

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

Dissertação de Mestrado

Aprimoramento do Processo de Recomposição de um Sistema de
Distribuição de 69 kV

Alessandro Viana Fontes

Campina Grande, Paraíba – Brasil

Maio de 2015

Alessandro Viana Fontes

Aprimoramento do Processo de Recomposição de um Sistema de
Distribuição 69 kV

Dissertação 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 de Energia

Washington Luiz Araújo Neves

Orientador

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Maio de 2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

F682a Fontes, Alessandro Viana.
Aprimoramento do processo de um sistema de distribuição 69 kV
/ Alessandro Viana Fontes. – Campina Grande, 2015.
95 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2015.

"Orientação: Prof. Dr. Washington Luiz Araújo Neves".
Referências.

1. Manobra de Recomposição. 2. Análise no domínio da Frequência. 3. Sistema de Distribuição 69kV. 4. Sobretensão de Manobra. I. Neves, Washington Luiz Araújo. II. Título.

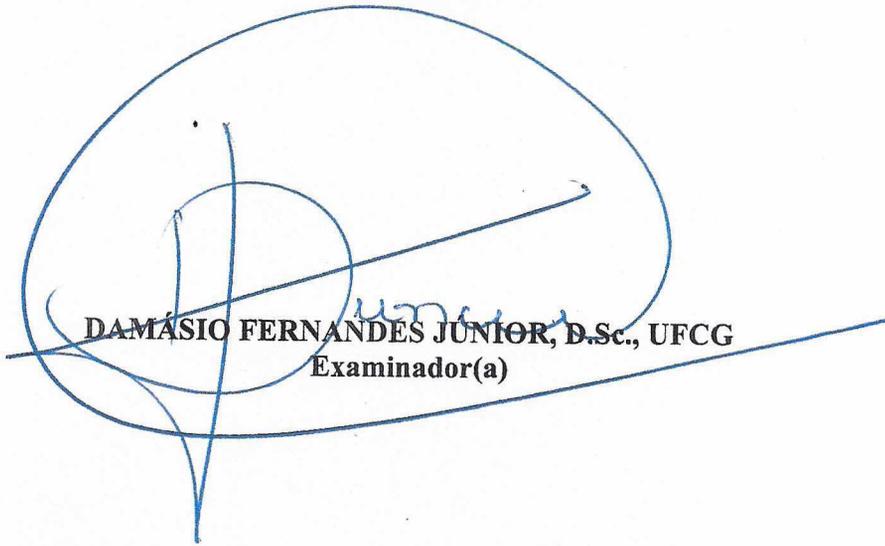
CDU 621.315(043)

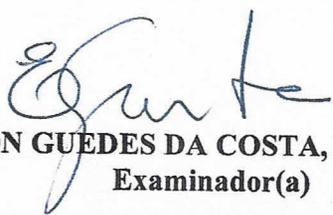
**"APRIMORAMENTO DO PROCESSO DE RECOMPOSIÇÃO DE UM SISTEMA DE
DISTRIBUIÇÃO DE 69KV"**

ALESSANDRO VIANA FONTES

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 13/05/2015


WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Orientador(a)


DAMÁSIO FERNANDES JUNIOR, D.Sc., UFCG
Examinador(a)


EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

*Dedico aos meus pais
Urquiza e Gleuse*

Agradecimentos

A Deus.

Ao professor Washington Neves pela compreensão, amizade e valiosas orientações e conhecimentos transmitidos desde a graduação.

À professora Núbia Brito pelos ensinamentos e por me iniciar na pesquisa durante a graduação, contribuição imensurável a minha formação.

Ao professor Benemar Alencar por aulas brilhantes, ensinamentos e por facilitar a logística para minha participação no programa.

Aos professores Damásio Fernandes e Edson Guedes pelos ensinamentos, disponibilidade, contribuições e análise crítica ao trabalho.

A Energisa Paraíba em especial ao Eng. Ricardo Soares pela oportunidade e disponibilidade para participação neste programa de pós-graduação. Aos Eng. Tércius, Rusangela e Danielly pelo apoio, contribuições e incentivo. E equipe da pré-operação, do tempo real -COS e da pós-operação pelo incentivo, entusiasmo e ensinamento práticos de operação do sistema de distribuição como, Petrônio, Jim, Salomão, Ronaldo Urquiza, João, Heldy, José Ronaldo, Chateaubriand, Sérgio, Edigle, Edesio, Alisson, Da Luz, Laelson entre outros.

Ao Dr. Alécio especialista do ONS pelas contribuições e por disponibilizar informações do sistema de transmissão.

Aos funcionários da COPELE, Ângela, Suênia e Pedro.

A minha esposa Jaqueline pela paciência e apoio em todos os momentos difíceis que atravessei no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus irmãos Anderson e Álvaro, meu primo Dennis, meus cunhados Rafael, Adegildes, Marina e Kátia, a todos meus familiares pelo apoio e incentivo.

Meus colegas e amigos Kárcius, Tarso, George, Welinsilvio, Felipe, Diana, Marcos, Robson, entre os vários outros não citados pelas mais diversas contribuições.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe e aos meus colegas professores Roberto, André e Fernando que me deram apoio para que fosse possível a conclusão deste trabalho.

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xiii
Glossário	xiv
Resumo	xv
Abstract.....	xvi
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	5
1.2 Objetivo.....	5
1.3 Contribuições	5
1.4 Estrutura do Trabalho.....	6
Capítulo 2	7
Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica	7
2.1 Ferramentas Computacionais para Transitórios Eletromagnéticos.....	7
2.2 Sobretensões.....	8
2.3 Representação de Cargas para Simulações Digitais.....	10
2.4 Estudo Estatístico	12
2.5 Análise no Domínio da Frequência.....	15
2.5.1 Resposta na Frequência.....	16
2.6 Resumo de Trabalhos Correlacionados ao Tema em Estudo	22
Capítulo 3	23
Metodologia Aplicada	23
3.1 Uso da Ferramenta <i>Frequency Scan</i> do ATP	24
3.2 Uso do Componente <i>Statistic Switch</i> do ATP	29
3.3 Critérios Utilizados para Avaliação das Sobretensões	31
3.4 Variáveis Observadas Durante Simulações.....	32
3.5 Construção de Base de Dados para Simulação em Massa usando Matlab e ATP... 33	
Capítulo 4	37
4 Aplicação e Resultado.....	37
4.1 Sistema Elétrico Estudado.....	37
4.2 Carga Esperada Após Desligamento	40
4.3 Primeiro Conjunto de Simulações – Circuito CMA - MLT	43

4.3.1	Avaliando o Efeito da Variação do percentual de Carga a ser Energizada	43
4.4	Segundo Conjunto de Simulações – Circuito CMA – SGL	48
4.5	Terceiro Conjunto de Simulações – Circuito CMA – PBL.....	52
4.6	Comparações Entre Resposta em Frequência Entre Barramento de Circuitos Diferentes	54
4.7	Determinando as Condições Mais Severas no Domínio do Tempo e Avaliação Usando critério de Amplitude e Amortecimento da Sobretensão	55
4.7.1	Barramento SE URN - Circuito CMA-SGL.....	55
4.7.2	Barramento SE TXR - Circuito CMA-MLT	62
4.7.3	Barramento SE SBT - Circuito CMA-PBL.....	66
4.8	Manobras Alternativas à Energização pela Operação de um Único Disjuntor	69
4.8.1	Desconexão dos bancos de capacitores	69
4.8.2	Manobra Alternativa – Energização Parcial do Sistema	73
Capítulo 5	87
5	Conclusões	87
6	Referências Bibliográficas	89
Anexo I	94
Anexo II	95

Lista de Figuras

Figura 1 – Diagrama do subsistema Coremas – São Gonçalo do regional Coremas.....	2
Figura 2 - Resposta em frequência para cargas RL série e RL paralelo.	12
Figura 3 – Diagrama representando sistema fictício em vazio.	12
Figura 4 – Sobretensão observada de acordo como ângulo de incidência 90° em (a) e 0° em (b).	13
Figura 5 – Funções de distribuição de probabilidade (a) uniforme e (b) normal (Nunes, 2006).	14
Figura 6 – Distribuição normal padrão.	15
Figura 7 – Circuito com um ramo RLC série.....	16
Figura 8 – Admitância em função da frequência para circuito com um ramo RLC série.	17
Figura 9 – Circuito com dois ramos RLC série.....	17
Figura 10 - Admitância em função da frequência para circuito como dois ramos RLC série.....	18
Figura 11 – Fluxograma da metodologia aplicada.	24
Figura 12 – Injeção de corrente de sequência positiva e sequência zero de frequência variável.	25
Figura 13 - Injeção de corrente variável com a frequência considerando sistema completo (chaves do lado fonte e do lado da carga fechadas) e considerando apenas o sistema de distribuição a jusante ao local injeção de corrente (chaves do lado fonte abertas).....	26
Figura 14 – Desconexão de bancos de capacitores, (a) varredura em frequência lado fonte conectado (b) varredura em frequência lado fonte desconectado.	27
Figura 15 – Comparação entre varredura em frequência lado da fonte conectado (fechado) e lado da fonte desconectado (aberto).	28
Figura 16 – Fluxograma de automatização do processo de construção da base de conhecimento.....	35
Figura 17 – Fluxograma de execução da rotina de construção da base de dados.	36
Figura 18 – Parte do sistema de transmissão 230 kV e 500 kV do regional norte do subsistema nordeste do SIN.....	38
Figura 19 - Diagrama do Regional Coremas da Energisa Paraíba.....	39
Figura 20 – Curvas de carga do fluxo de potência no disjuntor 12Y2 da SE SGL.....	41
Figura 21 - Curva de carga em MW da potência que passa pelo disjuntor 12Y2 da SE SGL em horário de carga média.	42
Figura 22 – Circuito 69 kV CMA-MLT do Regional Coremas.....	43
Figura 23 – (a) Resposta em frequência (10 Hz a 4 kHz) vista do barramento 69 kV da SE MLT com injeção de corrente de sequência positiva no barramento 69 kV da SE MLT com o sistema à montante desconectado (disjuntores 12J3 e 12J4 da SE MLT abertos) sistema no patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados. (b) Detalhe do frequência de ressonância de	

	1.292Hz. (c) Detalhe do frequência de ressonância da frequência de 3.047Hz.....	44
Figura 24 –	Resposta em frequência (10 Hz a 4 kHz) vista do barramento 69 kV da SE MLT com injeção de corrente de sequência zero no barramento 69 kV da SE MLT com o sistema à montante desconectado (disjuntores 12J3 e 12J4 da SE MLT abertos) sistema no patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados.....	45
Figura 25 –	Variação da amplitude da impedância para frequência de ressonância de 1290 Hz em função do carregamento em relação à carga nominal. Injeção de corrente de sequência positiva no barramento 69 kV da SE MTL.....	46
Figura 26 –	Resposta em frequência (10 Hz a 6 kHz) pela injeção de corrente de sequência positiva (a) e zero (b), nos barramento 69 kV da SE MLT, PTS, JTB e TXR com o sistema à montante conectado. Carregamento de 10 % do nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados.....	47
Figura 27 –	Resposta em frequência (10 Hz a 6 kHz) pela injeção de corrente de sequência positiva, nos barramento 13,8 kV da SE MLT, PTS, JTB e TXR com o sistema à montante conectado. Carregamento de 10 % do nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados.	48
Figura 29 –	(a) Resposta em frequência (10 Hz a 4 kHz) vista do barramento 69 kV da SE SGL com injeção de corrente de sequência positiva no barramento 69 kV da SE SGL com o sistema à montante desconectado (disjuntores 12J8 e 12J9 da SE SGL abertos) sistema no patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados. (b) Detalhe da frequência de ressonância da frequência de 1.395Hz.....	50
Figura 30 –	Resposta em frequência (10 Hz a 6kHz) pela injeção de corrente de sequência positiva (a) e zero (b), nos barramentos 69 kV da SE SGL, CJZ, SPX, URN e SZA com o sistema à montante conectado. Carregamento de 10% do nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados.....	51
Figura 32-	Resposta em frequência (10 Hz a 4 kHz) vista do barramento 69 kV da SE PBL como injeção de corrente de sequência positiva no barramento 69 kV da SE PBL com o sistema à montante desconectado (disjuntores 12J1 e 12J2 da SE PBL abertos) sistema no patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados.....	53
Figura 33 –	Resposta em frequência (10 Hz a 6kHz) pela injeção de corrente de sequência positiva (a) e zero (b), nos barramentos 69 kV da SE PBL, JRC, CTR, BJC, PLT e SBT com o sistema à montante conectado(sistema completo). Carregamento remanescente nestas subestações de 10% do nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados.....	54
Figura 34 -	Resposta em frequência (10 Hz a 6kHz) pela injeção de corrente de sequência positiva (a) e zero (b), nos barramento 69 kV da SE SBT, TXR e URN com o sistema à montante conectado. Carregamento de 10% do nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados	55

Figura 35 - Distribuição de probabilidade no barramento 13,8 kV SE URN 10% do carregamento nominal.	57
Figura 36 - Distribuição de probabilidade no barramento 13,8 kV SE URN 50% do carregamento nominal.	57
Figura 37- Tensão no barramento 13,8 kV da SE URN com o fechamento do disjuntor 12J8 da SE SGL energizando o sistema com (a) 10% da carga nominal e (b) 50% para o patamar de carga leve. Energização número 41 (a) e 46 (b) do estudo estatístico, sobretensão de maior amplitude no barramento 13,8 kV da SE URN.	59
Figura 38 - Tensão no barramento 69 kV da SE URN com o fechamento do disjuntor 12J8 da SE SGL energizando sistema com (a) 10% da carga nominal e (b) 50% para o patamar de carga leve. Energização número 49 (a) e 87 (b) do estudo estatístico, sobretensão de maior amplitude no barramento 13,8 kV da SE URN.	60
Figura 39 – Corrente da energização da SE URN como 10% da carga nominal no patamar de carga leve, energização nº 49 e sua decomposição harmônica. no intervalo de tempo [0,032 a 0,05ms] correspondente aos 4 primeiros ciclos da fundamental.....	61
Figura 40 – Tensão no barramento 13,8 kV da SE TXR com o fechamento do disjuntor 12J3 da SE MLT energizando 10% da carga nominal para o patamar de carga leve. Energização número 51 do estudo estatístico, sobretensão de maior amplitude no barramento 13,8 kV da SE TXR	63
Figura 41 – Tensão no barramento 13,8 kV da SE TXR com o fechamento do disjuntor 12J3 da SE MLT energizando 50% da carga nominal para o patamar de carga leve. Energização número 51 do estudo estatístico, sobretensão de maior amplitude no barramento 13,8 kV da SE TXR	64
Figura 42 – Tensão no barramento 69 kV da SE TXR com o fechamento do disjuntor 12J3 da SE MLT energizando 10% da carga nominal para o patamar de carga leve com bancos de capacitores conectados. Energização número 58 do estudo estatístico, sobretensão de maior amplitude no barramento 69 kV da SE TXR.....	64
Figura 43- Corrente no disjuntor 12J3 da SE MLT energizando 10% da carga nominal para o patamar de carga leve. Energização número 51 do estudo estatístico, mais severo de sobretensão no barramento 13,8 kV da SE TXR.....	65
Figura 44- Decomposição harmônica do sinal de corrente da fase A no disjuntor 12J3 da SE MLT durante a energização das SEs MLT, PTS, JTB e TXR como 10% da carga nominal no patamar de carga leve no intervalo de tempo [0,03; 0,1] correspondente aos 4 primeiros ciclos.	65
Figura 45 - Tensão no barramento 13,8 kV da SE CTR com o fechamento do disjuntor 12J2 da SE PBL energizando 10% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores desconectados	67
Figura 46 - Tensão no barramento 13,8 kV da SE CTR com o fechamento do disjuntor 12J2 da SE PBL energizando 30% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores desconectados	68

Figura 47 - Tensão no barramento 13,8 kV da SE CTR com o fechamento do disjuntor 12J2 da SE PBL energizando 50% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores desconectados.	68
Figura 48 - Tensão no barramento 69 kV da SE SBT com o fechamento do disjuntor 12J2 da SE PBL energizando 10% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores desconectados	68
Figura 49 – Comparação da resposta em frequência (10 Hz a 4 kHz) vista do barramento 69 kV da SE MLT com injeção de corrente de sequência positiva barramento 69 kV da SE MLT com o sistema à montante desconectado (disjuntores 12J3 e 12J4 da SE MLT abertos) sistema no patamar de carga leve e bancos de capacitores conectado e desconectados.	69
Figura 50 – Comparação da resposta em frequência (10 Hz a 4 kHz) vista do barramento 69 kV da SE PBL com injeção de corrente de sequência positiva barramento 69 kV da SE PBL com o sistema à montante desconectado (disjuntores 12J1 e 12J2 da SE PBL abertos) sistema no patamar de carga leve e bancos de capacitores conectado e desconectados.....	70
Figura 51 – Comparação da resposta em frequência (10 Hz a 4 kHz) vista do barramento 69 kV da SE SGL com injeção de corrente de sequência positiva barramento 69 kV da SE SGL com o sistema à montante desconectado (disjuntores 12J9 e 12J8 da SE SGL abertos) sistema no patamar de carga leve e bancos de capacitores conectado e desconectados.....	70
Figura 52 – Tensão no barramento 13,8 kV da SE TXR com o fechamento do disjuntor 12J3 da SE MLT energizando 10% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores desconectados	71
Figura 53 – Tensão no barramento 69 kV da SE TXR com o fechamento do disjuntor 12J3 da SE MLT energizando 10% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores desconectados	71
Figura 54 – Tensão no barramento 13kV da SE TXR com o fechamento do disjuntor 12J3 da SE MLT energizando 50% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores desconectados	72
Figura 55 – Tensão no barramento 69 kV da SE TXR com o fechamento do disjuntor 12J3 da SE MLT energizando 50% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores desconectados	72
Figura 56 – Comparação da resposta em frequência vista do barramento 69 kV da SE TXR considerando sistema até SE MLT (12J4 e 12J3 MLT abertos) e sistema até SE JTB (12N3 PTS aberto). Injeção de corrente de sequência positiva (a) e zero(b) barramento 69 kV da SE TXR.	74
Figura 57 - Tensão no barramento 13,8kV da SE TXR na energização das SEs JTB e TXR por meio do fechamento do disjuntor 12N3 da SE PTS energizando 10% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados.....	76
Figura 58 - Tensão no barramento 13,8kV da SE TXR na energização das SEs JTB e TXR por meio do fechamento do disjuntor 12N3 da SE PTS energizando	

	50% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados.....	76
Figura 59 –	Tensão no barramento 13,8kV da SE PTS na energização das SEs MLT e PTS por meio do fechamento do disjuntor 12J3 da SE MLT energizando 10% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados. Disjuntores 12J5 da SE MLT e 12N3 da PTS abertos.....	77
Figura 60 -	Tensão no barramento 13,8kV da SE MLT na energização das SEs JTB e TXR por meio do fechamento do disjuntor 12N3 da SE PTS energizando 10% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados.....	77
Figura 61 –	Comparação da resposta em frequência vista do barramento 69 kV da SE URN considerando sistema completo (12J8 e 12J9 SGL abertos) e sistema até SE CJZ (12Y2 SGL aberto). Injeção de corrente de sequência positiva (a) e zero(b) barramento 69 kV da SE URN.....	79
Figura 62 -	Tensão no barramento 13,8 kV da SE URN com o fechamento do disjuntor 12M1 da SE CJZ. Circuito com bancos de capacitores conectados.	81
Figura 63 –	Comparação da resposta em frequência vista do barramento 69 kV da SE BJC considerando sistema completo (12J1 e 12J3 PBL abertos) e sistema até SE CTR (12N2 JRC aberto). Injeção de corrente de sequência positiva (a) e zero(b) barramento 69 kV da SE BJC.	83
Figura 64 -	Tensão no barramento 13,8kV da SE BJC na energização das SEs CTR e BJC por meio do fechamento do disjuntor 12N2 da SE JRC . Bancos de capacitores conectados.....	85
Figura 65 –	Tensão em regime permanente no barramento 69kV da SE CMA.	95
Figura 66 –	Tensão em regime permanente no barramento de 13,8 kV da SE TXR...	95

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Fases do carregamento do sistema após um desligamento.....	10
Tabela 2 – Modelos típicos de representação de cargas (IEEE, 2003).....	11
Tabela 3 – Comparação entre métodos e estratégia de recomposição.	22
Tabela 4 – Variação da sobretensão com o tempo de dispersão entre pólos.....	30
Tabela 5 – Variáveis de simulação da chave estatística.	31
Tabela 6 – Sobretensões de manobra admissíveis adotadas pelo ONS.....	31
Tabela 7 – Nível de isolamento para os equipamentos especificados por fabricantes. Valores em pu tendo como base a tensão nominal de operação do sistema. .	32
Tabela 8 – Critério de suportabilidade para sobretensão de manobra adotado.	32
Tabela 9 – Variáveis de simulação.	33
Tabela 10 – Forma de onda e faixa de frequência de eventos. (CIGRÉ,1990)	40
Tabela 11 – Resultado do estudo para o subsistema da CMA-SGL.....	56
Tabela 12 – Resultado do estudo estatístico Energização a partir do disjuntor 12J3 da SE MLT energizando as SE MTL, PTS, JTB e TXR. Sistema no patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados.	62
Tabela 13 - Resultado do estudo estatístico danergização a partir do disjuntor 12J2 da SE PBL energizando as SEPBL, JRC, CTR, BJC, PLT e SBT. Sistema no patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados.	66
Tabela 14 – Resultado simulação estatística da energização do circuito CMA-MLT em duas operações de disjunção.	75
Tabela 15 - Resultado simulação estatística da energização do circuito CMA-MLT em duas operações de disjunção.	80
Tabela 16 – Resultado simulação estatística da energização do circuito CMA-PBL em três operações de disjunção.....	84
Tabela 17 - Carregamento e potência instalada de bancos de capacitores no regional Coremas	94

Glossário

ATP - *Alternative Transiente Program*

ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica

EMTP - *Electromagnetic Transients Program.*

MATLAB - *Matrix Laboratory.*

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PRODIST – Procedimentos de Distribuição

SE - Subestação

SIN - Sistema Interligado Nacional

$Z(j\omega)$ – Impedância variável com a frequência

Resumo

Os sistemas de distribuição de energia elétrica estão sujeitos a eventos intempestivos que podem levar à interrupção do fornecimento de energia. Num sistema de distribuição em alta tensão com característica predominantemente radial e sem opções de transferência de carga, um desligamento intempestivo pode atingir uma região de grandes proporções em relação à área de concessão. Isolado ou sanado o defeito provocador do desligamento, inicia-se o processo de recomposição do sistema, que consiste na execução de manobras para energização de linhas de distribuição, subestações e cargas, que pode demandar dezenas de operações em religadores, chaves e disjuntores, demandando um tempo considerável para normalização do sistema de distribuição de 69 kV. O objetivo desse trabalho é fazer a análise da energização de um circuito de tensão de 69 kV mostrando que é possível com a operação de apenas um único equipamento de disjunção fazer a energização do sistema com risco aceitável de violação dos limites de suportabilidade dos equipamentos. Assim reduzindo sensivelmente o número de operações e o tempo de manobra para recomposição. Para isso é apresentada uma metodologia de estudo de transitórios eletromagnéticos através de simulações digitais via ATP (*Alternative Transiente Program*), utilizando técnicas e ferramentas de análise de resposta em frequência, estudo estatístico de chaveamento de disjuntores e estudo determinístico no domínio do tempo. Identificando situações de maior severidade quanto à sobretensões em função do barramento observado, do carregamento e da presença de bancos de capacitores. Assim evidenciando que mesmos nas situações de maior severidade quanto a sobretensões, é factível de execução da manobra de energização do sistema com a operação de um único equipamento de disjunção, reduzindo sensivelmente o tempo necessário para o restabelecimento do sistema de distribuição de 69 kV.

Palavras Chaves: Manobra de recomposição, análise no domínio da frequência, sistema de distribuição 69 kV, sobretensão de manobra.

Abstract

The distribution power systems are subject to untimely events that can lead to disruption of power supply. The distribution power system for high voltage with characteristic predominantly radial and without charge transfer options, an untimely shutdown can reach a region of great proportions in relation to the concession area. Isolated or repaired the defect which triggered off the shutdown begins the process of rebuilding the system, consisting of the maneuverings for power-distribution lines, substations and loads, which may require dozens of operations in reclosers, switches and circuit breakers, demanding considerable time to normalization of the 69 kV distribution power system. The aim of this study is to analyze the effects of the energization within a large area of an electric power system through only one 69 kV high voltage circuit breaker unit, without violating withstand limits of the system equipments. Thus significantly reducing the system recovering time. For this purpose we present an electromagnetic transient study methodology through digital simulations via ATP (Alternative Transient Program), using techniques and analysis tools in frequency domain tools, statistical switching study of circuit breakers and deterministic study in the time domain. Identifying situations of greater severity as the surge to reflect the observed bar loading and the presence of capacitor banks. Thus showing that in these situations of greater severity as the surge, it is feasible for the implementation of power-handling system with the operation of a single equipment disjunction, significantly reducing the time required for the restoration of the 69 kV distribution system.

Keywords: Restoration, switching overvoltage, 69 kV distribution system, analysis in frequency domain.

Introdução

Os sistemas de distribuição de energia elétrica estão sujeitos a eventos intempestivos que podem levar à interrupção do fornecimento de energia, a exemplo das descargas atmosféricas em linha de distribuição. Num sistema de distribuição em alta tensão com característica predominantemente radial e sem opções de transferência de carga, um desligamento intempestivo pode atingir uma região de grandes proporções em relação à área de concessão. Isolado ou sanado o defeito provocador do desligamento, inicia-se o processo de recomposição do sistema, que consiste na execução de manobras para energização de linhas de distribuição, subestações e cargas. Onde não há muita opção de reconfiguração do sistema ou transferências de cargas, a normalização dar-se-á pelo caminho original de suprimento das cargas.

Para um sistema de distribuição em alta tensão, os defeitos (fatos geradores de desligamentos), em mais de 70% dos casos, são temporários e a normalização ocorre sem a necessidade de intervenções de equipes de manutenção ou até mesmo do operador, caso haja atuação do religamento automático. Dentre as falhas temporárias, os desligamentos gerados por descargas atmosféricas ou por queimadas sob as linhas de distribuição, é possível restabelecer o sistema em quase 90% dos casos, imediatamente.

A depender da condução do processo de recomposição do sistema elétrico, variações de tensão transitórias podem surgir e provocar a interrupção do fornecimento da energia aos consumidores com equipamentos sensíveis a estas variações, como também podem causar, danos a equipamentos do sistema elétrico de potência por superação da capacidade de isolamento.

Capítulo 1: Introdução

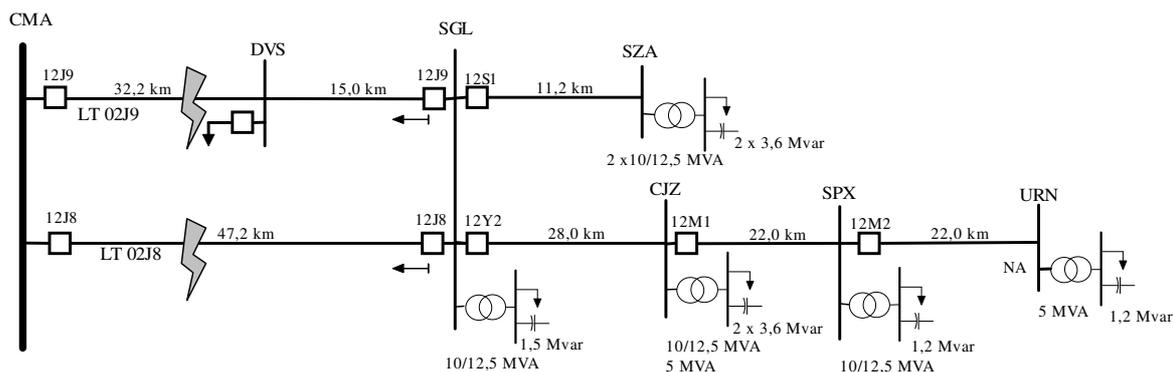


Figura 1 – Diagrama do subsistema Coremas – São Gonçalo do regional Coremas.

Para manobras em que a falha é temporária, torna-se útil a proposta deste trabalho. Considere-se o circuito ilustrado na Figura 1 e que ocorra uma falha temporária, por exemplo, a perda do isolamento auto-recuperante das linhas em circuito duplo 02J8 CMA/SGL e 02J9 CMA/SGL, provocada por uma descarga atmosférica, então com a devida atuação das proteções, tem-se a abertura dos disjuntores 12J8 e 12J9 da SE CMA e 12J8 e 12J9 da SE SGL. Considerando-se que:

- i. os disjuntores 12J8 e 12J9 da SE CMA, tem em seus ajustes de proteção a função religamento automático ativada e que se tenha cumprido o ciclo de religamento com sucesso,
- ii. e que os disjuntores 12J8 e 12J9 da SE SGL não têm religamento automático, ficando as linhas CMA/SGL energizadas em vazio e as subestações SGL, SZA, CJZ, SPX e URN desenergizadas.

A interpretação desse cenário pelo operador será vista da seguinte forma:

- i. Religamento automático com sucesso dos disjuntores 12J8 e 12J9 da subestação CMA indicando que o defeito foi temporário;
- ii. Atuação dos disjuntores 12J8 e 12J9 da SE SGL indica que o defeito não está no barramento da SE SGL, visto que esses possuem proteção exclusiva para as linhas.

Com isso conclui-se que as cargas podem ser normalizadas.

Com a conclusão da análise operacional, o operador do centro de operação do sistema (COS) executa uma manobra que visa salvaguardar equipamento e as cargas dos consumidores, a qual consiste na energização das subestações sem cargas (em vazio), energizando linhas, transformadores e bancos capacitores. Em seguida com subestações energizadas e serviços auxiliares disponíveis, os bancos de capacitores são desligados, e

Capítulo 1: Introdução

então as cargas são energizadas gradativamente com fechamento dos religadores dos alimentadores de média tensão.

Para execução desta manobra vários comandos são executados pelo operador do sistema envolvendo muitas operações em religadores e disjuntores, aumentando a chance de que ocorra uma falha na operação de equipamentos e com isso provocando atraso na recomposição do sistema. Tomando o exemplo em questão, a manobra para normalização das cargas, normalmente utilizada pela Energisa Paraíba, seguirá uma sequência com 62 operações:

- 1) Abertura de 3 religadores na SE SGL;
- 2) Abertura de 7 religadores na SE SZA;
- 3) Abertura de 7 religadores na SE CJZ;
- 4) Abertura de 4 religadores na SE SPX;
- 5) Abertura de 3 religadores na SE URN;
- 6) Fechamento do disjuntor 12J8/SGL;
- 7) Abertura dos bancos de capacitores das SE SGL, (2x) SZA, (2x) CJZ, SPX e URN;
- 8) Fechamento dos 3 religadores da SE SGL;
- 9) Fechamento dos 7 religadores da SE SZA;
- 10) Fechamento dos 7 religadores da SE CJZ;
- 11) Fechamento dos 4 religadores da SE SPX;
- 12) Fechamento dos 3 religadores da SE URN;
- 13) Fechamento do disjuntor 12J9/SGL;
- 14) Fechamento dos bancos capacitores nas SE SGL, (2x) SZA, (2x) CJZ, SPX e URN.

Em contrapartida a manobra para recomposição do sistema com menor número de operações, que é a proposta de estudo deste trabalho, consiste em fechar um único disjuntor, reenergizando dessa forma todo o sistema de distribuição.

Para o exemplo a manobra consiste em fechar o disjuntor 12J8 ou 12J9 da SE SGL, e todo o sistema é energizado com um único comando do operador, energizando as subestações SGL, SZA, CJZ, SPX e URN todas com suas cargas e banco de capacitores. Validando a possibilidade de realização desta manobra, fica evidente a redução do tempo de interrupção das cargas após uma ocorrência de um defeito temporário no sistema.

Capítulo 1: Introdução

Um dos cenários em que a proposta de normalização do sistema com uma única operação de um disjuntor se justifica, é no período de chuvas e descargas atmosféricas na região oeste do estado da Paraíba. Nesse período, a frequência de desligamentos provocados por esses incidentes naturais é elevada e, na maioria dos casos, a falha do isolamento gerada pelas descargas atmosféricas é temporária, tornando a possibilidade de reenergização do sistema quase que imediatamente após o desligamento.

1.1 Motivação

A principal motivação para a realização deste trabalho é subsidiar o aprimoramento dos procedimentos operacionais da Energisa Paraíba Distribuidora de Energia. Evitando transgredir limites dos indicadores de continuidade DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora e DIC (Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora). Para isso executando manobras com menor número de operações, reduzindo o tempo de retorno do sistema às condições normais de fornecimento de energia após um desligamento.

1.2 Objetivo

Redução do tempo de execução de manobras na recomposição do sistema após a ocorrência de um desligamento intempestivo, utilizando metodologias de análise no domínio da frequência, simulações estatísticas e no domínio do tempo. A redução de tempo para recomposição do sistema de distribuição é conseguida através da manobra que consiste em energizar as cargas com a operação de um único disjuntor. Para validar esta manobra de recomposição, é avaliada a possibilidade de danos, devido às possíveis sobretensões provocadas. Em contra partida, manobras cujas cargas são energizadas gradativamente através do fechamento dos religadores dos alimentadores de 13,8 kV exigem mais tempo para recomposição do sistema e aumento da probabilidade de falha de equipamentos, como por exemplo, o travamento de um mecanismo ou falha de comunicação.

1.3 Contribuições

A contribuição deste trabalho está relacionada à realização de um estudo sobre a viabilidade entre o procedimento inicialmente adotado em um sistema elétrico real da Energisa Paraíba e o proposto nesta dissertação, e assim a redução do tempo de execução de manobras para normalização do sistema de distribuição. O uso de ferramentas de análise de transitórios eletromagnéticos no domínio da frequência e no domínio do tempo é aplicado para validar a viabilidade de execuções de manobras nas quais há a possibilidade de ocorrerem sobretensões.

1.4 Estrutura do Trabalho

Além do capítulo 1, este trabalho está organizado em cinco capítulos. Fundamentação teórica e revisão bibliográfica no capítulo 2, baseando-se no conhecimento prévio para entendimento da metodologia aplicada, avaliação dos resultados e revisão bibliográfica, que versa sobre os temas correlacionados ao objetivo deste trabalho.

