da função $f(t)$ pode ser feita de duas formas: no domínio do tempo, onde $f(t)$ é expressa como função do tempo, e no domínio da frequência, onde o espectro é especificado.

O espectro de uma função periódica não é uma curva contínua, mas existe apenas para valores discretos de ω , múltiplos de uma frequência básica $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ ($\omega = n\omega_0, n \in Z$). Os coeficientes F_n , por serem complexos, são descritos por uma amplitude e uma fase (módulo e argumento). Conforme apresentado, os sinais periódicos podem ser decompostos, revelando seu conteúdo harmônico, em procedimento também conhecido como análise espectral (SAMPAIO et al., 2006).

A título de exemplo, considere as curvas apresentadas na Figura 2.3, contendo as componentes de frequência correspondentes a múltiplos inteiros de ordem 1, 3 e 7, da frequência fundamental, bem como a forma de onda distorcida, $f(t)$, resultante da soma destas componentes harmônicas.

A composição do sinal distorcido, $f(t)$, é feita da seguinte forma:

$$f(t) = 1,0\text{sen}(\omega t) + 0,7\text{sen}(3\omega t) + 0,5\text{sen}(7\omega t) \quad (2.7)$$

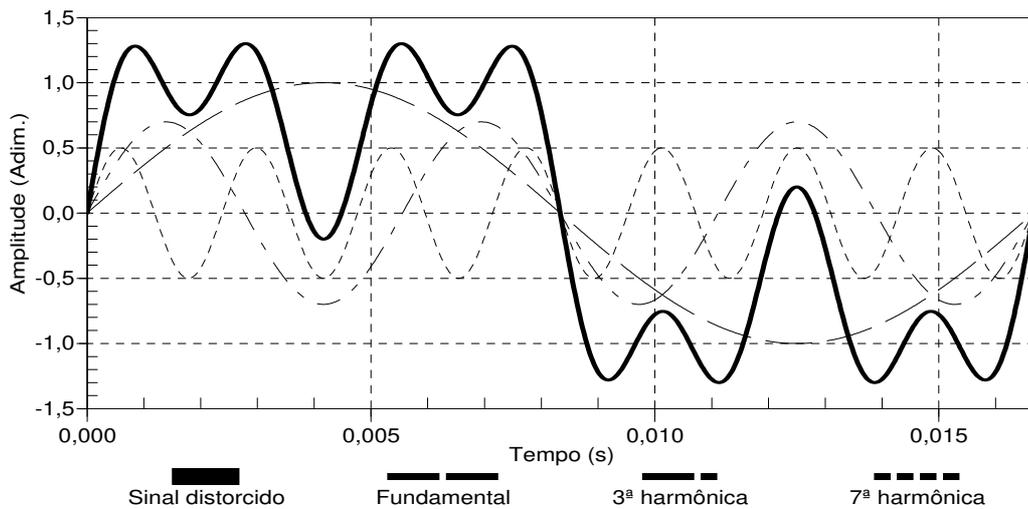


Figura 2.3 – Formas de onda do sinal distorcido, da componente fundamental e das componentes de 3ª e 7ª harmônicas.

A partir do sinal distorcido e periódico da Figura 2.

3 aplica-se a decomposição em série de Fourier. Como resultado, tem-se o espectro apresentado na Figura 2.4.

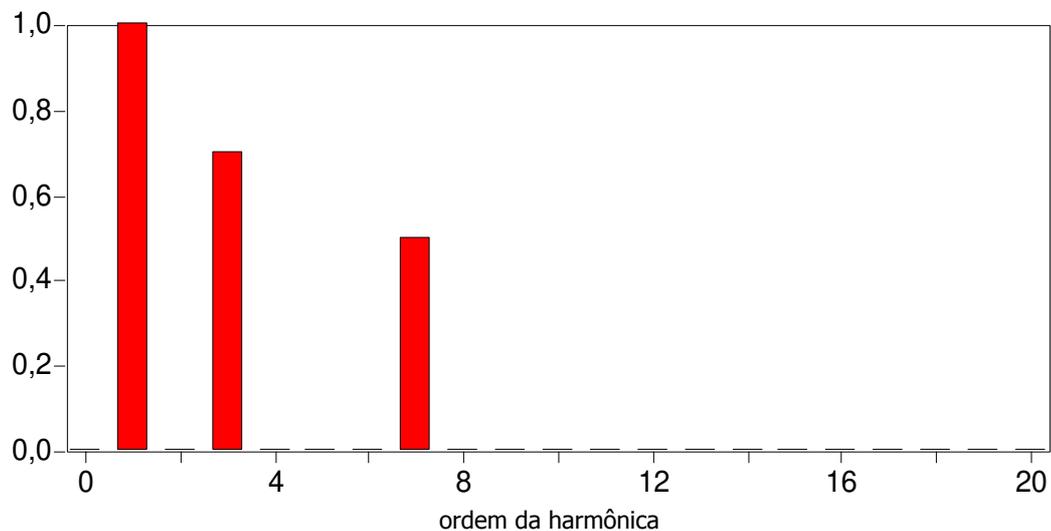


Figura 2.4 – Amplitudes obtidas a partir da decomposição em série de Fourier do sinal distorcido e periódico apresentado na Figura 2.3.

Conforme teoricamente esperado, as componentes de frequência presentes, reveladas a partir da decomposição em série de Fourier, possuem amplitude 1,0 na frequência 60 Hz (frequência fundamental), 0,7 em 180 Hz (terceira harmônica) e 0,5 em 420 Hz (sétima harmônica) (vide equação (2.7)).

2.2 ANÁLISES NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

A análise de varredura em frequência também é utilizada para avaliar os efeitos de harmônicas no sistema, quantificando as distorções nas formas de onda da tensão e corrente nos vários pontos da rede, determinando as possíveis condições de ressonância no sistema e como elas podem ser mitigadas (TASK FORCE ON HARMONICS MODELING AND SIMULATION, 1996a).

Os sistemas de potência embora por si só não se constituam numa fonte significativa de harmônicas, podem contribuir de forma considerável para a alteração da resposta em frequência (amplificação) da rede quando da ocorrência de problemas de ressonância, sendo necessária uma avaliação detalhada do comportamento da admitância (ou impedância) do sistema com a frequência.

2.2.1 Resposta em Frequência

Em um estudo de resposta em frequência, a maior preocupação é injetar tensões ou correntes harmônicas em determinada barra e obter as respostas de tensões ou correntes em outros pontos do sistema. A solução é obtida com os métodos de análise de redes em regime permanente (ZANETTA JÚNIOR, 2003).

Em um sistema interligado cada vez mais “malhado”, restringir a representação da rede, através de equivalentes, permite realizar uma avaliação mais detalhada e precisa. No entanto, a escolha dos pontos de corte, o grau de detalhamento e o número de barras a serem preservados constituem tarefas nem sempre de fácil solução.

Avaliando o comportamento da admitância (ou impedância) do sistema com a frequência, $Y(j\omega)$ (ou $Z(j\omega)$), torna-se possível determinar frequências de ressonância, contribuição de equipamentos para a resposta em frequência do sistema, dentre outras possibilidades.

A título de exemplo, utiliza-se aqui a ferramenta *FREQUENCY SCAN* do programa ATP para obter a resposta em frequência do circuito RLC da Figura 2.5. Os resultados são comparados com resposta em frequência calculada analiticamente, conforme apresentados a seguir.

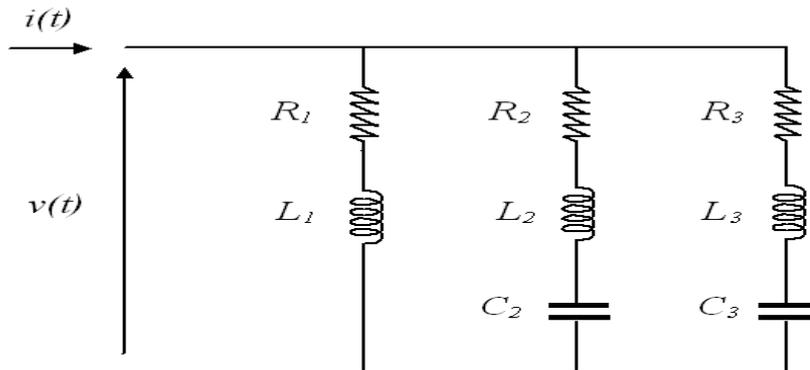


Figura 2.5 – Circuito RLC no domínio do tempo.

Para o circuito da Figura 2.5, a expressão analítica para a admitância no domínio da frequência (plano S ou domínio de Laplace) é dada por:

$$Y(s) = \frac{1/L_1}{s + (R_1/L_1)} + \frac{s/L_2}{s^2 + s.(R_2/L_2) + (1/L_2.C_2)} + \frac{s/L_3}{s^2 + s.(R_3/L_3) + (1/L_3.C_3)} \quad (2.8)$$

Ou ainda por,

$$Y(s) = \frac{(s + r_1).(s + r_2).(s + r_3).(s + r_4)}{(s + p_1).(s + p_2).(s + p_3).(s + p_4).(s + p_5)}, \quad (2.9)$$

sendo: r_i = zeros de $Y(s)$; p_i = polos de $Y(s)$.

Para o circuito da Figura 2.5, atribuem-se os parâmetros apresentados na Tabela 2.1 (LIMA et. al., 2005).

Tabela 2.1 – Parâmetros atribuídos ao circuito da Figura 2.5.

Parâmetros do Circuito
$R_1=3,5 \Omega$; $R_2=15,5 \Omega$; $R_3=52,0 \Omega$
$L_1=153,6 \text{ mH}$; $L_2=7,86 \text{ mH}$; $L_3=141,71 \text{ mH}$

Parâmetros do Circuito

$$C_2=11,387 \mu\text{F} ; C_3=4,9 \mu\text{F}$$

As Figuras 2.6 e 2.7 apresentam amplitude e fase, respectivamente, da resposta em frequência para o circuito RLC (vide Figura 2.5), numa faixa de frequência de 0,01 Hz a 1,0 MHz, calculadas analiticamente a partir da equação (2.8) e obtidas com a rotina *FREQUENCY SCAN* disponibilizada pelo programa ATP.

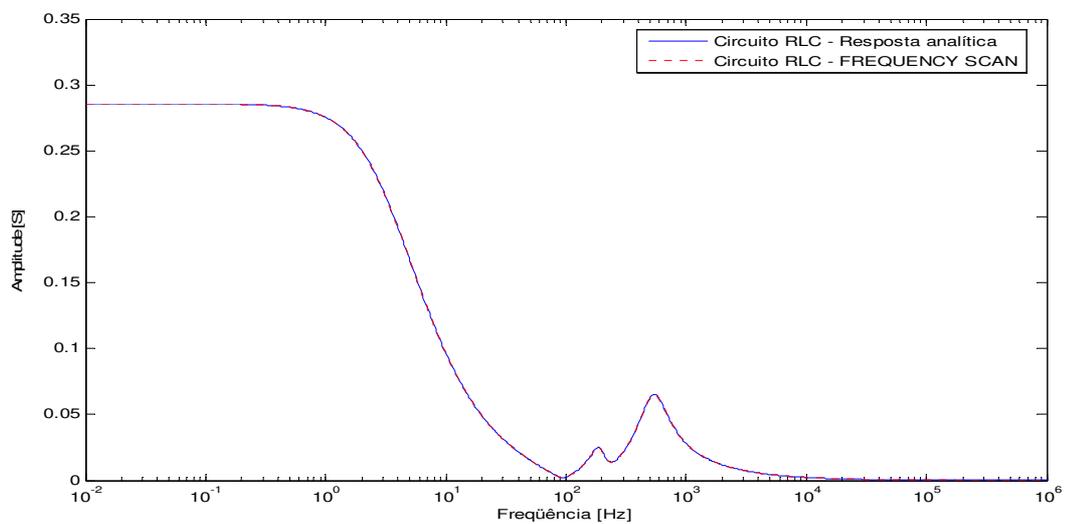


Figura 2.6 – Amplitude da resposta em frequência para o circuito RLC da Figura 2.5.

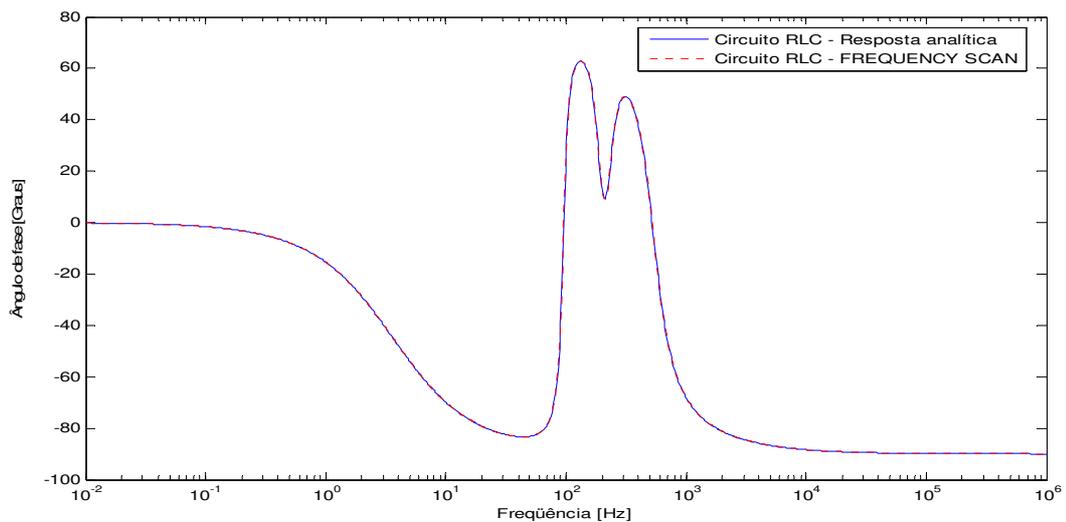


Figura 2.7 – Fase da resposta em frequência para o circuito RLC da Figura 2.5.

Observa-se que a rotina *FREQUENCY SCAN* reproduz com fidelidade o comportamento analítico da admitância em toda faixa de frequência. Entretanto, nos estudos de transitórios eletromagnéticos, as alterações na configuração da rede – associadas às distintas topologias consideradas nas análises – podem modificar a resposta em frequência do sistema, necessitando de uma investigação mais aprofundada.

No Capítulo 3, apresenta-se de forma detalhada uma metodologia baseada na análise de resposta em frequência do sistema, utilizando-se a ferramenta *FREQUENCY SCAN*, onde são realizadas avaliações práticas (através de comparações) e seguras, resultando na otimização dos estudos de transitórios eletromagnéticos para sistemas elétricos de potência.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA APLICADA

Tradicionalmente, após a definição das topologias a serem contempladas nos estudos de transitórios eletromagnéticos, são realizados estudos estatísticos para cada manobra de energização de circuitos e equipamentos nas diversas configurações consideradas. Estes estudos devem ser efetuados por análise probabilística, envolvendo a execução de pelo menos duzentas energizações para cada manobra analisada. Considera-se este número suficiente para representar a natureza aleatória dos instantes de operação dos contatos dos disjuntores, modelados por chaves estatísticas, seguindo uma distribuição Gaussiana de probabilidade (ONS, 2007b). Em seguida, são realizados estudos determinísticos dos casos mais severos (identificados estatisticamente), simulando cada uma das manobras de energização para cada uma das grandezas monitoradas (tensão e corrente). 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. O tempo demandado na análise e compilação dos resultados também é relevante. A identificação das ressonâncias, por exemplo, considerando o elevado número de casos, fica dependente da subjetividade e experiência do analista.

As análises norteadas pelas comparações no domínio da frequência permitem uma triagem e foco nos casos mais críticos, proporcionando uma redução significativa no tempo de execução dos estudos, ao se definir similaridades entre distintas topologias de rede.

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 abertas.

Na metodologia aplicada neste trabalho, as afirmações feitas a partir da análise de varredura em frequência devem ser validadas por simulações no domínio do tempo, visando referenciar as inferências do analista, resultando em avaliações sistêmicas mais objetivas.

A Figura 3.1 apresenta de forma esquemática a abordagem das duas técnicas:

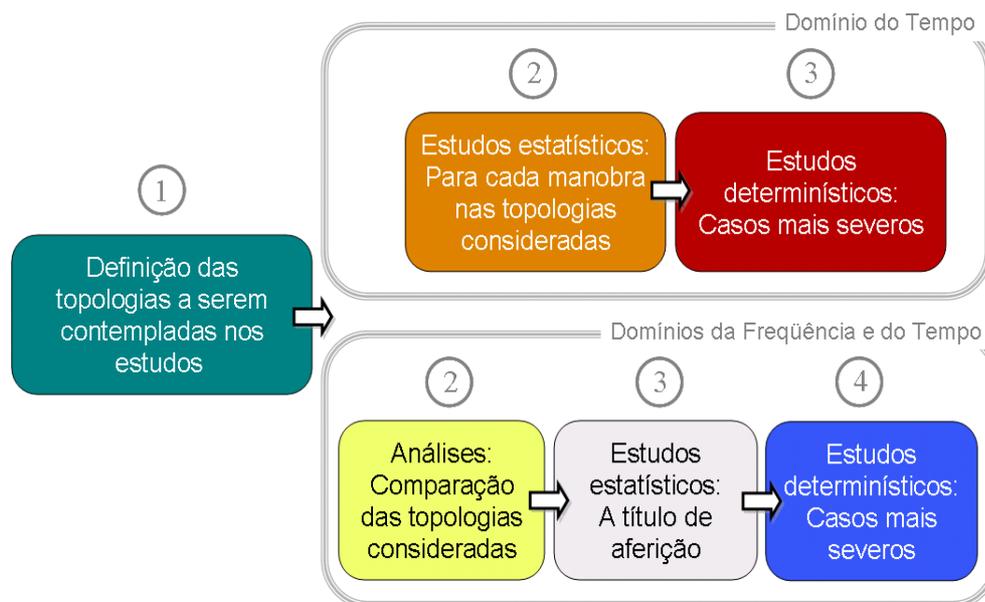


Figura 3.1 – Abordagem Tradicional versus Metodologia Aplicada.

3.1 FERRAMENTA *FREQUENCY SCAN*

Os programas desenvolvidos para cálculo de transitórios eletromagnéticos podem ser classificados de acordo com a técnica de solução utilizada: programas no domínio da frequência (FDTP – *Frequency Domain Transients Program*) e programas no domínio do tempo (EMTP – *Electromagnetic Transients Program*).

Nos programas no domínio da frequência (FDTP), a resposta transitória do sistema em análise é calculada no domínio da frequência. A solução no domínio do tempo é então determinada fazendo-se uso de transformações inversas, como a transformada rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*) (NAGAOKA; AMETANI, 1988; MORENO et al., 1991). A incapacidade de simular mudanças súbitas na configuração do sistema ao longo da

análise e a dificuldade em representar elementos não lineares, se constituem nas maiores limitações destes programas.

Nos programas no domínio do tempo (EMTP), a solução é determinada para cada passo de tempo Δt , em geral prefixado. Partindo-se das condições iniciais em $t = t_0$, as tensões em cada nó do sistema em análise são determinadas em $t = (t_0 + \Delta t), (t_0 + 2\Delta t), (t_0 + 3\Delta t), \dots$, até o tempo máximo de simulação $t_{máx}$. O cálculo das tensões e correntes em cada “nó” é realizado a partir das tensões e correntes “históricas” (obtidas em instantes de tempo anteriores). Mudanças súbitas na configuração do sistema (como defeitos, abertura e fechamento de disjuntores, etc.) e a presença de elementos não lineares, podem ser modeladas sem muita dificuldade (DOMMEL, 1996; ARAÚJO; NEVES, 2005). Estes programas combinam modelos e técnicas de solução, representando diferentes componentes de um sistema elétrico e seus inter-relacionamentos.

A modelagem de cada elemento de rede no domínio do tempo, num programa tipo EMTP, é realizada através de admitâncias (ou impedâncias) equivalentes e fontes de corrente (ou tensão) históricas, obtidos dos modelos matemáticos quando uma dada técnica de integração numérica é aplicada. A grande maioria dos métodos de solução no domínio do tempo se baseia na aplicação da regra de integração trapezoidal para a representação de elementos a parâmetros concentrados e no método das características, também conhecido como método de Bergeron, para a representação de elementos a parâmetros distribuídos (DOMMEL, 1996).

Para estudos de transitórios eletromagnéticos, os programas que utilizam a técnica de resolução no domínio do tempo, são seguramente os mais difundidos e utilizados, dada sua facilidade. Dentre os diversos programas comerciais do tipo EMTP existentes, destaca-se o programa ATP (*Alternative Transients Program*) (LEUVEN EMTP CENTER, 1987), que por

razões históricas, técnicas e econômicas, se tornou uma plataforma padrão para estudos de transitórios eletromagnéticos no Brasil.