A metodologia aplicada para o desenvolvimento do trabalho e os critérios avaliativos dos impactos das manobras para o reestabelecimento do sistema de distribuição são descritos no capítulo 3.

No capítulo 4 são apresentados os resultados de simulações, aplicações e formulação de um procedimento de recomposição do sistema de distribuição 69 kV.

No capítulo 5, a apresentação das conclusões e possibilidades de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentadas informações e uma revisão bibliográfica de trabalhos relacionados ao problema de recomposição de sistemas de distribuição de energia elétrica, sobretensões transitórias e técnicas de análise de sistemas elétricos.

Em muitos trabalhos é verificada a tendência em buscar estratégias de reconfiguração do sistema de distribuição de média tensão, normalmente em 13,8 kV, em que as opções de manobras são limitadas a atingir uma situação permitida para o estado de regime permanente, sem considerar os efeitos transitórios gerados durante a execução das manobras de reconfiguração. A exemplo de Ling et al. (2005), em um artigo sobre o processo de recomposição de um sistema elétrico de potência, minimizando o número de operações de chaveamento, usando como limitação as capacidades de potência ativa e reativa e os limites de tensão, utilizando um modelo baseado no método de otimização de colônias de formigas.

Como também, Lemos et al. (2005) mostram um sistema especialista para ser usado em tempo real, voltado para a reconfiguração do sistema de distribuição, objetivando a minimização do tempo de recomposição, do número de operações e maximizando a carga atendida.

Entretanto, essas aplicações normalmente não se destinam aos sistemas de distribuição de alta tensão que possuem a característica de rede predominantemente radial, limitando assim as opções de manobra a um número bastante reduzido. Assim, torna-se mais relevante para o trabalho proposto o levantamento de informações, técnicas de análise em trabalhos relacionados aos efeitos transitórios durante o processo de recomposição.

2.1 Ferramentas Computacionais para Transitórios Eletromagnéticos

A análise de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência tem maior viabilidade econômica com o uso de ferramentas computacionais a outros métodos como o uso de TNA (*Transients Networks Analysers*) e o uso de soluções analíticas.

Muitas técnicas têm sido aplicadas na simulação digital de transitórios eletromagnéticos ao longo dos anos. Seguramente, os programas que utilizam a técnica de resolução no domínio do tempo, programas do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*), são os mais difundidos e utilizados, dada a facilidade em simular mudanças súbitas na configuração do sistema e na facilidade de incluir o efeito de elementos não lineares (Martí et al., 1985 & Dommel, 1996). Existem diversos programas comerciais do tipo EMTP, para simulação de sistemas de energia elétrica, a exemplo do MICROTRAN® (Microtran Power System Analysis Corporation, 1992), EMTDC da MANITOBA, EMTP-DCG da EPRI e do ATP (Leuven EMTP Center, 1987). Entre os diversos programas EMTP destaca-se o ATP que por razões econômicas, técnicas e históricas tornou-se a plataforma padrão e oficial usada pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) e ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), para estudos de transitórios eletromagnéticos no Brasil.

Neste trabalho será utilizado o ATP (*Alternative Transientes Program*) (Leuven EMTP Center, 1987) para realizar simulações usando ferramentas nos domínios do tempo e da frequência.

2.2 Sobretensões

Os sistemas elétricos de potência operam em regime permanente grande parte do tempo, porém devem ser projetados para suportar solicitações extremas, denominadas de sobretensões e sobrecorrentes. As sobretensões são variações de tensão com valores superiores ao valor de regime permanente, que podem ser classificadas como instantâneas, momentâneas e temporárias. Os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST -, em seu Módulo 8 (ANEEL, 2015), consideram uma elevação momentânea de tensão quando maior que 1,1 pu com duração superior ou igual a um ciclo de 60 Hz e inferior a três segundos. Já as sobretensões instantâneas de tensão, são tratadas no Módulo 8 do PRODIST, normalmente superior a 1,1pu com duração entre 0,5 e 30 ciclos da frequência fundamental (Dugan et al., 2002).

As sobretensões são geradas por efeitos externos ao sistema elétrico, como descargas atmosféricas ou pelo próprio sistema, como as sobretensões de manobra, objeto de estudo deste trabalho. Essas sobretensões são originadas de mudança abrupta na configuração do sistema, causadas por chaveamento de equipamentos ou pela ocorrência de curtos-circuitos e têm duração típica de poucos ciclos (Nunes, 2006).

Situações comuns para ocorrência de sobretensões transitórias são oriundas da abertura ou fechamento de disjuntores, para manobras tais como:

- Energização de linhas;
- Chaveamento de cargas indutivas e capacitivas;
- Energização de transformadores e reatores;
- Ocorrência e eliminação de faltas;
- Ressonância linear e ferroressonância;
- Religamentos;
- Rejeição de carga.

A energização de elementos capacitivos é uma das principais fontes de sobretensões de manobra, como por exemplo, a energização de banco de capacitores.

As sobretensões de manobra são classificadas como sobretensões com frentes de ondas lentas e tipicamente apresentam componentes de frequência de 60 Hz até 20 kHz (CIGRÉ, 1990), (Zanetta Jr., 2003).

As sobretensões de manobra são responsáveis por cerca de 1% dos curtos-circuitos que podem ocorrer nos sistemas de potência (Regaller, 1980). As fontes de sobretensões transitórias são mudanças bruscas na configuração do sistema, manobras envolvendo capacitores, energização de transformadores, linhas de transmissão e descargas atmosféricas, (D'Ajuz, et al., 1987; Adibi, 1992; Dugan et al., 2002).

Normalmente acompanhado de algumas dessas sobretensões e afundamento de tensão estão as sobrecorrentes, que são definidas como correntes de valor instantâneo maior que o valor nominal em regime permanente. São resultados de energização de equipamentos como transformadores, bancos de capacitores, reatores e de faltas no sistema. As sobrecorrentes de energização de transformadores, por exemplo, podem chegar a 10 vezes o valor da corrente nominal e com forte conteúdo harmônico, podendo levar a operação indevida de esquemas de proteções gerando elevadas sobretensões sustentadas devido a presença circuitos ressonantes.

Transitórios por chaveamento de manobra são geralmente muito amortecidos e de curta duração e, segundo Adibi (1992), sobretensões transitórias não são um fator significativo em tensões de transmissão abaixo de 100 kV. Em tensões mais altas as sobretensões por chaveamento de manobra podem se tornar significativas. Sadeghkhanian et al. (2009) comentam que em geral as sobretensões transitórias são expressivas para sistemas de transmissão com tensão superior a 400 kV.

Apesar das colocações apresentadas, observações práticas de profissionais da operação do sistema de distribuição entendem ser necessária a validação dessas informações para execução de manobras com maior segurança.

2.3 Representação de Cargas para Simulações Digitais

A escolha do modelo utilizado para a representação de cargas é uma questão complexa e depende do tipo de estudo a ser realizado, podendo ser desde uma análise de fluxo de potência e curto-circuito, que retratam uma dada condição de regime permanente, a uma análise dinâmica de estabilidade ou transitórios eletromagnéticos. Em cada uma dessas áreas de análise existem condições particulares que afetam a maneira de se representar as cargas (Neto et al., 2009).

O uso de valores adequados para os percentuais de composição da carga é refletido em um cálculo mais preciso para os valores de tensão e corrente. Contudo, a determinação desses parâmetros não é uma tarefa fácil. Em sistemas de distribuição, cada tipo de alimentador apresenta uma natureza diferente, refletindo em sua configuração de carga. Alimentadores industriais, por exemplo, geralmente necessitam de uma demanda elevada para alimentação de motores elétricos. Já nos consumidores comerciais, as maiores cargas provêm dos circuitos de iluminação. Cabe então, ao responsável pela simulação, determinar, por algum critério, a representação de carga mais apropriada (IEEE, 1993; IEEE, 2003).

Para o estudo de restabelecimento de sistemas elétricos, determinar a carga a ser encontrada durante o processo de restabelecimento, e como a carga deve ser modelada constitui-se em um problema que pode alterar as conclusões do estudo. O problema do restabelecimento de carga após a falha no fornecimento de energia encontra-se dividido nas seguintes fases conforme Tabela 1 (Agneholm, 1999).

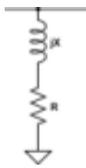
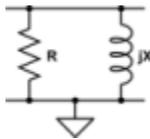
Tabela 1 - Fases do carregamento do sistema após um desligamento.

Proveniência da corrente	Duração aproximada (ordem de grandeza)
Corrente de partida de lâmpadas de descarga	Alguns ciclos
Corrente de partida de motores	1 segundo
Perda de diversidade entre equipamentos controlados termostaticamente (carga fria)	Minutos até horas

Para o fenômeno que se avalia neste trabalho (sobretensões de manobra) a modelagem da carga torna-se mais importante que o comportamento da demanda após a energização que é observada em regime permanente.

Tipicamente existem três tipos de cargas: resistiva, motora (indutiva) e não linear, apresentadas na Tabela 2. Caso seja conhecida, a composição não linear da carga e, se esta for adequadamente levada em consideração, um circuito RLC poderia então representar a parte linear. Porém, obter informações detalhadas dessa representação geralmente é muito complexo ou inexecutável. Assim, cargas são representadas usando valores de tensão do barramento as quais estão conectadas a potência ativa (P) e reativa (Q) para uma dada frequência fundamental (IEEE, 2009). Entretanto, essas representações simplificadas reproduzem o comportamento de uma carga linear em uma situação de regime permanente, e que podem não representar a realidade da carga para um fenômeno transitório, que pode ter em sua composição um extenso espectro de frequência.

Tabela 2 – Modelos típicos de representação de cargas (IEEE, 2003)

Modelo	Parâmetros
<p>Modelo 1: RL Série</p> 	$R = P \cdot \frac{V^2}{P^2 + Q^2}$ $X = Q \cdot \frac{V^2}{P^2 + Q^2}$
<p>Modelo 2: Paralelo</p> 	$R = \frac{V^2}{P}$ $X = \frac{V^2}{Q}$

Normalmente se adota o modelo RL série ou paralelo (Tabela 2, modelo 1 e modelo 2), que são equivalentes para a frequência fundamental, 60 Hz. Porém a resposta em frequência para esses modelos apresenta comportamentos distintos, posto que a reatância X_L se comporta como um circuito aberto em altas frequências, fazendo com que a impedância para o modelo1, RL série cresça indefinidamente, e para o modelo 2, RL paralelo a impedância da carga limite-se ao valor da resistência, pois com o aumento da frequência a reatância indutiva comporta-se como um circuito aberto. Na Figura 2 está ilustrado este comportamento com a frequência.

Para todas as simulações desta dissertação foi adotado o modelo RL paralelo, apesar de apresentar comportamento menos severo que o modelo RL série, o modelo RL paralelo se aproxima mais do comportamento de amortecimento e componentes de frequência observados nas oscilografias registradas nos sistemas de distribuição (Neto et al., 2009).

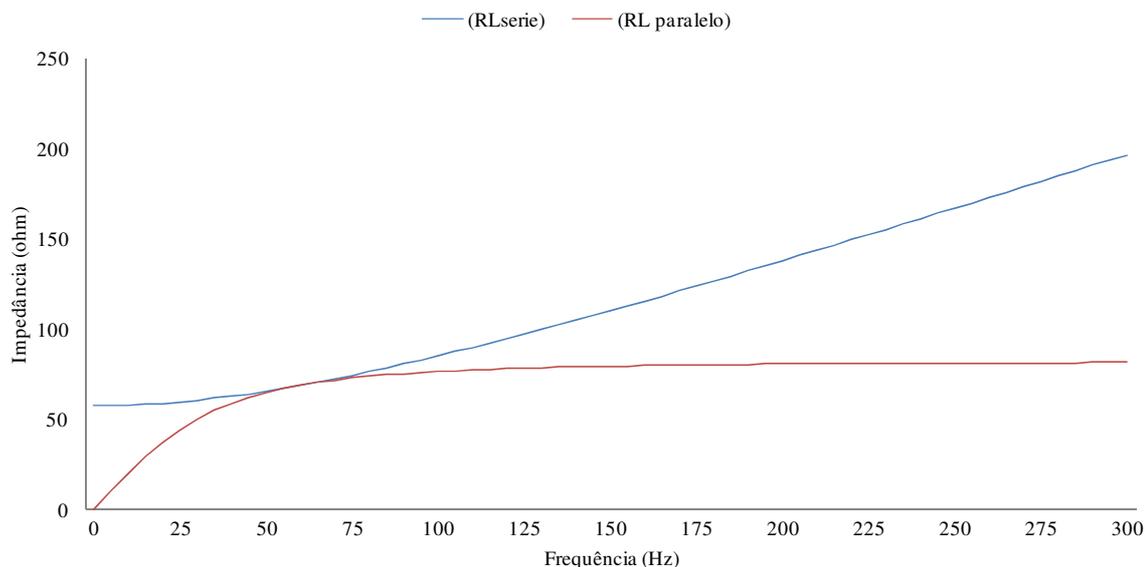


Figura 2 - Resposta em frequência para cargas RL série e RL paralelo.

2.4 Estudo Estatístico

A amplitude das sobretensões é influenciada por elementos do sistema elétrico e instante de operação do disjuntor.

No fechamento de um disjuntor para energização, por exemplo, de uma linha de transmissão em vazio (ver Figura 3), pode ser observada uma superposição de ondas viajantes com a tensão imposta pela fonte, porém com o amortecimento das ondas viajantes pelas perdas no sistema restará somente a tensão da fonte em regime permanente (Zaneta Júnior, 2003).

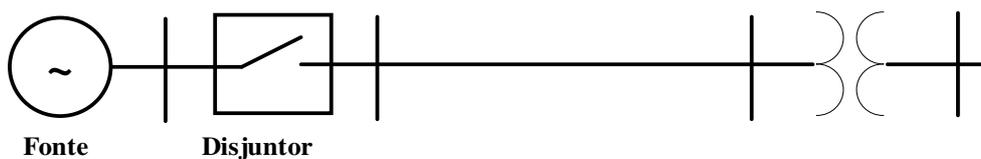


Figura 3 – Diagrama representando sistema fictício em vazio.

Para efeito de ilustrativos, considere na Figura 3 uma fonte que energizará uma linha e transformador. Com o fechamento do disjuntor no instante em que a tensão passa em seu valor de máximo, ou seja, com ângulo de incidência de 90° tem-se um transitório mais severo, instante em que a derivada da tensão é nula, Figura 4 (a). Fazendo o fechamento no momento em que a tensão passa em seu valor de nulo, ou seja, com ângulo de incidência de 0° não há sobretensões e o transitório é mínimo, instante que a derivada da tensão é máxima Figura 4 (b).

O instante de fechamento de um disjuntor determina a severidade do transitório e para cada ponto monitorado de um sistema esse instante pode ser diferente devido aos deslocamentos angulares da tensão, que podem ocorrer em um sistema, como por exemplo, após transformadores e linha de transmissão.

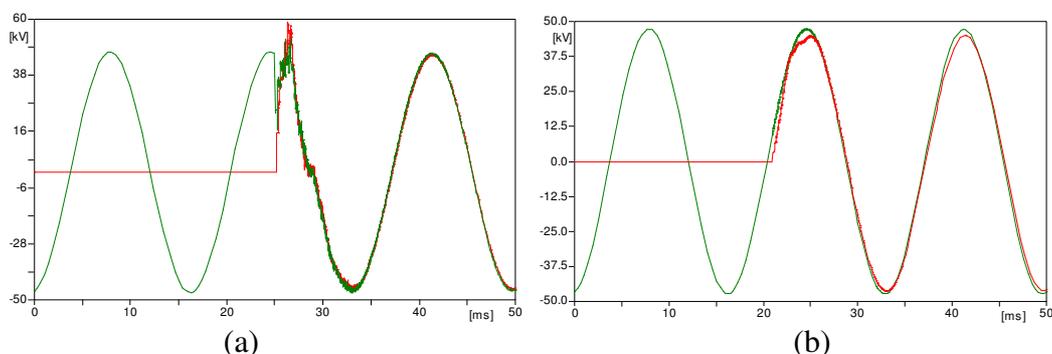


Figura 4 – Sobretensão observada de acordo como ângulo de incidência 90° em (a) e 0° em (b).

Em um sistema trifásico, além do instante de fechamento do disjuntor, existe um defasamento entre os instantes de fechamento de cada pólo em disjuntor que tenha o fechamento de cada pólo mecanicamente independente. O que torna praticamente impossível que os três contatos abram ou fechem simultaneamente. Estes desvios temporais, para o fechamento de cada pólo influenciam na amplitude da sobretensão de manobra, devido ao acoplamento de cada fase. Outro parâmetro aleatório, além da dispersão mecânica entre os pólos, é a formação de um arco elétrico durante a aproximação dos contatos do disjuntor antes de seu encontro (“*prestrike*”) e determinam os instantes de fechamento efetivo do disjuntor (Dommel,1986). Mas seu efeito é mínimo para disjuntores de operação rápida (Paris, 1968, Truax et al., 1978; e Woodford & Wedepohl 1997). De outra forma, seu efeito pode ser simplificadaamente incluído na análise pelo aumento da dispersão mecânica máxima entre pólos do disjuntor.

Os programas de simulação de transitórios eletromagnéticos disponibilizam ferramentas para análise estatística. O ATP disponibiliza a chave estatística (*Statistic switch*) que tem o objetivo de modelar o comportamento do disjuntor. E possibilita que a variação do tempo médio de operação do disjuntor siga uma distribuição uniforme/normal de probabilidade ao longo de um ciclo da frequência fundamental e a dispersão entre o fechamento de cada pólo siga uma distribuição normal de probabilidade (Dommel, 1986). Na Figura 5 tem-se o tempo médio distribuído ao longo de uma distribuição uniforme e tempo de fechamento de cada pólo do disjuntor seguindo uma distribuição normal.

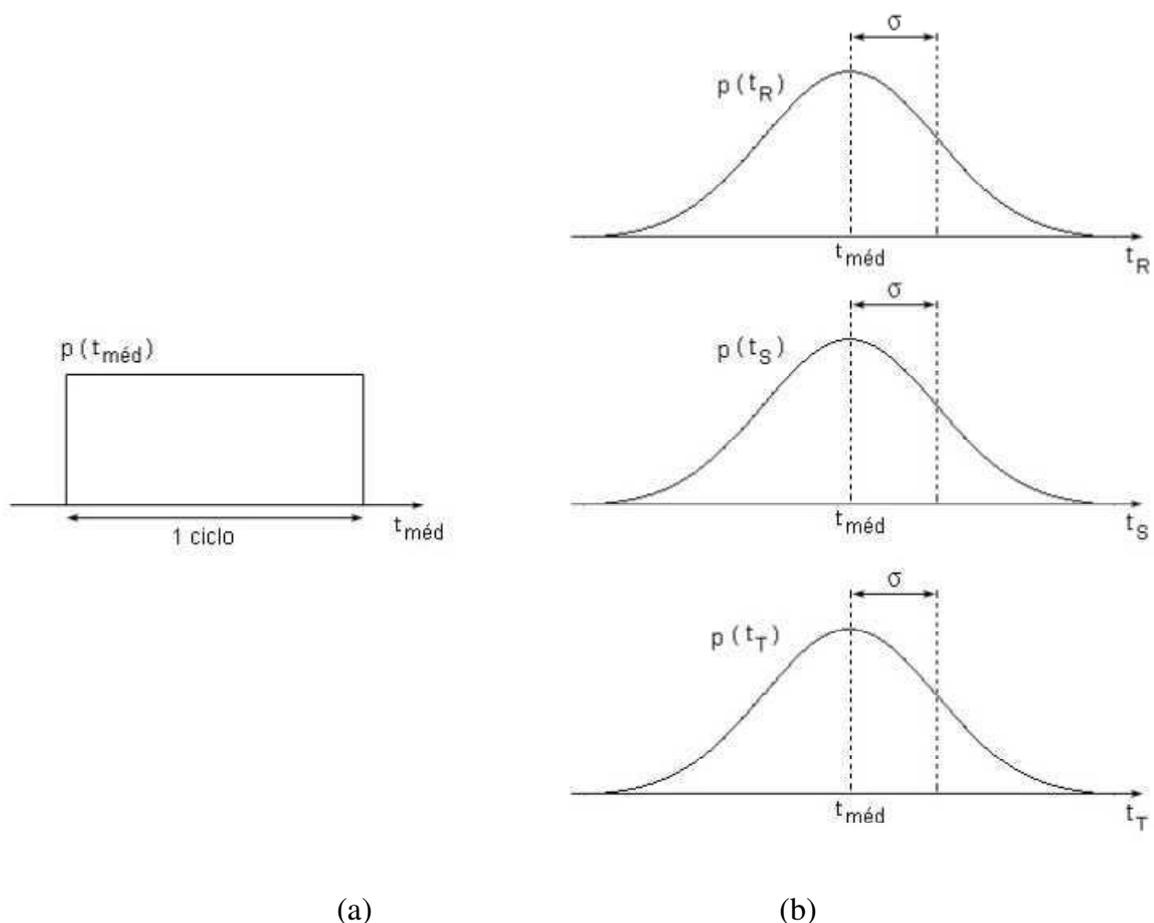


Figura 5 – Funções de distribuição de probabilidade (a) uniforme e (b) normal (Nunes, 2006).

A dispersão máxima entre pólos é normalmente fornecida nas especificações de fabricantes de disjuntores conforme Dommel (1986). Na Figura 6 tem-se a distribuição normal com \bar{T} sendo o tempo médio de operação e σ o desvio padrão que se relaciona com o tempo máximo de dispersão ($T_{dispersão}$) por Martinez (2000):

$$\sigma = \frac{\Delta T_{dispesão}}{3} \quad (1)$$

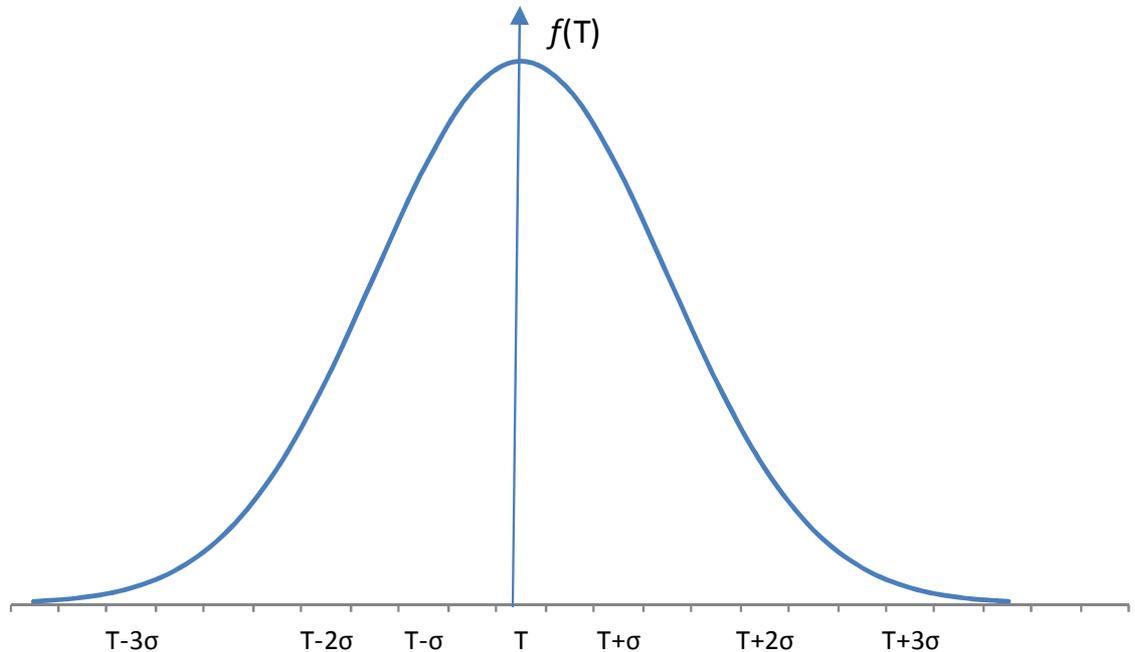


Figura 6 – Distribuição normal padrão.

2.5 Análise no Domínio da Frequência

A aplicação de um sinal distorcido em uma rede elétrica pode ser estudada usando a série de Fourier (Oppenheim et al.,1989). Com a decomposição da onda distorcida em série de Fourier e de posse das suas componentes harmônicas, calcula-se as respostas do sinal em determinados pontos da rede. Para isso, necessita-se da resposta em frequência da rede. A origem da distorção pode ser devido à saturação de transformadores, presença de circuitos retificadores, de modo geral, cargas não lineares.

Em geral, uma das preocupações é injetar correntes harmônicas em determinada barra e obter as respostas de tensão ou corrente na própria barra e em outros pontos da rede. A solução é obtida com métodos de análise de rede em regime permanente.

2.5.1 Resposta na Frequência

A análise no domínio da frequência de um circuito consiste na injeção de um sinal variável com a frequência de modo a encontrar as frequências em que o circuito entre em ressonância. Tomemos o circuito da Figura 7 como exemplo:

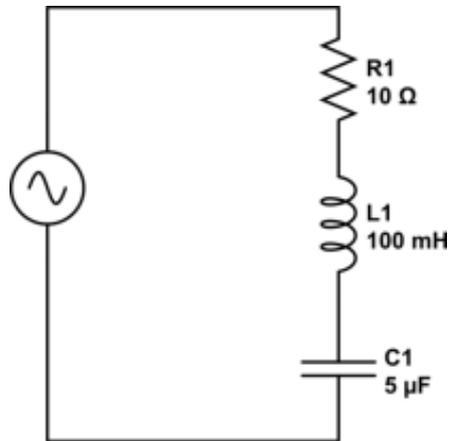


Figura 7 – Circuito com um ramo RLC série.

Onde se tem a frequência de ressonância igual $f = 1/\sqrt{L_1 C_1}$ e se tem como função de transferência:

$$Y(s) = \frac{s/L_1}{s^2 + s(R_1/L_1) + (1/L_1 C_1)}, \text{ onde } s = j\omega \quad (2)$$

Aplicando uma tensão senoidal de amplitude 1 V e frequência variando de 0,01 a 1 kHz se encontra, conforme Figura 8, a resposta à variação da frequência para o circuito com um ponto de ressonância na frequência de 225,08 Hz, como previsto fazendo o cálculo de forma analítica.

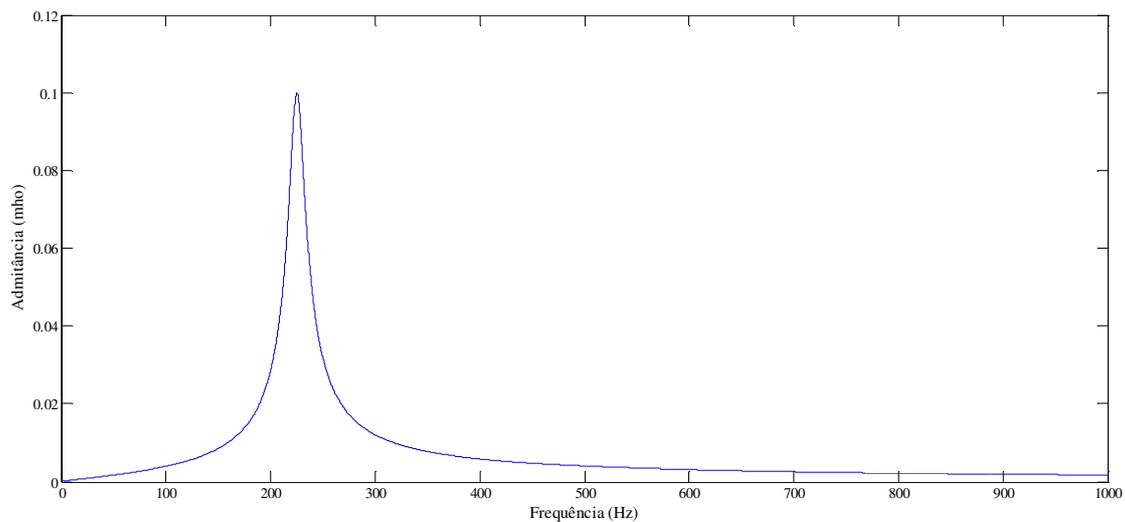


Figura 8 – Admitância em função da frequência para circuito com um ramo RLC série.

Agora acrescentando mais um ramo em paralelo ao circuito anterior Figura 9, modifica-se a resposta com a variação da frequência para o circuito criando-se mais um ponto de ressonância para o circuito a frequência de ressonância igual a $f_2 = 1/\sqrt{L_2C_2}$.

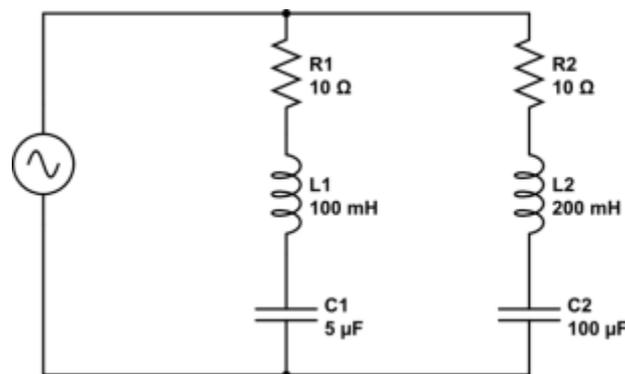


Figura 9 – Circuito com dois ramos RLC série.

E se tem como função de transferência:

$$Y(s) = \frac{s/L_1}{s^2 + s(R_1/L_1) + \left(\frac{1}{L_1C_1}\right)} + \frac{s/L_2}{s^2 + s(R_2/L_2) + \left(\frac{1}{L_2C_2}\right)} \quad (3)$$

Aplicando uma tensão senoidal de amplitude 1V e frequência, variando de 0,01 a 1 kHz, encontra-se os pontos de ressonância na frequência de 35,6 Hz e 225,08 Hz, conforme Figura 10.

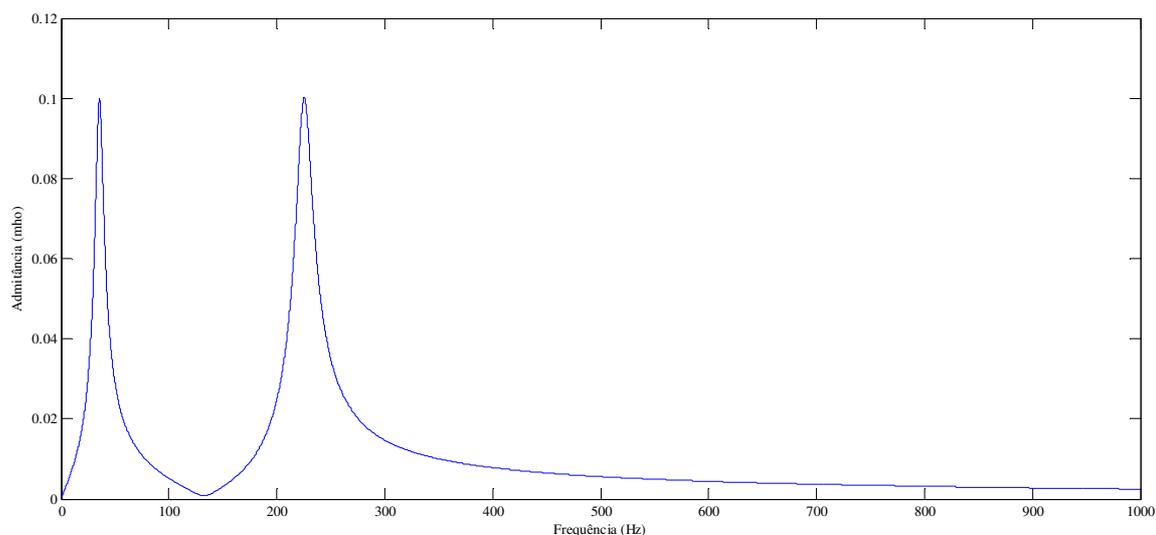


Figura 10 - Admitância em função da frequência para circuito como dois ramos RLC série.

O nível de complexidade envolvida para a análise de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência é tamanho, que se faz inexecutável uma solução analítica através de formulação de um problema por meio de equações diferenciais. Assim, o uso de ferramentas computacionais se torna indispensável. Técnicas de análise de sistemas elétricos de potência no domínio do tempo são mais usuais e difundidas do que as do domínio da frequência. Visto que os programas tipo EMTP são desenvolvidos inicialmente para solução no domínio do tempo, por trazerem informações de aplicação e interpretação diretas. Entretanto, estudos de sistema de potência envolvendo aspectos da frequência podem revelar características de diferentes percepções.

Apesar de os programas, tipo EMTP (Eletromagnetic Transiente Program), terem sua maior aplicação para simulações no domínio do tempo, o ATP disponibiliza a ferramenta *Frequency Scan* que possibilita verificar o comportamento da impedância de um sistema com a variação da frequência, assim possibilitando identificar a frequência de ressonância para cada configuração do sistema (Fernandes et al., 2011). O uso dessa ferramenta permite comparar diferentes configurações do sistema observando as alterações das amplitudes e frequência de ressonâncias, permitindo inferir configurações mais favoráveis e elementos com maior influência nas manobras para o processo de recomposição (França, 2010).

O uso de programa EMTP (*Eletromagnetic Transients Program*) como ATP e EPRI/DCG disponibilizam uma funcionalidade *Frequency Scan* que calcula de forma discreta a tensão e corrente para cada frequência no intervalo de frequência escolhido, sendo possível encontrar a impedância do sistema pela divisão da tensão pela corrente. Uma limitação dessa ferramenta é o fato de considerar o sistema como linear, desprezando as não linearidades, a exemplo dos efeitos da saturação nos transformadores. Portanto, a ferramenta possibilita comparar configurações distintas e inferir sobre a resposta do sistema, desconsiderando as não linearidades.

WART et al. (1997) publicaram um novo método para determinar as frequência de ressonância de sistema de potência considerando os efeitos das não linearidades dos elementos passivos do sistema como reatores e transformadores. O método consiste na aplicação de uma fonte de corrente de amplitude variável (*current sweep*) e uma fonte de corrente variável (*frequency sweep*). O método mostra que a depender de como seja feita a variação da amplitude da corrente, ascendente ou descendente, a resposta em frequência do sistema se altera, deslocando as frequências de ressonância, devido à característica de saturação dos elementos. A resposta a esse método de análise pode ser visualizada em um gráfico tridimensional onde se tem famílias de curvas que correlacionam amplitude da corrente e resposta em frequência.

Este método permite visualizar com detalhes a característica dinâmica não linear da resposta do sistema que pode ser útil para projetos de filtros harmônicos ou para verificar possíveis ressonâncias do sistema a eventos com forma de onda conhecida. Porém para uma aplicação qualitativa de observação de modificações na resposta em frequência do sistema por alterações em suas configurações, esse método traz informações que provavelmente não alteram a conclusão que se chega usando os métodos que não consideram os efeitos da não linearidade.

A varredura na frequência sem considerar o efeito da não linearidade dos componentes do sistema é aplicada em vários trabalhos com o objetivo de identificar frequências de ressonância, verificar contribuições de equipamentos ou configuração de um sistema para sua resposta em frequência.

Wanik et al. (2004) fizeram um estudo aplicando a varredura na frequência para simular a resposta em frequência de um sistema de distribuição e avaliar a distorção harmônica em um barramento do sistema com dispositivo de controle de velocidade (*ASD*) (Inversor de frequência). Foram feitas comparações das respostas em frequência

neste barramento de acordo com a aplicação de filtros passivos e capacitores para correção de fator de potência em barramento desse sistema. Para fazer a comparação segue o método de injeção de corrente de frequência variável em uma faixa de interesse, a tensão verificada no barramento representará numericamente o valor da impedância variável com a frequência vista deste ponto. Este procedimento simplifica a busca de situações de ressonância para o espectro de frequência produzido pela fonte de corrente distorcida por presença de componentes harmônicas.

Fernandes et al. (2007) usam como Wanik varredura em frequência para análise no domínio da frequência, visando quantificar os impactos na resposta em frequência do sistema quando do desligamento de linhas de transmissão para controle de tensão, o que leva a diversas topologias a serem analisadas, resultando em um elevado número de simulações caso a análise seja no domínio do tempo. Para chegar às mesmas conclusões de forma mais ágil, a avaliação no domínio da frequência é usada com o levantamento da impedância vista do ponto de interesse fazendo a injeção de corrente de frequência variável em uma faixa de interesse com amplitude unitária, assim a tensão verificada representará a impedância $z(j\omega)$ do sistema.

Outras aplicações da metodologia de análise no domínio da frequência tiveram a eficácia dos métodos comprovados. Neto et al. (2008) e Fernandes et al. (2009) utilizam análise de varredura em frequência para avaliar as diferentes configurações do sistema, possíveis de realizar a recomposição do sistema após um desligamento. Neto & Fernandes (2008) fazem uso da análise de varredura em frequência para avaliar os efeitos da modelagem da carga em estudo de transitórios eletromagnéticos. Fernandes et al. (2011) realiza um estudo de caso no domínio da frequência para avaliar o desempenho de um sistema de distribuição de 69 kV com geração eólica, verificando o quanto a presença da geração eólica nesse sistema altera seus pontos de ressonância

França (2009) formaliza a metodologia e aplicabilidade da análise de varredura na frequência como estratégia para comparar opções de topologias de um sistema elétrico de potência durante o processo de recomposição quanto à severidade de sobretensões. Em comparação às diretrizes propostas pelo ONS (2010), 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, traduzindo em segurança operativa. As análises de varredura em frequência são

validadas por simulações no domínio do tempo, comprovando a potencialidade da metodologia proposta.

O ONS (2010) no Submódulo 23.3 (Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos) dos seus Procedimentos de Rede, estabelece diretrizes para o estudo de transitórios eletromagnéticos sob condição de manobra e recomposição de um sistema elétrico. Nessas diretrizes é posta a utilização de simulações no domínio do tempo e estudos estatísticos. Em função da influência da aleatoriedade dos instantes de operação dos disjuntores, os estudos estatísticos devem ser efetuados por análise probabilística.

Azevêdo (2010) utiliza a varredura na frequência de um sistema elétrico para obtenção de equivalentes dependentes da frequência e sua aplicação em estudos de tensão de restabelecimento transitória. Para isso, é feita a varredura com a frequência nos barramentos passíveis de inserir o circuito equivalente, levantando a curva da impedância do sistema variável com a frequência e utilizando propriedades das curvas de módulo, valor real e imaginário da impedância é possível determinar os elementos da matriz impedância que corresponde ao equivalente do sistema. Outra aplicação fazendo uso das análises no domínio da frequência foi proporcionar indicativos sobre a extensão mínima do sistema que possa ser substituída por equivalentes à frequência fundamental em relação ao ponto de interesse, onde se constatou que aplicando o equivalente a 60 Hz a dois barramentos à montante do local de interesse para o estudo, reproduzirá a mesma resposta com a frequência para o sistema completo.

Carramaschi (2010) determina um equivalente dinâmico de Thevenin e de Norton a partir de dados no domínio da frequência e no domínio do tempo para aplicação em cálculo de faltas. Neste trabalho com a metodologia utilizada é possível representar até equivalentes de sistemas e elementos não lineares, apesar de não ter sido desenvolvido neste trabalho. A metodologia consiste na conversão da resposta do sistema na frequência para uma função de transferência. Para isso é gerado no domínio da frequência os sinais de corrente de Norton e tensão de Thèvenin no ponto de interesse para calcular a impedância ou admitância equivalente. Então se utiliza do método numérico de ajuste vetorial (*vector fitting*), técnica que permite a identificação de função de transferência na forma de um somatório de frações parciais, ou seja calculando pólos e zero da função de transferência. Calculada a função de transferência no domínio da frequência é possível fazer a conversão da função de transferência para o domínio do tempo.

Estes dois últimos trabalhos fazem o levantamento da impedância $Z(\omega)$ de parte do sistema que se deseja substituir por um equivalente. O que contribuem com a ideia de avaliação isolada da impedância da parte do sistema que sofre alteração.

2.6 Resumo de Trabalhos Correlacionados ao Tema em Estudo

Os trabalhos citados nesta revisão, entre outros citados ao logo desta dissertação, trazem contribuições com informações, metodologia de análise dos efeitos de manobras em sistemas elétricos, avaliação quanto à suportabilidade de equipamentos e a degradação da qualidade da energia elétrica.

Na Tabela 3 estão relacionados os trabalhos mais aproximados ao objetivo do estudo seguindo a codificação:

- a) Critérios de viabilidade da manobra limitados a suportabilidade dos equipamentos quanto às sobretensões de manobra;
- b) Uso de análise no domínio do tempo;
- c) Uso de análise na frequência;
- d) Busca por situações de manobras factíveis;
- e) Busca de situação impeditiva para execução da manobra;
- f) Varredura na frequência apenas da topologia a jusante no ponto de interesse.
- g) Uso de simulação em massa para geração de casos.

Tabela 3 – Comparação entre métodos e estratégia de recomposição.

Autor	a	b	c	d	e	f	g
ONS	x	x	-	x	-	-	
Fernandes et al.	x	x	x	x	-	-	
França	x	x	x	x	-	-	
Método Aplicado	x	x	x	x	x	x	x

Capítulo 3

Metodologia Aplicada

O objetivo deste trabalho é contribuir para a melhoria dos procedimentos operacionais de sistemas de distribuição, fornecendo subsídios para possibilitar a redução do número de operações em manobras de recomposição de sistemas de distribuição em alta tensão (Fontes et al., 2013).

Ao se fazer uma investigação no domínio do tempo, simulando cenários com prováveis configurações que poderiam gerar sobretensões proibitivas, essa expectativa não foi confirmada, porém essas simulações não cobrem o universo de possibilidades de cenários que podem levar a uma sobretensão de manobra. Assim, uma busca mais detalhada se torna necessária. Para abranger ao máximo o universo de possibilidades de configurações, uma investigação no domínio da frequência utilizando a ferramenta *frequency scan* do ATP para cada ponto de interesse do sistema, faz-se o levantamento da impedância com a variação da frequência e compara-se a resposta em frequência entre barramentos ou topologia do sistema (Fontes et al., 2013). Com isso, é possível fazer inferência do caso mais severo com um menor número de simulações e reduzir o universo de configurações a ser avaliado.

Depois de identificada a situação de ressonância mais severa, um estudo estatístico é realizado com o objetivo de buscar o instante de fechamento do disjuntor que provoca a sobretensão de maior amplitude. De posse dessa informação, realiza-se uma simulação no domínio do tempo, determinística, em que pode ser observada a amplitude e duração da sobretensão. Sendo esta situação permitida, os demais casos avaliados no domínio da frequência com menor severidade estarão, portanto aptos a serem executados sem superação dos limites de suportabilidade dos equipamentos.

Concomitantemente, outra constatação também é conseguida a partir da decomposição de harmônica da corrente de energização do sistema, e observar a existência de frequências ressonantes que servem como base para uma primeira classificação da configuração mais severa.

O fluxograma apresentado na Figura 11 contém resumo da metodologia a ser adotada.

- 1) Identificar a situação mais severa fazendo a varredura em frequência dos circuitos que se deseja avaliar e tomando como base a decomposição harmônica dos sinais de corrente.
- 2) Identificar a situação mais severa executa-se um estudo estatístico com o fim de encontrar a sobretensão de maior amplitude.
- 3) Avaliar sobretensão quanto à amplitude e duração.
- 4) Fazer a decomposição harmônica da corrente de energização do circuito.
- 5) Realizar inferências a partir das respostas em frequências de outros cenários e circuitos.

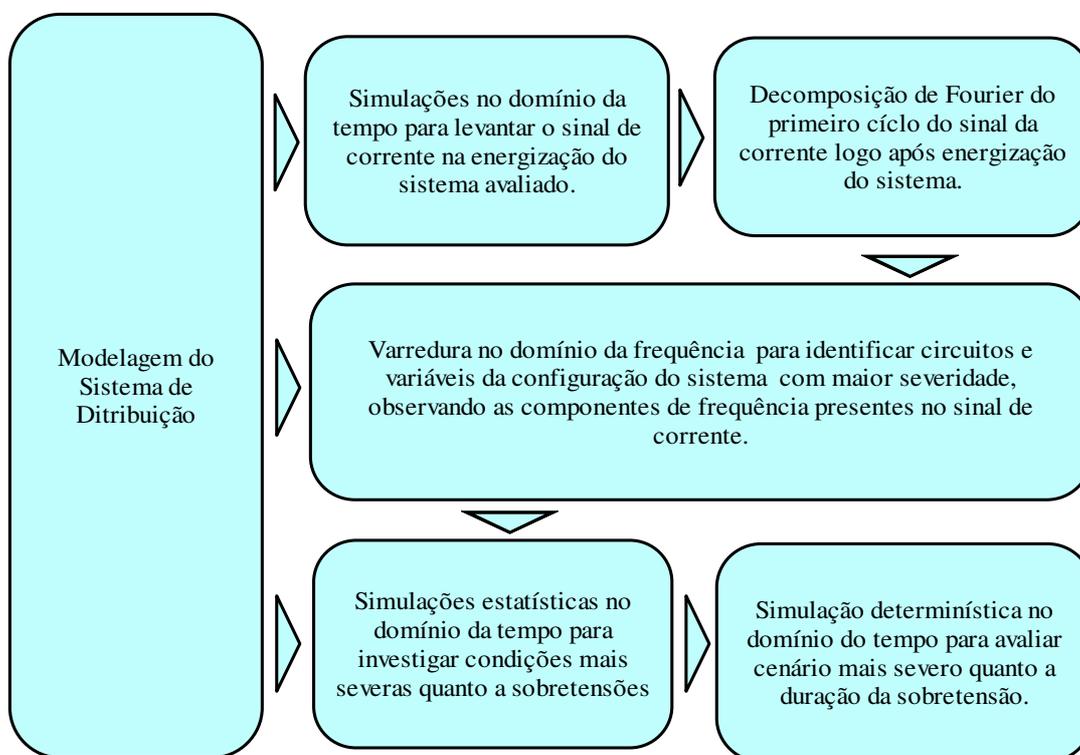


Figura 11 – Fluxograma da metodologia aplicada.

3.1 Uso da Ferramenta *Frequency Scan* do ATP

O uso da *Frequency Scan* se dá anulando todas as fontes de tensão do sistema, pondo em curto-circuito seus terminais, as fontes de correntes, também devem ser anuladas, removendo-se e deixando os terminais abertos. E então se aplica uma fonte de corrente de amplitude de 1A de sequência positiva ou de sequência zero, no ponto em que se deseja encontrar a impedância do sistema, em função da frequência, fazendo a leitura da tensão no local da injeção da corrente que equivale numericamente à impedância,

obtendo $Z(j\omega)$, o que equivale a levantar o comportamento da impedância de Thèvenin observada de um ponto do sistema com a variação da frequência.

Para o levantamento da impedância de sequência positiva de um sistema trifásico, as fontes de injeção da corrente da rotina *frequency scan* devem ser de 1A e defasadas de 120° . Para sequência zero as correntes devem ser de 1A e em fase, como ilustrado na Figura 12.

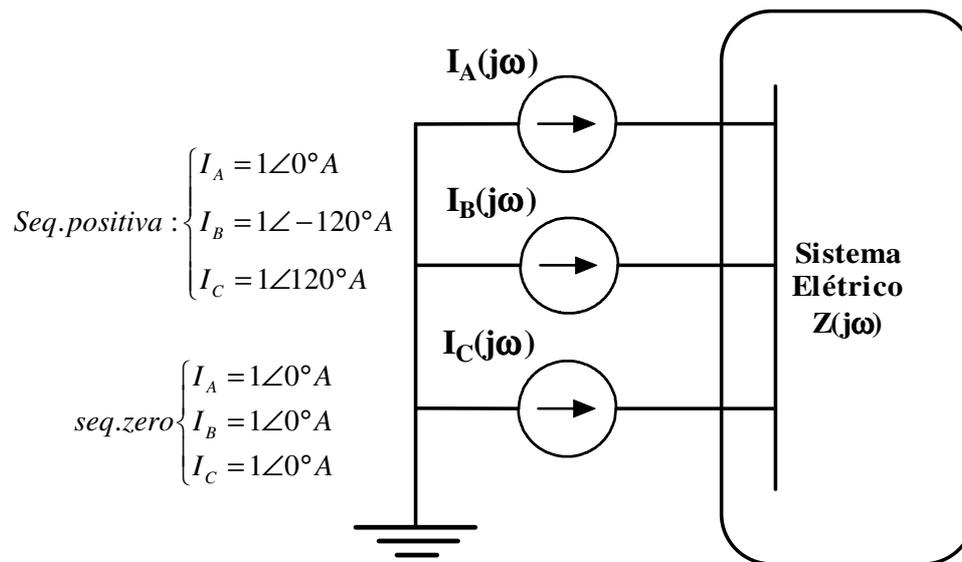


Figura 12 – Injeção de corrente de sequência positiva e sequência zero de frequência variável.

Com esse procedimento é possível verificar o quanto uma mudança na configuração, uma mudança de carregamento, presença de bancos de capacitores ou outros elementos, podem alterar a impedância vista de um ponto do sistema e, com isso, inferir que situação pode ser considerada mais severa ou favorável.

Outra maneira de observação que se torna útil para a manobra pretendida neste estudo é fazer o levantamento da impedância apenas da região do sistema que sofreu alguma modificação e assim fazer uma comparação sem a influência do restante do sistema. Considere na Figura 13 que se deseja fazer o levantamento da impedância $Z(\omega)$ de um sistema de distribuição em várias configurações e carregamento para identificação da configuração mais severa quanto a sobretensões. Porém com a presença do sistema de transmissão em paralelo ao sistema de distribuição em relação ao ponto de injeção da corrente, mascara os efeitos da mudança de configuração no sistema de distribuição. Assim, isolando o sistema de distribuição do sistema energizador (sistema de transmissão), com a abertura fictícia de uma chave do lado da fonte se faz o levantamento da impedância $Z(\omega)$.

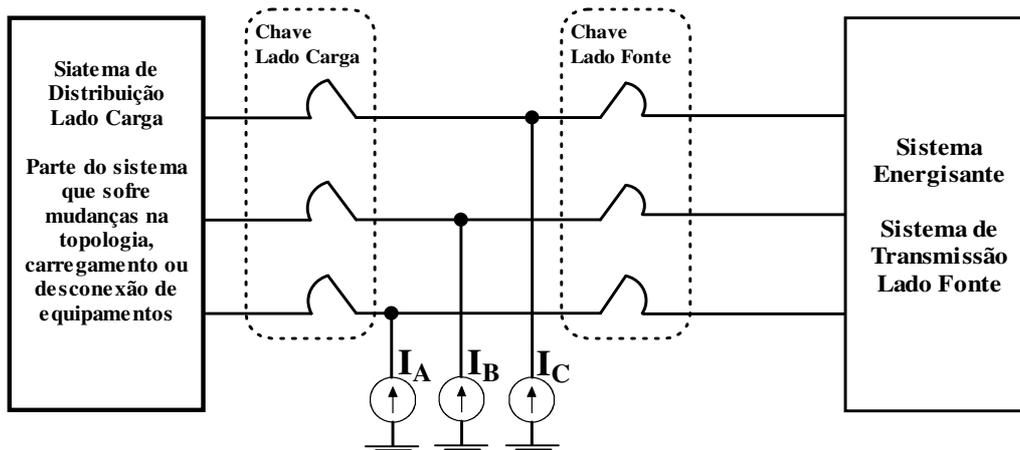
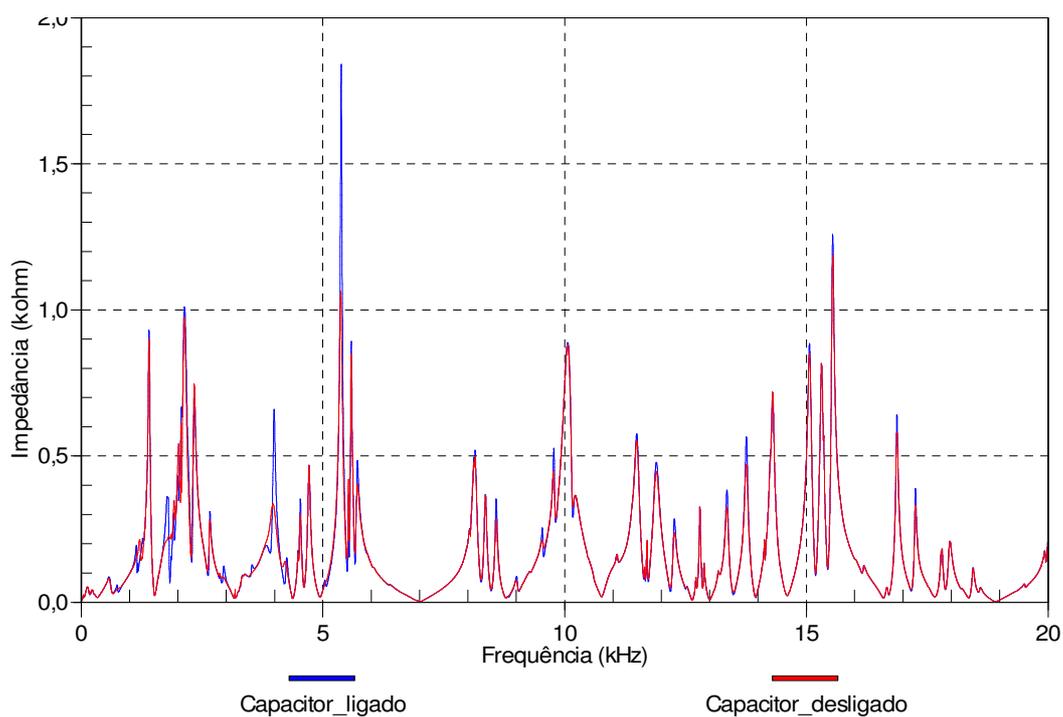
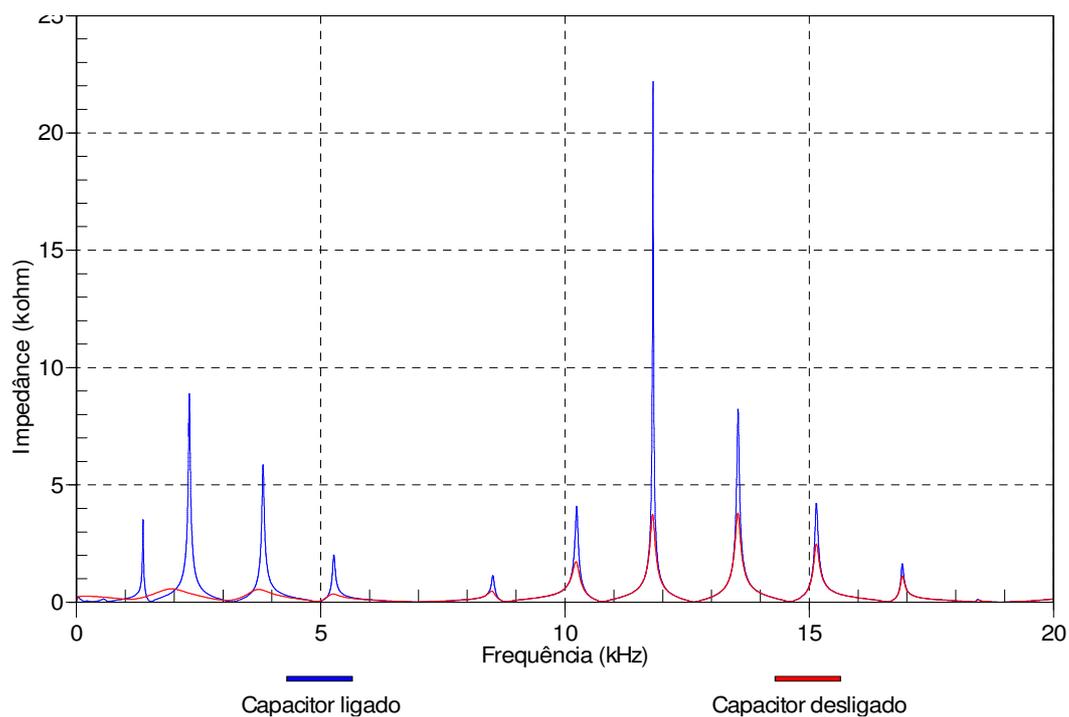


Figura 13 - Injeção de corrente variável com a frequência considerando sistema completo (chaves do lado fonte e do lado da carga fechadas) e considerando apenas o sistema de distribuição a jusante ao local injeção de corrente (chaves do lado fonte abertas).

Na Figura 14 (a) pode-se observar a resposta à varredura em frequência de um sistema de distribuição conectado ao sistema de transmissão à montante do local de injeção da corrente para observar duas configurações: com bancos de capacitores em operação ou fora de operação. Na Figura 14 (b) é feita o mesmo procedimento, porém o sistema de transmissão à montante do local da injeção de corrente está desconectado. Na Figura 14 (b) o efeito da presença de bancos de capacitores no sistema fica mais evidente.



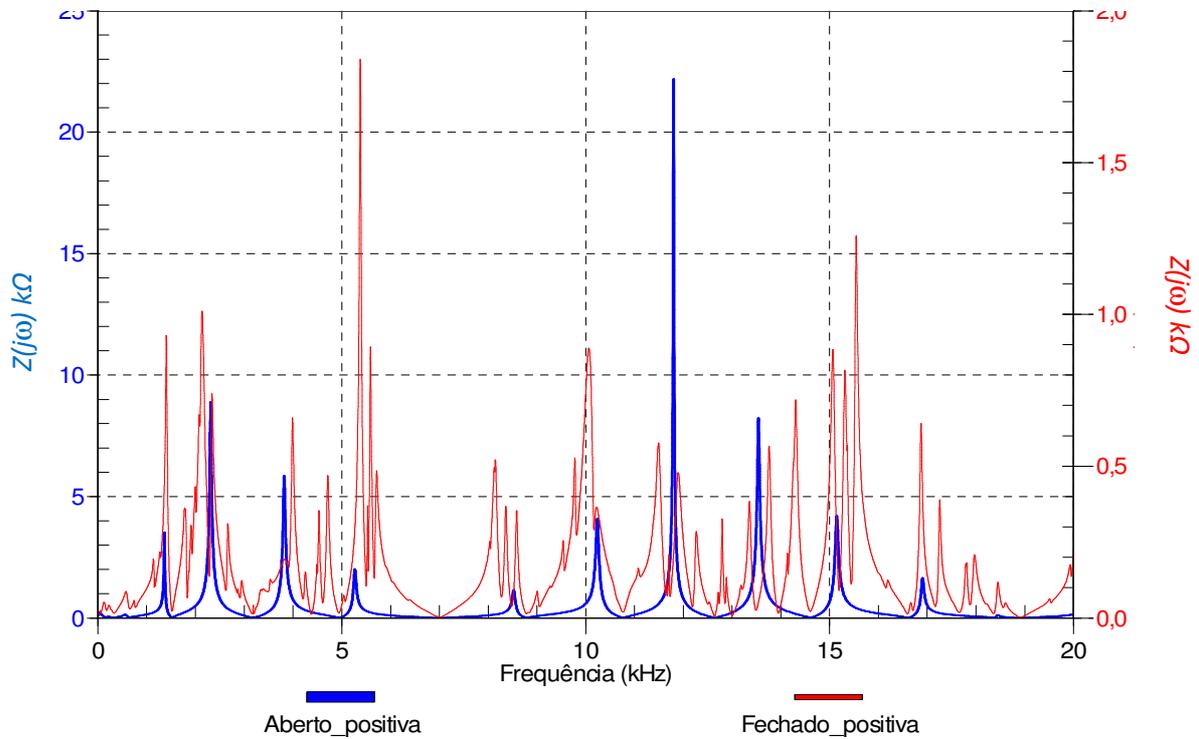
(a)



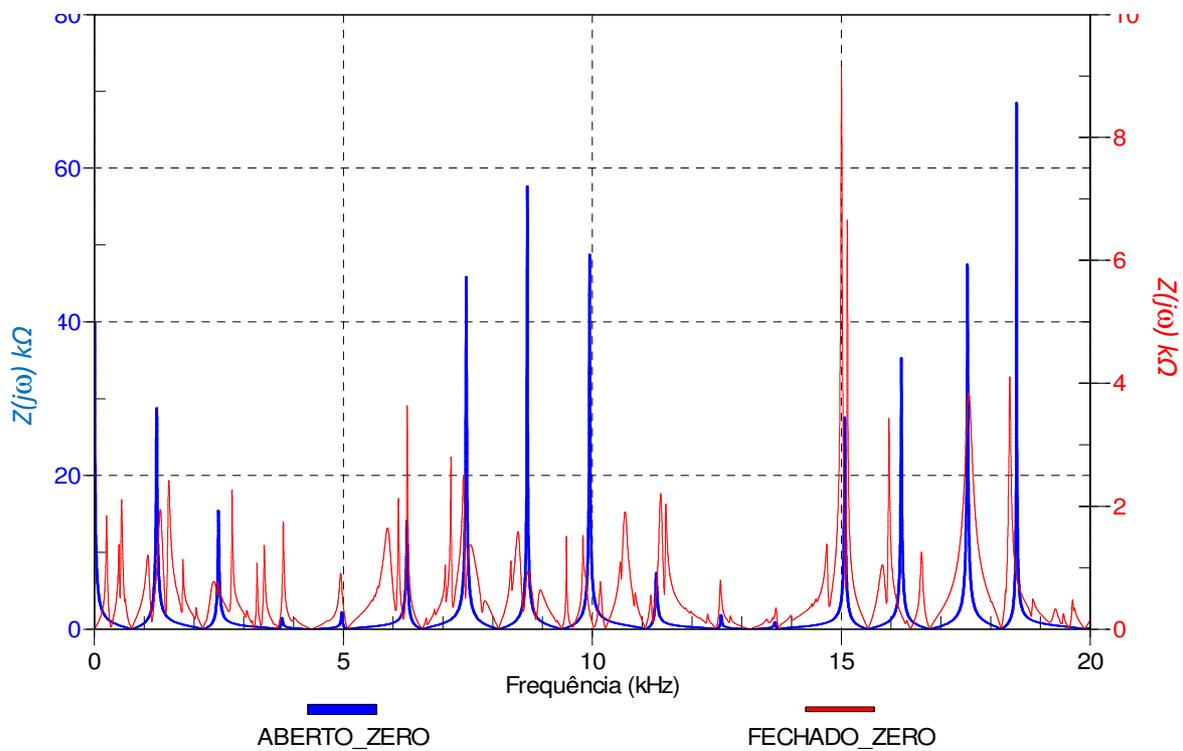
(b)

Figura 14 – Desconexão de bancos de capacitores, (a) varredura em frequência lado fonte conectado (b) varredura em frequência lado fonte desconectado.

Na Figura 15 é possível comparar a resposta em frequência de sequência positiva e zero para o sistema completo, chave lado fonte fechada, e apenas o sistema de distribuição, chave lado fonte aberta.



(a) Sequência positiva



(b) Sequência zero

Figura 15 – Comparação entre varredura em frequência lado da fonte conectado (fechado) e lado da fonte desconectado (aberto).

3.2 Uso do Componente *Statistic Switch* do ATP

Como descrito na seção 2.4, o componente *Statistic Switch* do ATP é uma chave controlada por tempo que repete uma manobra de fechamento ou abertura sucessivamente onde operações individuais de cada uma das três fases podem seguir uma distribuição gaussiana de probabilidades associada à dispersão do instante de fechamento entre os contatos. Os tempos médios de operação do conjunto das três fases, em cada manobra, devem ser distribuídos ao longo de um ciclo da frequência fundamental.

Conforme o procedimento de rede do ONS, Submódulo 23.3, os estudos estatísticos devem ser efetuados por análise probabilística que envolva a execução de, pelo menos, duzentos casos, de forma a assegurar a representação estatística dos estudos (ONS, 2011). Entretanto, Fernandes & Lima (2006) apresentam um estudo probabilístico no qual se observa que o fato de adotar 100, 200 ou 300 energizações é pouco relevante quanto a discrepância observada nos valores instantâneos de sobretensão. Assim não justifica o esforço computacional demandado para adotar mais que 100 energizações distribuídas ao longo de um ciclo da frequência fundamental.

Para o estudo proposto envolvendo a operação de disjuntores de 72,5 kV empregados no sistema de distribuição em 69 kV existe a peculiaridade de que seu sistema de acionamento mecânico é comum aos três pólos não havendo discrepância mecânica entre o tempo de fechamento de cada pólo restando apenas o tempo de *prestrike*, (ver sessão 2.4) que por ser mínimo, pode ser desconsiderado. Diferente dos disjuntores comumente aplicados nos sistemas de transmissão que possuem um mecanismo de acionamento para cada pólo do disjuntor, passível de discordância entre pólos.

Simulações estatísticas foram executadas para um sistema de distribuição de 69 kV usado resultados com referência comparativa, e mostraram que as consequências do aumento do tempo de dispersão entre pólos para os barramento de 13,8 kV são mínimas, entretanto para o barramento 69 kV houve alterações significativa que podem levar a conclusões diferentes, porém esses efeitos de dispersão entre pólos não são considerado para os disjuntores tripolar aplicados no sistema de distribuição em estudo.

Para execução dessa simulação, o disjuntor trifásico foi representado com três chaves monofásicas com distribuição de probabilidade independente. Adotado o pólo da fase A como chave mestre e os das fases B e C como dependentes (escravos). Assim, os

pólos dependentes somente fecharão com um atraso aleatório em relação ao tempo de fechamento do pólo da fase A.

$$T_{escravo} = T_{mestre} + \Delta T_{aleatório} \quad (2)$$

Nas simulações, esta dispersão foi representada usando uma distribuição de probabilidade Gaussiana descrita por um tempo médio de fechamento (T_m) desvio padrão (σ) sendo que a dispersão entre pólos ($\pm\Delta T_{aleatório}$) é dada por 3σ . Normalmente, a dispersão entre pólos é informada pelo fabricante e está inferior a um ciclo da frequência fundamental, adotando-se normalmente o desvio σ em torno de 2 a 2,5ms.

Na Tabela 4 são apresentados resultados das simulações com tempo médio de operação em 350ms e variação de 1 ciclo da frequência fundamental (0,333s a 0,3666s).

Tabela 4 – Variação da sobretensão com o tempo de dispersão entre pólos.

Tempo médio	350ms	350ms	350ms	350ms	350ms	350ms
Faixa de Variação	1 ciclo					
Desvio	0,0ms	0,3ms	0,5ms	2,0ms	4,0ms	5,0ms
Energização n°	71	81	3	47	65	58
Fechamento Fase A (ms)	34,474523	35,127494	34,902302	34,834424	34,491457	35,13570
Fechamento Fase B (ms)	34,474523	35,136719	34,849201	35,11565	34,226872	34,959758
Fechamento Fase C (ms)	34,474523	35,165884	34,834424	35,206329	34,5959917	35,034309
Barra 13,8 kV (pu)	3,15	3,15	3,2	3,15	3,1	3,15
Barra 69 kV (pu)	1,95	2,7	2,9	2,95	2,95	2,85

Assim, os disjuntores manobrados foram modelados como *Statistic Switch* do ATP e seus parâmetros foram ajustados conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Variáveis de simulação da chave estatística.

Tipo de distribuição	Instante médio de fechamento	Dispersão entre pólos	Faixa de Variação	Número de Energizações
Gaussiana	90°	0	1 ciclo da frequência fundamental	100

3.3 Critérios Utilizados para Avaliação das Sobretensões

Os valores máximos admissíveis para as sobretensões devem ser determinados considerando a relação amplitude das sobretensões versus duração.

O ONS em seus procedimentos de rede, no Submódulo 23.3, adota que durante manobras envolvendo elementos saturáveis como reatores, transformadores e autotransformadores só podem ser submetidos a sobretensões, no máximo iguais àquelas garantidas pelos fabricantes e fornecidas pelos agentes.

Na falta dessa informação, devem ser utilizados os valores indicativos apresentados na Tabela 6. Neste trabalho os critérios aplicados para rede básica, estendeu-se para o sistema de 69 kV como encontrado em versões anteriores do Submódulo 23.3.

Tabela 6 – Sobretensões de manobra admissíveis adotadas pelo ONS.

Tensão pu*	Tempo (s)
2,0	0,1666 (10 ciclos*)
1,82	0,3333 (20 ciclos)
1,5	1,666 (100Ciclos)
1,4	3,6
1,35	10,0
1,25	20
1,2	60
1,15	480
1,10	Regime permanente

*Valores em pu para tensão base de 230kV.

Para sobretensões com durações inferiores a 10 ciclos da frequência fundamental, o valor das sobretensões transitórias não devem ser superiores ao nível de isolamento dos equipamentos, com uma margem de segurança de 15%.