Na atual versão dos Procedimentos de Rede – elaborados pelo ONS com a participação dos agentes e aprovados pela ANEEL – o programa ATP é a ferramenta de simulação que deve ser utilizada para estudos de transitórios eletromagnéticos, visando uniformidade e reprodutibilidade destes (ONS, 2007a).

No programa ATP pode-se ainda obter soluções fasoriais de regime permanente a uma dada frequência ou em uma faixa de frequência desejada. Para tanto, o ATP disponibiliza uma ferramenta denominada *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 (LEUVEN EMTP CENTER, 1987).

Fazendo uso desta ferramenta é possível verificar o comportamento da admitância (ou impedância) do sistema com a frequência, $Y(j\omega)$ (ou $Z(j\omega)$), 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.

A 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 (sequências zero e positiva, geralmente com amplitude 1,0 A), cuja frequência será variada automaticamente pela rotina *FREQUENCY SCAN*, no espectro desejado (vide Figura 3.2).

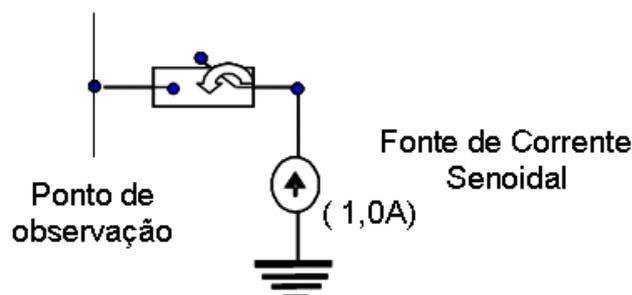


Figura 3.2 – Injeção de fonte de corrente utilizando a ferramenta *FREQUENCY SCAN* do Programa ATP.

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.

A partir dos resultados obtidos, é realizada uma comparação das respostas em frequência, admitância $Y(j\omega)$ (ou impedância $Z(j\omega)$), 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.

3.2 AFERIÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO

As constatações obtidas a partir da análise de varredura em frequência devem ser aferidas por simulações no domínio do tempo. Tal comprovação visa validar a análise 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 (LEUVEN EMTP CENTER, 1987).

Nos estudos de transitórios eletromagnéticos, especificamente nas simulações de energização de transformadores, verifica-se que a forma de onda da corrente é um sinal amortecido, conseqüentemente, não periódico (vide Figura 2.1). Como a teoria da série de

Fourier é aplicada a sinais periódicos (vide Figura 2.3), uma forma de analisar a influência da corrente de *inrush* é aplicar a decomposição em dois instantes distintos: no primeiro ciclo após o instante de energização do transformador e no último ciclo de simulação, onde se consideram os sinais nestes instantes como sinais periódicos. Ressalta-se que no primeiro caso tem-se a maior solitação do ponto de vista de sobrecorrente, enquanto que no último ciclo de simulação, a análise é realizada numa condição mais próxima a de regime permanente, constituindo-se das situações mais relevantes (FERNANDES et al., 2009).

A partir da correlação entre as componentes harmônicas – identificadas a partir da decomposição em série de Fourier – e as respostas em frequência do sistema em estudo – obtidas com a aplicação da ferramenta *FREQUENCY SCAN* – pode-se inferir se haverá ou não divergências significativas quanto às sobretensões e sobrecorrentes transitórias, decorrentes da energização dos transformadores, entre as configurações consideradas no estudo.

O processo é concluído com a realização de simulações no domínio do tempo, esperando que haja coerência e correlação entre as inferências feitas a partir da análise de varredura em frequência e os valores observados nas simulações.

3.3 APLICAÇÃO PRÁTICA DA ANÁLISE EM FREQUÊNCIA

A título de exemplo, considere a Área Pará do Sistema Norte, ilustrada na Figura 3.3, em operação normal (sistema íntegro). Para esta topologia, faz-se uma análise de varredura em frequência visando determinar como a manobra de energização de transformadores na SE 500 kV Marabá pode resultar em sobretensões nas instalações mais próximas.

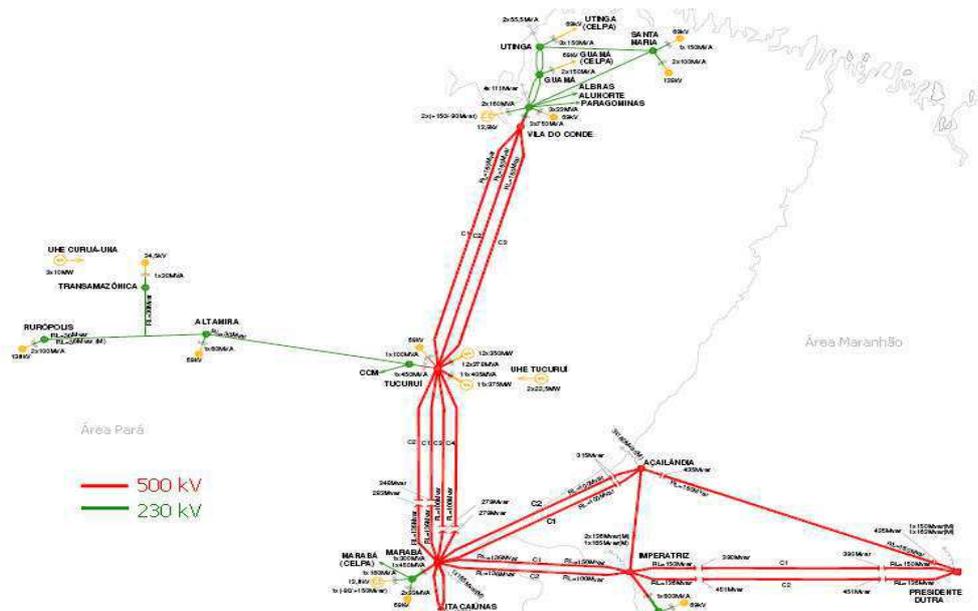


Figura 3.3 – Área Pará do Sistema Norte – Sistema Interligado Nacional.

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

Na Figura 3.4 são apresentadas as respostas em frequência ($Z(j\omega)$), de sequência positiva, vistas dos barramentos 500 kV das SEs Imperatriz, Marabá e Tucuruí.

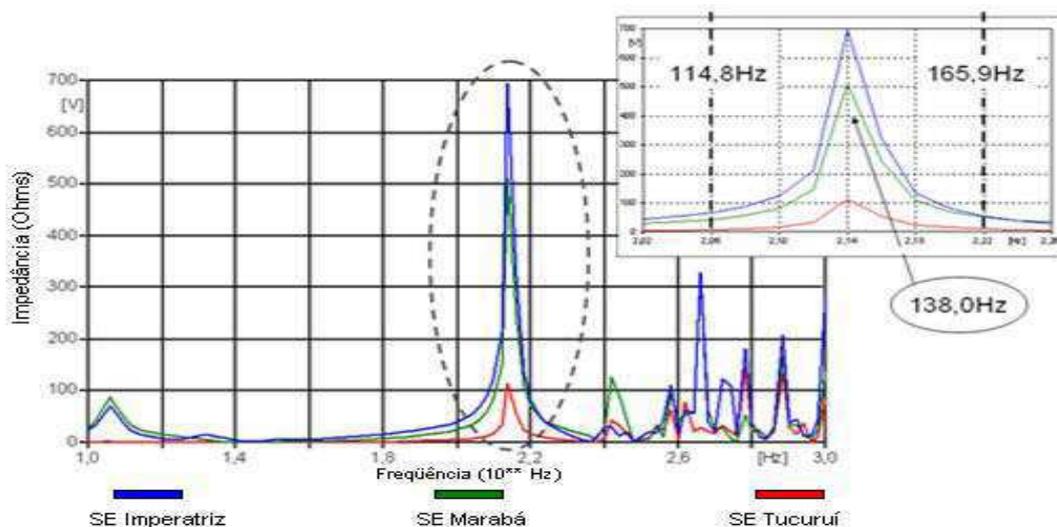


Figura 3.4 – Respostas em frequência (amplitude da impedância de sequência positiva) vistas dos barramentos 500 kV das SEs Imperatriz, Marabá e Tucuruí.

Observa-se que a injeção de uma corrente na frequência 138,0 Hz no barramento 500 kV da SE Marabá produz uma sobretensão mais elevada na SE 500 kV Imperatriz que na própria instalação onde se aplica a fonte de corrente. Em oposição, na SE 500 kV Tucuruí a sobretensão verificada, nesta mesma frequência, é significativamente inferior.

Assim, fazendo uso da ferramenta *FREQUENCY SCAN*, constata-se uma condição ressonante entre as SEs 500 kV Marabá e Imperatriz, nas proximidades da segunda harmônica, por uma análise comparativa simples e direta.

Através de análises apenas no domínio do tempo (abordagem tradicional), tal constatação só seria possível após a observação de um número significativo de manobras, que denotassem tal comportamento. Além disso, a identificação das ressonâncias torna-se fortemente dependente da subjetividade e da experiência do analista.

CAPÍTULO 4

AFERIÇÃO DA METODOLOGIA

4.1 RECOMPOSIÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Os estudos de recomposição têm como finalidade definir procedimentos operativos para o restabelecimento do sistema após perturbação geral ou parcial, definindo para os corredores (preferenciais e alternativos) do SIN, os procedimentos a serem observados pela operação das usinas e subestações quando do restabelecimento da rede de forma fluente ou coordenada, neste último caso sob a responsabilidade dos Centros de Operação do Sistema (COS) (ONS, 2007b).

O principal objetivo durante o processo de recomposição das subestações é restabelecer as cargas no menor tempo possível sem, no entanto, impor riscos operacionais às demais instalações, mantendo-se o equilíbrio entre carga e geração e, por conseguinte, de frequência, respeitados os limites de tensão.

Na recomposição fluente os procedimentos operativos, previamente definidos, permitem a recomposição de áreas de auto-restabelecimento, de forma descentralizada, com o mínimo de comunicação entre as usinas e/ou subestações com os centros de operação, compatibilizando carga e geração, em uma configuração mínima de rede.

Em uma segunda fase, na recomposição coordenada, os centros de operação do sistema autorizam o início do processo e das manobras, controlam o fechamento de paralelos e anéis entre áreas e regiões, a liberação de carga adicional e a intervenção na recomposição fluente, quando do impedimento no processo preferencial.

A recomposição coordenada tem início após a verificação dos seguintes requisitos: ausência de sobrecargas em equipamentos da área considerada; estabilização da frequência; e níveis de tensão compatíveis com a configuração mínima da área para os montantes de tomada de carga prioritária, conforme critérios estabelecidos anteriormente. A conexão entre áreas de auto-restabelecimento é efetuada quando estas apresentam situação estável (ONS, 2007b).

A Figura 4.1 apresentada a seguir, mostra de forma esquemática as etapas consideradas em um estudo de recomposição típico.

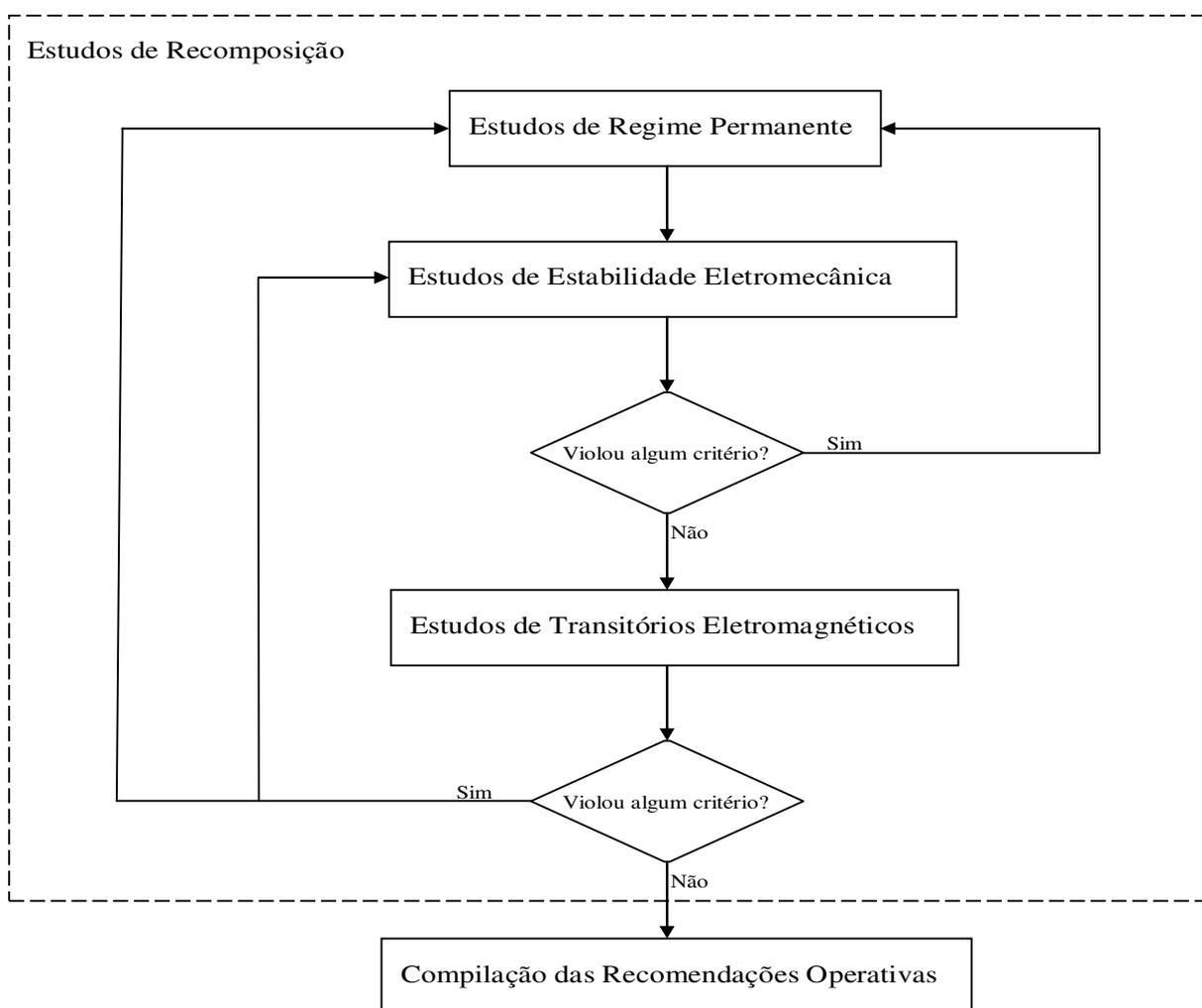


Figura 4.1 – Diagrama esquemático com as etapas de realização de um estudo de recomposição típico.

Conforme apresentado na figura anterior, a definição dos procedimentos de recomposição precede da realização de estudos de regime permanente e dinâmicos. Na

primeira etapa são realizados estudos de regime permanente para analisar as condições do sistema nos diversos estágios e configurações da recomposição. Verificam-se os perfis de tensão, os carregamentos em equipamentos e a capacidade das unidades geradoras do sistema nas situações pré-manobra e pós-manobra.

Na fase de elaboração dos estudos de estabilidade eletromecânica (segunda etapa) são realizadas análises para avaliar o comportamento das oscilações de frequência e de tensão durante manobras de energização de linhas de transmissão, de transformadores em vazio e no processo de tomada de carga, bem como a possibilidade de rejeição de carga. Nesses estudos, deve-se levar em conta a simulação dos reguladores de tensão e de velocidade das unidades geradoras nas usinas de auto-restabelecimento.

Caso as análises violem os critérios pré-estabelecidos nos estudos realizados na segunda etapa, retorna-se para a fase inicial (estudos de regime permanente). Caso contrário, sem violação dos critérios, inicia-se a realização dos estudos de transitórios eletromagnéticos (última etapa) sob condições de recomposição do sistema, onde são investigados os corredores preferenciais indicados pelos estudos de fluxo de potência e de estabilidade eletromecânica.

Os estudos de fluxo de potência e de estabilidade eletromecânica são responsáveis, inicialmente, pela definição dos montantes máximos de tomada de carga, da configuração mínima de reatores e das tensões máximas pré-energização de regime permanente e dinâmico. Também nesta última fase, caso ocorra violação dos critérios, deve-se retornar às outras duas etapas anteriores, dependendo do tipo de violação.

Caso os estudos de transitórios eletromagnéticos sejam concluídos com sucesso, os resultados dos mesmos são encaminhados para compilação das recomendações operativas, que irão compor os procedimentos operativos a serem utilizados pelos operadores nas salas de controle dos COS.

4.2 ESTUDO DE CASOS

A análise de varredura em frequência é utilizada como ferramenta complementar, quando da elaboração de estudos de transitórios eletromagnéticos, para definição dos procedimentos operativos para recomposição de dois sistemas reais do SIN.

A viabilidade da metodologia é aferida por simulações no domínio do tempo, com a utilização do programa ATP. Primeiramente são apresentados os resultados da aplicação da técnica na definição dos procedimentos para recomposição "ilhada" das SEs 230 kV Eunápolis, Funil e do Consumidor Industrial Veracel, a partir da UHE Itapebi, localizadas na Área Sul do Sistema Nordeste.

No segundo caso, mostram-se os resultados obtidos com a utilização da metodologia na definição dos procedimentos para recomposição das SEs 230 kV Teresina, Piripiri e Boa Esperança, a partir da SE Teresina II 500 kV, todas estas integrantes da Área Oeste do Sistema Nordeste.

4.2.1 Recomposição "ilhada" das SEs 230 kV Eunápolis, Funil e do Consumidor Industrial Veracel, a partir da UHE Itapebi

A UHE Itapebi é composta por 3 unidades geradoras (3 x 150 MW) e dispõe de um sistema de *black start* que possibilita a partida das máquinas desta usina de forma isolada (auto-restabelecimento), em uma situação de desligamento geral da Área Sul do Sistema Nordeste, ou em caso de "ilhamento" da SE Itapebi 230 kV (ONS; 2007c).

O diagrama unifilar com a configuração do sistema em estudo é apresentado na Figura 4.2.

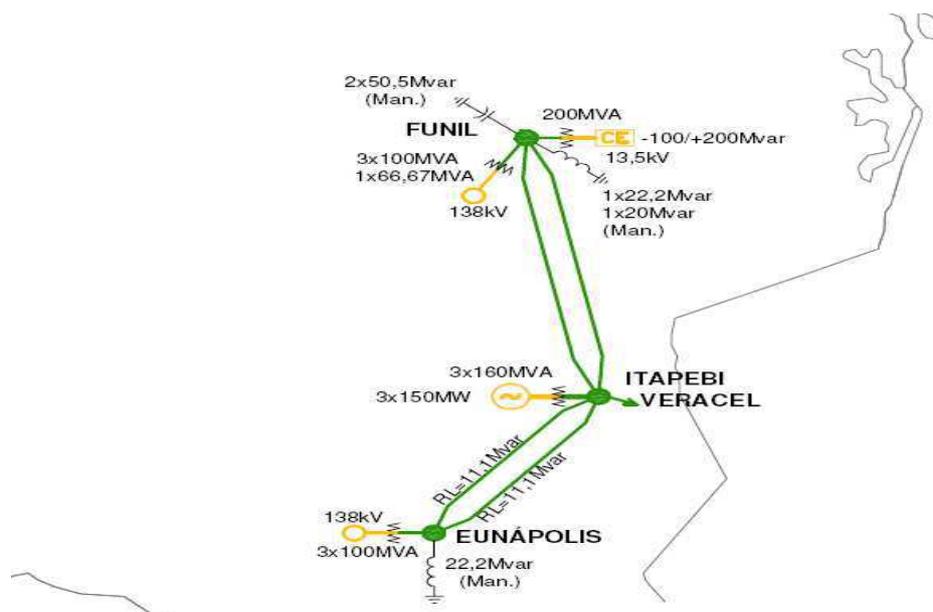


Figura 4.2 – Diagrama unifilar para o sistema em estudo – Recomposição “ilhada” das SEs 230 kV Eunápolis, Funil e do Consumidor Industrial Veracel, a partir da UHE Itapebi – Área Sul do Sistema Nordeste.

Embora a capacidade de geração da UHE Itapebi seja de 450 MW (geração máxima), estudos de regime permanente e de transitórios eletromecânicos revelaram ser possível atender no máximo cerca de 240 MW, no caso de se ter apenas 2 unidades geradoras sincronizadas ou 280 MW, no caso de 3 unidades geradoras sincronizadas na UHE Itapebi, de forma a se garantir o limite de segurança de tensão (ONS; 2007c).

Diante disto, estudos de transitórios eletromagnéticos, realizados pelo ONS, analisaram a possibilidade de energizar as SEs 230 kV Eunápolis, Funil e atender as cargas emergenciais do Consumidor Industrial Veracel, a partir da UHE Itapebi, de forma isolada (recomposição fluente e “ilhada”) do SIN.

Visando 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.

Destaca-se que estando as SEs 230 kV Eunápolis, Funil e o Consumidor Industrial Veracel operando de forma isolada do SIN, a partir da UHE Itapebi, não foi preciso representar o restante do sistema por equivalentes (ONS; 2007c).

Os principais dados do sistema em estudo, as premissas e critérios utilizados são apresentados nas Tabelas de 4.1 a 4.5.

Tabela 4.1 – Cargas consideradas no estudo – Carga mínima.

Subestação	Carga Mínima	
	MW	Mvar
Funil 138 kV	111,1	15,8
Eunápolis 138 kV	76,5	10,9
Consumidor Industrial Veracel 230 kV (carga emergencial)	20,0	11,1

Tabela 4.2 – Modelos computacionais utilizados no estudo.

Modelo Computacional
<p>MODELAGEM DOS TRANSFORMADORES</p> <ul style="list-style-type: none"> – Todos os transformadores considerados foram modelados no programa ATP fazendo-se uso do componente <i>SATURABLE TRANSFORMER</i>, segundo os dados fornecidos pelos agentes proprietários. – Os transformadores 04T1, 04T2 e 04T3 (230/138 kV, 100 MVA) da SE Eunápolis possuem parâmetros similares (mesma ordem de grandeza). De modo análogo, os transformadores 04T1 e 04T6 (230/138 kV, 100 MVA) da SE Funil (mesmo fabricante). Tal similaridade foi utilizada no processo de recomposição visando flexibilidade operativa em caso de indisponibilidade da unidade preferencial.
<p>MODELAGEM DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO</p> <ul style="list-style-type: none"> – 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 linhas a parâmetros constantes na frequência (em que a dependência da frequência dos parâmetros da linha é desprezada) (FERNANDES, 2001).
<p>MODELAGEM DOS DEMAIS COMPONENTES DO SISTEMA EM ESTUDO</p> <ul style="list-style-type: none"> – As cargas, listadas na Tabela 4.1, foram modeladas por circuitos RL ou RC série. Esta representação é adequada para a faixa de frequência do presente estudo (IEEE WORKING GROUP 15.08.09, 1998).

Tabela 4.3 – Capacidade operativa das unidades geradoras da UHE Itapebi.

Instalação	Faixa Operativa das Unidades Geradoras (valores para 1 unidade)	
	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (Mvar)
UHE ITAPEBI	90 a 150	-107 a +64

Tabela 4.4 – Dados utilizados nos estudos estatísticos, fazendo uso do componente *STATISTIC SWITCH* do programa ATP – Dados utilizados nas chaves estatísticas.

Tipo de Chave	Tempo Médio de Fechamento (ms)	Faixa de Variação do Fechamento das Chaves (Graus)	Dispersão entre Polos (ms)	Desvio (ms)	Número de Energizações
Distribuição Gaussiana de Probabilidade	100,0	0 a 360	± 2,5	0,83333	200

Em todos os casos simulados utilizou-se um passo de tempo de 20,0 μ s, tendo como tempo máximo de simulação 1,0 s.

Segundo o teorema de amostragem (IEEE Working Group 15.08.09, 1998), um passo de tempo de 20,0 μ s, possibilita a representação de componentes de frequência de até 25,0 kHz (frequência de Nyquist, $f_N = 1/2\Delta t$).

Tabela 4.5 – Critérios adotados para a realização do estudo.

Critério do Estudo
<p>SUPPORTABILIDADE DOS EQUIPAMENTOS</p> <p>– Para durações inferiores a 10 ciclos consecutivos na frequência fundamental, o valor das sobretensões transitórias não deve ser superior ao nível de isolamento dos equipamentos, com uma margem de segurança de 15%. Em um primeiro momento, na indisponibilidade da informação fornecida pelo fabricante/agente proprietário, adota-se como valor de referência 1,4 pu para transformadores e reatores de barramento. Caso este valor indicativo se mostre restritivo, dados específicos, fornecidos pelos agentes proprietários, devem ser utilizados.</p>
<p>SOBRETENSÕES NOS TERMINAIS EM ABERTO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO</p> <p>– A não superação do valor indicativo de 2,0 pu. Caso haja superação, dados específicos, fornecidos pelos agentes proprietários, devem ser utilizados.</p>

Critério do Estudo
<p>ANEL 230/138 kV ENTRE AS SUBESTAÇÕES FUNIL E EUNÁPOLIS</p> <p>– Para avaliação das solicitações transitórias decorrentes das manobras, não foi necessário representar o anel 230/138 kV entre as SEs Funil e Eunápolis. Assim, as análises realizadas, durante todo o processo de recomposição “ilhada” das SEs 230 kV Eunápolis, Funil e do Consumidor Industrial Veracel, a partir da UHE Itapebi, independem da configuração operativa do anel 230/138 kV, se aberto ou fechado.</p>

As condições de sistema adotadas nas simulações, bem como as etapas das simulações propostas (na sequência do processo de recomposição) são apresentadas nas Tabelas 4.6 e 4.7, respectivamente.

Tabela 4.6 – Condições de sistema adotadas nas simulações.

Item	Condição de Sistema
a)	SEs 230 kV Itapebi, Eunápolis e Funil inicialmente consideradas desenergizadas, estando estas isoladas do SIN.
b)	Instalações do Consumidor Industrial Veracel desenergizadas.
c)	LTs 230 kV Sapeaçu – Funil (circuitos 1 e 2) e Santo Antônio de Jesus – Funil desenergizadas.
d)	Condição de carga mínima (para o quadrimestre Janeiro-Abril/2007). Patamar de 50% da carga mínima no processo de tomada de carga nas subestações em recomposição.
e)	Tensões as mais elevadas possíveis em regime permanente nos barramentos 230 kV. Limites: 1,100 pu em vazio, e 1,050 pu quando em carga.
f)	Todos os reatores 230 kV disponíveis para operação.
g)	UHE Funil desenergizada durante todo o processo de recomposição.
h)	Auto-restabelecimento (<i>Black start</i>) da UHE Itapebi 230 kV para operação “ilhada”, isolada do SIN.
i)	Consideradas, inicialmente, 2 unidades geradoras sincronizadas na UHE Itapebi, adequando e limitando a entrada em operação da terceira unidade de acordo com o processo de tomada de carga nas SEs 230 kV Eunápolis, Funil e no Consumidor Industrial Veracel. Unidades geradoras com a maior tensão terminal possível (limite 1,050 pu).
j)	Visando fluência no processo de recomposição, foi considerada inicialmente a energização sequencial e individualizada das linhas e transformadores. Caso se verifiquem restrições, como alternativa, será avaliada a possibilidade da energização simultânea linha + transformador. As simulações simultâneas, no entanto, desconfiguram a fluência do processo de recomposição.
k)	Nas manobras de transformadores com outras unidades energizadas em vazio, caso as solicitações transitórias se mostrem proibitivas, será investigado qual o patamar de carga necessário para a realização da manobra.

Tabela 4.7 – Simulações propostas na sequência do processo de recomposição.

Etapa	Simulação Proposta
1.	Estando 2 unidades geradoras sincronizadas na UHE Itapebi (com partida por <i>black start</i>), energizar a LT 230 kV Itapebi – Eunápolis (04N1 ou 04N2). a) Em vazio. b) Em vazio, sob falta no terminal da linha em Eunápolis.
2.	Estando 2 unidades geradoras sincronizadas na UHE Itapebi e o barramento 230 kV da SE Eunápolis energizado, energizar o primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1, 04T2, ou 04T3) da SE Eunápolis.
3.	Estando 2 unidades geradoras sincronizadas na UHE Itapebi e a SE Eunápolis energizada com um transformador em vazio, energizar a LT 230 kV Funil – Itapebi (04F6 ou 04F7). a) Em vazio. b) Em vazio, sob falta no terminal da linha em Funil.
4.	Estando 2 unidades geradoras sincronizadas na UHE Itapebi, a SE Eunápolis energizada com um transformador em vazio e o barramento 230 kV da SE Funil energizado, energizar o primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1 ou 04T6) da SE Funil.
5.	Estando 2 unidades geradoras sincronizadas na UHE Itapebi e as SE Eunápolis (com 2 transformadores) e Funil energizadas em vazio, energizar o segundo transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1 ou 04T6) da SE Funil.
6.	Estando 2 unidades geradoras sincronizadas na UHE Itapebi e as SE Eunápolis e Funil (com 2 transformadores) energizadas em vazio, energizar o segundo transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1, 04T2 ou 04T3) da SE Eunápolis.
7.	Estando 2 unidades geradoras sincronizadas na UHE Itapebi e as SE Eunápolis e Funil energizadas, cada com dois transformadores em vazio, energizar o transformador 230/34,5 kV, 140 MVA (T10), do Consumidor Industrial Veracel.
8.	Estando 2 unidades geradoras sincronizadas na UHE Itapebi e as SE Eunápolis, Funil e o Consumidor Industrial Veracel energizados e em vazio, energizar a LT 230 kV Funil – Sapeaçu, 04F1, a partir da SE Funil. a) Em vazio. b) Em vazio, sob falta no terminal da linha em Sapeaçu.

Para cada etapa do processo de recomposição (Tabela 4.7) foram estabelecidas, primeiramente, as condições iniciais em regime permanente para só então partir para a realização dos estudos de transitórios eletromagnéticos.

Considerando a SE Itapebi isolada do SIN (“ilhada”), e as SE 230 kV Eunápolis, Funil e o Consumidor Industrial Veracel desenergizados (item (a) da Tabela 4.6), foram realizados estudos estatísticos visando determinar as solicitações transitórias mais severas,

quando da energização em vazio e sob falta da LT 230 kV Itapebi – Eunápolis (04N1 ou 04N2), a partir da SE Itapebi (etapa (1) da Tabela 4.7).

Destaca-se que nas simulações sob falta considerou-se a permanência desta, quando de fato a proteção de distância da linha sob manobra deve atuar após a identificação de um defeito, em um tempo aproximado de 100 ms (ONS, 2007c).

A Tabela 4.8 apresenta um resumo dos valores máximos, para as grandezas monitoradas, resultantes do estudo estatístico.

Tabela 4.8 – Resultados do estudo estatístico do programa ATP – Chaveamentos que resultaram nos valores máximos das grandezas monitoradas. Energização em vazio e sob falta da LT 230 kV Itapebi – Eunápolis (04N1), a partir da SE Itapebi.

Grandeza Monitorada	Valor Máximo	Fase / Energização
Tensões no barramento 230 kV da SE Itapebi.	316,179 kV (1,689 pu)	Fase B Energização 38
Tensões no terminal aberto em Eunápolis da LT 230 kV Itapebi – Eunápolis.	355,597 kV (1,893 pu)	Fase B Energização 24
Correntes de fase nos enrolamentos 230 kV do transformador elevador 230/13,8 kV, 160 MVA, TE-1, da UHE Itapebi.	2.374,906 A (5,913 pu) ($I_N = 401,635$ A)	Fase A Energização 115
Corrente de neutro no lado 230 kV do transformador elevador 230/13,8 kV, 160 MVA, TE-1, da UHE Itapebi.	2.422,337 A	Energização 89
Corrente de armadura nos enrolamentos 13,8 kV da unidade geradora G1, 13,8 kV, 160 MVA, da UHE Itapebi.	23.843,870 A (3,562 pu) ($I_N = 6.693,916$ A)	Fase A Energização 26
Energia absorvida pelos parraios da LT 230 kV Itapebi – Eunápolis, 04N1, nos terminais na SE Itapebi.	0,623 kJ (Limite = 1.100,0 kJ)	Fase B Energização 38
Energia absorvida pelos parraios da LT 230 kV Itapebi – Eunápolis, 04N1, nos terminais na SE Eunápolis.	24,027 kJ (Limite = 1.100,0 kJ)	Fase B Energização 16

Tendo como base os tempos de fechamento, que resultaram nos valores máximos, foi simulada a manobra de energização em vazio e sob falta da LT 230 kV Itapebi – Eunápolis (04N1), a partir da SE Itapebi. As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam as situações transitórias mais severas, resultantes desta energização.

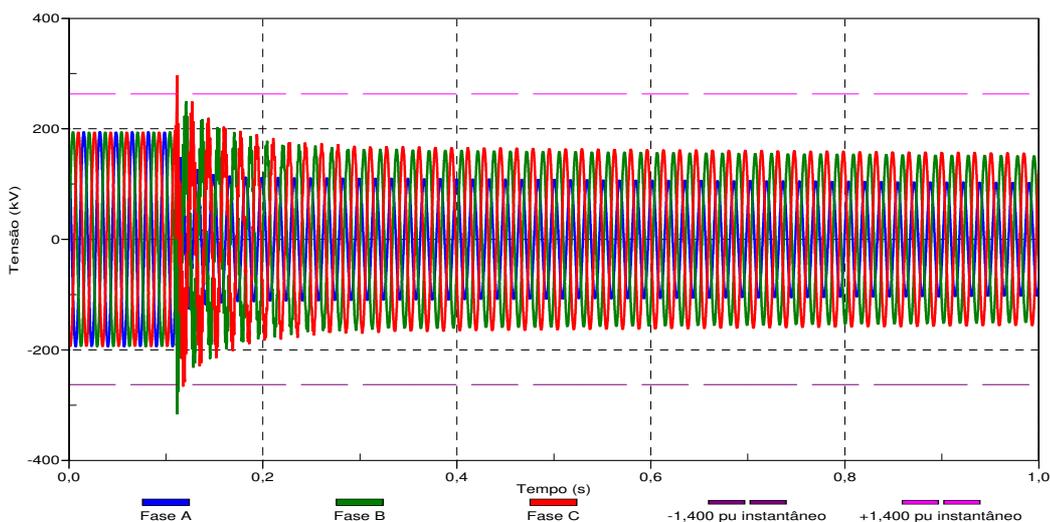


Figura 4.3 – Tensões no barramento 230 kV da SE Itapebi. Energização em vazio e sob falta da LT 230 kV Itapebi – Eunápolis (04N1), a partir da SE Itapebi (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).

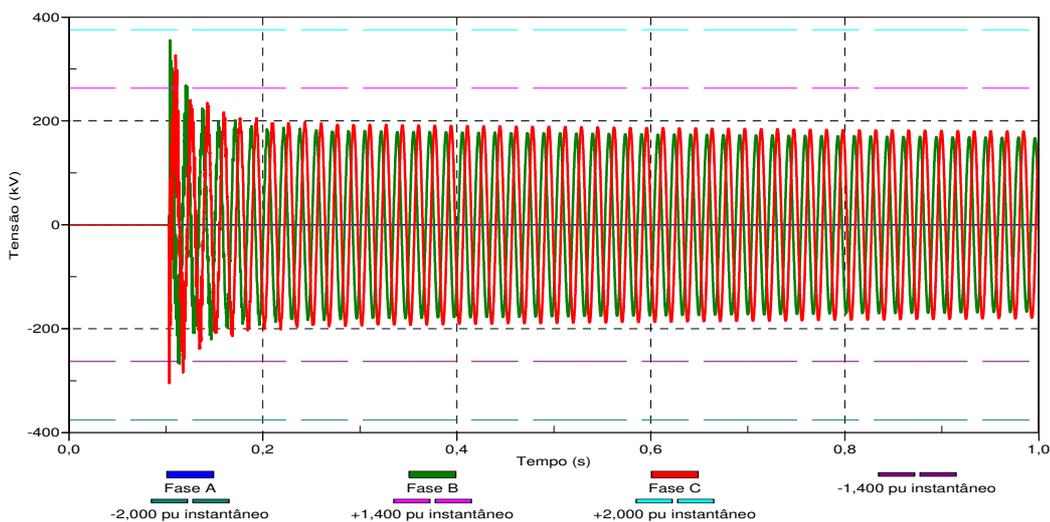


Figura 4.4 – Tensões no terminal aberto em Eunápolis. Energização em vazio e sob falta da LT 230 kV Itapebi – Eunápolis (04N1), a partir da SE Itapebi (Referências: $\pm 2,000$ pu e $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).

As sobretensões observadas nas Figuras 4.3 e 4.4 atingiram valores superiores a 1,400 pu, mas se mostraram fortemente amortecidas.

As outras grandezas monitoradas (correntes de fase e de neutro nos transformadores elevadores 230/13,8 kV da UHE Itapebi, correntes de armadura nas unidades geradoras da usina, além da energia absorvida pelos pararraios da linha de transmissão sob manobra) também apresentaram resultados satisfatórios (ONS, 2007c).

A partir desses resultados, concluiu-se que a manobra de energização em vazio, mesmo sob falta, da LT 230 kV Itapebi – Eunápolis (04N1 ou 04N2), a partir da SE Itapebi, não impõe riscos à integridade dos equipamentos destas instalações e das instalações circunvizinhas.

As etapas (2) e (3) da Tabela 4.7 foram realizadas de forma análoga. As simulações foram executadas na sequência do processo de recomposição. Com o barramento 230 kV da SE Eunápolis energizado em vazio, foi dado prosseguimento a energização em vazio do primeiro transformador desta subestação (etapa (2)). As solicitações transitórias decorrentes desta manobra não se mostraram proibitivas.

Considerando a SE Eunápolis energizada com um transformador em vazio, seguiu-se para a etapa (3), energizar em vazio e sob falta a LT 230 kV Funil – Itapebi, a partir da SE Itapebi. As solicitações transitórias observadas quando da realização desta manobra também não impuseram riscos à integridade dos equipamentos destas instalações e das instalações circunvizinhas (ONS, 2007c).

Estando 2 unidades geradoras sincronizadas na UHE Itapebi, a SE Eunápolis energizada com um transformador em vazio e o barramento 230 kV da SE Funil energizado, partiu-se para energizar o primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1 ou 04T6) da SE Funil (etapa (4) da Tabela 4.7). Estudos estatísticos foram realizados visando determinar as solicitações transitórias mais severas, quando da energização em vazio do primeiro transformador desta subestação (ONS, 2007c).

A Tabela 4.9 apresenta um resumo dos valores máximos, para as grandezas monitoradas, resultantes do estudo estatístico.

Tabela 4.9 – Resultados do estudo estatístico do programa ATP – Chaveamentos que resultaram nos valores máximos das grandezas monitoradas. Energização em vazio do primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1), da SE Funil.

Grandeza Monitorada	Valor Máximo	Fase / Energização
Tensões no barramento 230 kV da SE Itapebi.	316,796 kV (1,687 pu)	Fase C Energização 187
Tensões no barramento 230 kV da SE Eunápolis.	343,825 kV (1,831 pu)	Fase C Energização 176
Tensões no barramento 230 kV da SE Funil.	354,728 kV (2,702 pu)	Fase A Energização 52
Correntes de fase nos enrolamentos 230 kV do transformador elevador 230/13,8 kV, 160 MVA, TE-1, da UHE Itapebi.	417,146 A (1,039 pu) ($I_N = 401,635$ A)	Fase C Energização 187
Corrente de neutro no lado 230 kV do transformador elevador 230/13,8 kV, 160 MVA, TE-1, da UHE Itapebi.	412,115 A	Energização 90
Corrente de armadura nos enrolamentos 13,8 kV da unidade geradora G1, 13,8kV, 160 MVA, da UHE Itapebi.	7.030,567 A (1,050 pu) ($I_N = 6.693,916$ A)	Fase B Energização 26
Correntes de fase nos enrolamentos 230 kV do transformador 230/138 kV, 100 MVA, 04T1, da SE Eunápolis.	10,466 A (0,042 pu) ($I_N = 251,022$ A)	Fase B Energização 159
Corrente de neutro no lado 230 kV do transformador 230/138 kV, 100 MVA, 04T1, da SE Eunápolis.	9,627 A	Energização 159
Correntes de fase nos enrolamentos 230 kV do transformador 230/138 kV, 100 MVA, 04T1, da SE Funil.	740,442 A (2,950 pu) ($I_N = 251,022$ A)	Fase A Energização 162
Corrente de neutro no lado 230 kV do transformador 230/138 kV, 100 MVA, 04T1, da SE Funil.	640,266 A	Energização 137

Tendo como base os tempos de fechamento, que resultaram nos valores máximos, foi simulada a manobra de energização em vazio do primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1), da SE Funil. As Figuras de 4.5 a 4.7 apresentam as situações transitórias mais severas, resultantes desta energização.