Outro critério mais conservador também apontado em relatórios e estudos elaborados pelo ONS é o valor de referência de 1,4 pu em até 10 ciclos da frequência fundamental de 60Hz para transformadores e reatores de barramento, usado para sobretensões sustentadas. Na Tabela 7 seguem os menores níveis de isolamento encontrados nos equipamentos que compõem as subestações de distribuição 69 kV e 13,8 kV, considerando como valores-base a tensão nominal do sistema. Valores em pu tendo como base a tensão nominal de operação do sistema.

Tabela 7 – Nível de isolamento para os equipamentos especificados por fabricantes.

Valores em pu tendo como base a tensão nominal de operação do sistema.

U - Tensão nominal do sistema (kV efetiva)	69 kV	13,8 kV
Ur - Tensão máxima de operação (kV eficaz)	72,5 kV (1,05 pu)	15 kV (1,08 pu)
Uf - Nível de isolamento na frequência fundamental por 1minuto entre pólos ou entre pólo à terra (kV eficaz).	140 kV (4,25 pu)	34 kV (3,01 pu)
Up - Nível básico de isolamento (NBI) (kVcrista) 1,2µs /50µs	350 kV (5,07 pu)	110 kV (7,97 pu)

Para a realização deste estudo, utilizou-se o critério de suportabilidade apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Critério de suportabilidade para sobretensão de manobra adotado.

Critérios de suportabilidade dos equipamentos

Valor de 1,4 pu* em até 10 ciclos consecutivos da frequência fundamental de 60Hz

*Valores em pu para tensão base de 69 kV para os barramentos de alta tensão e 13,8 kV para os barramentos de média tensão.

3.4 Variáveis Observadas Durante Simulações

Análises sob patamar de leve carregamento proporcionam maiores níveis de sobretensão após o seccionamento de trechos do sistema elétrico (Jones, 1988).

Para cada cenário de manobras simuladas, algumas variáveis, declaradas na Tabela 9, e foram utilizadas na avaliação do cenário.

- Patamar de carga do sistema como um todo, apenas confirmando que sob patamar de leve carregamento proporcionam maiores níveis de sobretensão após o seccionamento de trechos do sistema elétrico (Jones, 1988).
- Percentual de carga nominal a ser energizada - após um desligamento passa a ser desconhecida a carga que será energizada. Variáveis como clima, duração do desligamento, tipo de carga (residencial, rural, comercial, industrial, entre outras) passam a influenciar no comportamento da carga após um desligamento. Assim, considera-se a variação da carga em relação ao seu valor anterior ao desligamento.
- Banco de Capacitor - a presença do banco de capacitor tem influência direta nas sobretensões. Em um sistema de distribuição algumas subestações não possuem o recurso para desconexão do banco de capacitores sem que haja tensão CA nos serviços auxiliares. Atualmente desenvolvem-se na Energisa PB projetos de melhoria para instalação de sistema de proteção para o desligamento dos bancos de capacitores por falta de tensão.

Tabela 9 – Variáveis de simulação.

Parâmetros	Conjuntos de dados utilizados
Patamar de carregamento do sistema	Leve
Percentual de carga nominal a ser energizada	10% a 110%
Banco de capacitor	Conectado; desconectado
Quantidade de Subestações energizadas	Local de levantamento da resposta em frequência (local de aplicação da fonte de frequência variável)

3.5 Construção de Base de Dados para Simulação em Massa usando Matlab e ATP

Para o uso operacional da ferramenta computacional de simulação de transitórios eletromagnéticos, para este trabalho foi utilizado o ATP, e no mínimo três etapas são necessárias:

- Preparação de um arquivo (.atp) como entrada de dados contendo informações organizadas de forma sistemática que modela eletricamente elementos de um

sistema elétrico de potência e suas conexões como também, designação de locais de medição;

- ii. Execução do arquivo de entrada (.atp) no programa ATP;
- iii. Coleta de informações em arquivos de saída (.dat, .lis e .pl4).

Para abranger o maior número de cenários de recomposição é necessário um número significativamente grande de simulações que varia de acordo com a quantidade de variáveis envolvidas. Para facilitar a execução das simulações, empregando o ATP, utilizando-se uma metodologia para construção de base de dados baseada no método proposto por SOUZA et al. (2005).

A metodologia toma como base a reprodução de arquivos (.atp), para cada cenário de simulação, fazendo o uso da função \$PARAMETER que possibilita agrupar as variáveis de simulação no início do arquivo (.atp). Com essa rotina, é possível transformar as constantes de cada cenário de simulação em variáveis.

Um arquivo (.atp) com o sistema em estudo modelado serve de molde para a construção dos demais arquivos, alterando-se as respectivas variáveis para cada cenário de recomposição. O processo descrito, embora simples, é repetitivo e, caso seja executado manualmente, além da demanda de esforço considerável é sujeito a erros.

O uso da função \$PARAMETER possibilita automatização do processo de construção dos arquivos (.atp). Programa-se uma rotina usando MATLAB® cujo princípio de funcionamento baseia-se no fornecimento das variáveis de simulação e na escolha de um arquivo modelo para gerar todos os cenários de recomposição desejados. A rotina processa os arquivos da seguinte forma:

- i. Definidos faixa e valores das variáveis, arquivo modelo e tipo de simulação: Varredura na frequência (*frequency scan*) ou estudo estatístico (*statistic switch*);
- ii. Abre o arquivo-modelo e cria um novo arquivo (.atp), no qual serão transcritas linhas específicas encontradas nos limites da rotina \$PARAMETER do ATP, que atribuem valores às variáveis de cada cenário.
- iii. Finalizada a mudança de variáveis linha a linha do arquivo-modelo, que estão fora da rotina \$PARAMETER do ATP são transcritas para o novo arquivo (.atp) que é salvo usando uma nomenclatura que possibilite a

rastreabilidade, identificando o tipo e cenário de simulação que está representado.

- iv. Em sequência a execução dessa rotina também é criado um arquivo em lote ou de processamento em lote, *batch file*, (.bat) que traz uma sequência de comando para posteriormente, de forma automática, executar a simulação de todos os arquivos (.atp) correspondentes a cada cenário definido, renomear os arquivos de dados do ATP seguindo a nomenclatura específica para identificação das condições de cada cenário de recomposição, e apagar os arquivos de saída do ATP que não são de interesse.

Após a execução do arquivo de processamento em lote o (.bat), e obtidas as saídas como dados gerados pela MODELS do ATP, uma outra rotina programada no Matlab® formata os dados para encontrar os pontos de ressonância de cada cenário simulado, gerando um banco de informações de cada cenário.

Uma visão do processo pode ser ilustrado nas Figuras 16 e 17.

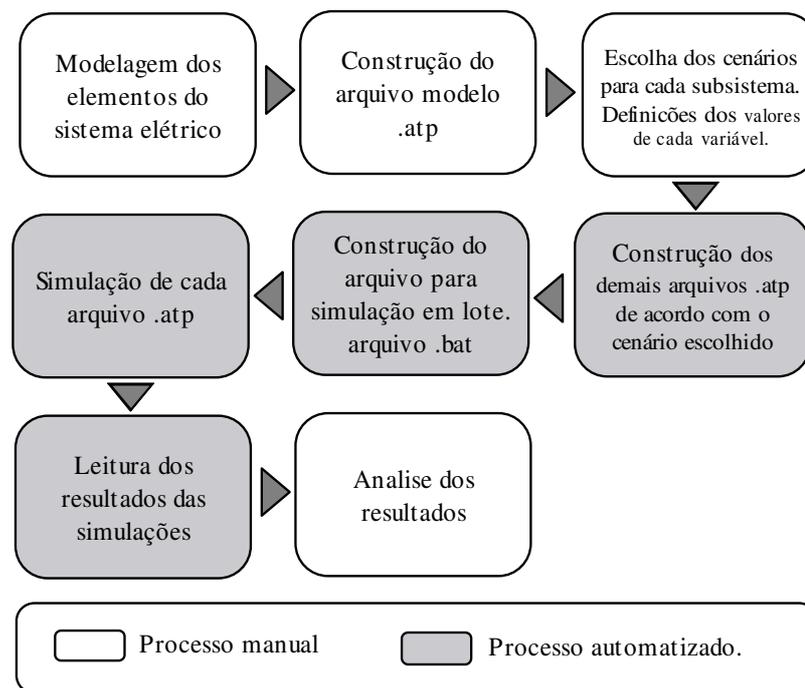


Figura 16 – Fluxograma de automatização do processo de construção da base de conhecimento

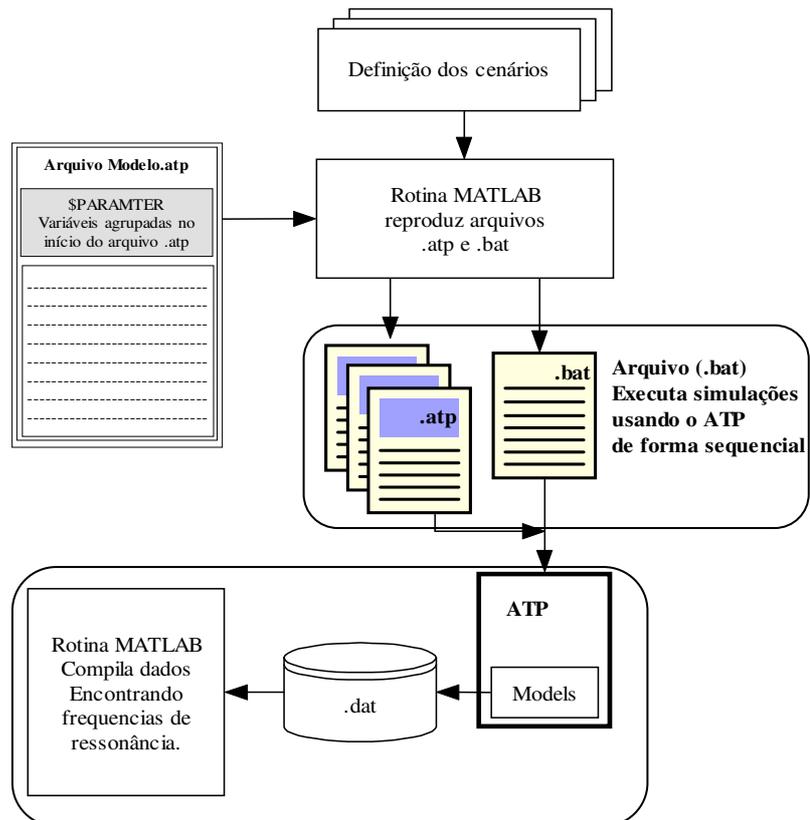


Figura 17 – Fluxograma de execução da rotina de construção da base de dados.

Capítulo 4

Aplicação e Resultado

Neste capítulo são apresentados resultados e análises de procedimentos de recomposição utilizando ferramentas e metodologia apresentadas anteriormente, aplicados a um sistema de distribuição real. Primeiramente, descreve-se a rede de distribuição em estudo e as manobra de recomposição que serão avaliadas.

4.1 Sistema Elétrico Estudado

Utilizando programa ATP para simulações de manobras, e a partir da modelagem de um sistema real, foi escolhido o regional Coremas do sistema de distribuição 69 kV da Energisa-PB, ilustrado na Figura 19. O estudo apresentado nesse trabalho tratou especificamente de subsistemas de distribuição do Regional Coremas (CMA) porque possui característica predominante radial e sazonalmente sofre desligamentos intempestivos, normalmente provocados para descargas atmosféricas.

Visando abranger a modelagem do sistema na área de interesse, os sistemas em 230kV e 500kV são representados até os equivalentes de sistemas, em subestações mais afastados do barramento de 69 kV da SE Coremas, garantindo uma melhor reprodução da resposta em frequência, e do amortecimento e amplitudes das sobretensões no sistema de distribuição em estudo que deriva da SE Coremas, conforme estudo realizado por Wilker (2009). Os equivalentes (dados de resistências e reatâncias, de sequência zero e positiva, calculados na frequência 60Hz) foram fornecidos pelo ONS, obtidos fazendo-se uso do programa ANAFAS (Análise de Falhas Simultâneas), do CEPEL. E foram representados nos barramentos de 500kV das Fortaleza II e Luiz Gonzaga e nos barramentos de 230kV das SE Fortaleza II e Bom Nome, sistema ilustrados na Figura 18.

Para as linhas de distribuição 69 kV utilizou-se modelo a parâmetros distribuídos constante na frequência, para todos os transformadores 69 kV/13,8 kV conexão delta-estrela aterrada (Dyn11). Usando o componente *Saturable Transformer* do ATP foi considerada a curva de saturação no lado de 13,8 kV conforme dados disponíveis nos

manuais do fabricante. Os disjuntores desse sistema foram modelados com chaves controladas por tempo. Os bancos de capacitores conectados ao barramento de 13,8 kV das subestações foram representados como três capacitores conectados em estrela isolada, e em serie com cada capacitância uma indutância de 5 μ H representando o reator limitador de corrente. Para evitar instabilidades numéricas do ATP foi conectada o centro da estrela à terra através de uma resistência de 1G Ω (Neves, et. al, 2009). Os pára-raios das linhas e transformadores não foram representados com o intuito de maximizar as sobretensões, apesar de que para o estudo em questão as sobtensões observadas provavelmente não provoquem o disparo do pára-raios.

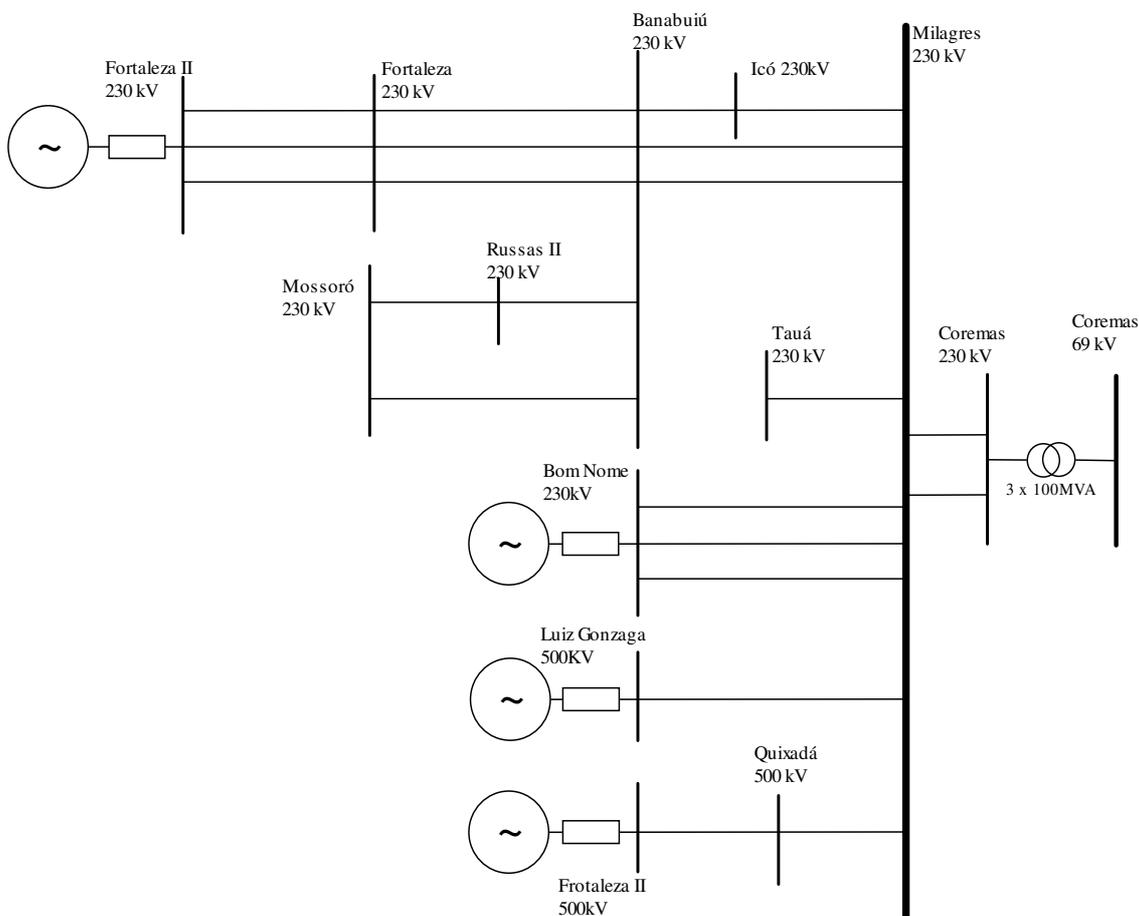


Figura 18 – Parte do sistema de transmissão 230 kV e 500 kV do regional norte do subsistema nordeste do SIN.

transitórias estão na faixa de 60 Hz a 20 kHz, conforme Tabela 10 de acordo com o relatório elaborado pelo CIGRÉ (1990). O passo de tempo de simulação necessário para capturar eventos de acordo com a máxima frequência que componha o evento que se deseja observar é garantido pela equação 1.

$$\Delta t \leq \frac{1}{(10 \cdot f_{max})} \quad (4)$$

Tabela 10 – Forma de onda e faixa de frequência de eventos. (CIGRÉ,1990)

Faixa de frequência	Forma da onda	Tipo de evento
0,1Hz a 1kHz	Baixa frequência oscilatória	Energização de Transformadores
0,1Hz a 3kHz	Baixa frequência oscilatória	Sobretensões Temporárias
60Hz a 20 kHz	Frente de onda lenta	Sobretensões Transitórias
10kHz a 3MHz	Frente de onda rápida	Surto atmosférico
100kHz a 50MHz	Frente de onda muito rápida	Chaveamento em Barramento isolado a SF6

As cargas foram representadas com modelo RL paralelo na frequência fundamental 60Hz. A escolha do modelo RL paralelo e não RL série, se dá pelo fato de obter uma melhor reprodução das amplitudes e amortecimentos quando comparado com registros oscilográficos (Neto & Fernandes, 2009).

Conforme exposto na sessão 2.3, a resposta em frequência para cargas representadas por circuitos RL série leva à impedâncias elevadas para frequência altas. As cargas foram conectadas ao barramento 13,8 kV das subestações e ao secundário de transformadores 13,8 kV/380 V. As demandas para o trecho do sistema em estudo são apresentadas no anexo I para o regional Coremas. No anexo II estão as curvas em regime permanente para verificação de tensões senoidal e nos limites de maior que 0,9 pu e menor que 1,1pu tomando como base as tensões nominais dos barramentos de 13,8 kV e 69 kV.

4.2 Carga Esperada Após Desligamento

Como comentado anteriormente a carga após um desligamento pode não ser a mesma que existia antes do desligamento, a depender do tipo de carga. Para ilustrar a variação

da carga após um desligamento, toma-se como exemplo um desligamento intempestivo em que houve a abertura do disjuntor 12Y2 da SE SGL desenergizando as SE CJZ, SPX e URN por um período de 1 hora e 24 minutos no horário de carga leve. Com a recomposição do sistema as cargas energizadas representavam 57% da carga prevista para aquele horário. Vale destacar que os dados apresentados foram capturados por sistema supervisorio, que tem objetivo operacional, e armazena dados de medição a cada 15 minutos, o que pode implicar em valores diferentes do apresentado. Confrontando com as informações observadas pelos operadores do centro de operação, no momento da ocorrência normalmente, é verificada uma carga menor no instante da energização. Na Figura 20 está ilustrada a curva de carga da ocorrência e curvas históricas dos mesmos dias da semana usadas para gerar a previsão da carga para o dia da contingência. Para previsão foi usada o valor inicial antes da ocorrência e uma regressão linear simples com bases nas curvas históricas.

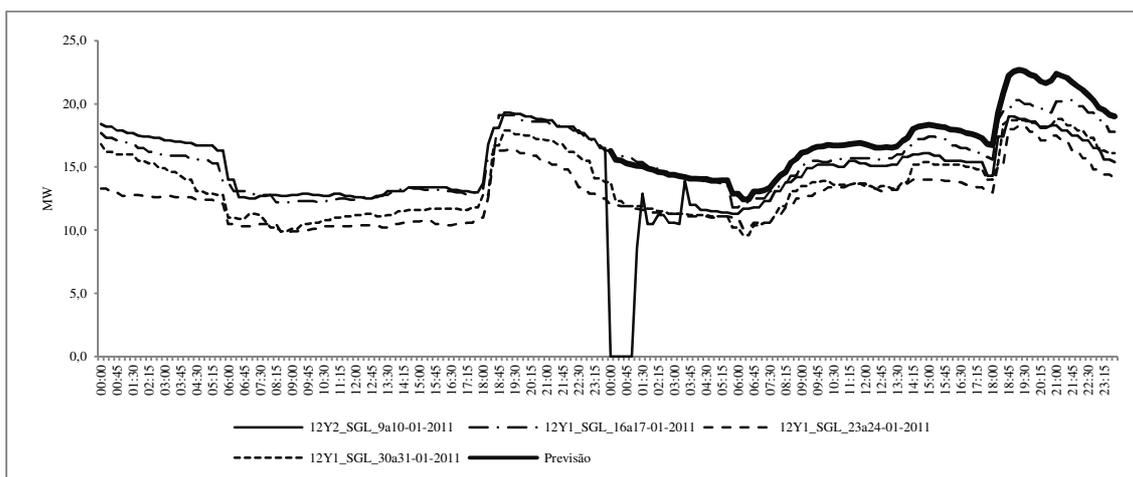


Figura 20 – Curvas de carga do fluxo de potência no disjuntor 12Y2 da SE SGL.

Na Figura 21 tem-se o comportamento da carga em outro exemplo de contingência em que houve a abertura do disjuntor 12Y2 da SE SGL desenergizando as SE CJZ, SPX e URN por um período de 36 minutos no horário de carga média. Com a recomposição do sistema, as cargas energizadas representavam 87% da carga prevista para aquele horário e logo alcançando o carregamento previsto.

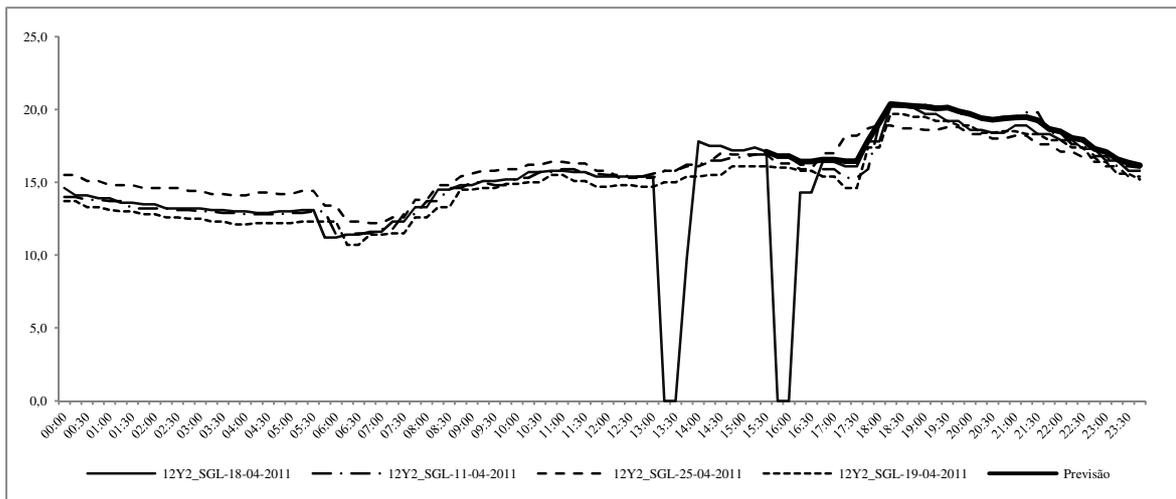


Figura 21 - Curva de carga em MW da potência que passa pelo disjuntor 12Y2 da SE SGL em horário de carga média.

Uma análise estatística detalhada com uma massa de dados mais confiáveis proveniente de oscilógrafias seria necessária para correlacionar o carregamento esperado, a duração da interrupção e o tipo de carga envolvida. Apesar de esta informação ser mais importância para estudos em regime permanente.

4.3 Primeiro Conjunto de Simulações – Circuito CMA - MLT

Considerando na Figura 22 o circuito formado pelas SEs CMA MLT, PTS, JTB e TXR do regional Coremas, onde se têm as LT 02J3CMA/MLT e 02J4 CMA/MLT energizadas em vazio. Será avaliada a manobra que consiste no fechamento do disjuntor 12J3 ou 12J4 da SE MLT energizando as subestações SE MLT, PTS, JTB e TXR. Será observando o comportamento das sobretensões ao fazer modificações no circuito quando ao carregamento e presença de bancos de capacitores.

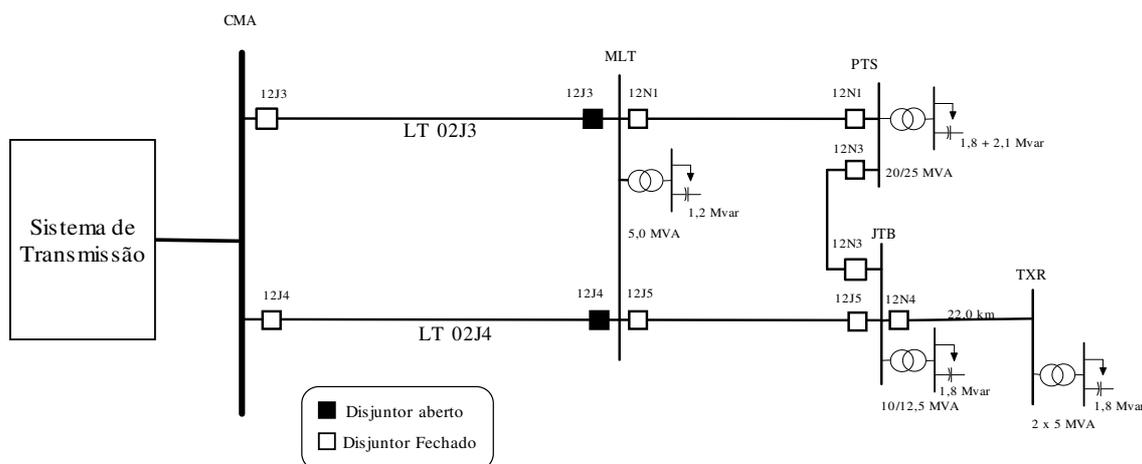
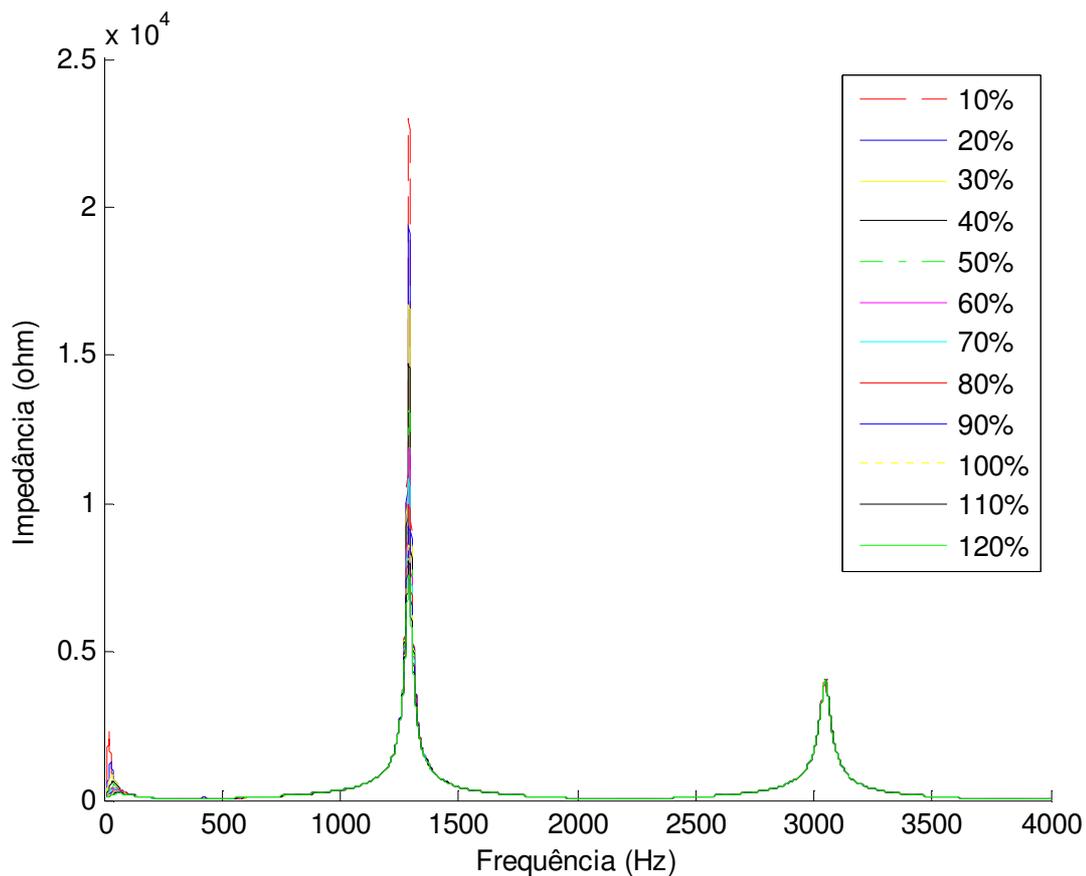


Figura 22 – Circuito 69 kV CMA-MLT do Regional Coremas.

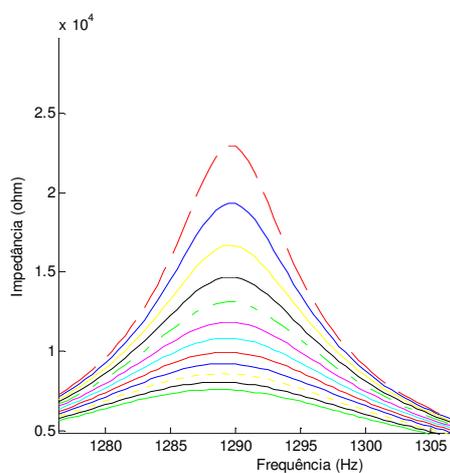
4.3.1 Avaliando o Efeito da Variação do percentual de Carga a ser Energizada

Com o objetivo de avaliar sobretensões do circuito CMA-MLT de acordo com carga remanescente das subestações a serem energizadas se faz a variação do percentual de carga remanescente de 10 a 120% da carga nominal, conforme Tabela 3. Essas cargas podem ser menores que o registrado antes da interrupção ou maior a depender da duração da interrupção e tipo de carga, como abordado nos item 2.3 e 5.2 deste trabalho.

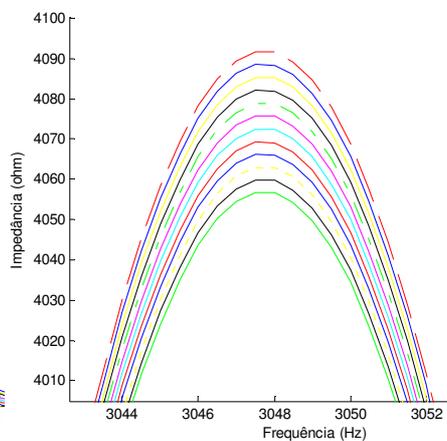
Na Figura 23(a) é possível observar que não há variação da frequência de ressonância com a variação do carregamento, apenas as amplitudes como se deixa evidente nas Figuras 23(b) e (c). Esse comportamento é perceptível em outras frequências de ressonância. E pode-se inferir que quanto menor o carregamento mais provável sobtensões mais severas. Na Figura 24 onde as curvas $Z(j\omega)$ ficaram sobrepostas, a resposta em frequência para injeção de corrente de sequência zero, não sofre alteração com o carregamento. Isso é justificado por que todas as cargas estão conectadas no secundário dos transformadores 69 kV/13,8 kV com conexão Dy11 que filtra as componentes de sequência zero. ω



(a)



(b)



(c)

Figura 23 – (a) Resposta em frequência (10 Hz a 4 kHz) vista do barramento 69 kV da SE MLT com injeção de corrente de sequência positiva no barramento 69 kV da SE MLT com o sistema à montante desconectado (disjuntores 12J3 e 12J4 da SE MLT abertos) sistema no patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados. (b) Detalhe do frequência de ressonância de 1.292Hz. (c) Detalhe do frequência de ressonância da frequência de 3.047Hz

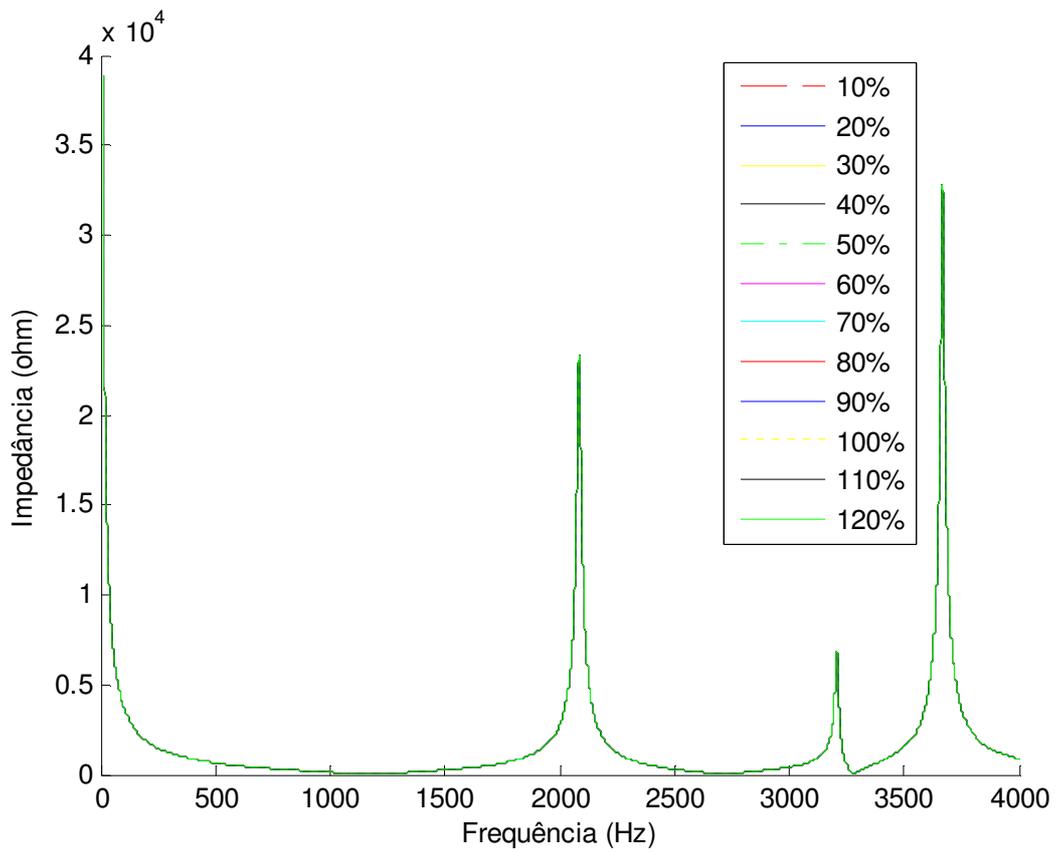


Figura 24 – Resposta em frequência (10 Hz a 4 kHz) vista do barramento 69 kV da SE MLT com injeção de corrente de seqüência zero no barramento 69 kV da SE MLT com o sistema à montante desconectado (disjuntores 12J3 e 12J4 da SE MLT abertos) sistema no patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados.