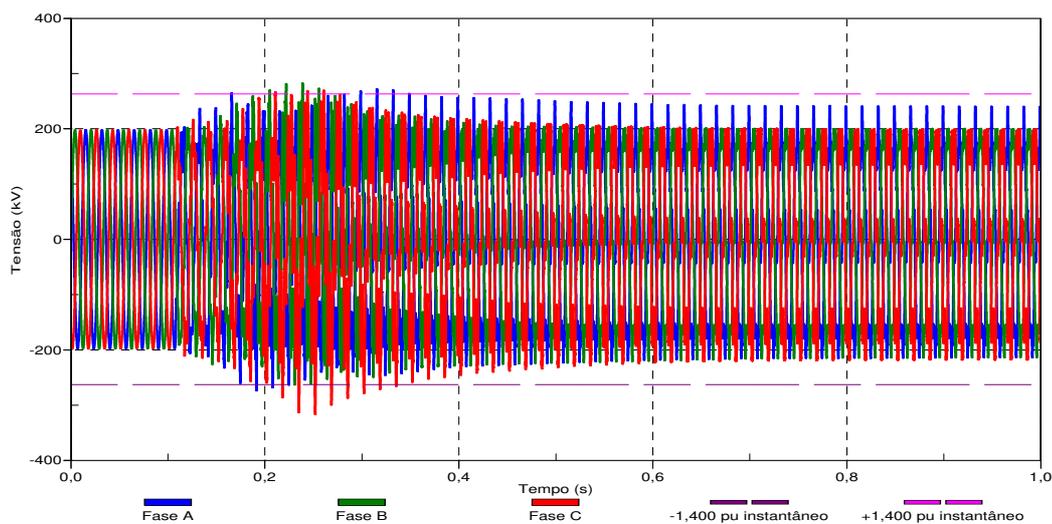


Figura 4.5 – Tensões no barramento 230 kV da SE Itapebi. Energização em vazio do primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1), da SE Funil (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).

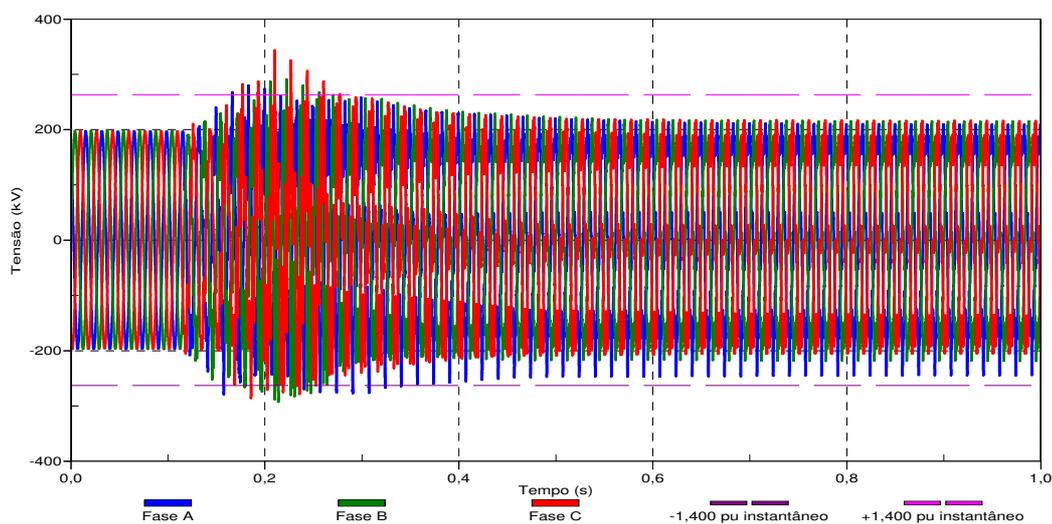


Figura 4.6 – Tensões no barramento 230 kV da SE Eunápolis. Energização em vazio do primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1), da SE Funil (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).

As sobretensões observadas nos barramentos 230 kV das SE Itapebi e Eunápolis (Figuras 4.5 e 4.6, respectivamente) superaram os valores de 1,400 pu por breves instantes, sendo amortecidas em seguida.

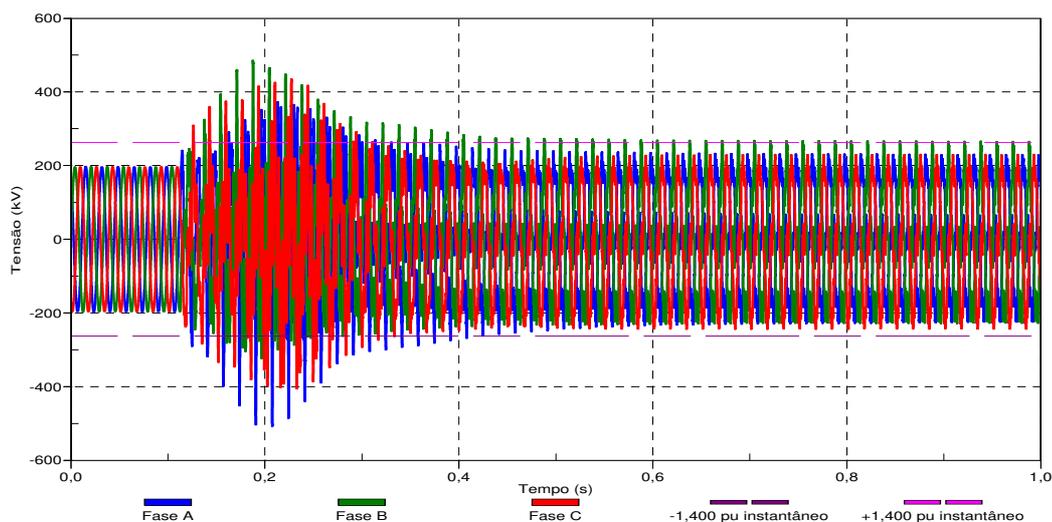


Figura 4.7 – Tensões no barramento 230 kV da SE Funil. Energização em vazio do primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1), da SE Funil (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).

Já no barramento 230 kV da SE Funil (Figura 4.7) as sobretensões atingiram valores elevados com fraco amortecimento, ultrapassando o valor de referência (1,400 pu) em um tempo superior a 10 ciclos consecutivos da frequência fundamental.

De fato, observam-se sobretensões instantâneas da ordem de 2,702 pu no barramento 230 kV da SE Funil (vide Tabela 4.9). Vale destacar que, usualmente nos estudos de energização de transformadores não se representam os pararraios dos transformadores nem das linhas de transmissão.

Diante das sobretensões verificadas na SE 230 kV Funil, concluiu-se que a manobra de energização em vazio do primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1), da SE Funil, impõe riscos à integridade dos equipamentos desta instalação e das instalações circunvizinhas (ONS, 2007c).

Visando a continuidade fluente do processo de recomposição foram estabelecidas 4 (quatro) configurações alternativas (consideradas viáveis ou factíveis), conforme apresentadas na Tabela 4.10. Fazendo uso destas, espera-se eliminar a condição ressonante que resultou nos valores elevados com baixo amortecimento das sobretensões, quando da manobra de energização em vazio do primeiro transformador da SE Funil (ONS, 2007c).

Tabela 4.10 – Configurações alternativas propostas para recomposição fluente da SE Funil.

1 – Tomada prévia de carga no barramento 138 kV da SE Eunápolis.
2 – Redução da tensão pré-manobra no barramento 230 kV da SE Funil.
3 – Energização prévia do segundo circuito 230 kV Itapebi – Funil.
4 – Energização prévia de um banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230 kV, na SE Funil.

Destaca-se que na impossibilidade de prosseguir com a recomposição fluente a partir das configurações alternativas elencadas acima, a continuidade do processo será dada através da energização simultânea linha (circuito 04F6) + transformador (04T1) da SE 230 kV Funil (conforme premissa detalhada no item (j) da Tabela 4.6).

4.2.1.1 Análise de Varredura em Frequência das Configurações Alternativas

Com o objetivo de identificar quais das configurações alternativas propostas (vide Tabela 4.10) são efetivas de forma a possibilitar o processo fluente de recomposição da SE Funil, estando a Área Sul do Nordeste em recomposição “ilhada” a partir da SE Itapebi, são realizadas análises de varredura em frequência.

A análise de varredura em frequência é utilizada aqui com o intuito de comparar as configurações alternativas factíveis e determinar quais são candidatas a efetivas ao alterar a resposta em frequência do sistema, vista do barramento 230 kV da SE Funil.

Para tanto, utiliza-se a rotina *FREQUENCY SCAN* do programa ATP (LEUVEN EMTP CENTER, 1987). Na análise em questão, realizam-se varreduras na faixa de frequência de 10,0 Hz a 3,0 kHz, espectro suficiente para analisar os fenômenos decorrentes da energização de transformadores e linhas de transmissão. No presente estudo consideram-se os parâmetros desses equipamentos calculados na frequência 60 Hz, portanto admitir valores mais elevados no espectro de frequência, sobretudo superiores a 1,0 kHz, pode-se incorrer em

erros significativos. As fontes de tensão são retiradas e os pontos de conexão destas aterrados (curto-circuitados). No ponto de interesse (barramento 230 kV da SE Funil), injeta-se uma fonte de corrente (sequências zero e positiva, amplitude 1,0 A), cuja frequência será variada pela rotina *FREQUENCY SCAN*, no espectro desejado.

4.2.1.2 Tomada prévia de carga no barramento 138 kV da SE Eunápolis

Com a topologia da rede em recomposição, estando o barramento 230 kV da SE Funil energizado a partir da SE Itapebi por 1 circuito 230 kV (04F6), são analisadas 4 (quatro) configurações distintas quanto à tomada prévia de carga na SE Eunápolis (alternativa (1) da Tabela 4.10), listadas a seguir:

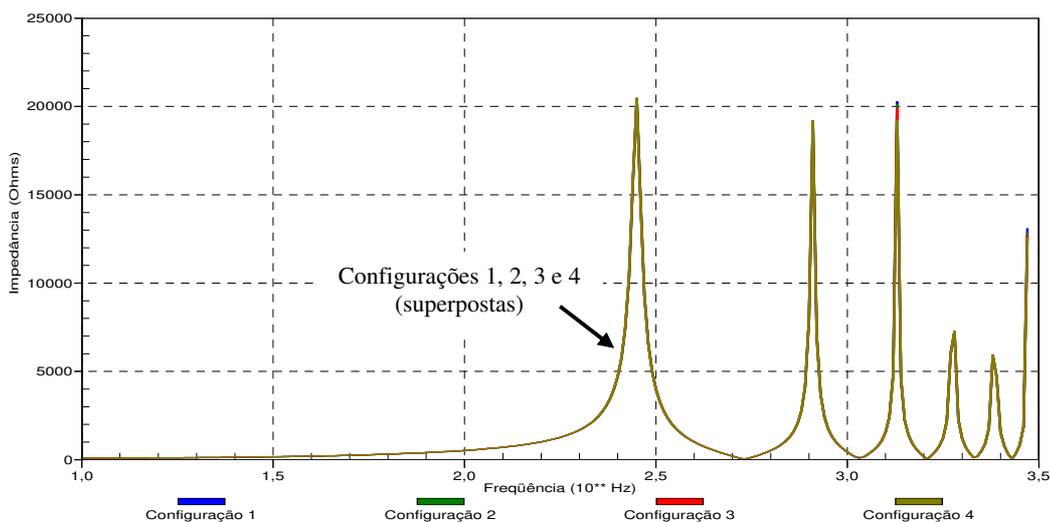
Configuração 1: SE Eunápolis **em vazio** (configuração proibitiva). Considerada apenas para efeito de comparação.

Configuração 2: SE Eunápolis com **22,0 MW** de carga restabelecida (regionais de Porto Seguro e Coroa Vermelha).

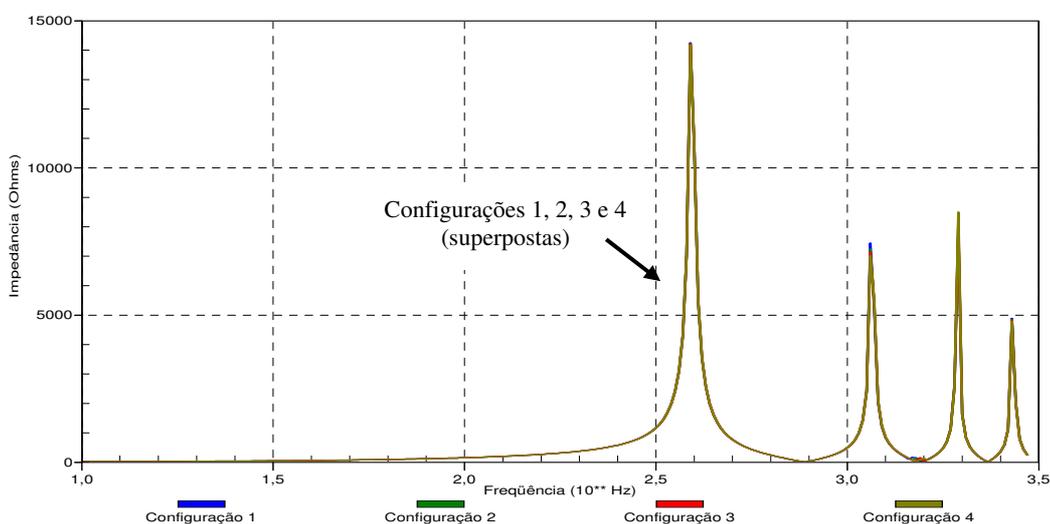
Configuração 3: SE Eunápolis com **45,0 MW** de carga restabelecida (regionais de Porto Seguro, Coroa Vermelha, Eunápolis e Itamaraju).

Configuração 4: SE Eunápolis com **82,0 MW** de carga restabelecida (regionais de Porto Seguro, Coroa Vermelha, Eunápolis, Itamaraju e Teixeira de Freitas).

A Figura 4.8 apresenta os resultados obtidos para o comportamento da impedância do sistema com a frequência (sequências zero e positiva), quando da injeção da fonte de corrente no barramento 230 kV da SE Funil. Comparam-se as respostas em frequência para a impedância ($Z(j\omega)$) nas 4 (quatro) configurações analisadas.



(a) Sequência zero.



(b) Sequência positiva.

Figura 4.8 – Respostas em frequência (amplitude da impedância) vistas do barramento 230 kV da SE Funil – Comparação entre as configurações em análise quanto à tomada de carga na SE Eunápolis.

Dos resultados apresentados na Figura 4.8, verifica-se que a tomada prévia de carga na SE Eunápolis não altera a resposta em frequência do sistema (impedâncias de sequência zero e positiva), não se configurando, portanto, como uma alternativa efetiva para a continuidade do processo fluente de recomposição da SE Funil.

De posse dos resultados da análise de varredura em frequência, faz-se uma análise no domínio do tempo visando validar as afirmações feitas com base na análise na frequência. Para tanto, simula-se, no domínio do tempo, a manobra de energização do primeiro

transformador 04T1, 230/138 kV, 100 MVA, da SE Funil nas configurações de 2 a 4 (a Configuração 1, proibitiva, já foi analisada):

A Figura 4.9 apresenta as sobretensões transitórias verificadas na SE Funil (fase A, maior amplitude no estudo estatístico, com 1 circuito 230 kV Funil – Itapebi em operação), quando da manobra, nas quatro configurações analisadas com relação à tomada prévia de carga na SE Eunápolis.

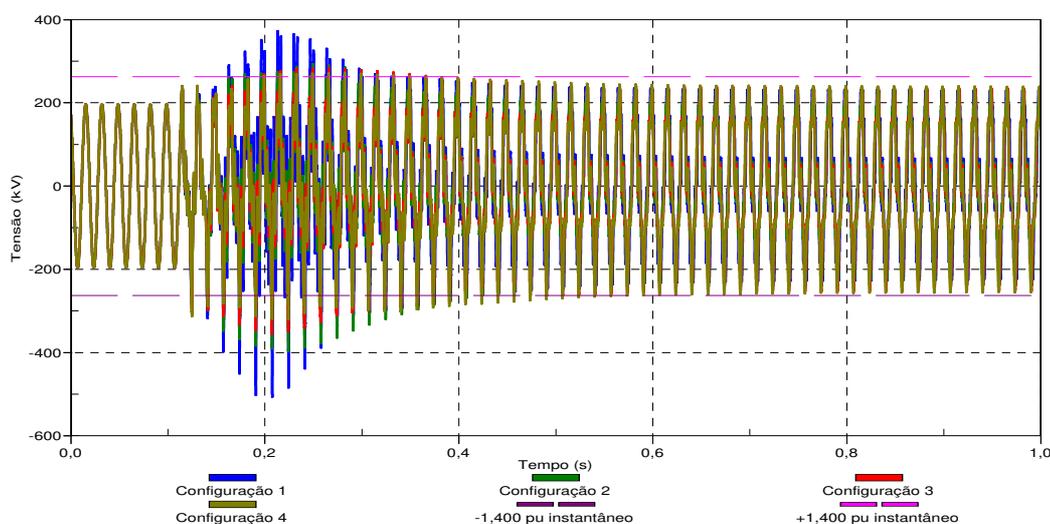


Figura 4.9 – Tensões no barramento 230 kV da SE Funil (fase A). Comparação entre as configurações em análise quanto à tomada de carga na SE Eunápolis. Energização em vazio do primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1), da SE Funil. (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).

Na Figura 4.9, observam-se sobretensões severas e pouco amortecidas, ultrapassando o valor de 1,400 pu por um tempo superior a 10 ciclos consecutivos da frequência fundamental.

As solicitações transitórias visualizadas nas quatro configurações (em vazio, 22 MW, 45 MW e 82 MW), além de não apresentarem diferenças significativas, mostram que a alternativa de tomada prévia de carga na SE Eunápolis não é efetiva para possibilitar a realização da manobra sem impor riscos aos equipamentos sob manobra.

Os resultados apresentados (simulações no tempo) confirmam as inferências feitas a partir da análise de varredura em frequência, validando-as. As pequenas distinções

observadas se devem à natureza aleatória das manobras estatísticas e à consideração das não linearidades quando das simulações no tempo.

A Tabela 4.11 apresenta de forma esquemática um comparativo do tempo demandado nas análises quando da realização de simulações no tempo e na frequência, quanto à tomada de carga na SE Eunápolis.

Tabela 4.11 – Comparação entre as análises no tempo (tradicional) e na frequência, quanto à tomada de carga na SE Eunápolis.

Estudo	Análise no Tempo (tradicional)	<i>FREQUENCY SCAN</i>
Estudo regime permanente	3 casos (22 MW, 45 MW e 82 MW)	Não é necessário (equivalentes de Thévenin)
Estudo estatístico	3 casos (22 MW, 45 MW e 82 MW)	Não é necessário
Estudo determinístico	3 casos (22 MW, 45 MW e 82 MW)	Não é necessário
Conclusão	9 casos para concluir que a tomada de carga em Eunápolis não é efetiva.	Comparações rápidas e práticas para se chegar a mesma conclusão.

Como pode ser observado na Tabela 4.11, a depender do número de possibilidades, o processo de análise no tempo pode tornar-se bastante demorado, uma vez que requer ajustes em regime permanente, estudos estatísticos e determinísticos para cada topologia considerada. Enquanto que a análise norteada pelas comparações na frequência proporciona uma redução significativa no tempo de execução dos estudos, ao permitir avaliar de forma mais ágil, segura e objetiva as diversas configurações (topologias) contempladas na análise, resultando na otimização dos estudos de transitórios eletromagnéticos, minimizando a subjetividade do analista que, por sua vez, se traduz em segurança operativa.

4.2.1.3 Redução da tensão pré-manobra no barramento 230 kV da SE Funil

Ao se utilizar a ferramenta *FREQUENCY SCAN*, as fontes de tensão são curto-circuitadas (equivalente de Thévenin), portanto a efetividade desta alternativa, de reduzir a tensão pré-manobra, não pode ser verificada através da análise na frequência.

Desta forma simula-se, no domínio do tempo, a manobra de energização do primeiro transformador 04T1, 230/138kV, 100MVA, da SE Funil, considerando a redução na tensão pré-manobra de 1,050 pu para 1,000 pu nesta subestação (alternativa (2) da Tabela 4.10). Tal análise é realizada visando avaliar o efeito da redução da tensão pré-manobra sobre as solicitações transitórias decorrentes da citada manobra de energização.

Configuração 1: Barramento 230 kV da SE Funil energizado a partir da SE Itapebi por 1 circuito 230 kV (04F6), tendo como tensão pré-manobra 1,000 pu.

Apresentam-se na Figura 4.10, as sobretensões transitórias verificadas na SE Funil, quando da manobra.