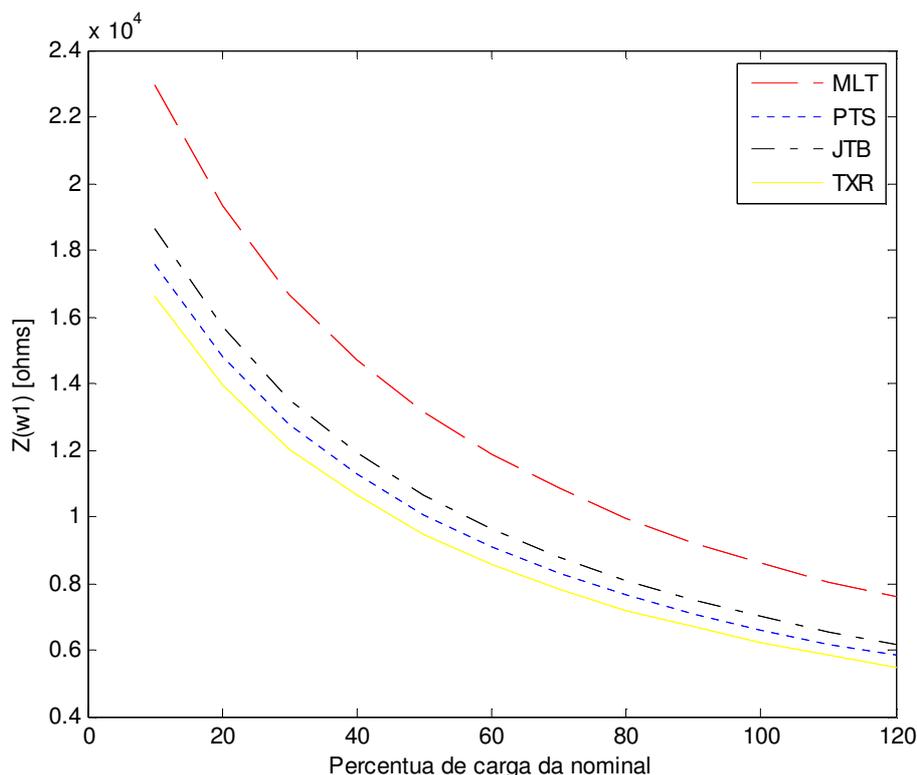


Figura 25 – Variação da amplitude da impedância para frequência de ressonância de 1290 Hz em função do carregamento em relação à carga nominal. Injeção de corrente de sequência positiva no barramento 69 kV da SE MTL

Na Figura 25 pode-se perceber que a variação da amplitude da impedância na frequência de 1290Hz tem um decaimento exponencial com o percentual da carga, indicando forte sensibilidade ao carregamento do sistema.

Feita uma varredura em frequência com a injeção de correntes de sequência positiva e zero em cada barramento 69 kV do circuito CMA - MLT (Figura 23) como se observa nas Figura 26 (a) e (b), as amplitudes das impedâncias $z(j\omega)$ são maiores no barramento da SE TXR que em outros barramento, o que indica possíveis sobretensões de maior amplitude.

A resposta de sequência positiva vista do lado de alta tensão (69kV) tem maior representatividade para essa constatação, pois devido à conexão delta-estrela do transformador, as contribuições para a componente de sequência zero do secundário do transformador são filtradas, como o efeito do banco de capacitores e variação das cargas.

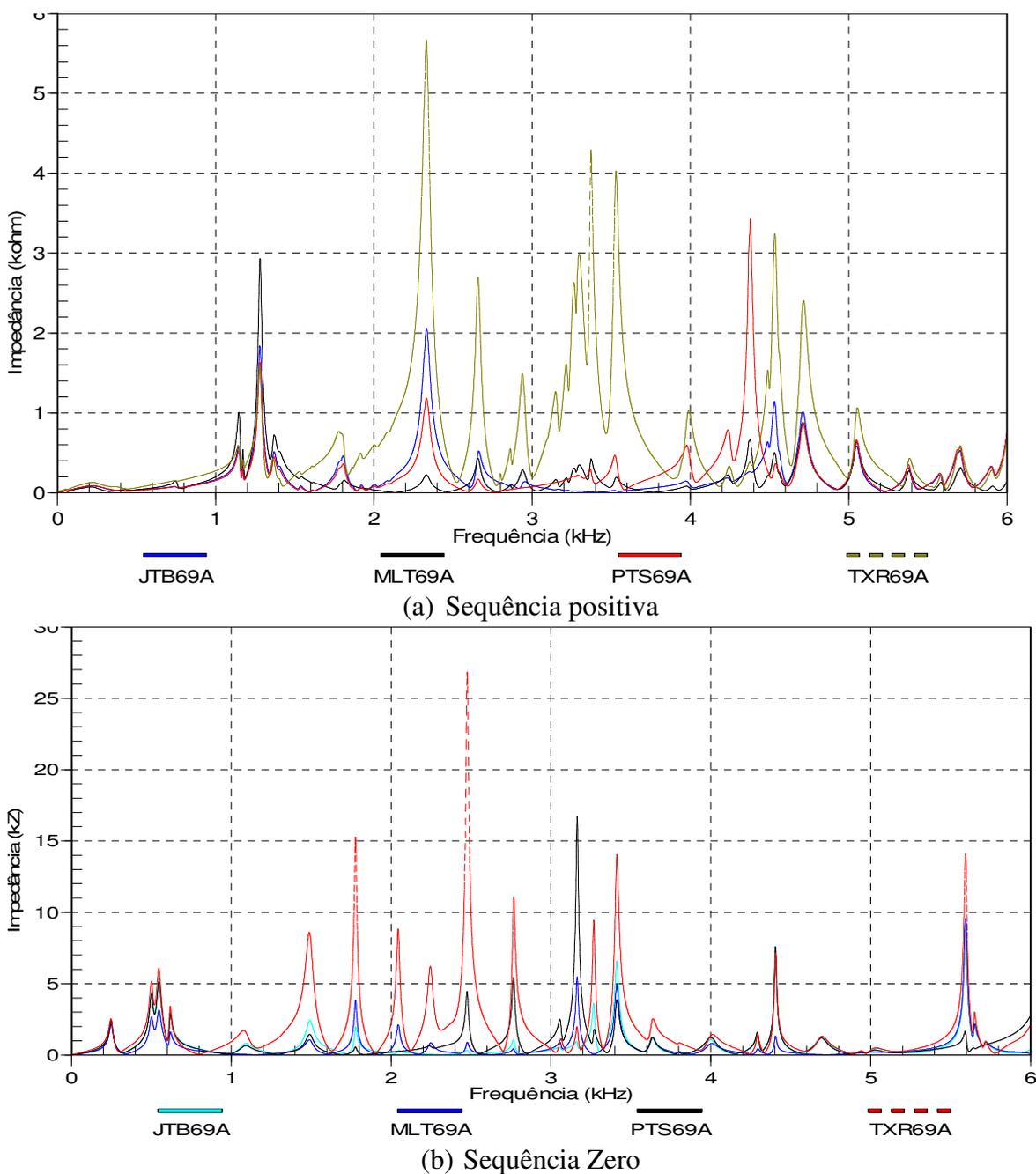


Figura 26 – Resposta em frequência (10 Hz a 6 kHz) pela injeção de corrente de seqüência positiva (a) e zero (b), nos barramento 69 kV da SE MLT, PTS, JTB e TXR com o sistema à montante conectado. Carregamento de 10 % do nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados.

Na Figura 27 observa-se a varredura em frequência em cada barramento de 13,8 kV do circuito CMA-MLT e se obtém a mesma constatação que as maiores sobretensões estão no barramento da SE TXR.

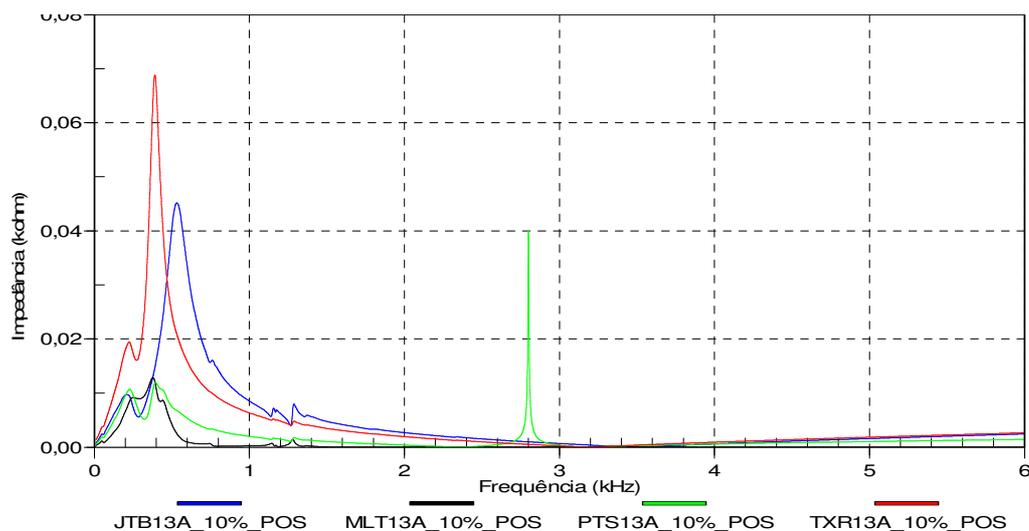


Figura 27 – Resposta em frequência (10 Hz a 6 kHz) pela injeção de corrente de seqüência positiva, nos barramento 13,8 kV da SE MLT, PTS, JTB e TXR com o sistema à montante conectado. Carregamento de 10 % do nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados.

4.4 Segundo Conjunto de Simulações – Circuito CMA – SGL

Considerando na Figura 28 o circuito formado pelas SEs CMA, SGL, SZA, CJZ, SPX e URN do regional Coremas, onde temos as LT 02J9CMA/SGL e 02J8 CMA/SGL energizadas em vazio. Será avaliada a manobra que consiste no fechamento do disjuntor 12J8 ou 12J9 da SE SGL energizando as subestações SE SGL, SZA, CJZ, SPX e URN. Será observado o comportamento das sobretensões com a variação do carregamento e presença de bancos de capacitores.

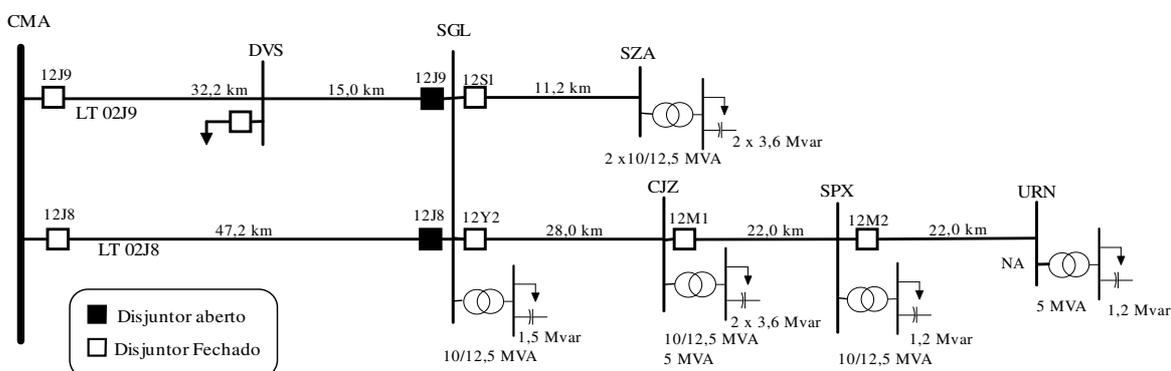
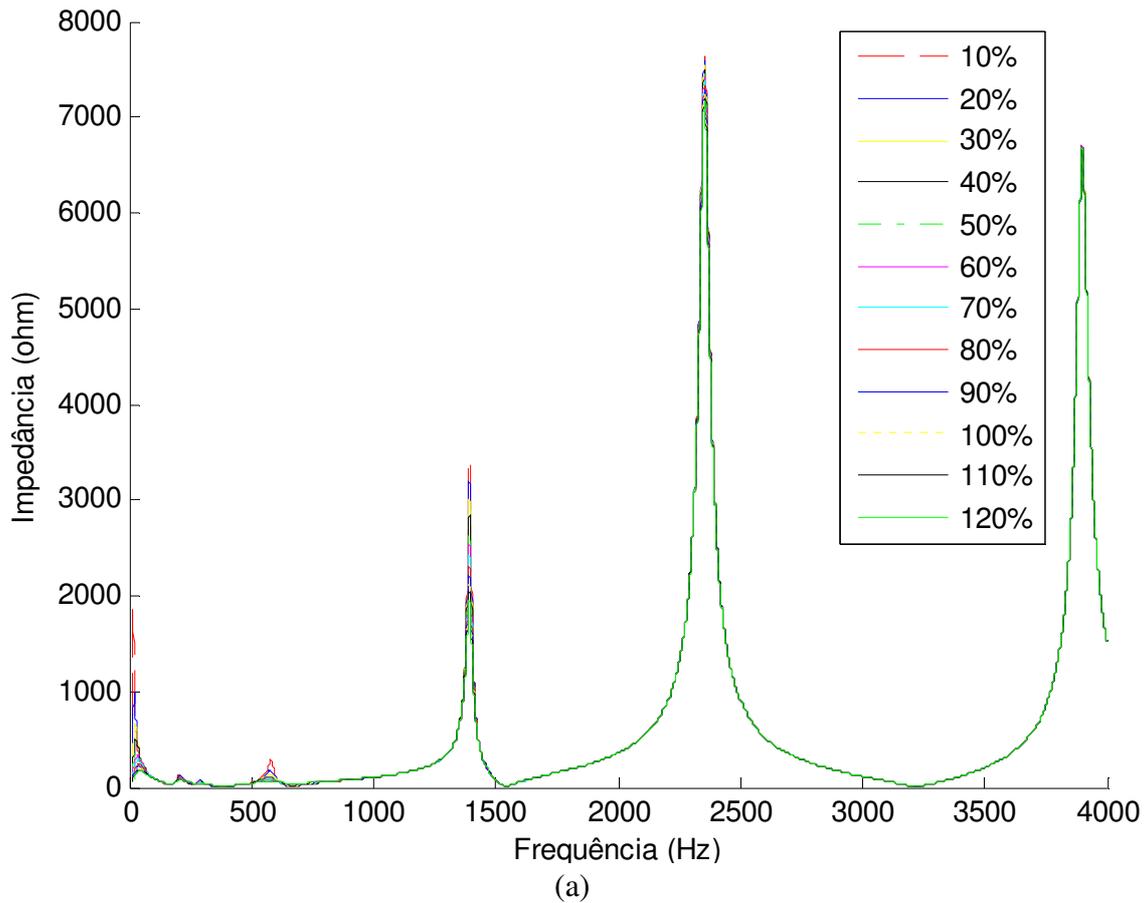


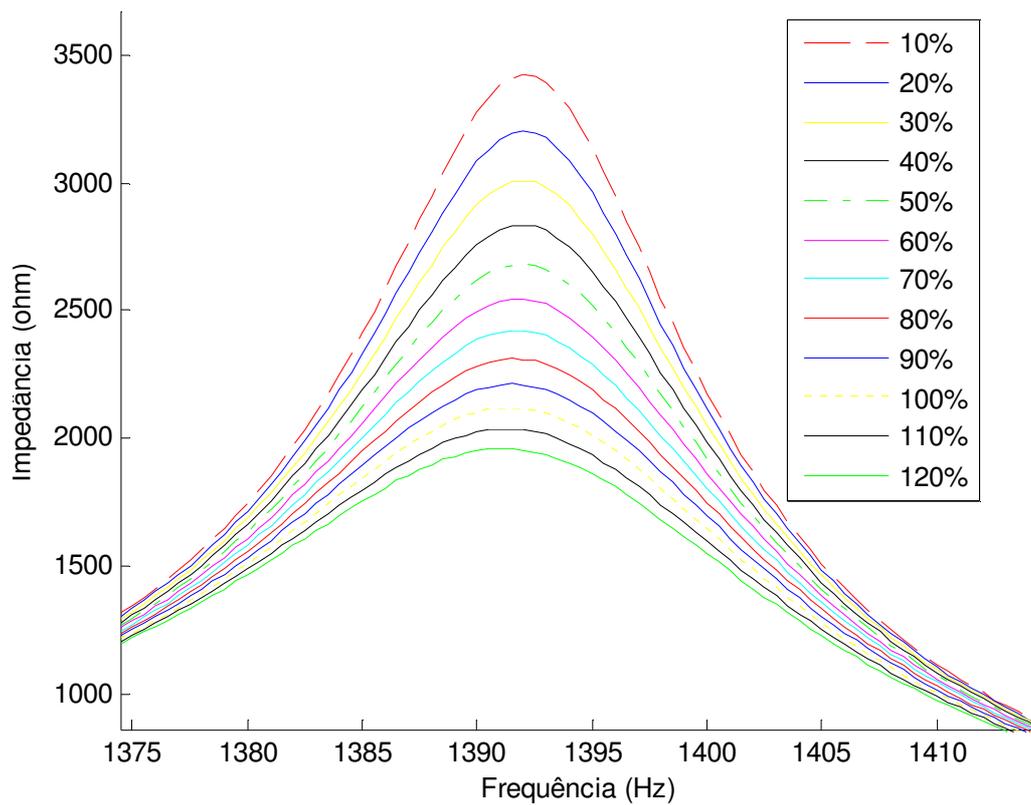
Figura 28 - Subsistema Coremas - São Gonçalo

O comportamento observado no primeiro conjunto de simulações repete-se para todo o sistema de distribuição (ver Figura 29). Na Figura 30 observa-se a comparação

entre resposta em frequência no barramento 69 kV das SE SGL, SZA, CJZ, SPX e URN com o sistema completo. E constata-se que o barramento da SE URN apresenta maior probabilidade de sobretensões mais severas.

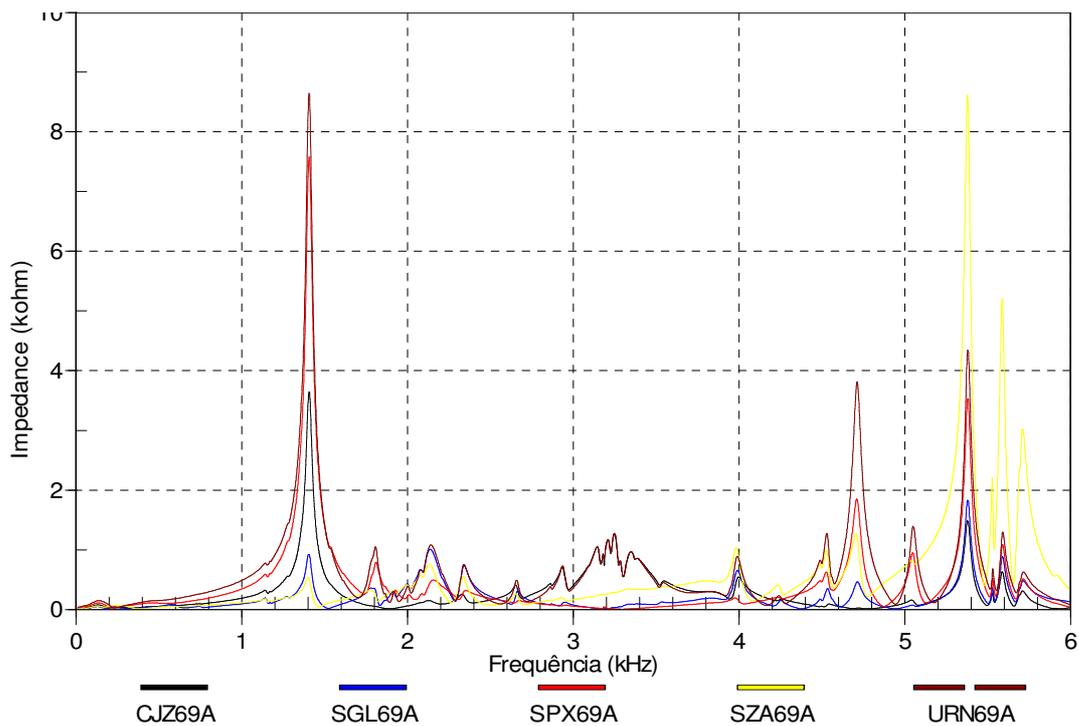
Como dito anteriormente a resposta de sequência positiva vista do lado de alta tensão (69kV) tem maior representatividade para essa constatação.



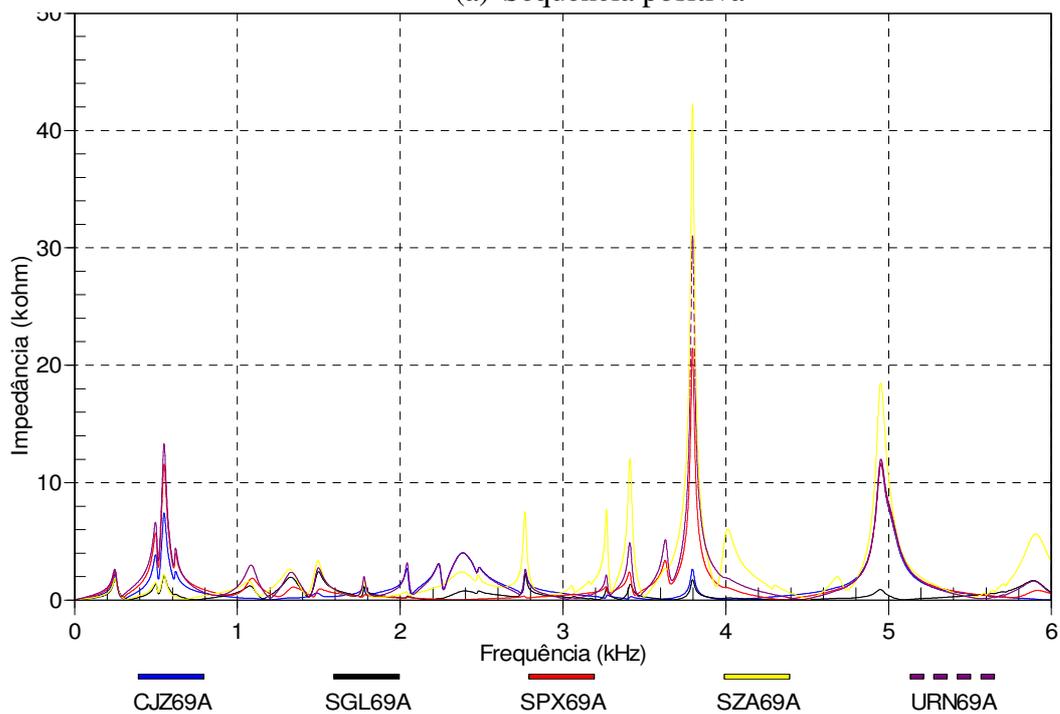


(b)

Figura 29 – (a) Resposta em frequência (10 Hz a 4 kHz) vista do barramento 69 kV da SE SGL com injeção de corrente de sequência positiva no barramento 69 kV da SE SGL com o sistema à montante desconectado (disjuntores 12J8 e 12J9 da SE SGL abertos) sistema no patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados. (b) Detalhe da frequência de ressonância da frequência de 1.395Hz



(a) Sequência positiva



(b) Sequência zero

Figura 30 – Resposta em frequência (10 Hz a 6kHz) pela injeção de corrente de seqüência positiva (a) e zero (b), nos barramentos 69 kV da SE SGL, CJZ, SPX, URN e SZA com o sistema à montante conectado. Carregamento de 10% do nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados.

4.5 Terceiro Conjunto de Simulações – Circuito CMA – PBL

Considerando na Figura 31 o circuito formado pelas SEs CMA, PBL, JRC, CTR, BJC, PLT e SBT do regional Coremas. Onde tem-se as LT 02J1CMA/PBL e 02J2 CMA/PBL energizadas em vazio. Será avaliada a manobra que consiste no fechamento do disjuntor 12J2 da SE PBL energizando as subestações SE PBL, JRC, CTR, BJC, PLT e SBT. Será observado o comportamento das sobretensões ao realizar a variações no circuito quanto ao carregamento e presença de bancos de capacitores.

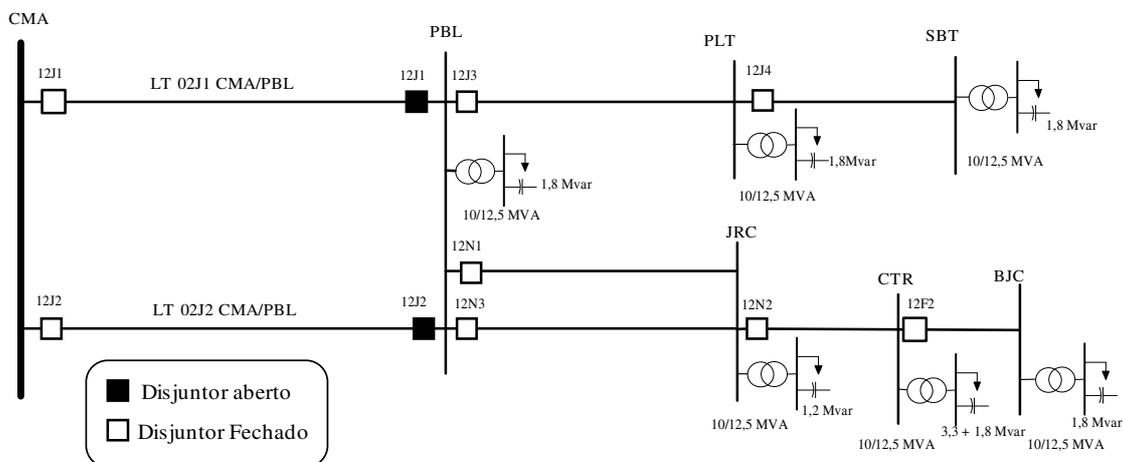


Figura 31 - Circuito 69 kV CMA-PBL do Regional Coremas

Nas Figuras 32 são observados, como esperado, os mesmos comportamentos quanto ao carregamento apresentado nos casos anteriores. Na Figura 33 observa-se a comparação entre resposta em frequência no barramento 69 kV das SE PBL, JRC, CTR, BJC, PLT e SBT com o sistema completo. E constatam-se os barramentos das SE SBT e SE CTR com maior probabilidade de sobretensões mais severas.

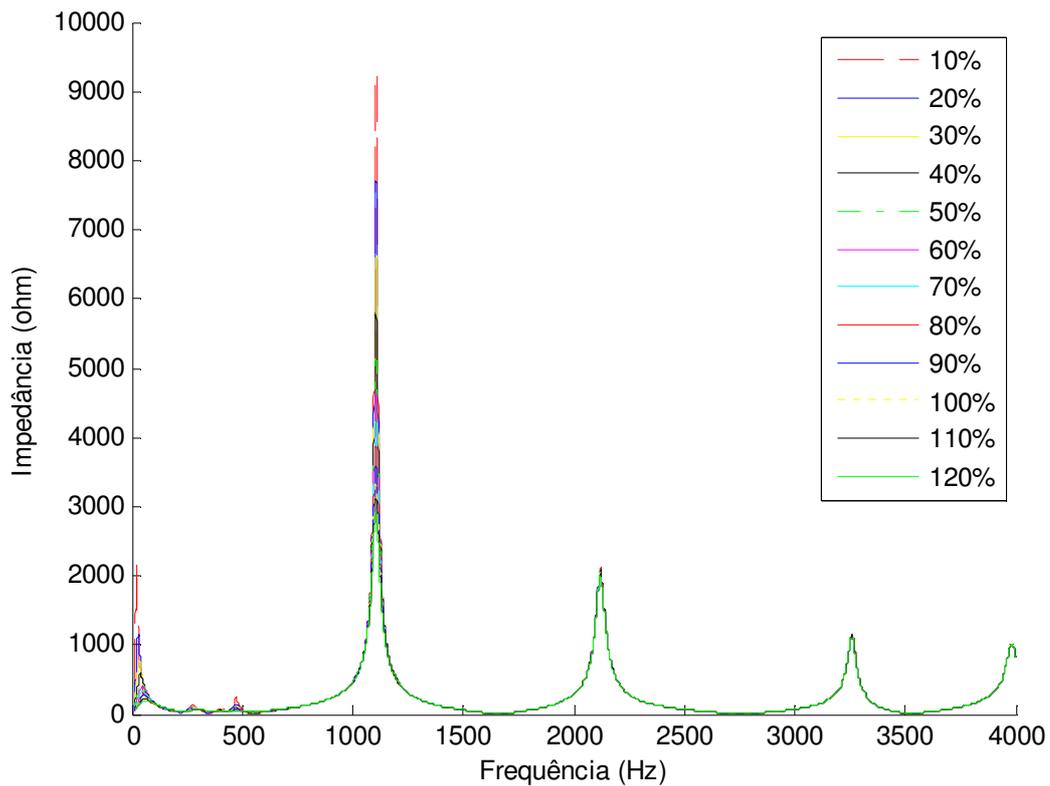
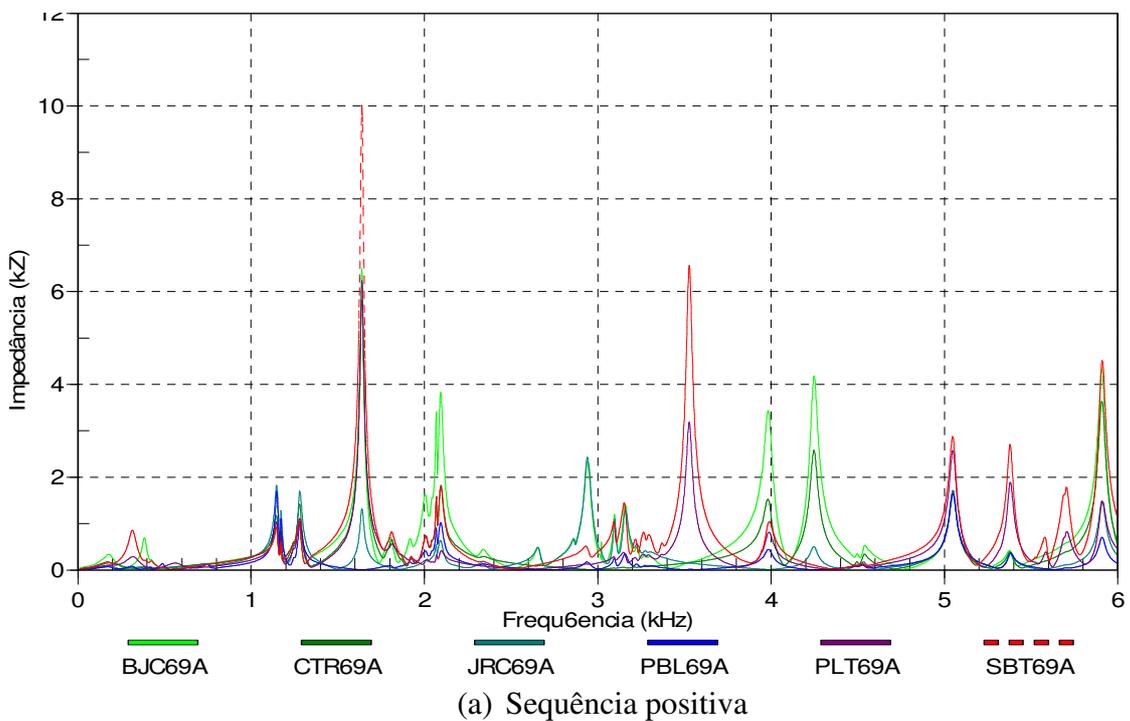
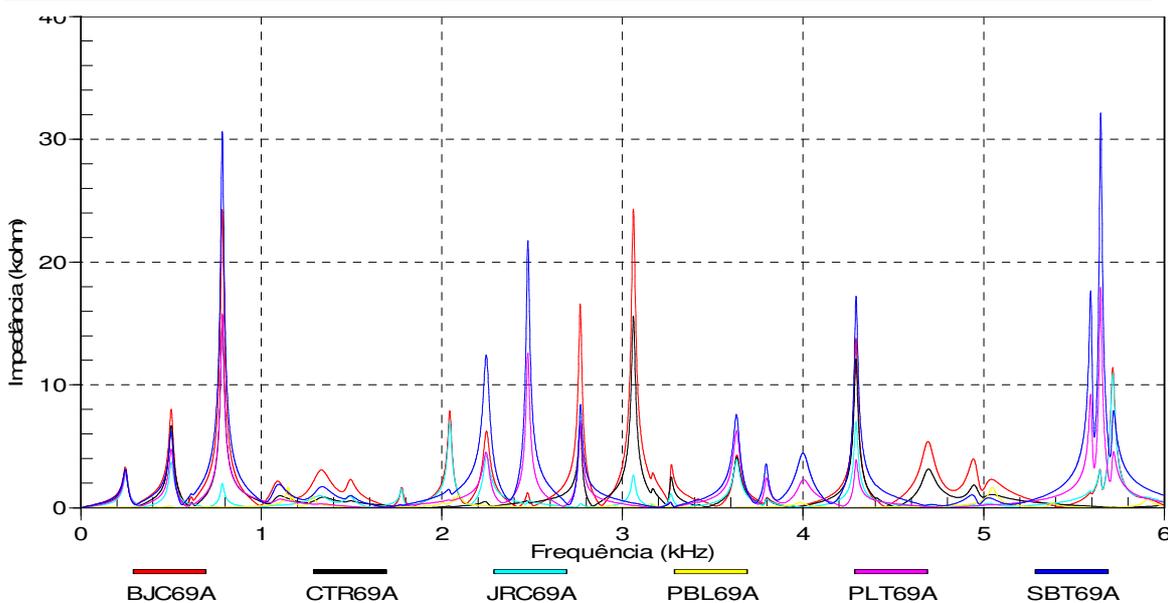


Figura 32- Resposta em frequência (10 Hz a 4 kHz) vista do barramento 69 kV da SE PBL como injeção de corrente de sequência positiva no barramento 69 kV da SE PBL com o sistema à montante desconectado (disjuntores 12J1 e 12J2 da SE PBL abertos) sistema no patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados.



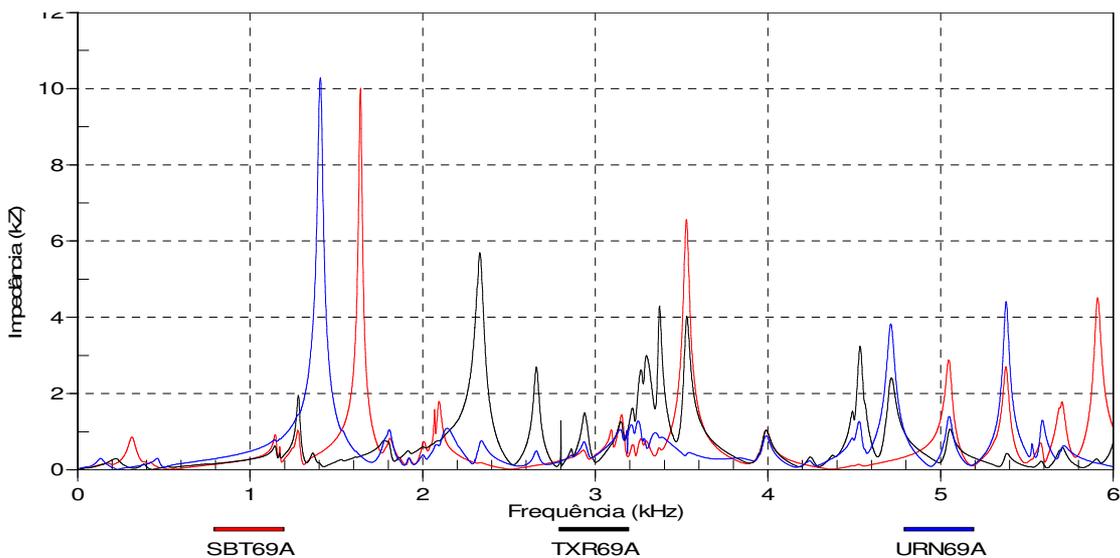


(b) Sequência zero

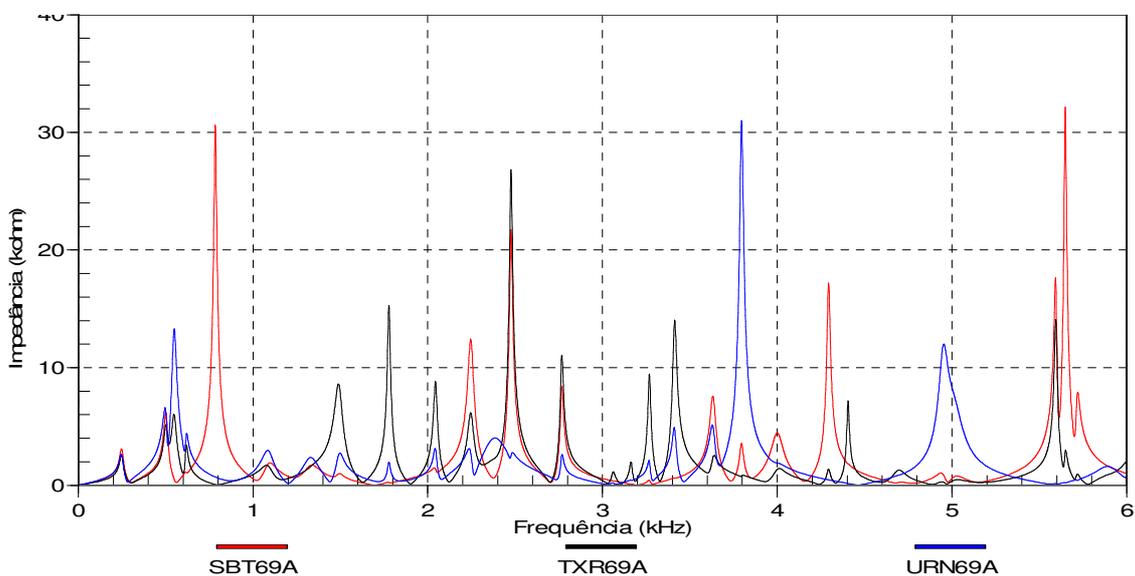
Figura 33 – Resposta em frequência (10 Hz a 6kHz) pela injeção de corrente de sequência positiva (a) e zero (b), nos barramentos 69 kV da SE PBL, JRC, CTR, BJC, PLT e SBT com o sistema à montante conectado(sistema completo). Carregamento remanescente nestas subestações de 10% do nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados.

4.6 Comparações Entre Resposta em Frequência Entre Barramento de Circuitos Diferentes

Na Figura 34 foi apresentada uma comparação entre as respostas em frequência dos barramentos que apresentaram respostas mais severas quanto à sobretensão nos barramento 69 kV das SE TXR, SBT e URN. Observa-se que a resposta para o barramento da SE URN é mais provável a ter maior sobretensão. A partir dessa informação nas próximas seções será verificado no domínio do tempo o comportamento da tensão na SE URN para avaliação quanto aos limites de suportabilidade dos equipamentos. De acordo com essa avaliação é possível fazer inferência para os demais casos.



(a) Sequência positiva.



(b) Sequência zero

Figura 34 - Resposta em frequência (10 Hz a 6kHz) pela injeção de corrente de sequência positiva (a) e zero (b), nos barramento 69 kV da SE SBT, TXR e URN com o sistema à montante conectado. Carregamento de 10% do nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados

4.7 Determinando as Condições Mais Severas no Domínio do Tempo e Avaliação Usando critério de Amplitude e Amortecimento da Sobretensão

4.7.1 Barramento SE URN - Circuito CMA-SGL

Como constatado pelo estudo no domínio da frequência, o barramento da SE URN apresentará as maiores sobretensões entre os circuitos analisados.

Para este subsistema CMA-SGL (Figura 28), avaliam-se as amplitudes e amortecimentos das sobretensões mais severas nos barramentos 69 kV e 13,8 kV da SE URN. Para isso, foi realizado um estudo estatístico utilizando a rotina *Statistic Switch* do ATP. A manobra avaliada (descrito na seção 5.3) consiste no fechamento do disjuntor 12J8 da SE SGL energizando as SEs SGL, SZA, CJZ, SPX e URN, onde o disjuntor 12J8 será substituído por uma chave estatística usando parâmetros da Tabela 5.

Executando a rotina para construção da base de dados para simulação de cada cenário de carregamento conforme a Tabela 9, permitindo constatar a análise no domínio da frequência para todos os barramentos do subsistema CMA-SGL.

Na Tabela 11 é apresentado o resultado do estudo estatístico e como esperado as maiores sobretensões ocorrem nos barramentos da SE URN. Na Figura 35 é apresentado um histograma em que é possível observar que 46% das energizações com 10% de carregamento remanescente apresentaram sobretensões entre 3 e 3,15pu no barramento da SE URN e para o carregamento remanescente de 50%, (Figura 36) 68% das energizações apresentaram sobretensões em torno de 1,9 a 2,05 pu.

Tabela 11 – Resultado do estudo para o subsistema da CMA-SGL

Carga (%)	Barramento 69 kV (tensão base 69 kV)										Barramento 13,8 kV (tensão base 13,8 kV)									
	SGL		SZA		CJZ		SPX		URN		SGL		SZA		CJZ		SPX		URN	
	#	pu	#	pu	#	pu	#	pu	#	pu	#	pu	#	pu	#	pu	#	pu	#	pu
10	7	1,6	7	1,65	60	1,7	4	1,9	49	1,95	3	1,95	42	2,0	73	2,1	72	2,6	41	3,1
20	37	1,47	51	1,5	11	1,55	42	1,65	39	1,75	68	1,75	50	1,8	84	1,85	24	2,3	6	2,8
30	1	1,35	1	1,35	31	1,4	54	1,55	16	1,65	2	1,55	23	1,6	54	1,7	85	2,05	78	2,55
40	45	1,3	45	1,3	54	1,35	49	1,45	7	1,55	82	1,45	5	1,5	38	1,55	61	1,8	72	2,3
50	37	1,25	49	1,25	87	1,3	37	1,35	87	1,4	93	1,35	11	1,4	77	1,45	98	1,6	54	2,1
60	22	1,2	22	1,2	54	1,25	12	1,30	12	1,3	57	1,3	71	1,3	42	1,35	14	1,45	46	1,9
70	26	1,15	76	1,15	48	1,2	88	1,2	74	1,25	69	1,2	47	1,25	79	1,3	88	1,35	95	1,75
80	83	1,1	83	1,1	14	1,15	9	1,15	37	1,2	2	1,15	44	1,15	95	1,25	2	1,25	73	1,6
90	84	1,05	84	1,1	85	1,1	40	1,1	82	1,15	52	1,15	78	1,15	78	1,15	6	1,2	17	1,5
100	45	1,05	6	1,05	75	1,05	79	1,05	18	1,1	83	1,1	26	1,1	16	1,1	87	1,1	54	1,35
110	38	1,0	80	1,0	7	1,0	26	1,0	26	1,05	61	1,05	68	1,05	94	1,05	24	1,05	67	1,25

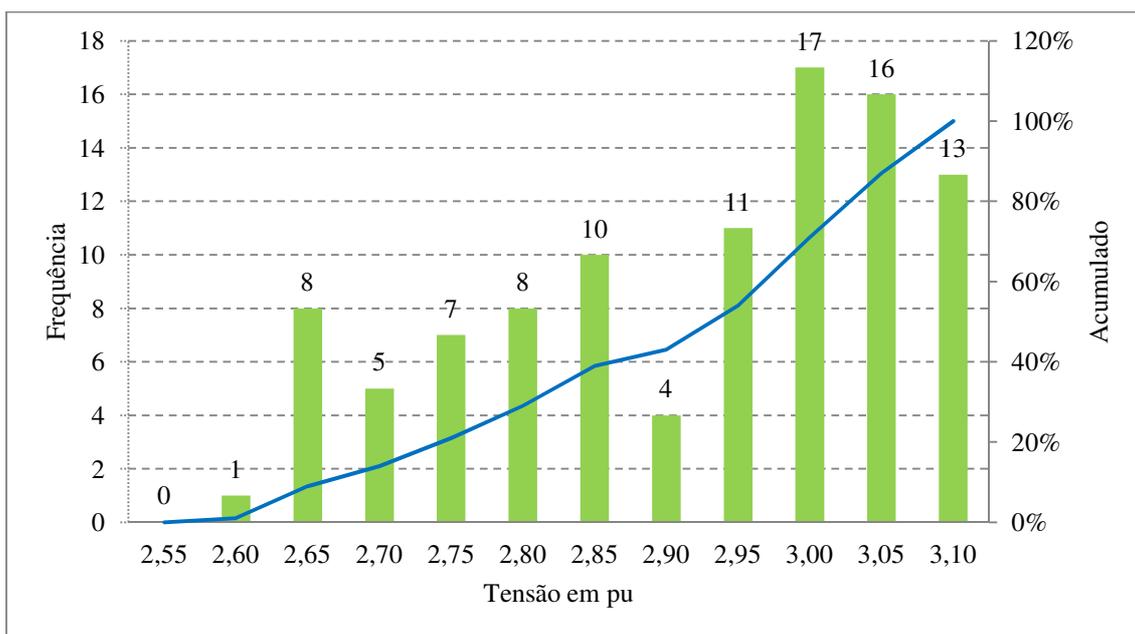


Figura 35 - Distribuição de probabilidade no barramento 13,8 kV SE URN 10% do carregamento nominal.

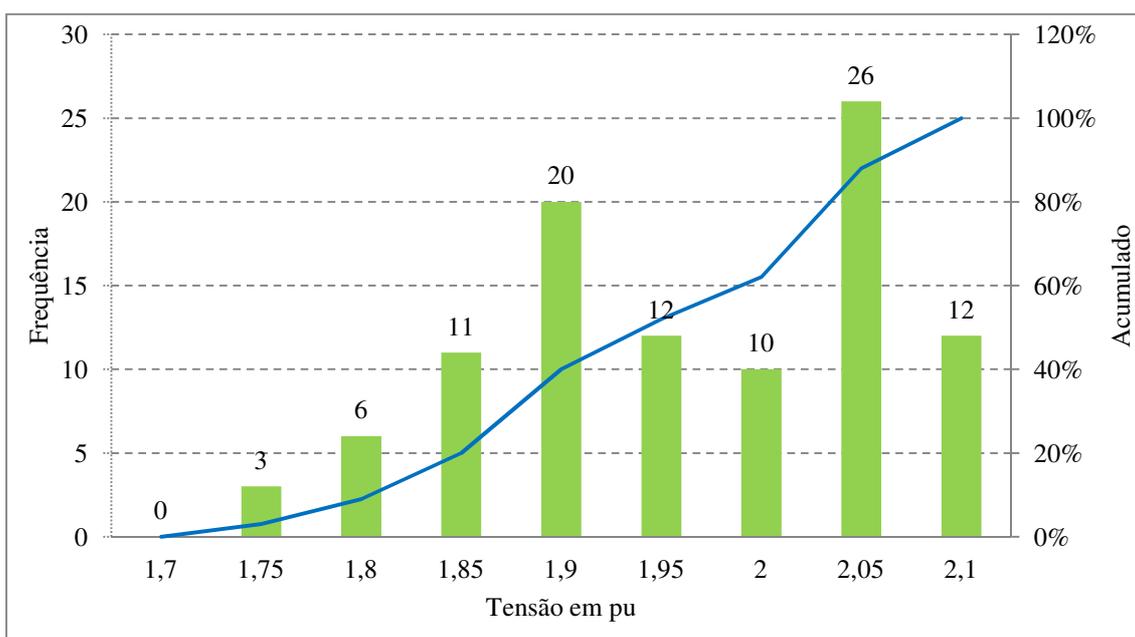


Figura 36 - Distribuição de probabilidade no barramento 13,8 kV SE URN 50% do carregamento nominal.

Fazendo uma simulação determinística usando o instante de fechamento do disjuntor (determinado em estudo estatístico) que provocou a maior sobretensão, conseguem-se as formas de onda no tempo para corrente e tensão dos casos mais severos. Assim, é possível verificar o amortecimento da tensão e comparar com os critérios de suportabilidade, ultrapassagem do limite de 1,4 pu por mais de 10 ciclos consecutivos

da frequência fundamental, apresentados na seção 4.3, Tabela 8. E para a corrente é possível fazer a sua decomposição harmônica de *Fourier* para ratificar e nortear as conclusões do estudo no domínio da frequência, Figura 39.

Na Figura 37 (a) observa-se que a amplitude da sobretensão ultrapassa o limite de 1,4 pu e tem amortecimento que permanece no limiar da suportabilidade, porém essa é uma situação extrema em que a subestação estaria praticamente sem carga.

Comparando-se com a Figura 37 (b) onde a carga remanescente é 50% da nominal (carga mais provável de ocorrer conforme histórico de constatação na operação em tempo real) para o patamar de carga leve observa-se um sobretensão dentro dos limites de suportabilidade havendo apenas um pico de tensão de 2,1 pu fortemente amortecido.

Para o barramento de 69 kV da SE URN existem apenas dois pico de ultrapassagem do valor de referência de 1,4 pu e logo em seguida é amortecido, portanto não caracterizando uma violação dos limites de suportabilidade quanto a sobretensão, ver Figura 38.

Tomando como base os resultados para investigação sobre as sobretensões nos barramentos da SE URN, é possível inferir que também não haverá problemas de violação dos limites de suportabilidade dos outros subssistemas (CMA-MLT e CMA-PBL). Para constatar essa inferência nas seções 5.8.1 e 5.8.2 são apresentados os resultados dos estudos estatísticos e determinísticos executados para os subsistemas CMA-MLT e CMA-PBL.

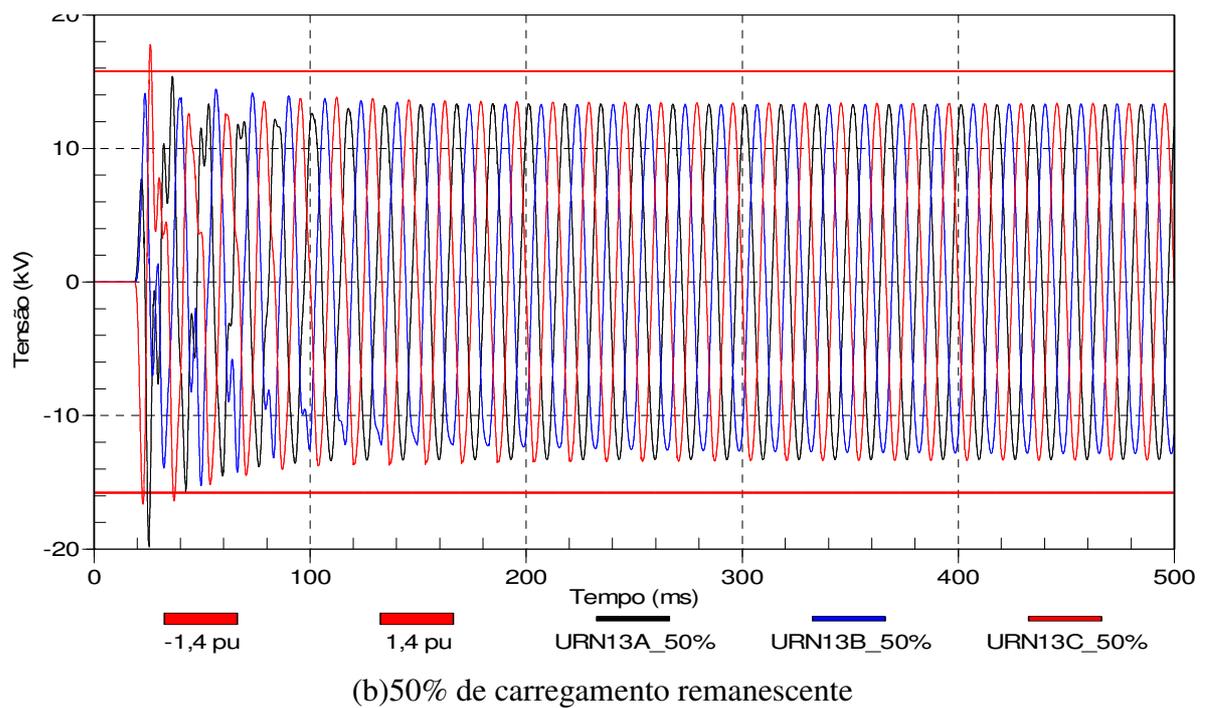
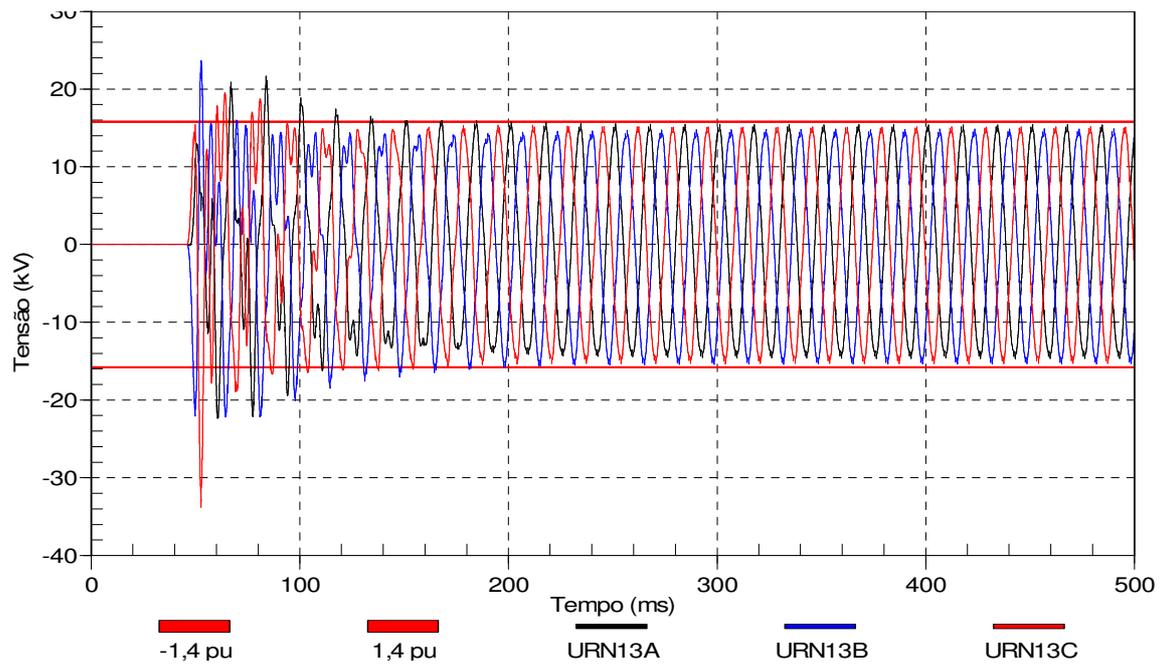
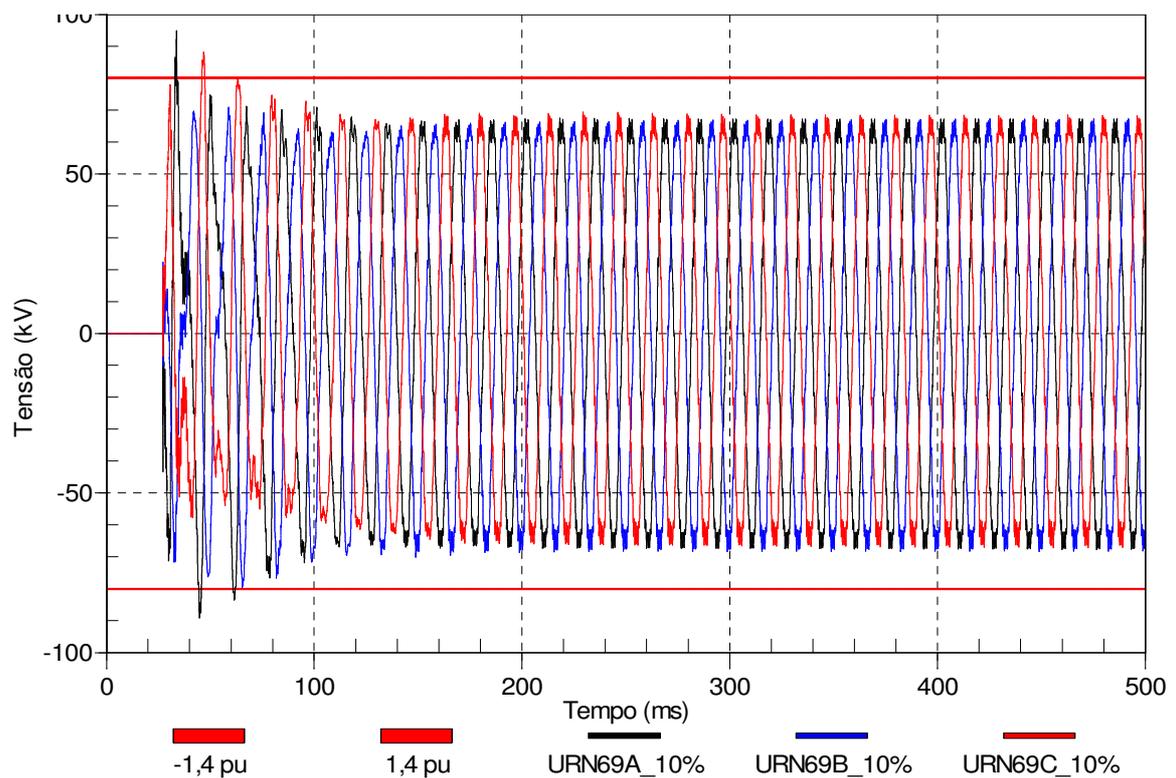
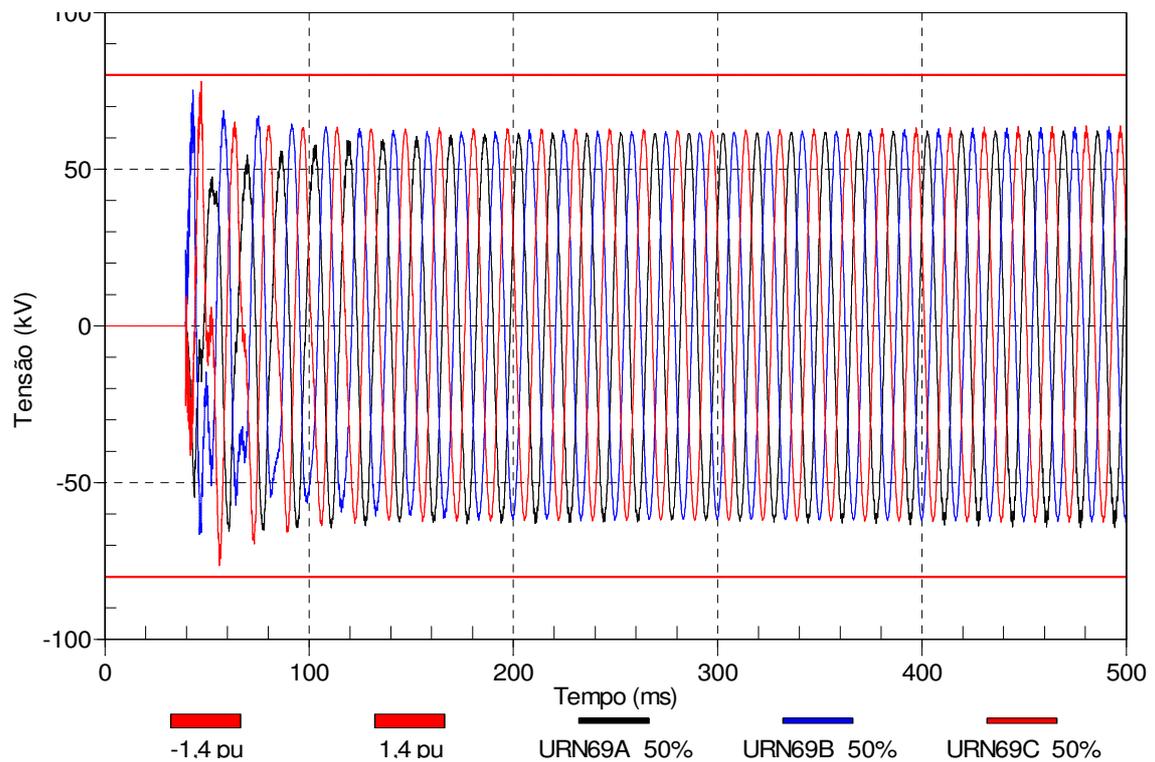


Figura 37- Tensão no barramento 13,8 kV da SE URN com o fechamento do disjuntor 12J8 da SE SGL energizando o sistema com (a) 10% da carga nominal e (b) 50% para o patamar de carga leve. Energização número 41 (a) e 46 (b) do estudo estatístico, sobretensão de maior amplitude no barramento 13,8 kV da SE URN.



(a) 10% de carregamento



(b) 50% de carregamento

Figura 38 - Tensão no barramento 69 kV da SE URN com o fechamento do disjuntor 12J8 da SE SGL energizando sistema com (a) 10% da carga nominal e (b) 50% para o patamar de carga leve. Energização número 49 (a) e 87 (b) do estudo estatístico, sobretensão de maior amplitude no barramento 13,8 kV da SE URN.

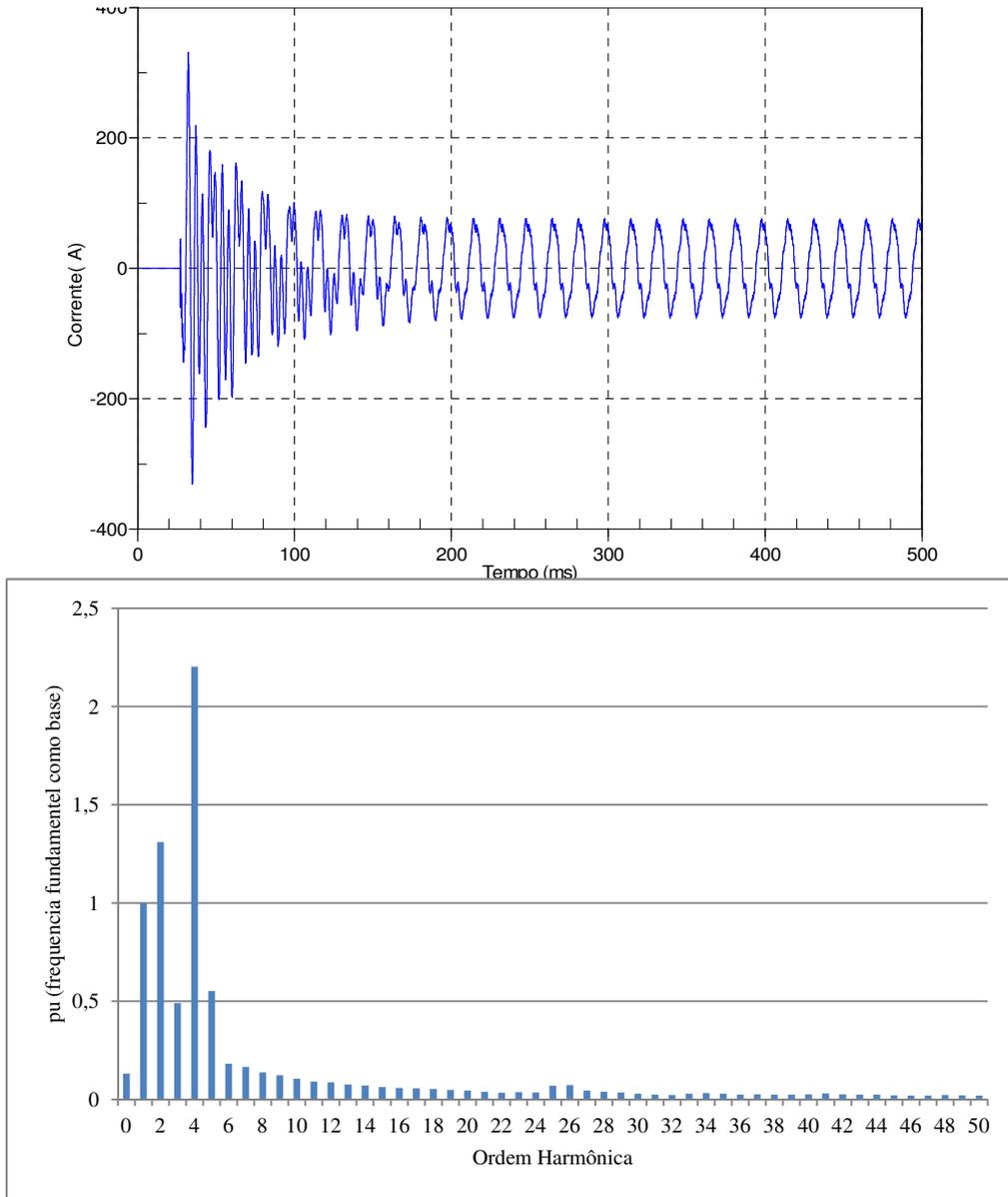


Figura 39 – Corrente da energização da SE URN como 10% da carga nominal no patamar de carga leve, energização nº 49 e sua decomposição harmônica. no intervalo de tempo [0,032 a 0,05ms] correspondente aos 4 primeiros ciclos da fundamental.

4.7.2 Barramento SE TXR - Circuito CMA-MLT

Nos mesmos moldes que foram executados os estudos estatísticos e determinísticos para o subsistema CMA-SGL foram realizados para o circuito CMA-MLT. E para a corrente é possível fazer a sua decomposição harmônica de *Fourier* para ratificar e nortear as conclusões do estudo no domínio da frequência, ver Figuras 43 e 44.

NA Tabela 12 é apresentado o resultado para o estudo estatístico confirmando maior sobretensão nos barramento da SE TXR e menor que os observado nos barramento da SE URN.

Tabela 12 – Resultado do estudo estatístico Energização a partir do disjuntor 12J3 da SE MLT energizando as SE MTL, PTS, JTB e TXR. Sistema no patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados.

Carga (%)	Barramento 69 kV (tensão base 69 kV)								Barramento 13,8 kV (tensão base 13,8 kV)							
	MLT		PTS		JTB		TXR		MLT		PTS		JTB		TXR	
	#	pu	#	pu	#	pu	#	pu	#	pu	#	pu	#	pu	#	pu
10	90	1,55	90	1,7	90	1,75	58	1,85	81	1,9	76	2,0	81	1,95	51	2,15
20	80	1,5	54	1,6	80	1,6	41	1,75	89	1,7	21	1,8	70	1,7	18	1,9
30	48	1,4	81	1,5	81	1,55	71	1,65	54	1,55	76	1,65	61	1,55	83	1,75
40	73	1,35	15	1,45	15	1,45	10	1,55	25	1,4	72	1,5	6	1,45	13	1,65
50	25	1,3	67	1,4	67	1,4	30	1,5	11	1,35	7	1,4	99	1,4	78	1,55
60	91	1,25	23	1,35	5	1,35	68	1,45	53	1,3	90	1,35	88	1,3	26	1,45
70	61	1,2	43	1,3	6	1,3	24	1,4	94	1,2	1	1,3	12	1,25	33	1,4
80	45	1,2	58	1,25	58	1,25	36	1,3	57	1,2	88	1,2	51	1,2	86	1,3
90	21	1,15	43	1,2	45	1,2	91	1,3	74	1,15	98	1,15	95	1,15	67	1,25
100	20	1,1	3	1,15	70	1,15	35	1,25	49	1,1	57	1,15	12	1,1	54	1,2
110	92	1,1	41	1,1	41	1,1	67	1,2	79	1,05	82	1,1	13	1,05	49	1,15
120	85	1,05	68	1,05	2	1,1	84	1,15	65	1,05	20	1,05	14	1,05	20	1,1

- Número da energização da simulação estatística.

Foi feita uma simulação determinística tomando como base os resultados do estudo estatístico. Do mesmo modo que ocorreu para SE URN, na Figura 40 observa-se uma sobretensão que ultrapassa e permanece no limiar da suportabilidade, porém essa é uma situação extrema em que a subestação estaria praticamente sem carga e com o sistema no patamar de carga leve.