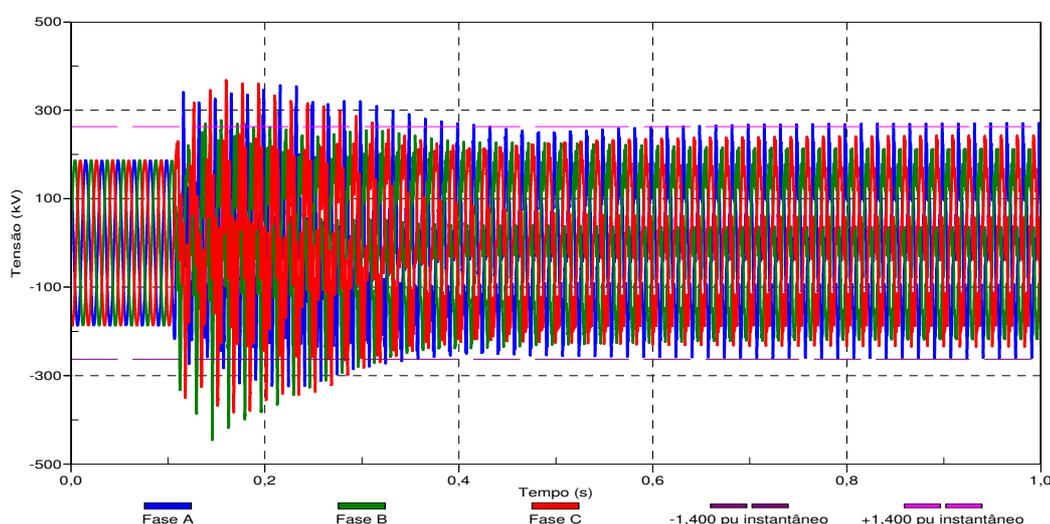


Figura 4.10 – Tensões no barramento 230 kV da SE Funil. Energização em vazio do primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1), da SE Funil. Tensão pré-manobra 1,000 pu (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).

Na Figura 4.10, observam-se sobretensões severas e pouco amortecidas, ultrapassando o valor de 1,400 pu por um tempo superior a 10 ciclos consecutivos da frequência fundamental.

A partir destes resultados, verifica-se que a redução na tensão pré-manobra de 1,050 pu para 1,000 pu não se mostra eficaz para possibilitar a recomposição fluente da SE Funil sem impor riscos aos equipamentos sob manobra.

4.2.1.4 Energização prévia do segundo circuito 230 kV Itapebi – Funil e de um banco de capacitores 50,5 Mvar na SE 230 kV Funil

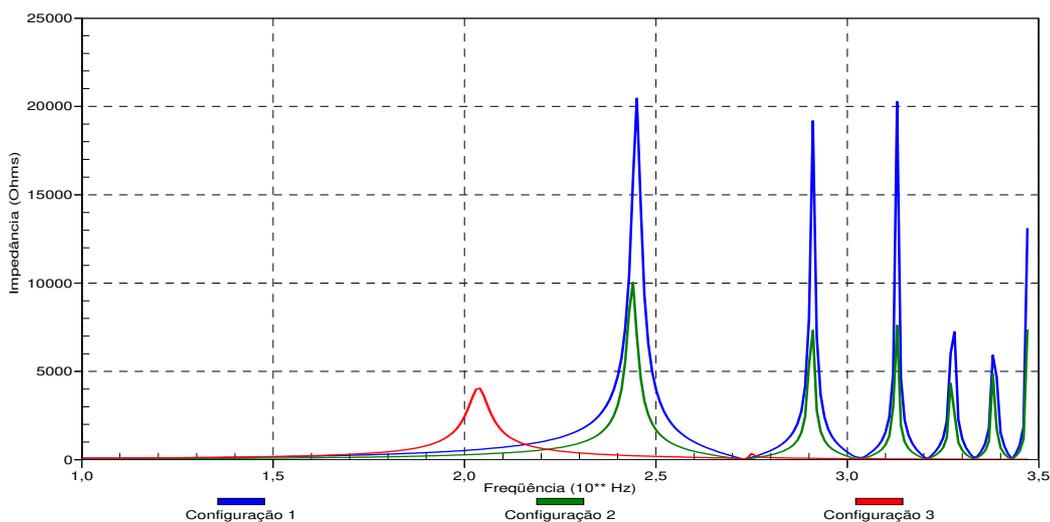
As configurações alternativas (3) e (4) da Tabela 4.10 são analisadas conjuntamente, como segue.

Configuração 1: Barramento 230 kV da SE Funil energizado a partir da SE Itapebi por **1 circuito 230 kV** (04F6). Considerada apenas para efeito de comparação (proibitiva).

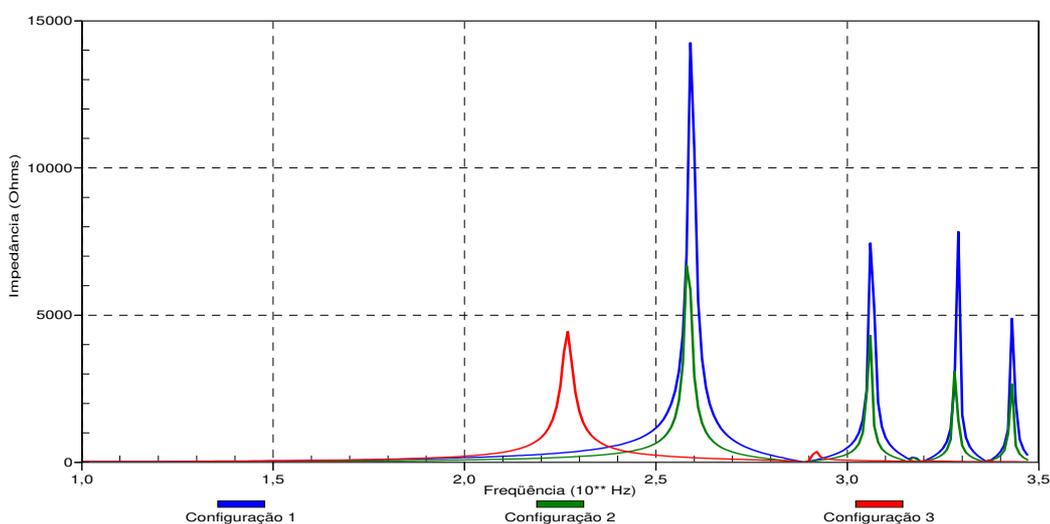
Configuração 2: Barramento 230 kV da SE Funil energizado a partir da SE Itapebi por **2 circuitos 230 kV** (04F6 e 04F7).

Configuração 3: Energização prévia de **1 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230 kV**, na SE Funil.

Apresentam-se na Figura 4.11, os resultados obtidos para o comportamento da impedância do sistema com a frequência (sequências zero e positiva), quando da injeção da fonte de corrente no barramento 230 kV da SE Funil. Comparam-se, agora, as respostas em frequência para a impedância ($Z(j\omega)$) nas 3 (três) configurações em análise.



(a) Sequência zero.



(b) Sequência positiva.

Figura 4.11 – Respostas em frequência (amplitude da impedância) vistas do barramento 230 kV da SE Funil – Comparação entre as configurações em análise quanto à topologia do sistema e da SE Funil.

Dos resultados apresentados na Figura 4.11, observam-se diferenças significativas na resposta em frequência (impedâncias de sequência zero e positiva) quanto à topologia do sistema e da SE Funil.

Em relação à Configuração 1 (proibitiva), a presença de 1 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230 kV, energizado na SE Funil (Configuração 3) resulta em um deslocamento do primeiro pico ressonante para a frequência de 186,2 Hz (próxima, à terceira harmônica) para a sequência positiva, eliminando os picos ressonantes em frequências superiores.

Já na Configuração 2, a presença do segundo circuito 230 kV Funil – Itapebi contribui para atenuar os picos ressonantes, que se situam em torno de 380,0 Hz e 420,0 Hz (sexta e sétima harmônicas) e acima de 1,0 kHz para a sequência positiva, sem deslocamentos expressivos destes.

Pelas alterações na resposta em frequência (impedâncias de sequência zero e positiva), as alternativas (3) e (4) da Tabela 4.10 se mostram candidatas efetivas para a continuidade do processo fluente de recomposição da SE Funil.

Caso a corrente transitória decorrente da energização, no domínio do tempo, do primeiro transformador da SE Funil apresente componentes de frequência nos distintos pontos de ressonância, apresentados nas amplitudes das impedâncias (vide Figura 4.11), as sobretensões (e sobrecorrentes) podem ser significativamente distintas nas três configurações analisadas. Caso contrário, se as componentes de frequência não excitarem os pontos de ressonância, as diferenças podem ser desprezíveis.

Mais uma vez, a partir dos resultados da análise de varredura em frequência, faz-se uma análise no domínio do tempo, visando validar as afirmações feitas com base na análise de frequência. Para tanto, simula-se a manobra de energização do primeiro transformador 04T1, 230/138 kV, 100 MVA, da SE Funil nas Configurações 2 e 3, conforme apresentadas a seguir.

Configuração 2: Barramento 230 kV da SE Funil energizado a partir da SE Itapebi por **2 circuitos 230 kV** (04F6 e 04F7).

Apresentam-se na Figura 4.12, as sobretensões transitórias verificadas na SE Funil, quando da manobra.

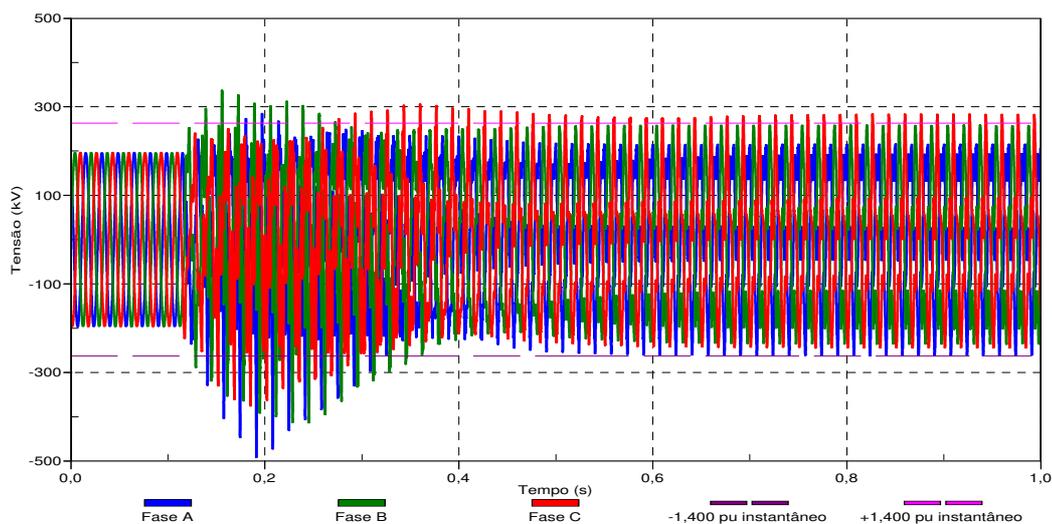


Figura 4.12 – Tensões no barramento 230 kV da SE Funil. Energização em vazio do primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1), da SE Funil. Barramento 230 kV da SE Funil energizado a partir da SE Itapebi por 2 circuitos 230 kV (04F6 e 04F7) (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).

Mais uma vez, observam-se sobretensões severas e pouco amortecidas (Figura 4.12), que ultrapassam o valor de 1,400 pu por um tempo superior a 10 ciclos consecutivos da frequência fundamental.

A partir das simulações no domínio do tempo, verifica-se que a presença do segundo circuito não é eficaz para possibilitar a realização da manobra sem impor riscos aos equipamentos sob manobra.

Configuração 3: Energização prévia de **1 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230 V**, na SE Funil.

Apresentam-se na Figura 4.13, as sobretensões transitórias verificadas na SE Funil, quando da manobra.

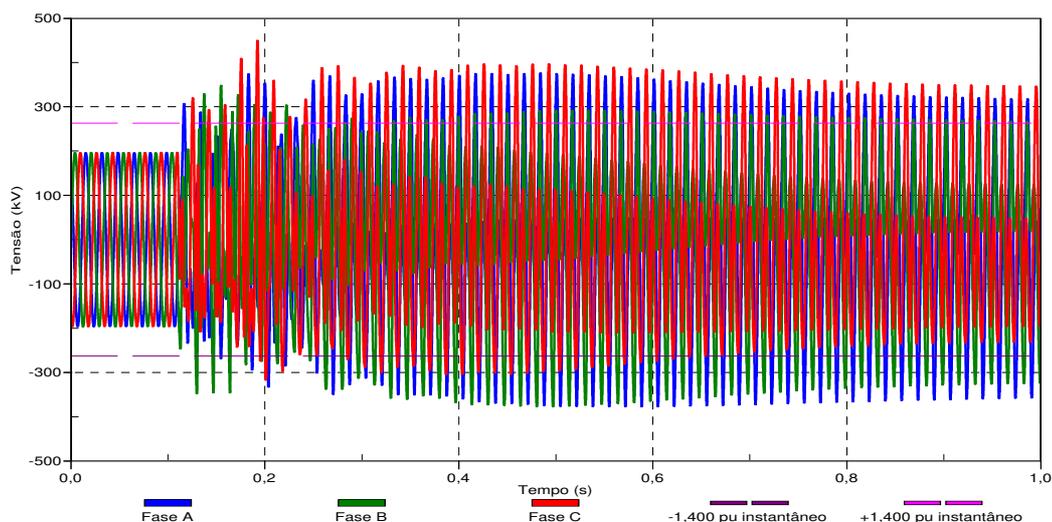


Figura 4.13 – Tensões no barramento 230 kV da SE Funil. Energização em vazio do primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1), da SE Funil. Energização prévia de 1 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230 kV, na SE Funil (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).

Da figura anterior, observam-se sobretensões severas que se sustentam e ultrapassam o valor de 1,400 pu por um tempo superior a 10 ciclos consecutivos da frequência fundamental.

A presença prévia de 1 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230 kV, energizado na SE Funil, resulta em uma amplificação das sobretensões, não sendo eficaz para possibilitar a recomposição fluente da SE Funil sem impor riscos aos equipamentos sob manobra. De fato, esta se mostra como sendo a configuração mais severa dentre as opções elencadas.

A corrente transitória quando da energização do transformador 04T1 da SE Funil, 230/138 kV, 100 MVA, verificada na fase B (maior amplitude no estudo estatístico, com 1 circuito 230 kV Funil – Itapebi em operação), que resultou nas sobretensões na SE 230 kV Funil, considerando a presença de 1 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230 kV, é apresentada na Figura 4.14.

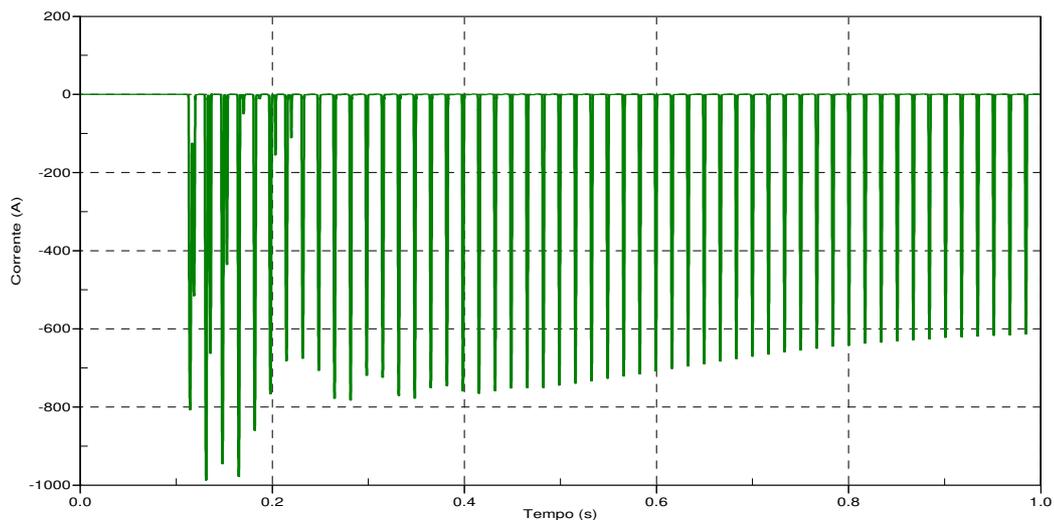
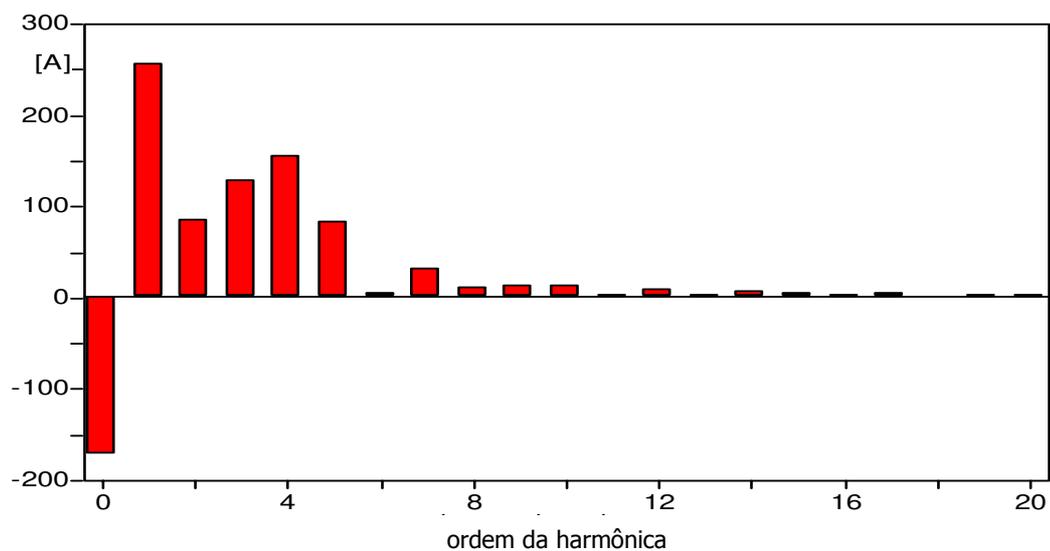
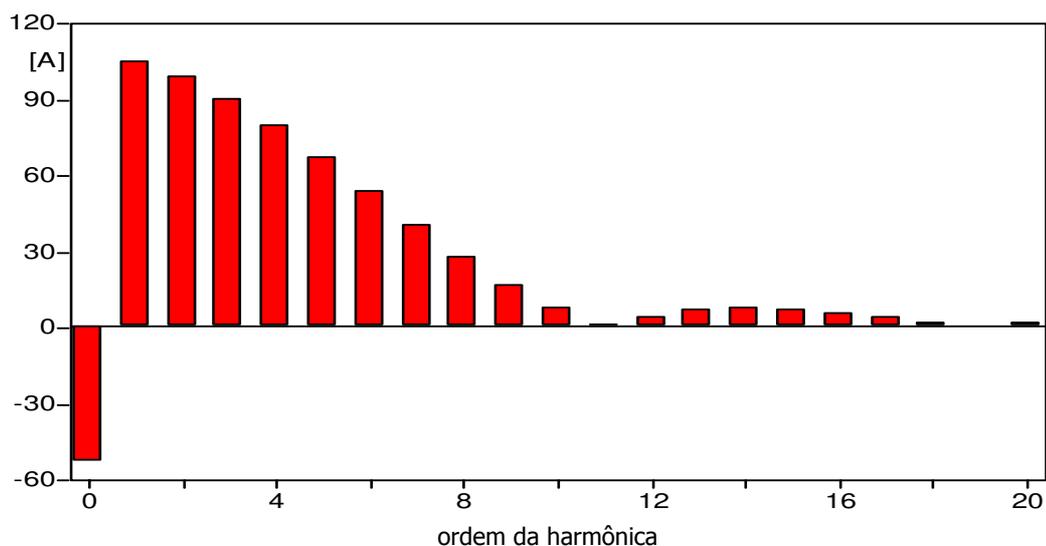


Figura 4.14 – Corrente da fase B no enrolamento de 230 kV do transformador 04T1 – Energização em vazio do primeiro transformador (230/138 kV, 100 MVA) da SE Funil – Energização prévia de 1 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230kV, na SE Funil.

No intuito de verificar quais as componentes de frequência presentes na corrente transitória (Figura 4.14) quando da energização do transformador 04T1 da SE Funil, 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, conforme apresentados na Figura 4.15.



(a) Primeiro ciclo (110,006 ms a 126,673 ms).



(b) Último ciclo (983,333 ms a 1.000 ms).

Figura 4.15 – Decomposição em série de Fourier da corrente da fase B no enrolamento de 230 kV do transformador 04T1 – Amplitude em “A” – Energização prévia de 1 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230 kV, na SE Funil.

A decomposição em série de Fourier da sobrecorrente transitória revela que a presença do banco de capacitores, ao alterar a resposta em frequência vista do barramento 230 kV da SE Funil (vide Figura 4.11), entra em ressonância com as componentes de frequência presentes nas sobrecorrentes transitórias, amplificando as sobretensões no barramento 230 kV desta subestação, que se mantêm sustentadas por todo o tempo de simulação (vide figura 4.13).

De acordo com os resultados apresentados, as alternativas indicadas para a recomposição fluente da SE Funil não se mostram efetivas. Diante desta impossibilidade, resta a energização simultânea linha (circuito 04F6) + transformador (04T1) da SE Funil 230 kV. Ressalta-se que esta energização simultânea desconfigura a fluência do processo de recomposição, pois, requer como preparação para a energização simultânea, o fechamento prévio do disjuntor do transformador 04T1 na SE Funil, mediante contato entre os operadores nas salas de controle dos Centros de Operação do Sistema (COS).

Conforme apresentadas na Figura 4.16, as solicitações transitórias quando da manobra de energização simultânea, em vazio e sob falta, da LT 230 kV Funil – Itapebi (04F6 ou 04F7), do reator 04E1 (ou 04E2), 230 kV, 20 Mvar e do transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1 ou 04T6) da SE Funil, se mostram numa condição próxima da limítrofe, ultrapassando o valor de 1,400 pu por um tempo igual a 8 ciclos consecutivos da frequência fundamental, não impondo riscos à integridade dos equipamentos destas instalações e das instalações vizinhas (ONS, 2007c). Ressalta-se que para o atendimento ao critério de suportabilidade dos equipamentos – especificamente dos transformadores – as solicitações transitórias não devem ultrapassar o valor de referência (1,400 pu) por um tempo superior a 10 ciclos consecutivos na frequência fundamental (60 Hz).

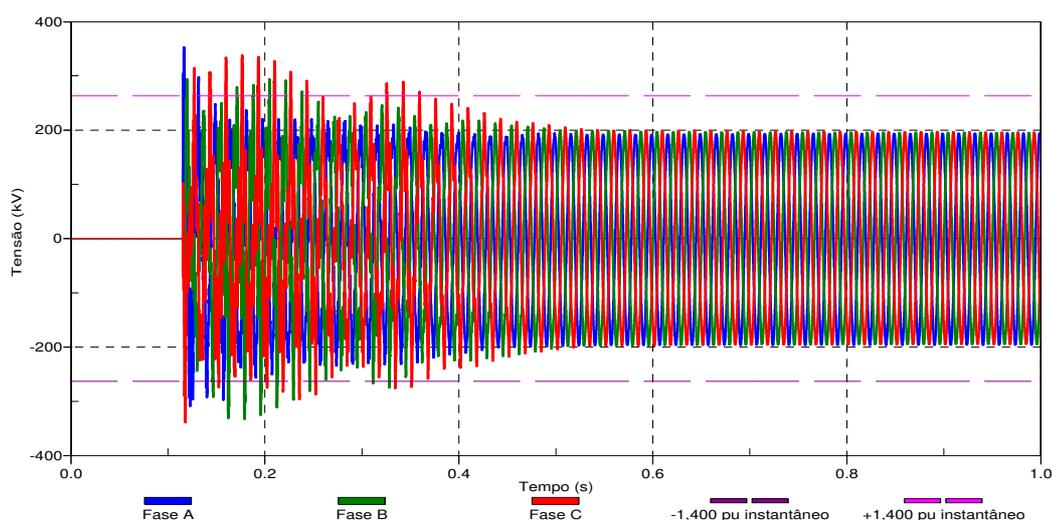


Figura 4.16 – Tensões no barramento 230 kV da SE Funil. Energização simultânea, em vazio, da LT 230 kV Funil – Itapebi (04F6), do reator 04E1, 230kV, 20 Mvar e do primeiro transformador 230/138 kV, 100 MVA (04T1), da SE Funil (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).

Desta etapa em diante, as simulações propostas, realizadas na sequência do processo de recomposição fluente (vide Tabela 4.7), não apresentaram nenhuma restrição e os procedimentos operativos para a recomposição "ilhada" das SEs 230 kV Eunápolis, Funil e do Consumidor Industrial Veracel, a partir da UHE Itapebi foram definidos (ONS, 2007c).

4.2.2 Recomposição das SEs 230 kV Teresina, Piripiri e Boa Esperança, a partir da SE Teresina II 500 kV

Tradicionalmente, a recomposição geral da Área Oeste 230 kV do Sistema Nordeste era iniciada unicamente a partir da SE Boa Esperança 230 kV, com a energização da LT 230 kV Boa Esperança – Teresina (04L1 ou 04L2) (ONS, 2007d).

O diagrama unifilar com a configuração do sistema em estudo é apresentado na Figura 4.17.

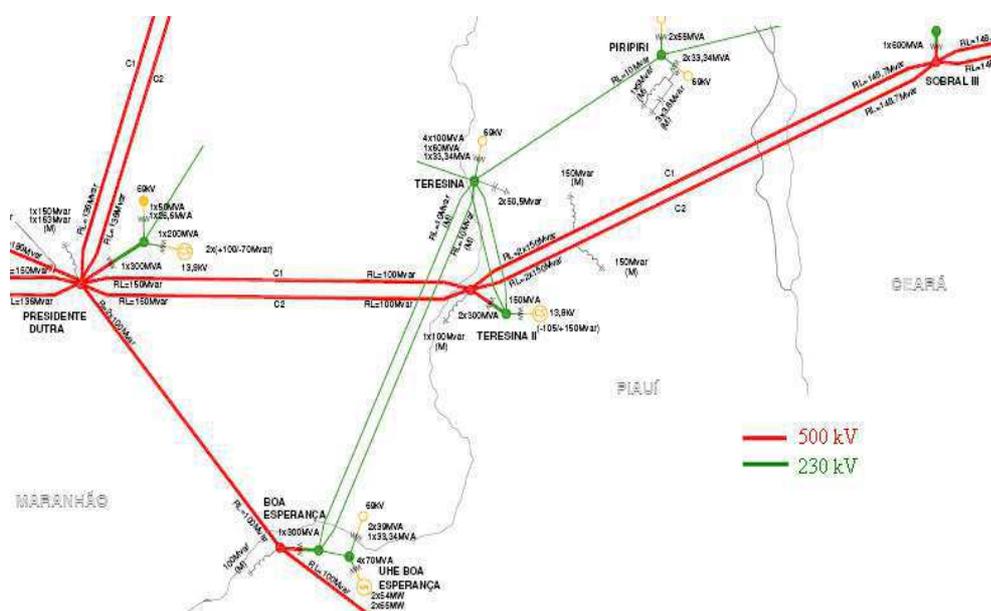


Figura 4.17 – Diagrama unifilar para o sistema em estudo – Recomposição das SEs 230 kV Teresina, Piripiri e Boa Esperança, a partir da SE 500 kV Teresina II – Área Oeste do Sistema Nordeste.

Na indisponibilidade do autotransformador 05T1 (500/230/13,8 kV, 300 MVA) da SE 500 kV Boa Esperança, o procedimento anteriormente descrito não é possível, uma vez que a SE 230 kV Boa Esperança permanece desenergizada (ONS, 2007d).

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.

Em um processo de recomposição geral, a SE 500 kV Teresina II pode estar suprida unicamente a partir da SE 500 kV Presidente Dutra ou pelo eixo 500 kV Fortaleza II – Sobral III – Teresina II. As análises foram realizadas considerando o sistema em uma topologia de recomposição coordenada da Interligação Norte/Nordeste a partir da SE 500 kV Presidente Dutra (ONS, 2007d).

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.

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, subestações de fronteira distantes duas barras da área em estudo, conforme recomendado no Submódulo 23.3 dos Procedimentos de Rede (ONS, 2007b). 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) (CEPEL, 1998).

Os principais dados do sistema em estudo, as premissas e critérios utilizados são apresentados nas Tabelas de 4.12 a 4.15.

Tabela 4.12 – Cargas consideradas no estudo – Carga mínima.

Subestação	Carga Mínima	
	MW	Mvar
Teresina 69 kV (CEMAR)	18,7	11,9
Teresina 69 kV (CEPISA)	89,6	48,5
Teresina 13,8 kV (04T1)	11,2	7,0
Teresina 13,8 kV (04T2)	7,5	4,6
Piripiri 138 kV	21,2	3,0
Piripiri 69 kV	7,4	2,3

Subestação	Carga Mínima	
	MW	Mvar
Piripiri 13,8 kV	3,7	3,1
Boa Esperança 69 kV	18,2	2,5
Boa Esperança 13,8 kV (04T6)	0,4	0,1

Tabela 4.13 – Modelos computacionais utilizados no estudo.

Modelo Computacional
<p>MODELAGEM DOS TRANSFORMADORES</p> <p>– Todos os transformadores considerados foram modelados no programa ATP fazendo-se uso do componente <i>SATURABLE TRANSFORMER</i>, segundo os dados fornecidos pelos agentes proprietários.</p> <p>– Os transformadores 04T1 (230/69/13,8 kV, 33,3 MVA), 04T2 (230/69/13,8 kV, 60,0 MVA) e 04T3 (230/69 kV, 100 MVA) da SE Teresina, possuem uma única disjunção, sendo assim as três unidades são sempre energizadas simultaneamente. De modo análogo, os transformadores 04T1 e 04T2 (230/69/13,8 kV, 33,3 MVA) da SE Piripiri, são manobrados simultaneamente através de um único disjuntor.</p>
<p>MODELAGEM DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO</p> <p>– 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 linhas a parâmetros constantes na frequência (em que a dependência da frequência dos parâmetros da linha é desprezada) (FERNANDES, 2001).</p>
<p>MODELAGEM DOS DEMAIS COMPONENTES DO SISTEMA EM ESTUDO</p> <p>– As cargas, listadas na Tabela 4.12, foram modeladas por circuitos RL ou RC série. Esta representação é adequada para a faixa de frequência do presente estudo (IEEE WORKING GROUP 15.08.09, 1998).</p>

Tabela 4.14 – Dados utilizados nos estudos estatísticos, fazendo uso do componente *STATISTIC SWITCH* do programa ATP – Dados utilizados nas chaves estatísticas.

Tipo de Chave	Tempo Médio de Fechamento (ms)	Faixa de Variação do Fechamento das Chaves (Graus)	Dispersão entre Polos (ms)	Desvio (ms)	Número de Energizações
Distribuição Gaussiana de Probabilidade	100,0	0 a 360	± 2,5	0,83333	200

Em todos os casos simulados utilizou-se um passo de tempo de 20,0 μ s, tendo como tempo máximo de simulação 1,0 s.

Segundo o teorema de amostragem (IEEE WORKING GROUP 15.08.09, 1998), um passo de tempo de 20,0 μ s, possibilita a representação de componentes de frequência de até 25,0 kHz (frequência de Nyquist, $f_N = 1/2\Delta t$).

Tabela 4.15 – Critérios adotados para a realização do estudo.

Critério do Estudo
<p>SUPPORTABILIDADE DOS EQUIPAMENTOS</p> <p>– Para durações inferiores a 10 ciclos consecutivos na frequência fundamental, o valor das sobretensões transitórias não devem ser superiores ao nível de isolamento dos equipamentos, com uma margem de segurança de 15%. Em um primeiro momento, na indisponibilidade da informação fornecida pelo fabricante/agente proprietário, adota-se como valor de referência 1,4 pu para transformadores e reatores de barramento. Caso este valor indicativo se mostre restritivo, dados específicos, fornecidos pelos agentes proprietários, devem ser utilizados.</p>
<p>SOBRETENSÕES NOS TERMINAIS EM ABERTO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO</p> <p>– A não superação do valor indicativo de 2,0 pu. Caso haja superação, dados específicos, fornecidos pelos agentes proprietários, devem ser utilizados.</p>

As condições de sistema adotadas nas simulações, bem como as etapas das simulações propostas (na sequência do processo de recomposição) são apresentadas nas Tabelas 4.16 e 4.17, respectivamente.

Tabela 4.16 – Condições de sistema adotadas nas simulações.

Item	Condição de Sistema
a)	Sistema em recomposição coordenada da Interligação Norte/Nordeste a partir da SE 500 kV Presidente Dutra.
b)	Autotransformador 05T1, 500/230/13,8 kV, 300 MVA, da SE 500 kV Boa Esperança, indisponível para operação.
c)	Condição de carga mínima nas regiões adjacentes. Patamar de 50% da carga mínima no consumidor industrial ALUMAR e no processo de tomada de carga nas subestações em recomposição.
d)	Tensões as mais elevadas possíveis em regime permanente nos barramentos 500 kV (limites: 1,100 pu ou 1,200 pu, conforme casos específicos) e 230 kV (Limites: 1,100 pu em vazio, e 1,050 pu quando em carga).
e)	Todos os reatores 500 kV e 230 kV disponíveis para operação.
f)	Nas manobras de transformadores com outras unidades energizadas em vazio, caso as solicitações transitórias se mostrem proibitivas, será investigado qual o patamar de carga necessário para a

Item	Condição de Sistema
	realização da manobra.

Tabela 4.17 – Simulações propostas na sequência do processo de recomposição.

Etapa	Simulação Proposta
1.	Estando um autotransformador (05T1 ou 05T2) 500/230/13,8 kV, 300 MVA, energizado em vazio, e o barramento 230 kV da SE Teresina energizado pelos <i>links</i> , a partir da SE 500 kV Teresina II, energizar simultaneamente (única disjunção), em vazio, os transformadores 04T1 (230/69/13,8 kV, 33,3 MVA) e 04T2 (230/69/13,8 kV, 60,0 MVA) da SE Teresina.
2.	Estando os transformadores 04T1 e 04T2 energizados em vazio, energizar em vazio o transformador 04T3 (230/69 kV, 100 MVA) da SE Teresina.
3.	Estando os transformadores 04T1, 04T2 e 04T3 energizados em vazio, energizar em vazio o transformador 04T4 (230/69 kV, 100 MVA) como quarta unidade da SE Teresina.
4.	Estando a SE 230 kV Teresina com 4 transformadores (04T1, 04T2, 04T3 e 04T4) energizados em vazio, energizar, em vazio, a LT 230 kV Teresina – Boa Esperança (04L1 ou 04L2), a partir de Teresina. a) Em vazio. b) Em vazio, sob falta no terminal da linha em Boa Esperança.
5.	Estando a SE 230 kV Teresina com 4 transformadores (04T1, 04T2, 04T3 e 04T4) energizados em vazio, energizar a LT 230 kV Teresina – Piripiri (04S1), a partir de Teresina. a) Em vazio. b) Em vazio, sob falta no terminal da linha em Piripiri.
6.	Estando o barramento 230 kV da SE Boa Esperança energizado, a partir da SE Teresina, energizar simultaneamente a LT 230 kV Boa Esperança - Usina Boa Esperança (04V1 – <i>link</i>) e o transformador 04T8 (230/69 kV, 39 MVA) da UHE Boa Esperança.
7.	Estando o barramento 230 kV da SE Piripiri energizado, a partir da SE Teresina, energizar simultaneamente (única disjunção) em vazio os transformadores 04T1 e 04T2 (230/69/13,8 kV, 33,3 MVA) da SE Piripiri.
8.	Estando os transformadores 04T1 e 04T2 energizados em vazio, energizar em vazio o transformador 04T4 (230/138/13,8kV, 55MVA) da SE Piripiri.
9.	Estando os transformadores 04T1 e 04T2 energizados em vazio, energizar em vazio o transformador 04T5 (230/138/13,8 kV, 55 MVA) da SE Piripiri.
10.	Estando a SE 230 kV Teresina com 4 transformadores (04T1, 04T2, 04T3 e 04T4) energizados em vazio, energizar em vazio o transformador 04T5 (230/69 kV, 100 MVA) como quinta unidade desta subestação.

Para cada etapa do processo de recomposição (Tabela 4.17) foram estabelecidas, primeiramente, as condições iniciais em regime permanente para só então partir para a realização dos estudos de transitórios eletromagnéticos.

Considerando o sistema em recomposição a partir da SE 500 kV Presidente Dutra (item (a) da Tabela 4.16) e o barramento 230 kV da SE Teresina energizado a partir da SE 500 kV Teresina II, foram realizados estudos estatísticos visando determinar as solicitações transitórias mais severas, quando da energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores 04T1 (230/69/13,8 kV, 33,3 MVA) e 04T2 (230/69/13,8 kV, 60,0 MVA) da SE Teresina. (etapa (1) da Tabela 4.17).

A Tabela 4.18 apresenta um resumo dos valores máximos, para as grandezas monitoradas, resultantes do estudo estatístico.

Tabela 4.18 – Resultados do estudo estatístico do programa ATP – Chaveamentos que resultaram nos valores máximos das grandezas monitoradas. Energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores 04T1 (230/69/13,8kV, 33,3MVA) e 04T2 (230/69/13,8kV, 60MVA) da SE Teresina.

Grandeza Monitorada	Valor Máximo (Valor de pico)	Fase / Energização
Tensões no barramento 500 kV da SE Presidente Dutra.	454,116 kV (1,112 pu)	Fase C Energização 44
Tensões no barramento 500 kV da SE Teresina II.	477,095 kV (1,169 pu)	Fase B Energização 35
Tensões no barramento 230 kV da SE Presidente Dutra.	202,050 kV (1,076 pu)	Fase A Energização 193
Tensões no barramento 230 kV da SE Teresina.	237,060 kV (1,262 pu)	Fase B Energização 14
Correntes de fase nos enrolamentos 500 kV do autotransformador AT7-01, 500/230/13,8 kV, 300 MVA, da SE Presidente Dutra.	194,438 A (0,397 pu) ($I_N = 489,898$ A)	Fase B Energização 63
Corrente de neutro no lado 500 kV do autotransformador AT7-01, 500/230/13,8 kV, 300 MVA, da SE Presidente Dutra.	26,847 A	Energização 47
Correntes de fase nos enrolamentos 500 kV do autotransformador 05T1, 500/230/13,8 kV, 300 MVA, da SE Teresina II.	643,886 A (1,314 pu) ($I_N = 489,898$ A)	Fase C Energização 43
Corrente de neutro no lado 500 kV do autotransformador 05T1, 500/230/13,8 kV, 300 MVA, da SE Teresina II.	56,528 A	Energização 112

Grandeza Monitorada	Valor Máximo (Valor de pico)	Fase / Energização
Correntes de fase nos enrolamentos 13,8 kV em delta fechado do autotransformador 05T1, 500/230/13,8 kV, 300 MVA, da SE Teresina II.	445,940 A (0,025 pu) ($I_N = 17,749$ kA)	Energização 43
Correntes de fase nos enrolamentos 230 kV do transformador 04T1, 230/69/13,8 kV, 33,3 MVA, da SE Teresina.	725,286 A (6,135 pu) ($I_N = 118,215$ A)	Fase C Energização 43
Corrente de neutro no lado 230 kV do transformador 04T1, 230/69/13,8 kV, 33,3 MVA, da SE Teresina.	100,481 A	Energização 43
Correntes de fase nos enrolamentos 230 kV do transformador 04T2, 230/13,8 kV, 60 MVA, da SE Teresina.	721,098 A (3,385 pu) ($I_N = 212,999$ A)	Fase C Energização 43
Corrente de neutro no lado 230 kV do transformador 04T2, 230/13,8 kV, 60 MVA, da SE Teresina.	320,371 A	Energização 43
Correntes de fase nos enrolamentos 230 kV do transformador TF6-03, 230/13,8/13,8 kV, 200 MVA (do CS), da SE Presidente Dutra.	224,540 A (0,316 pu) ($I_N = 709,996$ A)	Fase A Energização 38
Corrente de neutro no lado 230 kV do transformador TF6-03, 230/13,8/13,8 kV, 200 MVA (do CS), da SE Presidente Dutra.	56,837 A	Energização 47
Corrente de armadura nos enrolamentos 13,8 kV do compensador síncrono CS2-01, 13,8 kV, -70/+100 Mvar, da SE Presidente Dutra.	1.866,815 A (0,316 pu) ($I_N = 5.916,642$ A)	Fase B Energização 52

Tendo como base os tempos de fechamento, que resultaram nos valores máximos, foi simulada a manobra de energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores 04T1 e 04T2 da SE Teresina. As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam as situações transitórias mais severas, resultantes desta energização.