Comparando-se com a Figura 41 onde a carga remanescente é 50% da carga nominal no patamar de carga leve observa-se uma sobretensão dentro dos limites de suportabilidade.

Para o barramento de 69 kV da SE TXR (ver Figura 42) existe apenas um pico de ultrapassagem do valor de referência de 1,4 e logo em seguida é amortecido não caracterizando uma violação dos limites de suportabilidade.

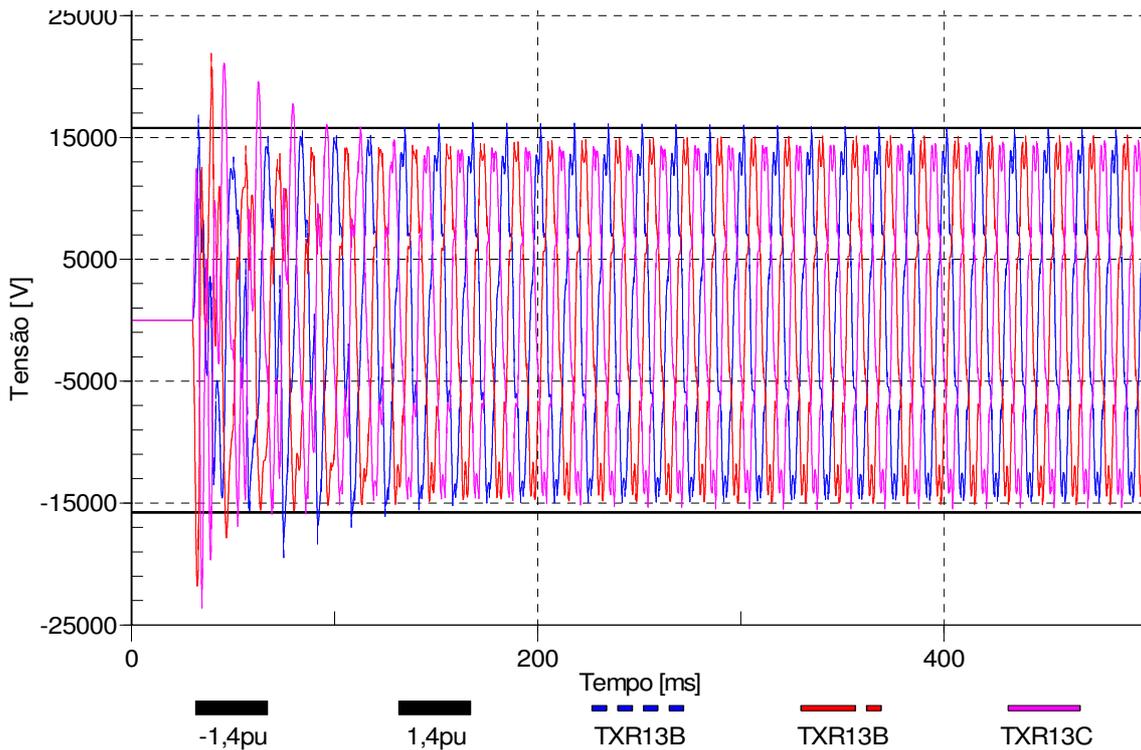


Figura 40 – Tensão no barramento 13,8 kV da SE TXR com o fechamento do disjuntor 12J3 da SE MLT energizando 10% da carga nominal para o patamar de carga leve. Energização número 51 do estudo estatístico, sobretensão de maior amplitude no barramento 13,8 kV da SE TXR

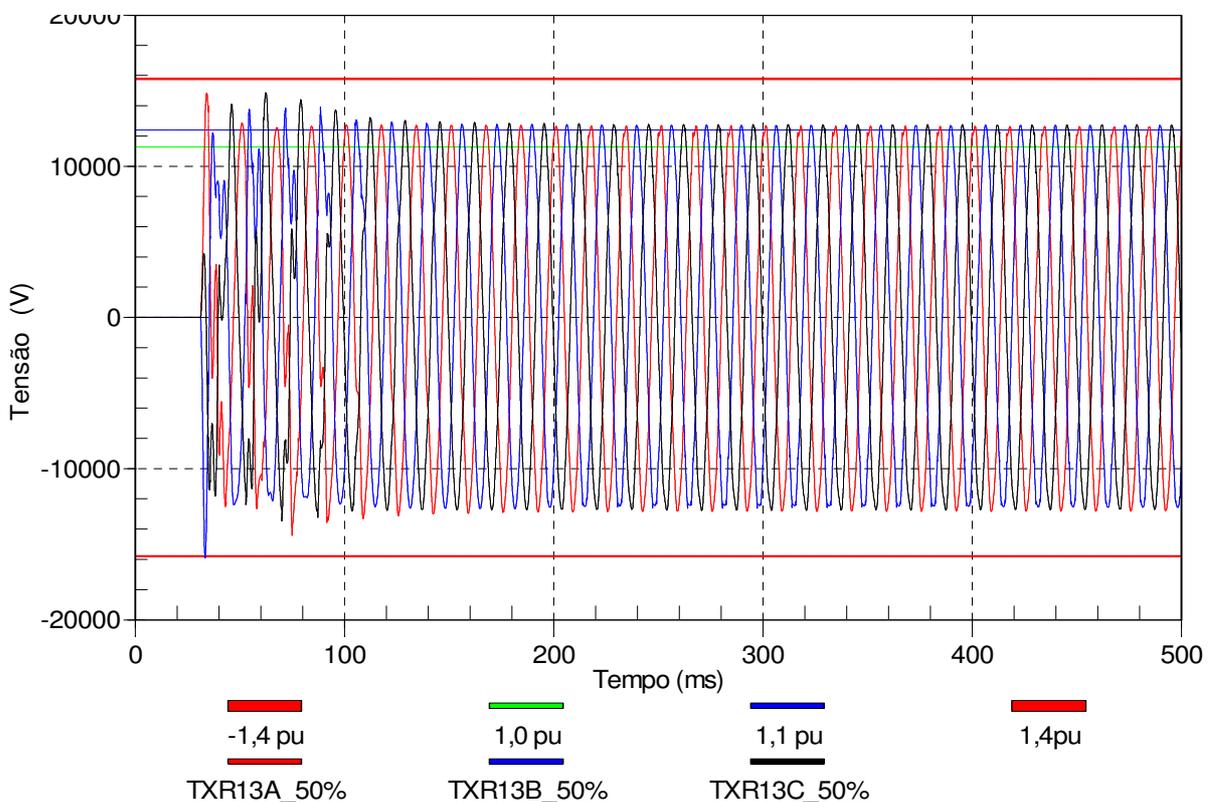


Figura 41 – Tensão no barramento 13,8 kV da SE TXR com o fechamento do disjuntor 12J3 da SE MLT energizando 50% da carga nominal para o patamar de carga leve. Energização número 51 do estudo estatístico, sobretensão de maior amplitude no barramento 13,8 kV da SE TXR

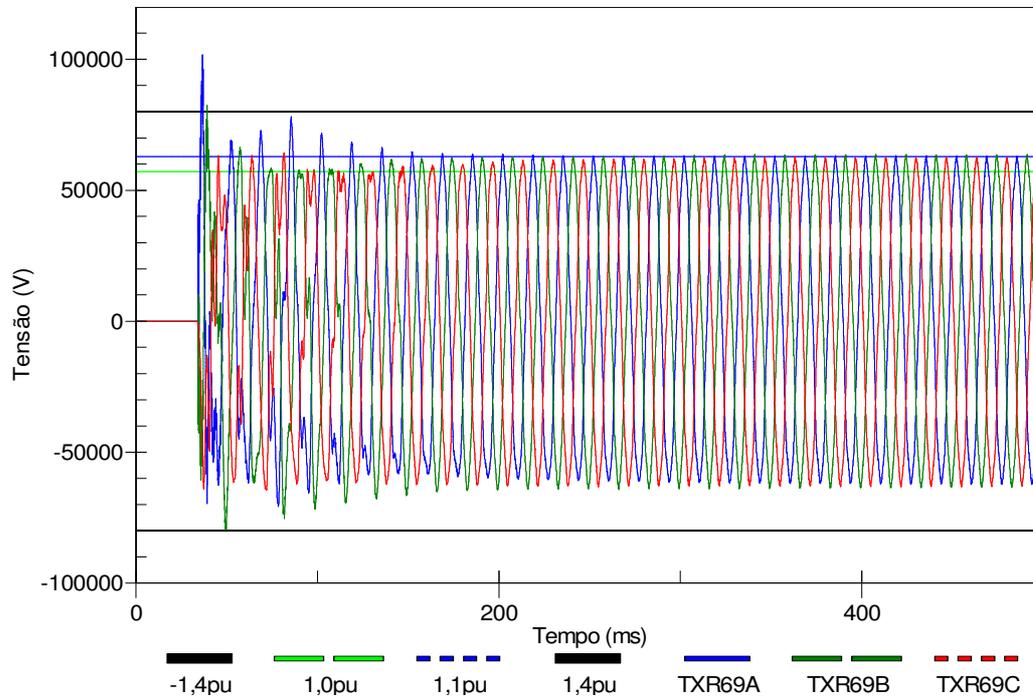


Figura 42 – Tensão no barramento 69 kV da SE TXR com o fechamento do disjuntor 12J3 da SE MLT energizando 10% da carga nominal para o patamar de carga leve com bancos de capacitores conectados. Energização número 58 do estudo estatístico, sobretensão de maior amplitude no barramento 69 kV da SE TXR.

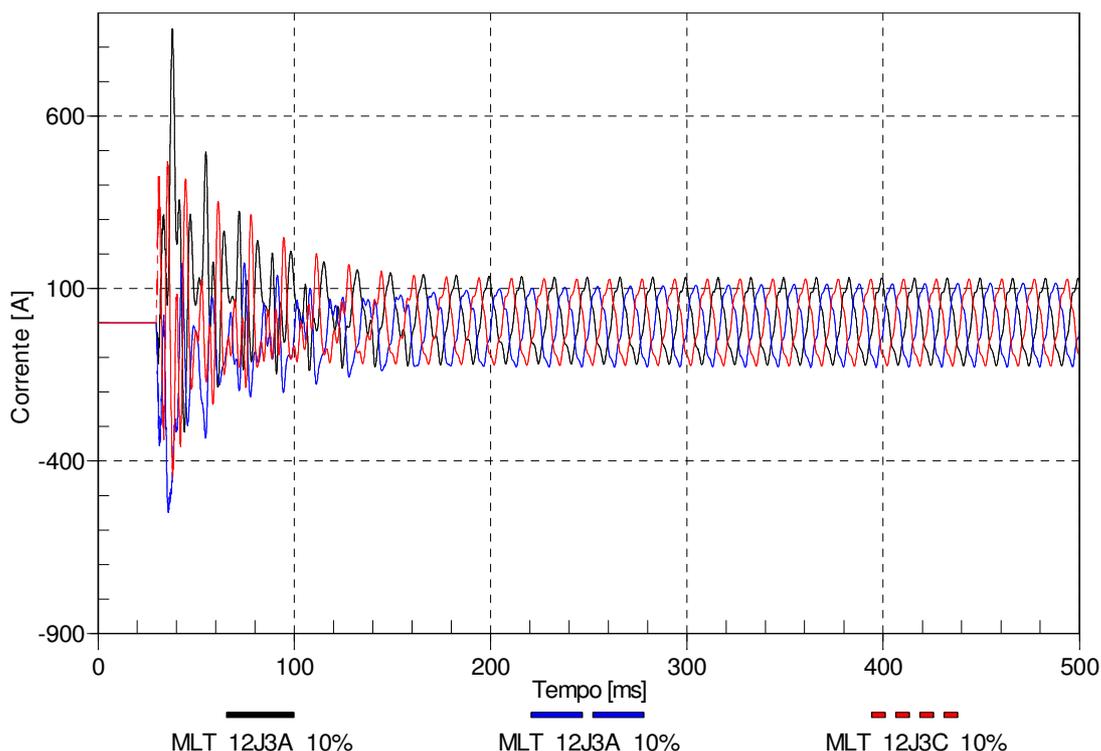


Figura 43- Corrente no disjuntor 12J3 da SE MLT energizando 10% da carga nominal para o patamar de carga leve. Energização número 51 do estudo estatístico, mais severo de sobretensão no barramento 13,8 kV da SE TXR.

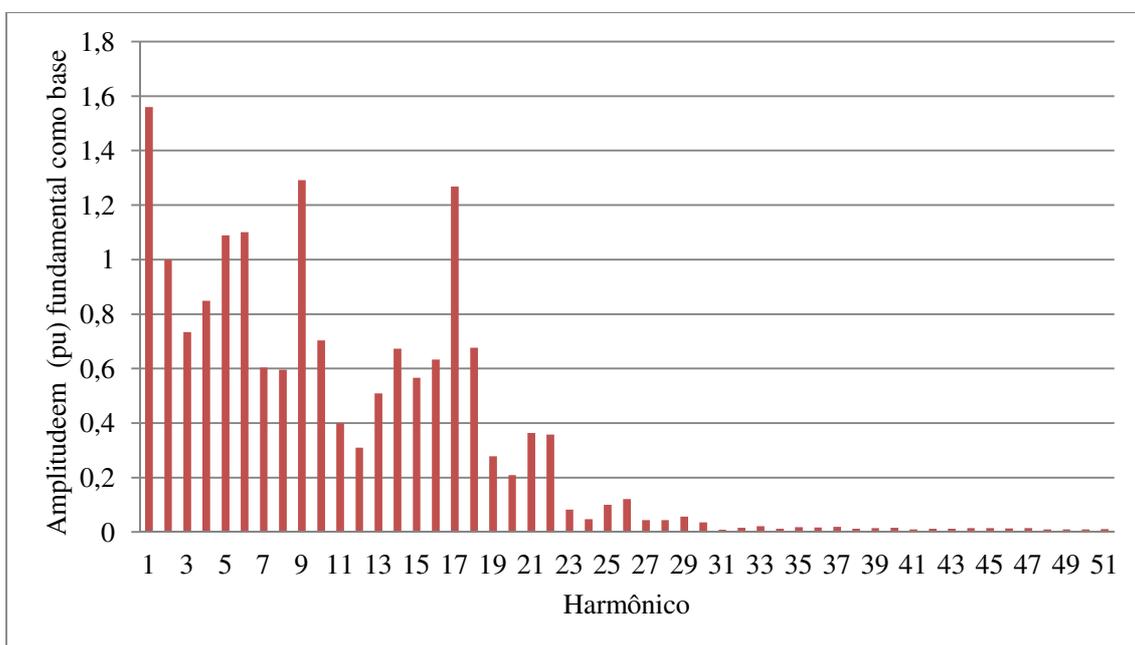


Figura 44- Decomposição harmônica do sinal de corrente da fase A no disjuntor 12J3 da SE MLT durante a energização das SEs MLT, PTS, JTB e TXR como 10% da carga nominal no patamar de carga leve no intervalo de tempo [0,03; 0,1] correspondente aos 4 primeiros ciclos.

4.7.3 Barramento SE SBT - Circuito CMA-PBL

Nos mesmos moldes que foram executados os estudos estatísticos e determinísticos para o subsistema CMA-SGL foram realizados para o circuito CMA-PBL.

NA Tabela 13 é apresentado o resultado para o estudo estatístico confirmando maior sobretensão nos barramento da SE SBT e menor que os observados no barramento da SE URN. Porém, as sobretensões alcançadas no barramento 13,8 kV da SE CTR são justificadas pelo banco de capacitores sobredimensionado.

Tabela 13 - Resultado do estudo estatístico danergização a partir do disjuntor 12J2 da SE PBL energizando as SEPBL, JRC, CTR, BJC, PLT e SBT. Sistema no patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados.

Carga (%)	Barramento 69 kV (tensão base 69 kV)											
	PBL		JRC		CTR		BJC		PLT		SBT	
	#	pu	#	pu	#	pu	#	pu	#	pu	#	pu
10	8	1,5	93	1,55	82	1,65	72	1,75	47	1,75	87	1,95
30	73	1,35	62	1,4	48	1,5	44	1,6	57	1,45	57	1,55
40	14	1,3	20	1,35	12	1,45	51	1,5	11	1,45	11	1,5
50	19	1,25	79	1,3	54	1,4	87	1,45	94	1,4	94	1,45
70	17	1,2	53	1,25	82	1,25	90	1,35	53	1,3	53	1,4
90	93	1,15	79	1,2	4	1,2	1	1,3	79	1,25	79	1,3
100	69	1,1	18	1,2	59	1,15	20	1,25	76	1,25	7	1,3

Carga (%)	Barramento 13,8 kV (tensão base 13,8 kV)											
	PBL		JRC		CTR		BJC		PLT		SBT	
	#	pu	#	pu	#	pu	#	pu	#	pu	#	pu
10	17	1,6	28	2,0	38	2,7*	100	2,25	3	1,8	78	2,1
30	11	1,35	40	1,75	69	2,2	30	1,95	43	1,5	15	1,7
40	23	1,3	1	1,65	59	2,05	1	1,75	62	1,4	57	1,55
50	96	1,3	21	1,6	18	1,85	75	1,65	96	1,35	26	1,45
70	53	1,2	69	1,4	72	1,6	36	1,45	10	1,25	100	1,3
90	1	1,1	14	1,3	42	1,35	76	1,3	51	1,15	20	1,2
100	3	1,05	75	1,2	23	1,3	70	1,2	85	1,1	88	1,2

Foram realizadas simulações determinísticas tomando como base os resultados do estudo estatístico. Do mesmo modo que executado para os outros circuitos (CMA-SGL e CMA-MLT) observa-se uma sobretensão que ultrapassa o limiar da suportabilidade (ver Figuras 45), porém essa é uma situação extrema em que a subestação estaria praticamente sem carga e com o sistema no patamar de carga leve.

Comparando-se com a Figura 46 onde a carga remanescente é 30% e na Figura 47 com carga remanescente de 50% da carga nominal no patamar de carga leve observa-se uma sobretensão dentro dos limites de suportabilidade.

Para o barramento de 69 kV da SE SBT (ver Figura 48) existe apenas um pico de ultrapassagem do valor de adotado de 1,4 pu por até 10 ciclos consecutivos da frequência fundamental, e logo em seguida é amortecido não caracterizando uma violação dos limites de suportabilidade.

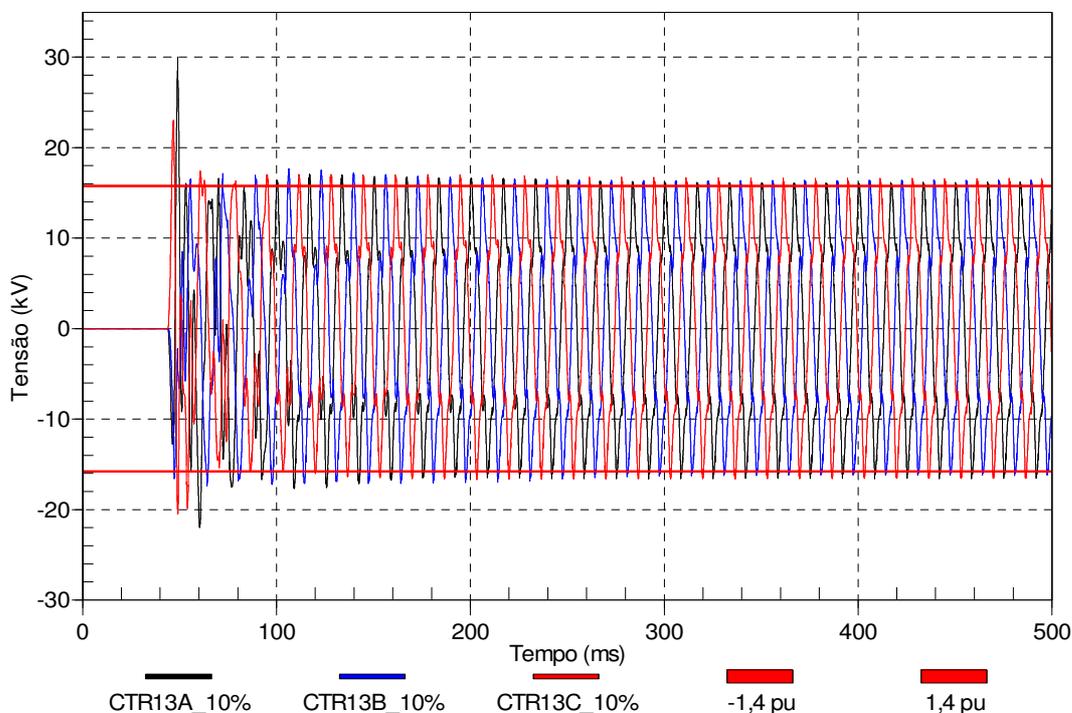


Figura 45 - Tensão no barramento 13,8 kV da SE CTR com o fechamento do disjuntor 12J2 da SE PBL energizando 10% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores desconectados

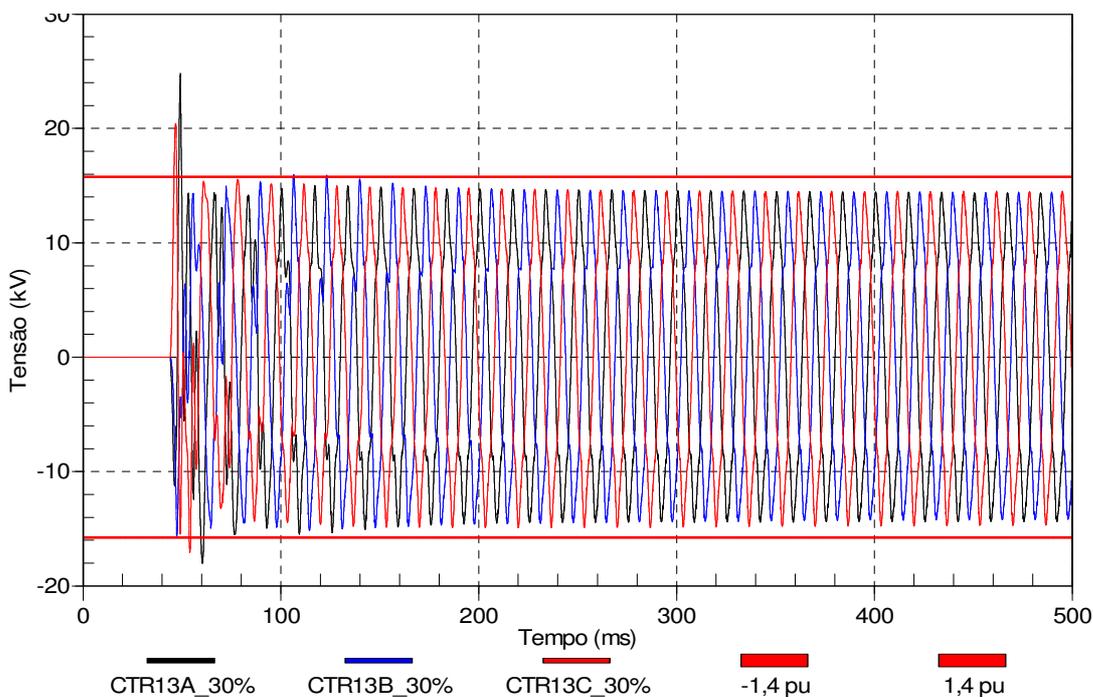


Figura 46 - Tensão no barramento 13,8 kV da SE CTR com o fechamento do disjuntor 12J2 da SE PBL energizando 30% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores desconectados

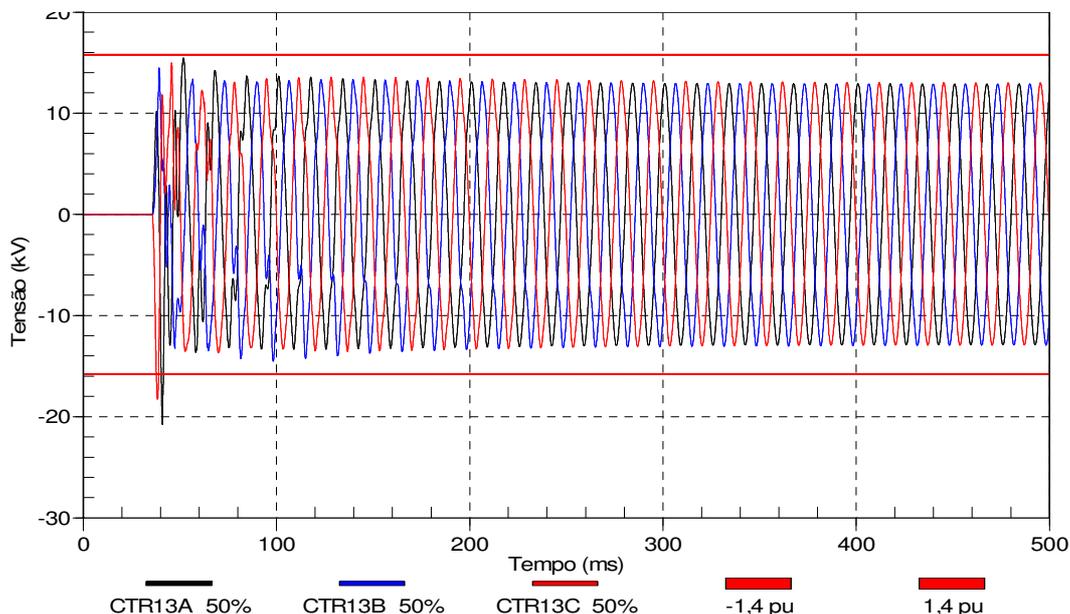


Figura 47 - Tensão no barramento 13,8 kV da SE CTR com o fechamento do disjuntor 12J2 da SE PBL energizando 50% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores desconectados.

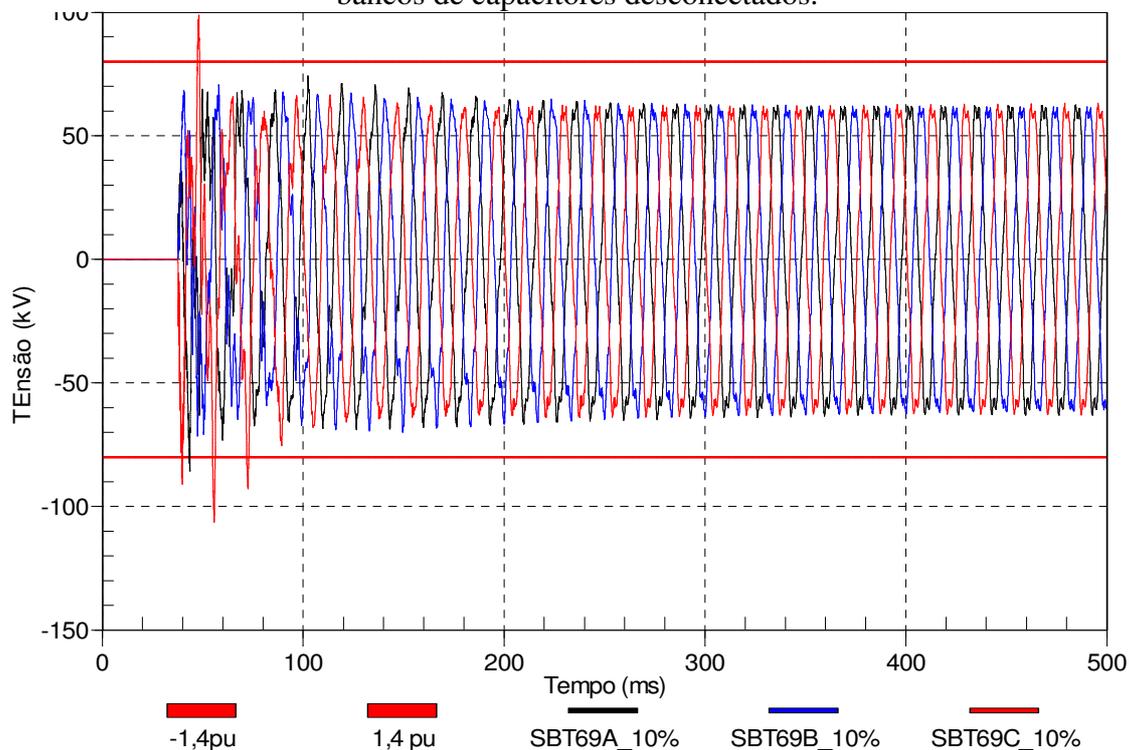


Figura 48 - Tensão no barramento 69 kV da SE SBT com o fechamento do disjuntor 12J2 da SE PBL energizando 10% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores desconectados

4.8 Manobras Alternativas à Energização pela Operação de um Único Disjuntor

4.8.1 Desconexão dos bancos de capacitores

O Efeito das desconexões dos bancos de capacitores de todas as subestações que serão energizadas é evidenciado pelos resultados da varredura em frequência como uma alternativa para evitar sobtensões em casos extremos de carregamento mínimo. Apesar de ser uma situação geralmente não factível, pois existe a limitação de que normalmente os bancos de capacitores somente podem ser acionados enquanto a subestação estiver energizada.

Nas Figuras 49, 50 e 51 pode-se observar o comportamento da resposta em frequência de sequência positiva da injeção de corrente no barramento 69 kV da SE MLT, PBL e SGL respectivamente e sem a presença dos bancos de capacitores em nenhuma das subestações alimentadas por linha que saiam destas subestações.

Como exemplo, nas Figuras 52, 53, 54 e 55 em que é apresentado o comportamento da tensão nos casos mais severos conseguidos por um estudo estatístico não há violação dos limites de suportabilidade mesmo para o caso extremo de existir apenas 10% do carregamento nominal no instante da energização.

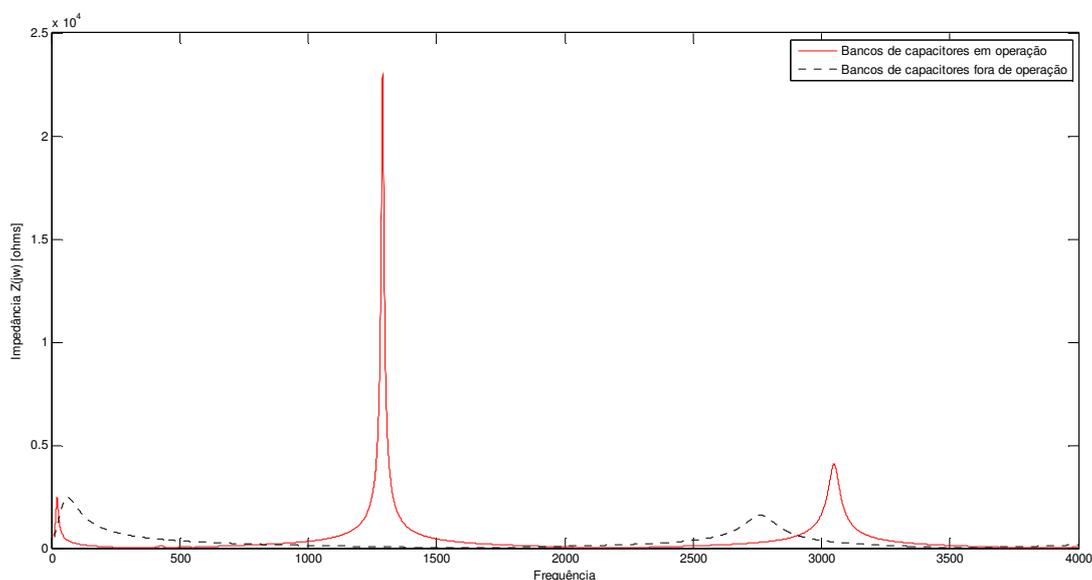


Figura 49 – Comparação da resposta em frequência (10 Hz a 4 kHz) vista do barramento 69 kV da SE MLT com injeção de corrente de sequência positiva barramento 69 kV da SE MLT com o sistema à montante desconectado (disjuntores 12J3 e 12J4 da SE MLT abertos) sistema no patamar de carga leve e bancos de capacitores conectado e desconectados.

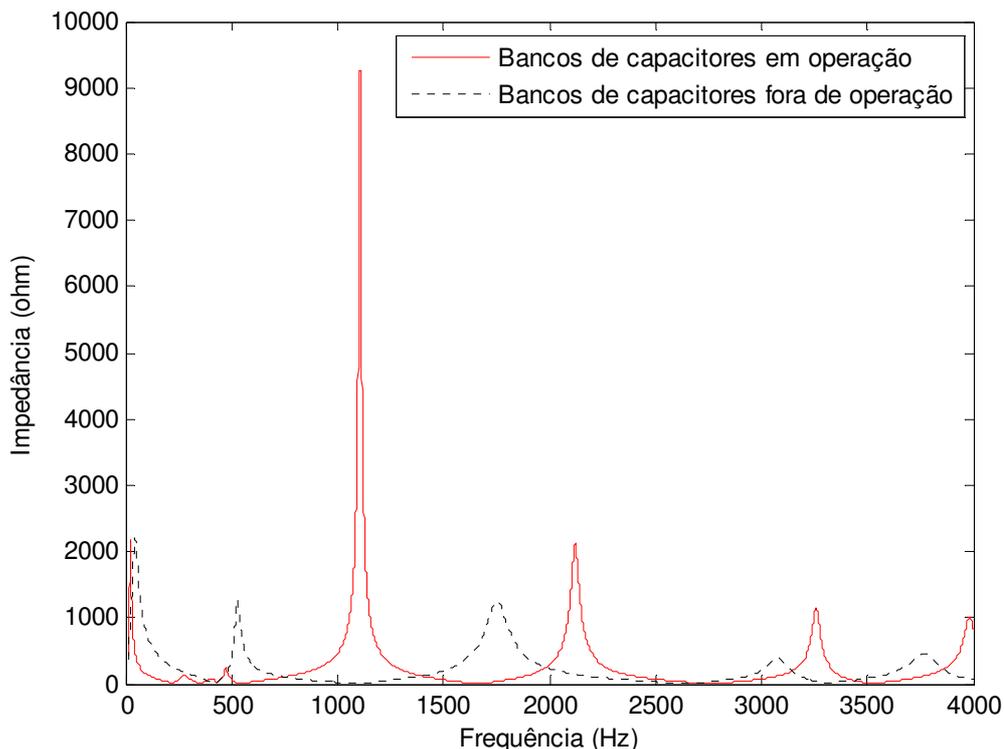


Figura 50 – Comparação da resposta em frequência (10 Hz a 4 kHz) vista do barramento 69 kV da SE PBL com injeção de corrente de sequência positiva barramento 69 kV da SE PBL com o sistema à montante desconectado (disjuntores 12J1 e 12J2 da SE PBL abertos) sistema no patamar de carga leve e bancos de capacitores conectado e desconectados.