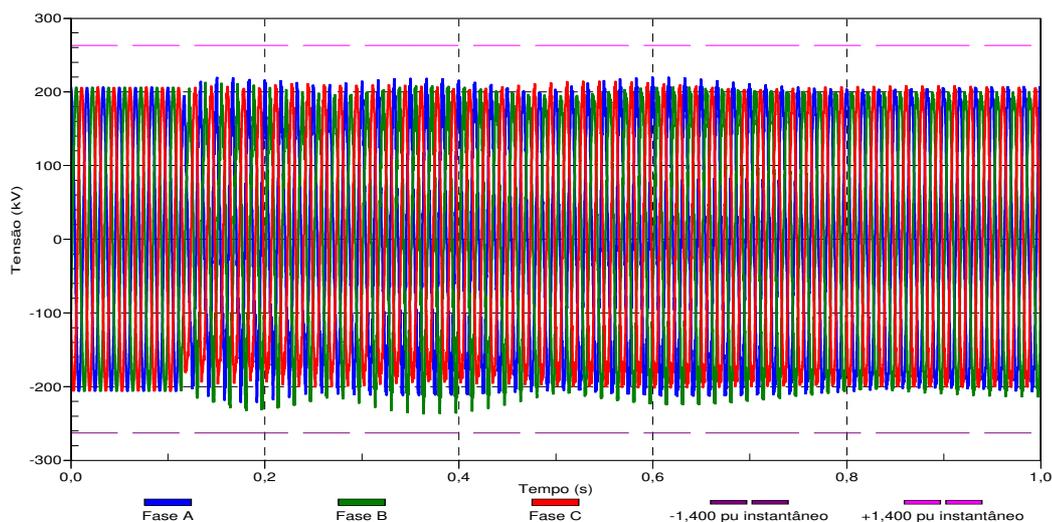


Figura 4.18 – Tensões no barramento 230 kV da SE Teresina. Energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores 04T1 (230/69/13,8 kV, 33,3 MVA) e 04T2 (230/13,8 kV, 60 MVA) da SE Teresina (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).

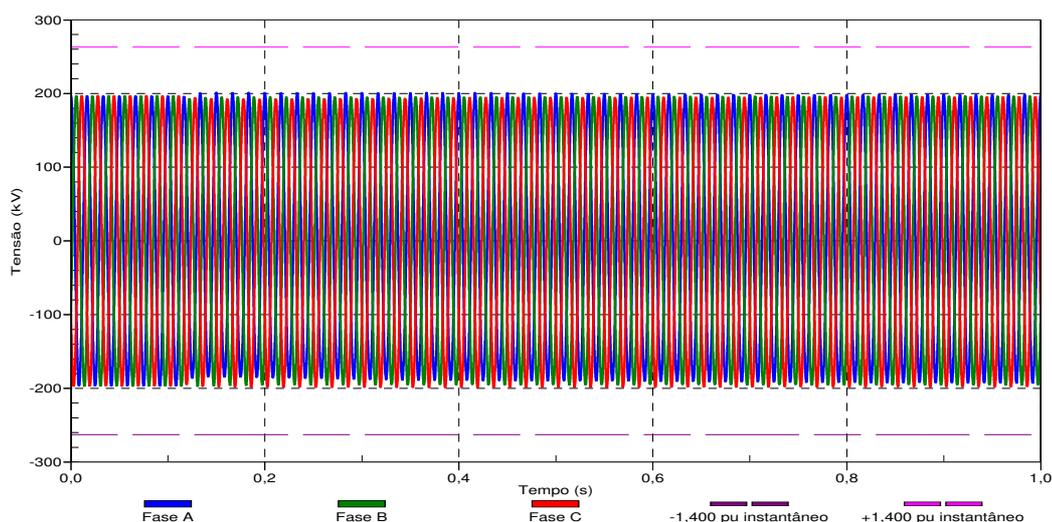


Figura 4.19 – Tensões no barramento 230 kV da SE Presidente Dutra. Energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores 04T1 (230/69/13,8 kV, 33,3 MVA) e 04T2 (230/13,8 kV, 60 MVA) da SE Teresina (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).

As sobretensões observadas nas anteriores não atingiram valores significativos em nenhum momento da simulação. Também não foram observadas sobretensões elevadas nos barramentos 500 kV das SEs Presidente Dutra e Teresina II (ONS, 2007d).

Outras grandezas monitoradas – correntes de fase e de neutro nos transformadores das SEs 500 kV e 230 kV Presidente Dutra e Teresina II – também apresentaram resultados satisfatórios (ONS, 2007d).

A partir desses resultados, concluiu-se que a manobra de energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores 04T1 (230/69/13,8kV, 33,3MVA) e 04T2 (230/13,8kV, 60MVA) da SE Teresina, não impõe riscos à integridade dos equipamentos desta instalação e circunvizinhanças.

As etapas de (2) a (6) da Tabela 4.17 foram realizadas de forma análoga. As simulações foram executadas na sequência do processo de recomposição. As solicitações transitórias observadas quando da realização das manobras também não impuseram riscos à integridade dos equipamentos das instalações circunvizinhas (ONS, 2007d).

Estando o sistema em recomposição coordenada a partir da SE 500 kV Presidente Dutra e o barramento 230 kV da SE Piripiri energizado a partir da SE Teresina, partiu-se para energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores 04T1 e 04T2 (230/69/13,8 kV, 33,3 MVA) da SE Piripiri. (etapa (7) da Tabela 4.17). Estudos estatísticos foram realizados visando determinar as solicitações transitórias mais severas, quando da energização em vazio dos referidos transformadores (ONS, 2007d).

A Tabela 4.19 apresenta um resumo dos valores máximos, para as grandezas monitoradas, resultantes do estudo estatístico.

Tabela 4.19 – Resultados do estudo estatístico do programa ATP – Chaveamentos que resultaram nos valores máximos das grandezas monitoradas. Energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores 04T1 e 04T2 (230/69/13,8kV, 33,3MVA) da SE Piripiri.

Grandeza Monitorada	Valor Máximo (Valor de pico)	Fase / Energização
Tensões no barramento 500 kV da SE Teresina II.	499,387 kV (1,223 pu)	Fase A Energização 59
Tensões no barramento 230 kV da SE Teresina.	244,132 kV (1,300 pu)	Fase A Energização 73
Tensões no barramento 230 kV da SE Piripiri.	315,727 kV (1,681 pu)	Fase C Energização 23
Tensões no barramento 230 kV da SE/Usina Boa Esperança.	316,134 kV (1,638 pu)	Fase A Energização 73

Grandeza Monitorada	Valor Máximo (Valor de pico)	Fase / Energização
Correntes de fase nos enrolamentos 500 kV do autotransformador 05T1, 500/230/13,8 kV, 300 MVA, da SE Teresina II.	331,610 A (0,677 pu) ($I_N = 489,898$ A)	Fase A Energização 175
Corrente de neutro no lado 500 kV do autotransformador 05T1, 500/230/13,8 kV, 300 MVA, da SE Teresina II.	4,407 A	Energização 147
Correntes de fase nos enrolamentos 230kV do transformador 04T3, 230/69 kV, 100 MVA, da SE Teresina.	14,997 A (0,004 pu) ($I_N = 354,998$ A)	Fase A Energização 175
Corrente de neutro no lado 230 kV do transformador 04T3, 230/69 kV, 100 MVA, da SE Teresina.	6,962 A	Energização 179
Correntes de fase nos enrolamentos 230 kV do transformador 04T1, 230/69/13,8 kV, 33,3 MVA, da SE Piripiri.	416,639 A (4,984 pu) ($I_N = 83,590$ A)	Fase A Energização 175
Corrente de neutro no lado 230 kV do transformador 04T1, 230/69/13,8 kV, 33,3 MVA, da SE Piripiri.	10,282 A	Energização 196
Correntes de fase nos enrolamentos 230 kV do transformador 04T2, 230/69/13,8 kV, 33,3 MVA, da SE Piripiri.	390,114 A (4,667 pu) ($I_N = 83,590$ A)	Fase A Energização 175
Corrente de neutro no lado 230kV do transformador 04T2, 230/69/13,8kV, 33,3MVA, da SE Piripiri	20,724 A	Energização 175
Correntes de fase nos enrolamentos 230kV do transformador 04T8, 230/69kV, 39MVA, da SE/Usina Boa Esperança.	10,516 A (0,008 pu) ($I_N = 138,449$ A)	Fase B Energização 175
Corrente de neutro no lado 230kV do transformador 04T8, 230/69kV, 39MVA, da SE/Usina Boa Esperança	6,792 A	Energização 175

Tendo como base os tempos de fechamento, que resultaram nos valores máximos, foi simulada a manobra de energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores 04T1 e 04T2 da SE Piripiri. As Figuras 4.20 e 4.21 apresentam as situações transitórias mais severas, resultantes desta energização.

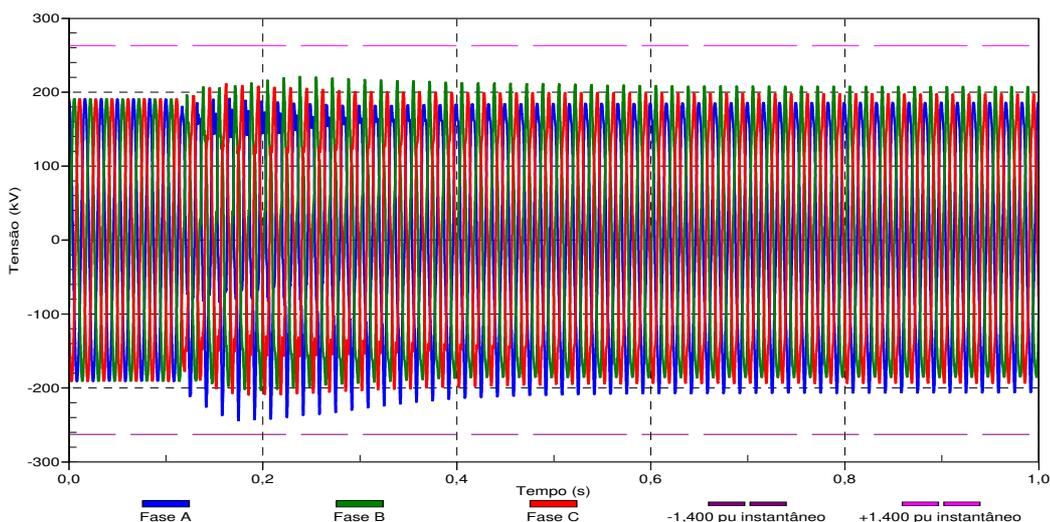


Figura 4.20 – Tensões no barramento 230 kV da SE Teresina. Energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores 04T1 e 04T2 (230/69/13,8 kV, 33,3 MVA) da SE Piripiri (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).

As sobretensões observadas no barramento 230 kV da SE Teresina (Figura 4.20), não ultrapassaram o valor de referência (1,400 pu) em um tempo superior a 10 ciclos consecutivos da frequência fundamental.

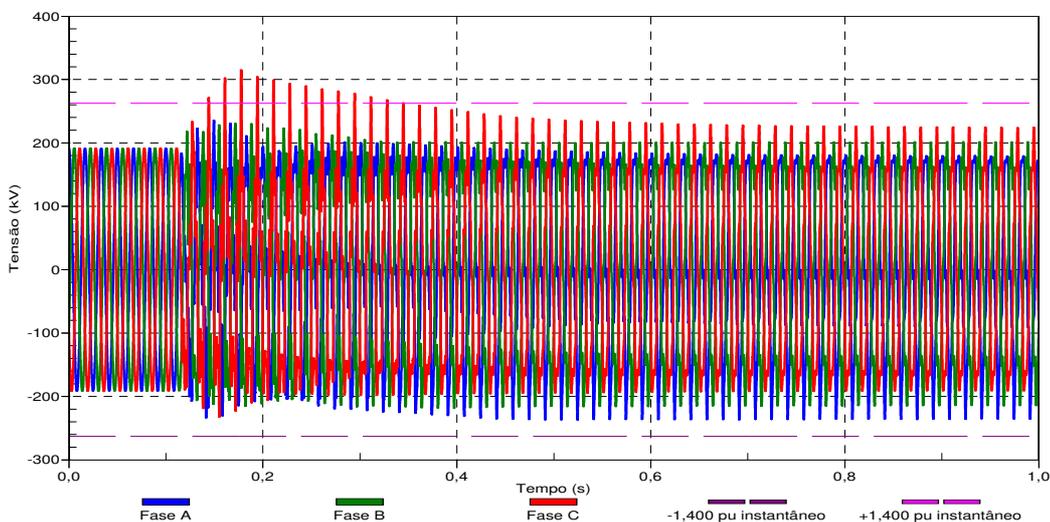


Figura 4.21 – Tensões no barramento 230 kV da SE Piripiri. Energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores 04T1 e 04T2 (230/69/13,8 kV, 33,3 MVA) da SE Piripiri (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).

Diferentemente do verificado na SE Teresina, as sobretensões instantâneas verificadas no barramento 230 kV das SE Piripiri (Figura 4.21) ultrapassaram o valor de

referência de 1,400 pu, por um tempo um pouco superior a 10 ciclos consecutivos da frequência fundamental.

Diante das sobretensões verificadas na SE 230 kV Piripiri, concluiu-se que a manobra de energização simultânea, em vazio, dos transformadores 04T1 e 04T2, 230/69/13,8 kV, 33,3 MVA, da SE Piripiri se mostrou restritiva, quando se tem a SE Teresina e a UHE Boa Esperança energizadas em vazio, interrompendo a fluência do processo de recomposição.

Visando a continuidade fluente do processo de recomposição foram estabelecidas 2 (duas) configurações alternativas (consideradas viáveis ou factíveis), conforme apresentadas na Tabela 4.20. Fazendo uso destas, espera-se eliminar a condição ressonante que resultou na amplificação das sobretensões na SE Piripiri (vide Figura 4.21), quando da manobra de energização simultânea dos transformadores 04T1 e 04T2 desta subestação (ONS, 2007d).

Tabela 4.20 – Configurações alternativas propostas para recomposição fluente da SE 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 1 (um) banco de capacitores 230 kV, 50,5 Mvar (04H1 ou 04H2), energizado e em operação. |
-

4.2.2.1 Análise de Varredura em Frequência das Configurações Alternativas

Com o objetivo de identificar quais das configurações alternativas propostas (vide Tabela 4.20) são efetivas de forma a possibilitar o processo fluente de recomposição da SE Piripiri, estando a Área Oeste do Nordeste em recomposição coordenada a partir da SE 500 kV Presidente Dutra, são realizadas análises de varredura em frequência.

A análise de varredura em frequência é utilizada aqui com o intuito de comparar as configurações alternativas factíveis e determinar quais são candidatas a efetivas ao alterar a resposta em frequência do sistema, vista do barramento 230 kV da SE Piripiri.

Para tanto, utiliza-se a rotina *FREQUENCY SCAN* do programa ATP (LEUVEN EMTP CENTER, 1987). Na análise em questão, realizam-se varreduras na faixa de frequência de 10,0 Hz a 3,0 kHz, espectro suficiente para analisar os fenômenos decorrentes da energização de transformadores e linhas de transmissão. No presente estudo consideram-se os parâmetros desses equipamentos calculados na frequência 60 Hz, portanto admitir valores mais elevados no espectro de frequência, sobretudo superiores a 1,0 kHz, pode-se incorrer em erros significativos. 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 (sequências zero e positiva, amplitude 1,0 A), cuja frequência será variada pela rotina *FREQUENCY SCAN*, no espectro desejado.

4.2.2.2 Energização prévia da SE Teresina com carga, com e sem um banco de capacitores 50,5 Mvar no barramento 230 kV, energizado e em operação

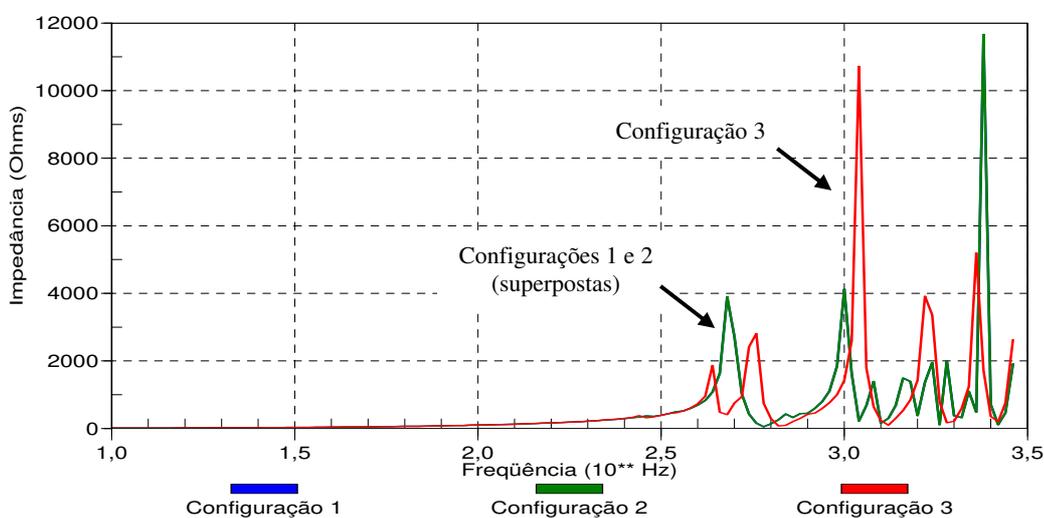
Com a topologia da rede em recomposição, estando o barramento 230 kV da SE Piripiri energizado a partir da SE Teresina por 1 circuito 230 kV (04S1), são analisadas as 3 (três) configurações distintas listadas a seguir:

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

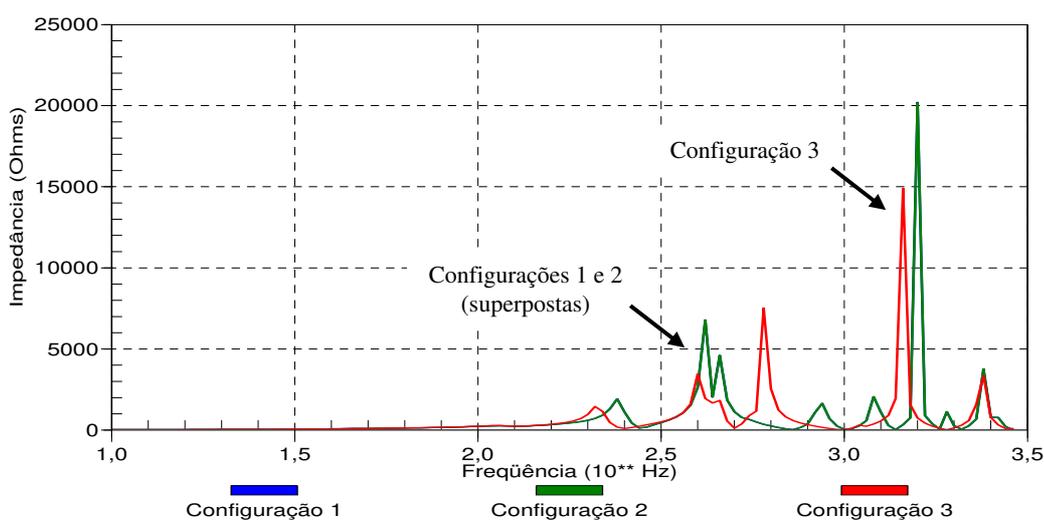
Configuração 2: Barramento 230 kV da SE Piripiri e a UHE Boa Esperança energizados em vazio e a SE Teresina energizada **com carga** (50% da carga mínima).

Configuração 3: Barramento 230 kV da SE Piriipiri e a UHE Boa Esperança energizados em vazio e a SE Teresina energizada com carga (50% da carga mínima), tendo **1 (um) banco de capacitores 230 kV, 50,5 Mvar** (04H1 ou 04H2), energizado e em operação.

Apresentam-se na Figura 4.22, os resultados obtidos para o comportamento da impedância do sistema com a frequência (sequências zero e positiva), quando da injeção da fonte de corrente no barramento 230 kV da SE Piriipiri. Comparam-se as respostas em frequência para a impedância ($Z(j\omega)$) nas 3 (três) configurações analisadas.



(a) Sequência zero.



(b) Sequência positiva.

Figura 4.22 – Respostas em frequência (amplitude da impedância) vistas do barramento 230 kV da SE Piriipiri – Comparação entre as configurações em análise.

Dos resultados apresentados na Figura 4.22, observam-se diferenças significativas na resposta em frequência (impedâncias de sequência zero e positiva) quanto à topologia do sistema.

Em relação à Configuração 1 (proibitiva), a presença de 1 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 a frequência de 208,9 Hz e de 420 Hz (sétima harmônica) para a frequência de 398,1 Hz, respectivamente, ambos para a impedância de sequência 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.

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

Pelas alterações na resposta em frequência (impedâncias de sequência zero e positiva), apenas a alternativa (2) da Tabela 4.20 se mostra candidata efetiva para a continuidade do processo fluente de recomposição da SE Piripiri.

Caso a corrente transitória decorrente da energização simultânea (única disjunção), no domínio do tempo, dos transformadores 04T1 e 04T2 da SE Piripiri apresente componentes de frequência nos distintos pontos de ressonância, apresentados nas amplitudes das impedâncias (vide Figura 4.22), as sobretensões (e sobrecorrentes) podem ser significativamente distintas nas três configurações analisadas. Caso contrário, se as componentes de frequência não excitarem os pontos de ressonância, as diferenças podem ser desprezíveis.

De posse dos resultados da análise de varredura em frequência, faz-se uma análise no domínio do tempo visando validar as afirmações feitas com base na análise de frequência.

Para tanto, simula-se, no domínio do tempo, 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 na Figura 4.23, as sobretensões transitórias verificadas na SE Piripiri, quando da manobra.

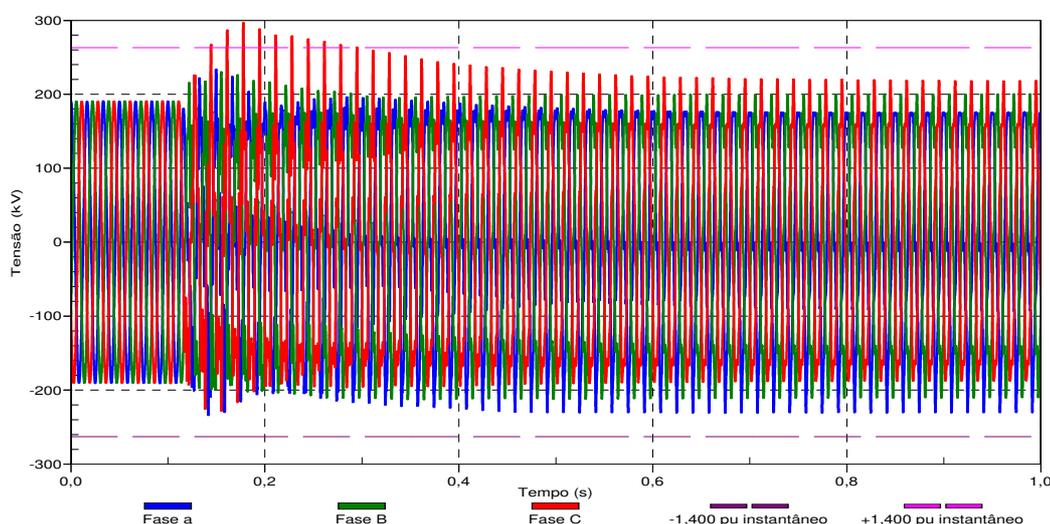


Figura 4.23 – Tensões no barramento 230 kV da SE Piripiri. Energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores 04T1 e 04T2 (230/69/13,8 kV, 33,3 MVA) da SE Piripiri. SE Teresina energizada com 50% da carga mínima (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).

Mais uma vez, observam-se sobretensões severas e pouco amortecidas (Figura 4.23), que ultrapassam o valor de 1,400 pu por um tempo igual a 10 ciclos consecutivos da frequência fundamental (condição limítrofe).

De fato, conforme inferências feitas a partir da análise 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 **1 (um) banco de capacitores 230 kV, 50,5 Mvar** (04H1 ou 04H2), energizado e em operação.

Apresentam-se na Figura 4.24, as sobretensões transitórias verificadas na SE Piripiri, quando da manobra.

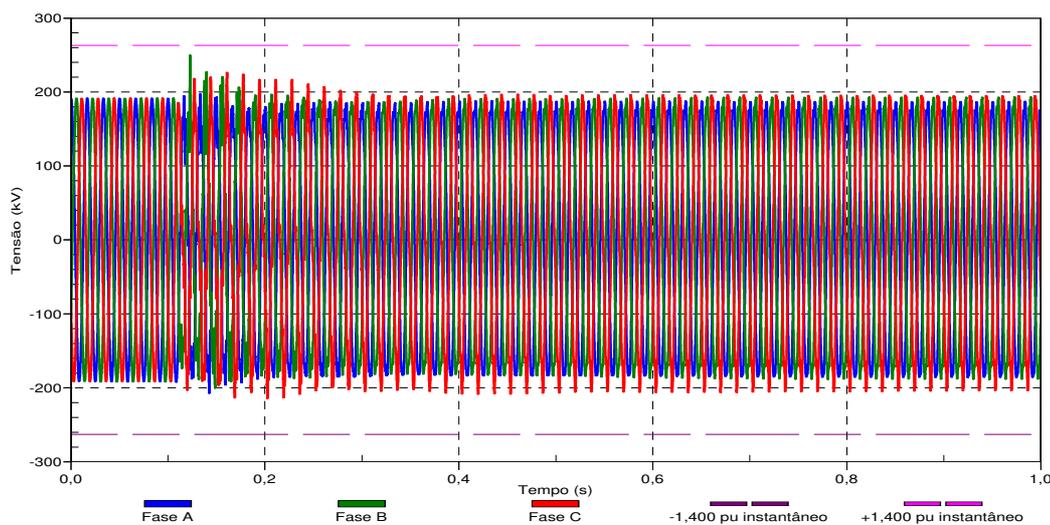


Figura 4.24 – Tensões no barramento 230 kV da SE Piripiri. Energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores 04T1 e 04T2 (230/69/13,8 kV, 33,3 MVA) da SE Piripiri. Energização prévia de 1 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230 kV, na SE Piripiri (Referências: $\pm 1,400$ pu, valor instantâneo).

Observam-se na Figura 4.24, que as sobretensões instantâneas na SE Piripiri 230 kV 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 1 (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 (vide Figura 4.22), eliminando 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 (Figura 4.24).

No intuito de identificar quais as componentes de frequência presentes na corrente transitória 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 1 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230 kV, 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.

A corrente transitória verificada na fase C dos transformadores 04T1 e 04T2 (única disjunção) da SE Piripiri e os resultados da decomposição em série de Fourier, são apresentados nas Figuras 4.25 e 4.26.

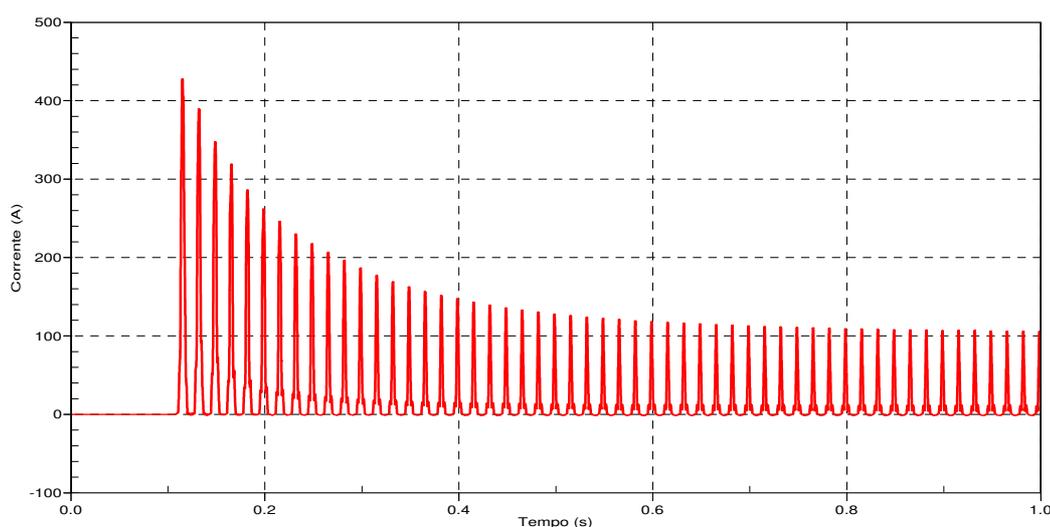
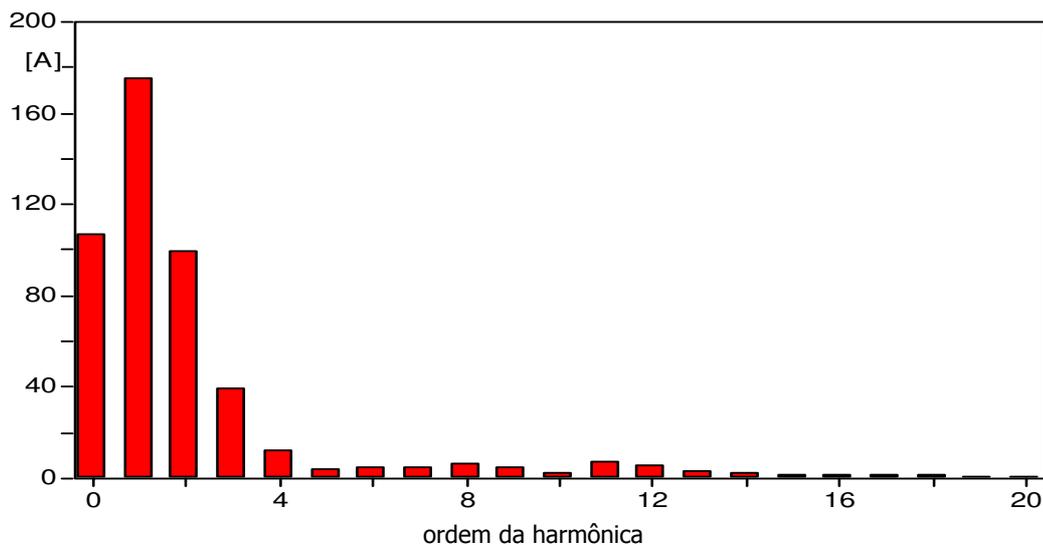
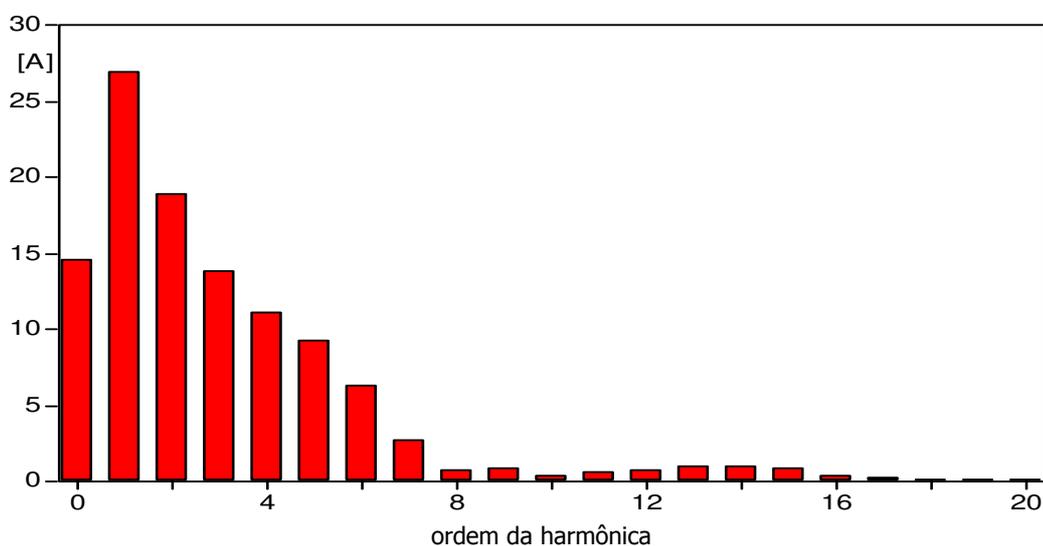


Figura 4.25 – Corrente da fase C no enrolamento de 230 kV dos transformadores 04T1 e 04T2. Energização simultânea (única disjunção), em vazio, dos transformadores (230/69/13,8 kV, 33,3 MVA) da SE Piripiri. Energização prévia de 1 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230 kV, na SE Piripiri.

A decomposição em série de Fourier (vide Figura 4.26) da sobrecorrente transitória revela 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 (vide Figura 4.22), 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 Figura 4.24).



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



(b) Último ciclo (983,333 ms a 1.000 ms).

Figura 4.26 – Decomposição em série de Fourier da corrente da fase C no enrolamento de 230 kV dos transformadores 04T1 e 04T2 – Amplitude em “A” – Energização prévia de 1 banco de capacitores, 50,5 Mvar, 230 kV, na SE Teresina (50% de carga mínima).

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 são desprezíveis (vide Figura 4.22).

De acordo com os resultados apresentados, apenas a alternativa 2 da Tabela 4.20 se mostra efetiva para a recomposição fluente da SE Piripiri. 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 1 (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 das instalações circunvizinhas.

Desta etapa em diante, as simulações propostas, realizadas na sequência do processo de recomposição fluente (vide Tabela 4.17), não apresentaram nenhuma restrição e os procedimentos operativos para a recomposição das SEs 230 kV Teresina, Piripiri e Boa Esperança, a partir da SE Teresina II 500 kV foram definidos (ONS, 2007d).

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

No presente trabalho, as análises realizadas a partir da avaliação do comportamento da impedância do sistema com a frequência, $Z(j\omega)$, permitiram qualificar as alternativas factíveis através de análises comparativas, sem a necessidade de ajustes em regime permanente, simulações estatísticas e determinísticas. 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 atenuar as ressonâncias.

A análise de varredura em frequência foi aplicada a dois casos reais do SIN, auxiliando no processo de tomada de decisão, atuando como estratégias para realização de estudos de transitórios eletromagnéticos, especificamente, estudos de recomposição de sistemas elétricos de potência.

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 aplicada.

Em ambos os casos, a realização dos estudos de transitórios eletromagnéticos, com o auxílio desta metodologia complementar, sofreu uma considerável redução no tempo de execução e análise. Ao permitir avaliar de forma mais ágil, objetiva e segura as diversas configurações contempladas na análise, promoveu-se a otimização dos estudos de transitórios eletromagnéticos, minimizando a subjetividade do analista que, por sua vez, se traduz em

segurança operativa. Uma desvantagem desta técnica é a dificuldade em se representar as não linearidades do sistema, a exemplo da saturação dos transformadores. No entanto, a limitação da ferramenta *FREQUENCY SCAN* do programa ATP foi contornada por simulações no domínio do tempo, validando as análises também quando estas não foram possíveis de serem realizadas no domínio da frequência.

As estratégias utilizadas na realização dos dois estudos de recomposição contribuíram para a definição dos procedimentos operativos que foram adotados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Com a apresentação deste trabalho, culminando com a aplicação da técnica em dois casos reais do SIN, espera-se ter contribuído para o estabelecimento de diretrizes e critérios para a utilização de análises de varredura em frequência como estratégia aplicada a estudos de recomposição de sistemas elétricos de potência.

Como continuação desta pesquisa são sugeridas algumas proposições para trabalhos futuros, como o estabelecimento de diretrizes e critérios para a utilização de análises de varredura em frequência para:

- **Análise de diferentes topologias operativas:** Via de regra, faz-se necessário regular o nível de tensão em regime permanente de modo a limitar a tensão operativa imposta aos equipamentos e instalações, preservando integridade, segurança e confiabilidade na operação do SIN. Em determinadas condições operativas, sobretudo quando se tem circuitos energizados com baixo carregamento (muito freqüente nas interligações em 500 kV nos cenários de baixo intercâmbio), uma vez esgotados os recursos disponíveis para controle de tensão, utiliza-se o desligamento de linhas de transmissão com baixo carregamento como última opção. Nestes casos, tem-se uma configuração de rede incompleta (indesejável, porém necessária) para a qual se deve extrapolar os

procedimentos operativos, obtidos via estudos de transitórios eletromagnéticos, quando do sistema em condição normal de operação. Nesta extrapolação, a varredura em frequência pode ser aplicada estendendo as conclusões de um estudo para uma outra configuração em que se tem a indisponibilidade de circuitos, reduzindo substancialmente o volume de trabalho.

- **Estudos de configuração mínima de reatores:** Sobretensões decorrentes de rejeições da carga podem impor um número mínimo de reatores em operação, de forma a limitar tais solicitações sobre equipamentos e instalações. A varredura em frequência se mostra como uma ferramenta útil na definição de uma configuração mínima de reatores, por possibilitar a comparação de várias composições distintas.
- **Análise de rede para alocação de equivalentes:** A alocação de equivalentes pode impactar os resultados dos estudos de transitórios eletromagnéticos, a ponto de alterar significativamente as solicitações observadas. Neste caso pode se usar a varredura em frequência visando quantificar as diferenças na impedância quando se deslocam os equivalentes no sentido de se afastar do ponto de interesse nos estudos. Assim, é possível determinar a partir de quais barras a alocação dos equivalentes não alteram a resposta em frequência vista do ponto de interesse.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRAWAL B. L.; FARMER R. G. *Use of Frequency Scanning Techniques for Subsynchronous Resonance Analysis*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, VOL. PAS-98, No. 2, March/April, 1979.
- ARAÚJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. *Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia*, Belo Horizonte, MG – Brasil, Editora UFMG, 2005.
- CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA – CEPEL ANAFAS – *Análise de Faltas Simultâneas*, v3.0, Rio de Janeiro, Brasil, 1998.
- CHANG, G. W.; RIBEIRO, P. F. *Harmonics Theory*, IEEE PES Special Publication of "Tutorial on Harmonics Modeling and Simulation", 98TP125-0, 1998.
- DOMMEL, H. W. *Electromagnetic Transients Program Reference Manual: EMTP Theory Book*, Portland, BPA: [s.n.], 1996.
- 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.
- FERNANDES, A. B; ARAÚJO, A. L.; SILVA, R. M. *Agilidade na Execução de Estudos de Recomposição Fluente de Subestações via Análises no Domínio da Frequência*, XII ERIAC – Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 20 a 24 de Maio de 2007.
- FERNANDES, A. B; SILVA, R. M. *Análises no Domínio da Frequência no Auxílio à Reavaliação de Restrições Operativas*, XII ERIAC – Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 20 a 24 de Maio de 2007.

- FERNANDES, A. B.; SAMUEL NETO, A. *Análises no Domínio da Frequência Visando Quantificar o Impacto do Desligamento de Circuitos para Controle de Tensão*, XII CBQEE – Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Santos, SP, Brasil, 05 a 08 de Agosto de 2007.
- FERNANDES, A. B.; SAMUEL NETO, A.; FRANÇA, F. A. X. *Análise Qualitativa das Alternativas Factíveis de Recomposição via Domínio da Frequência*. VIII CBQEE – Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Blumenau, SC, Brasil, 02 a 05 de Agosto de 2009.
- IEEE WORKING GROUP 15.08.09 *Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Programs*, Piscataway: IEEE PES Special Publication, 1998.
- JIANG, X.; GOLE, A. M. *A Frequency Scanning Method for the Identification of Harmonic Instabilities in HVDC Systems*, IEEE Transactions on Power Delivery, VOL. 10, No. 4, October, 1995.
- KIZILCAY, M. *Utilizing the Frequency Scan Feature of ATP-EMTP*, European EMTP Meeting, DTU, Lyngby, April 18-20, 1994.
- LEUVEN EMTP CENTER *ATP - Alternative Transients Program*, Rule Book, Herverlee, Belgium, 1987.
- LIMA, A. C. S.; FERNANDES, A. B.; CARNEIRO Jr., S. *Rational Approximation of Frequency Domain Responses in the S and Z Planes*, Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting 2005, San Francisco, USA, Page (s): 2219 – 2224, June 12-16, 2005.
- MARTINEZ-VELASCO J. A. *Computer Analysis of Electrical Power System Transients: Selected Readings*, Piscataway: IEEE Press, 1997.

- MORENO, P.; DE LA ROSA, R.; NAREDO, J. L. *Frequency Domain Computation of Transmission Line Closing Transients*, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No.1, pp.275-281, January, 1991.
- NAGAOKA, N.; AMETANI, A. *A Development of a Generalized Frequency Domain Transient Program - FTP*, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-3, No.4, pp.1996-2004, October, 1988.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS *Procedimentos de Rede – Módulo 18 - Submódulo 18.2: Modelos Computacionais*, Rio de Janeiro, Brasil, 2007a.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS *Procedimentos de Rede – Módulo 23 - Submódulo 23.3: Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos*, Rio de Janeiro, Brasil, 2007b.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS *Estudo de Transitórios Eletromagnéticos: Recomposição "ilhada" das SE 230kV Eunápolis, Funil e do Consumidor Industrial Veracel, a partir da UHE Itapebi*, RE 3/048/2007, 2007c.
- 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, 2007d.
- OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY A. S.; NAWAB S. H. *Signals and Systems – Second Edition*, New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1992.
- SAMPAIO R.; CATALDO E.; BRANDÃO A. S. *Análise e Processamento de Sinais*, Rio de Janeiro : SBMAC, 2006.

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.

TASK FORCE ON HARMONICS MODELING AND SIMULATION *Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks Part I: Concepts, Models and Simulation Techniques*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.11, No.1, January, 1996a.

TASK FORCE ON HARMONICS MODELING AND SIMULATION *Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks Part II: Sample Systems and Examples*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.11, No.1, January, 1996b.

ZANETTA JÚNIOR, L. C. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*, 1. ed. [S.l.]: EDUSP, 2003.