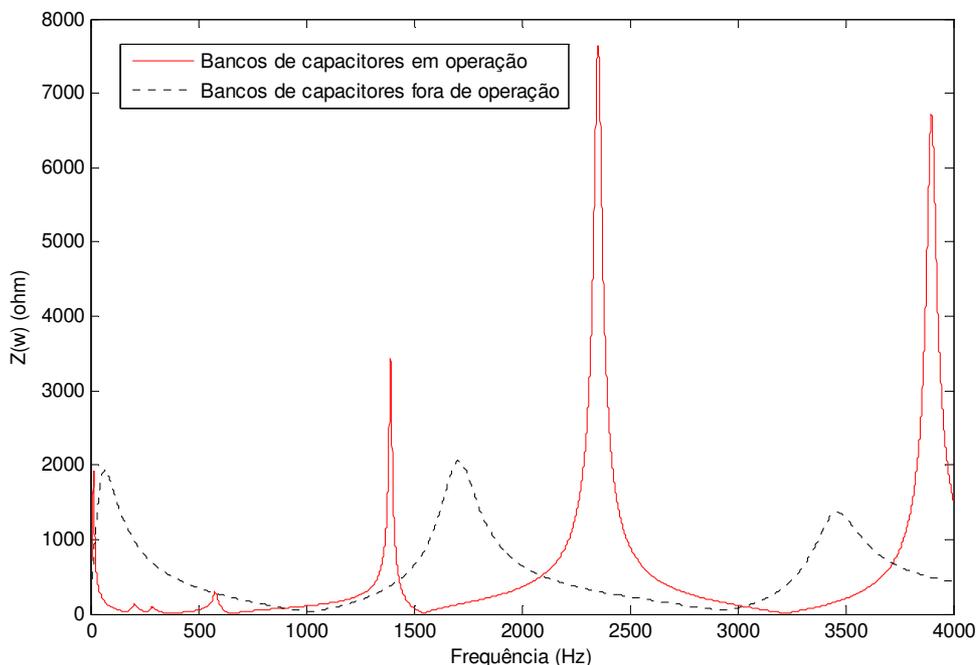


Figura 51 – Comparação da resposta em frequência (10 Hz a 4 kHz) vista do barramento 69 kV da SE SGL com injeção de corrente de sequência positiva barramento 69 kV da SE SGL com o sistema à montante desconectado (disjuntores 12J9 e 12J8 da SE SGL abertos) sistema no patamar de carga leve e bancos de capacitores conectado e desconectados.

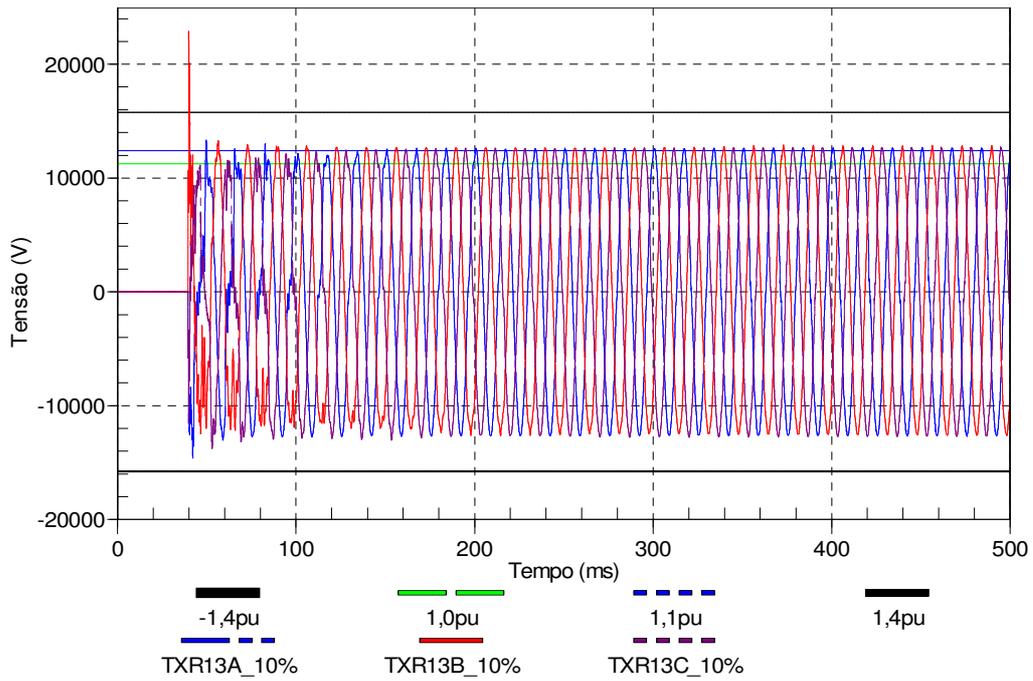


Figura 52 – Tensão no barramento 13,8 kV da SE TXR com o fechamento do disjuntor 12J3 da SE MLT energizando 10% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores desconectados

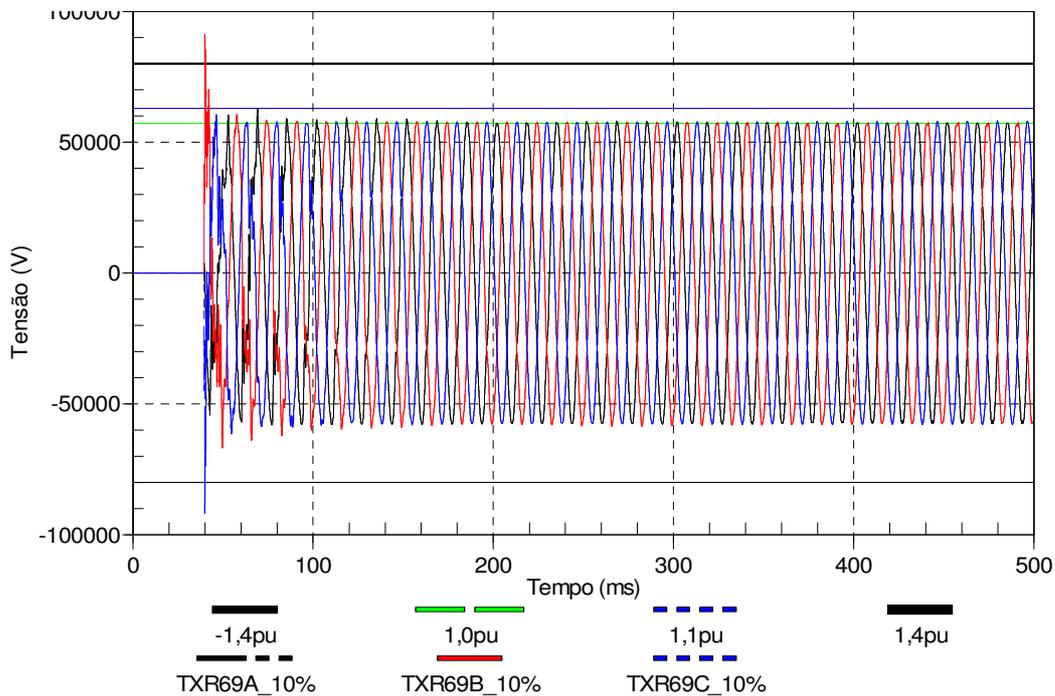


Figura 53 – Tensão no barramento 69 kV da SE TXR com o fechamento do disjuntor 12J3 da SE MLT energizando 10% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores desconectados

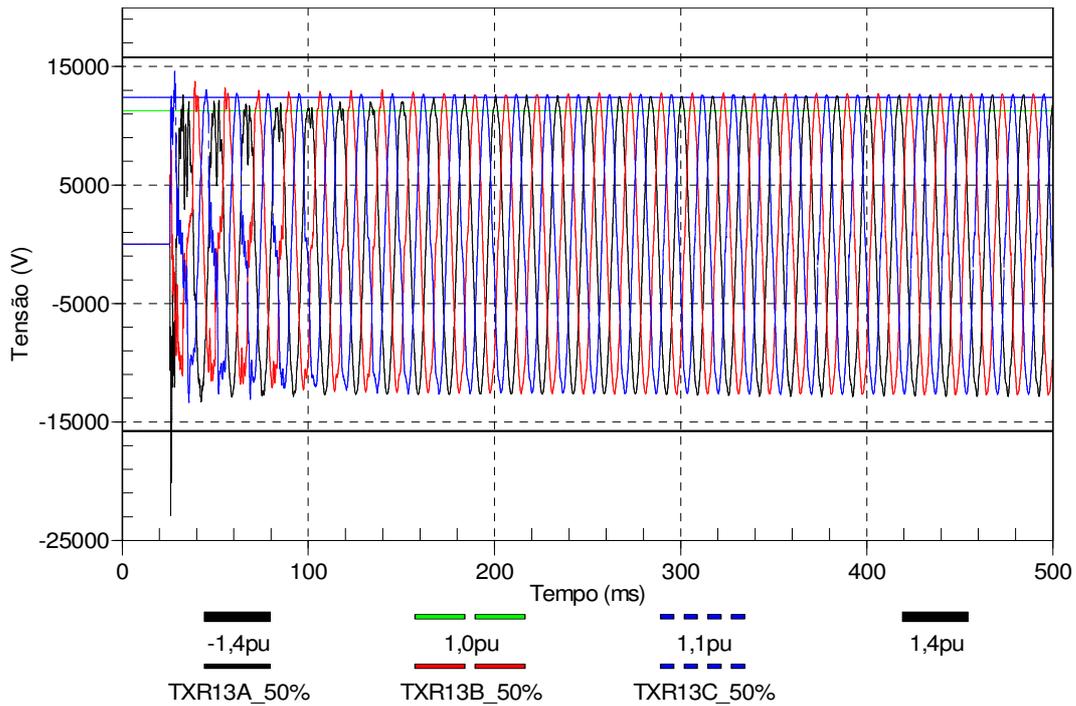


Figura 54 – Tensão no barramento 13kV da SE TXR com o fechamento do disjuntor 12J3 da SE MLT energizando 50% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores desconectados

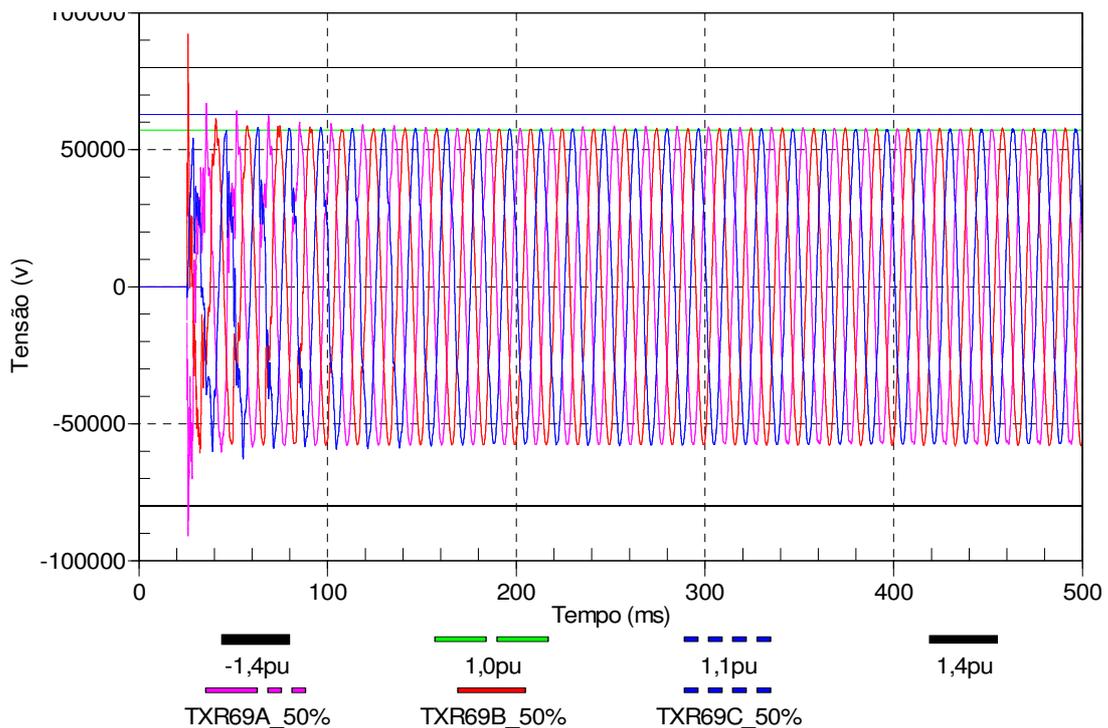


Figura 55 – Tensão no barramento 69 kV da SE TXR com o fechamento do disjuntor 12J3 da SE MLT energizando 50% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores desconectados

4.8.2 Manobra Alternativa – Energização Parcial do Sistema

Para efeito comparativo será avaliada a energização de circuito avaliado por duas ou três etapas de energização. Para isso será efetuada a varredura em frequência com a injeção de corrente no barramento que apresentou maiores sobretensões, identificado nas sessões anteriores, comparando as respostas em frequência considerando o sistema completo e parte do sistema. Também será realizado o estudo estatístico e determinístico corroborando com inferências da varredura em frequência.

4.8.2.1 Circuito CMA - MLT

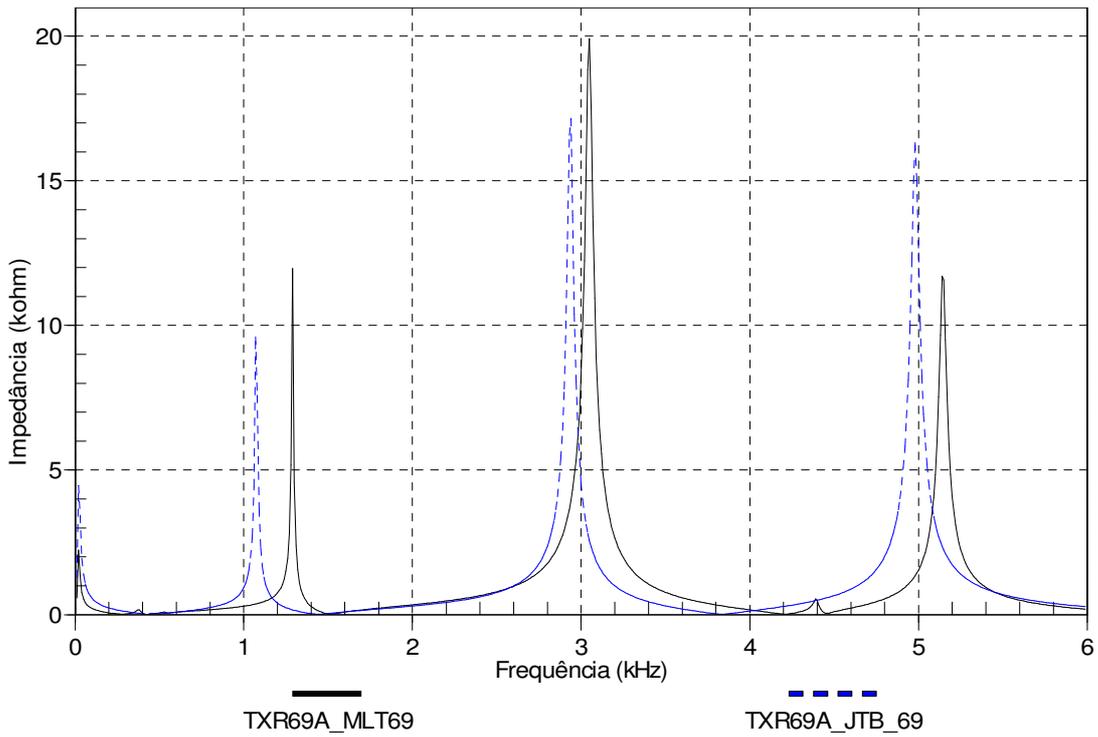
O barramento da SE TXR apresenta as maiores sobretensões como observado nas seções anteriores. Uma possível alternativa para mitigar as sobretensões nestes barramentos é a energização parcial do sistema em comparação com a energização do sistema por uma única disjunção. A manobra consiste nas seguintes etapas:

- i. energização das SE MLT e PTS e
- ii. em sequência a energização das SE JTB e TXR.

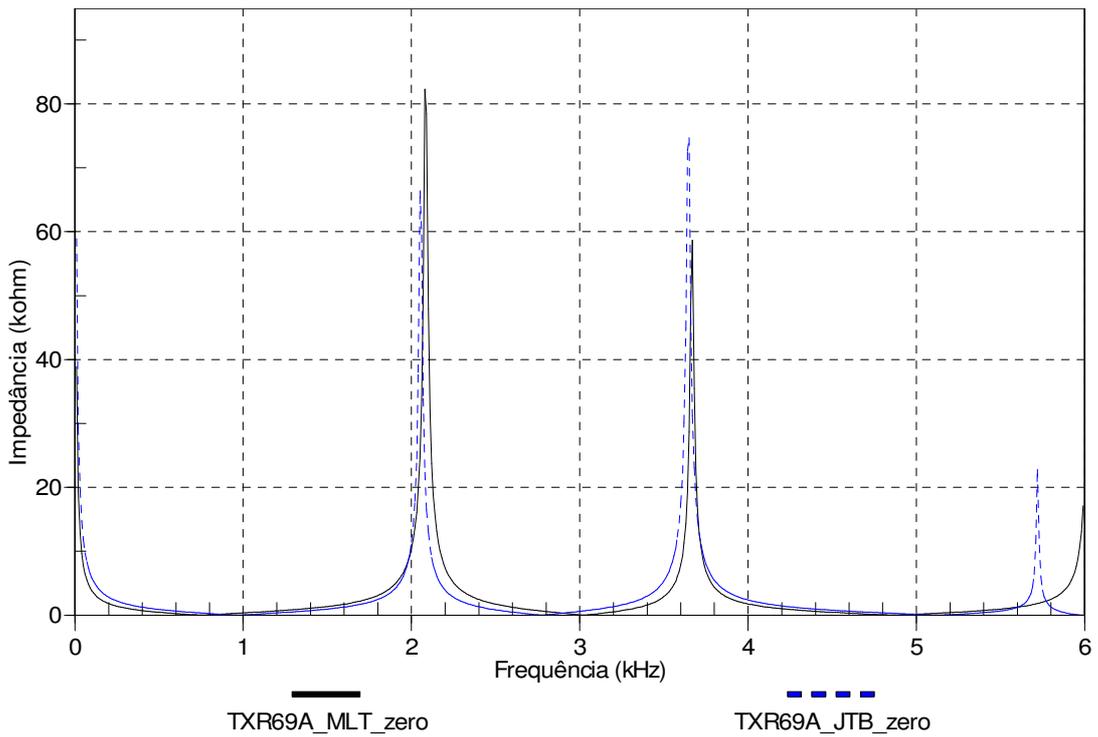
Considerando a situação descrita na seção 5.5 os disjuntores 12J3 e 12J4 da SE MLT abertos, as operações para execução da manobra consiste na abertura dos disjuntores 12J5 da SE MLT e 12N3 da PTS, e em sequência energiza-se as SE MTL e PTS com o fechamento do disjuntor 12J3 da SE MLT. E em seguida se energizam as SE TXR e MLT com o fechamento do disjuntor 12J5 da SE MLT. E posteriormente normaliza-se a configuração com o fechamento do disjuntor 12N3 da SE PTS.

Para avaliar esta configuração de manobra no domínio da frequência se fez a injeção de corrente no barramento de 69 kV da SE TXR para duas situações: a primeira com o sistema conectado do barramento da SE TXR até o barramento 69 kV da SE MLT(12J3 e 12J4 da SE MLT abertos); e a outra conectado do barramento de 69 kV da SE TXR até o barramento 69 kV da SE JTB (12N1 PTS e 12J5 MLT abertos).

Conforme se pode observar com a comparação das respostas em frequência da injeção de corrente no barramento 69 kV da SE TXR na Figura 56, em que para sequência positiva e para sequência zero há uma redução da amplitude da impedância e redução das frequência de ressonância, o que mostra uma possível redução não muito significativa das sobretensões, porém reduzir o amortecimento pela redução das frequências de ressonância.



(a) Sequência positiva



(b) Sequência zero

Figura 56 – Comparação da resposta em frequência vista do barramento 69 kV da SE TXR considerando sistema até SE MLT (12J4 e 12J3 MLT abertos) e sistema até SE JTB (12N3 PTS aberto). Injeção de corrente de seqüência positiva (a) e zero(b) barramento 69 kV da SE TXR.

Na tabela 14 com o resultado da simulação usando a chave estatística confirma-se que as amplitudes das sobretensões observadas não sofreram muita influencia comparando-se com o resultado da tabela 12.

Tabela 14 – Resultado simulação estatística da energização do circuito CMA-MLT em duas operações de disjunção.

Carga	Etapa	69 kV				13,8 kV			
		MLT	PTS	JTB	TXR	MLT	PTS	JTB	TXR
10%	1-Energização MLT e PTS	1,55	1,7	-	-	1,8	1,95	-	-
	2-Energização JTB e TXR	1,6	1,6	1,65	1,65	1,6	1,75	1,9	2,2
50%	1-Energização MLT e PTS	1,3	1,5	-	-	1,35	1,65	-	-
	2-Energização JTB e TXR	1,4	1,4	1,35	1,4	1,25	1,35	1,35	1,55

Simulações determinísticas tomando como base os resultados do estudo estatístico, instante de fechamento do disjuntor. Observa-se nas Figuras 57, uma sobretensão no barramento 13,8 kV da SE TXR que ultrapassa o limiar da suportabilidade, devido o baixo amortecimento, porém essa é uma situação extrema em que a subestação estaria praticamente sem carga e com o sistema no patamar de carga leve. Ao encontrar o sistema com 50% da carga nominal para o patamar, na Figura 58 existe um forte amortecimento e não há violação dos limites de suportabilidade adotados. Nas Figuras 59 e 60 é observada sobretensões dentro dos limites de suportabilidade nos barramentos das SE PTS e MLT durante manobras.

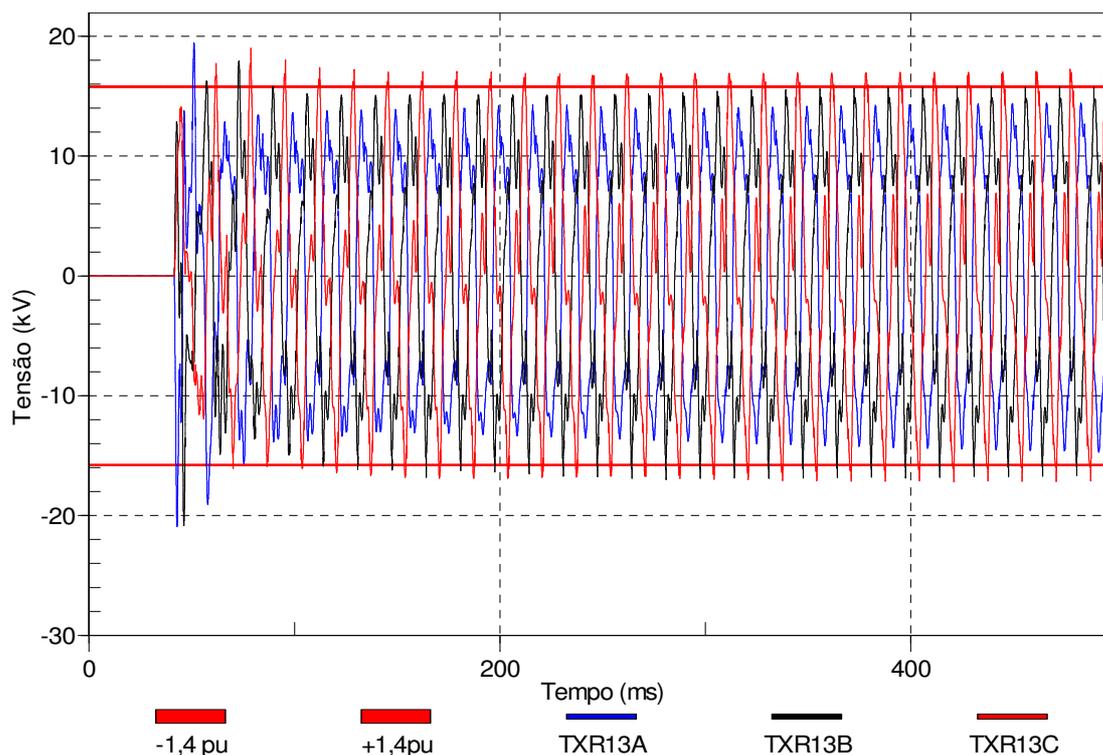


Figura 57 - Tensão no barramento 13,8kV da SE TXR na energização das SEs JTB e TXR por meio do fechamento do disjuntor 12N3 da SE PTS energizando 10% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados.

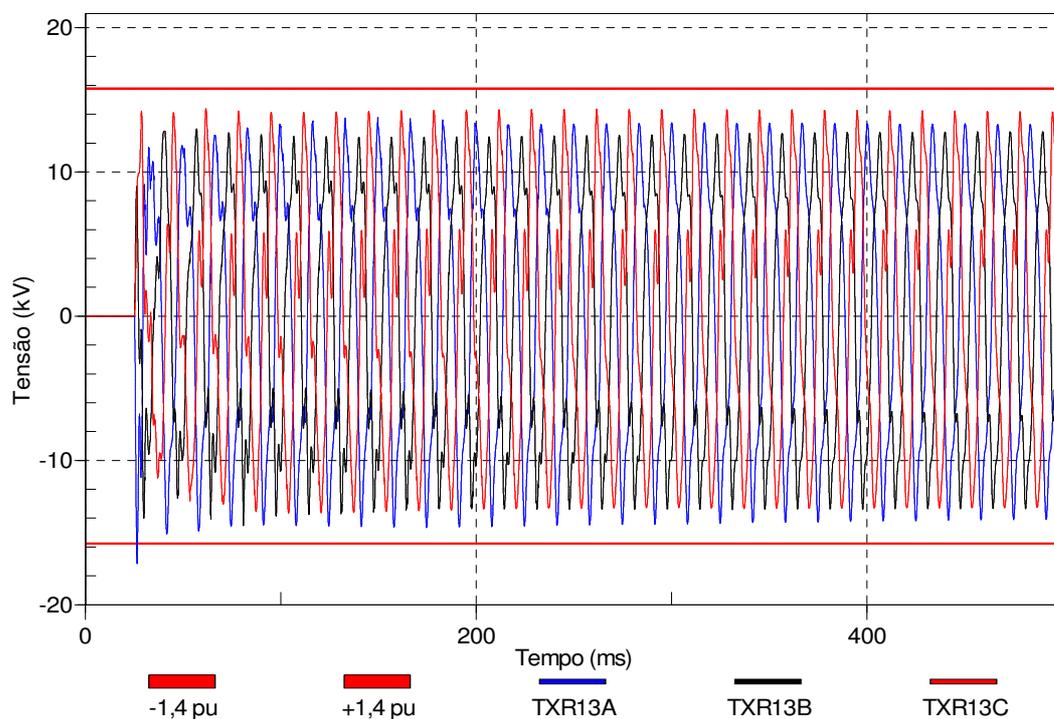


Figura 58 - Tensão no barramento 13,8kV da SE TXR na energização das SEs JTB e TXR por meio do fechamento do disjuntor 12N3 da SE PTS energizando 50% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados.

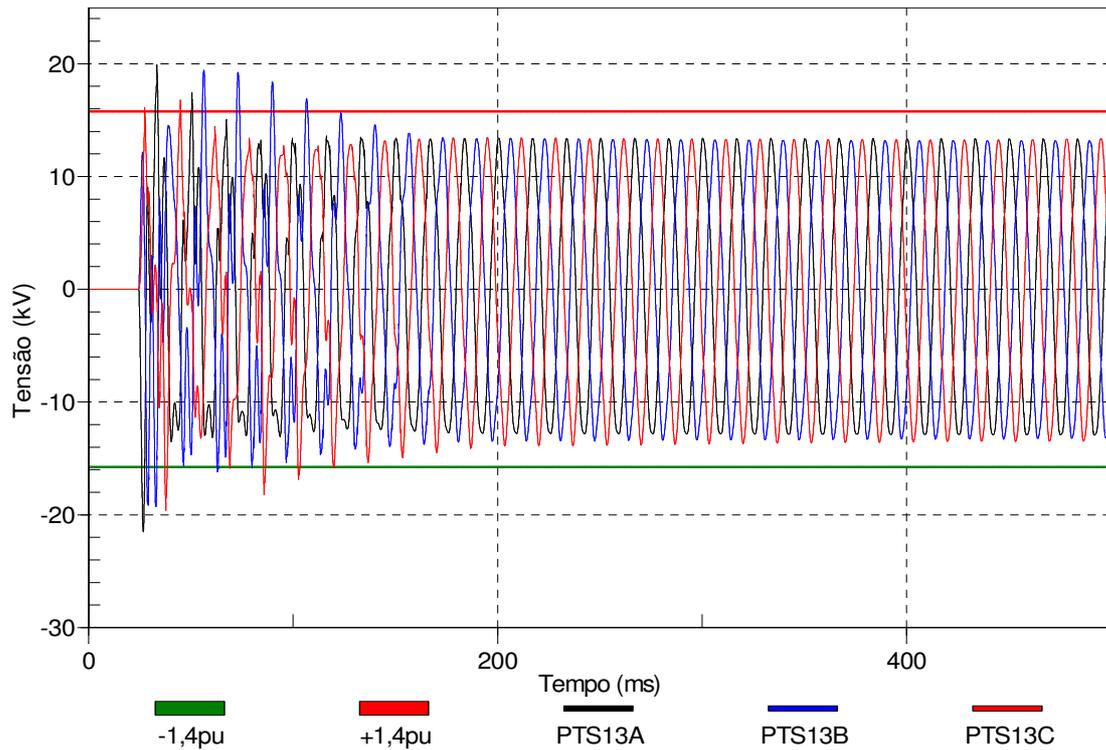


Figura 59 – Tensão no barramento 13,8kV da SE PTS na energização das SEs MLT e PTS por meio do fechamento do disjuntor 12J3 da SE MLT energizando 10% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados. Disjuntores 12J5 da SE MLT e 12N3 da PTS abertos.

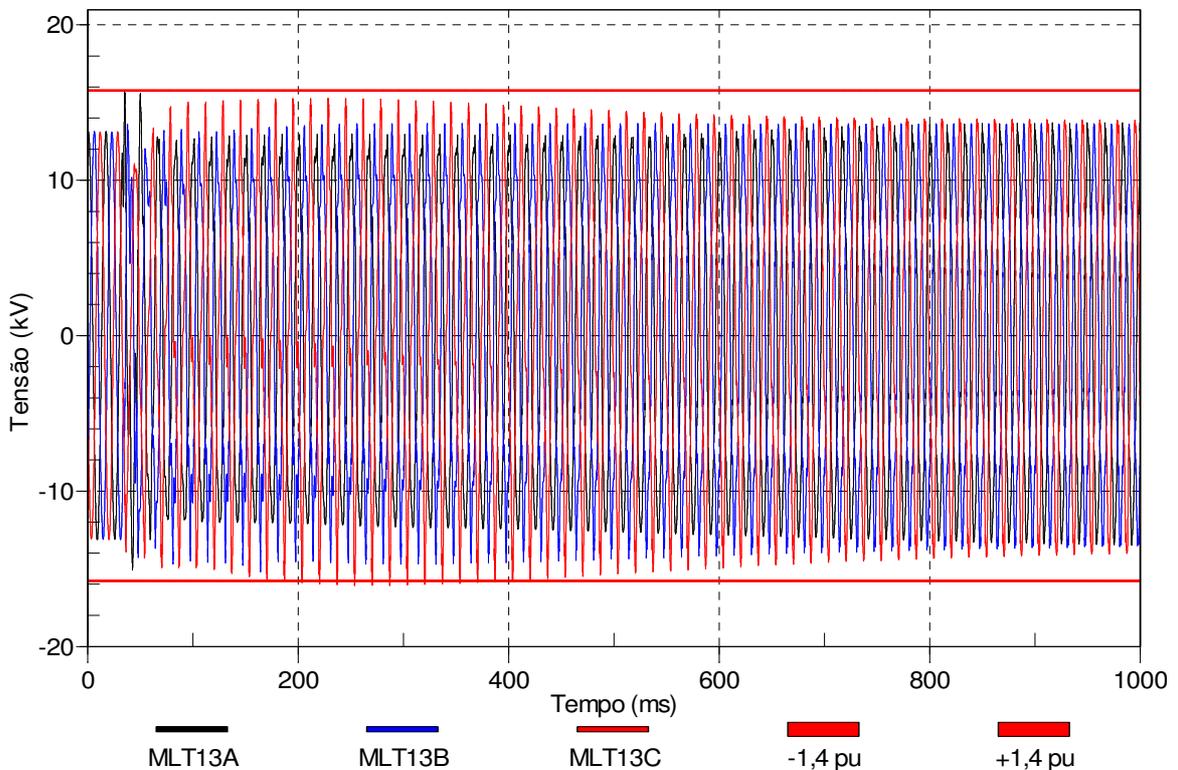


Figura 60 - Tensão no barramento 13,8kV da SE MLT na energização das SEs JTB e TXR por meio do fechamento do disjuntor 12N3 da SE PTS energizando 10% da carga nominal para o patamar de carga leve e bancos de capacitores conectados.

4.8.2.2 Circuito CMA – SGL

Como observado nas seções anteriores o barramento 13,8 kV da SE URN apresenta as maiores sobretensões. Uma possível alternativa para mitigar as sobretensões nestes barramentos é a energização parcial do sistema em comparação com a energização do sistema por uma única disjunção.

Considerando os disjuntores 12J8 e 12J9 da SE SGL abertos, a manobra consiste nas seguintes etapas:

- i. Abertura do disjuncto 12Y2 da SE SGL;
- ii. energização das SE SGL e SZA, com o fechamento do disjuncto 12J8 da SE SGL;
- iii. em sequência a energização das SE CJZ, SPX e URN, com o fechamento do disjuncto 12Y2 da SE SGL..

Para avaliar esta configuração de manobra no domínio da frequência se fez a injeção de corrente no barramento de 69 kV da SE URN para duas situações: a primeira com o sistema completo até a SE SGL (12J8 e 12J9 da SE SGL abertos); e a outra conectado do barramento de 69 kV da SE SGL até o barramento 69 kV da SE CJZ (12Y2 SGL aberto).

Conforme se pode observar com a comparação das respostas em frequência da injeção de corrente no barramento 69 kV da SE URN na Figura 61, em que para sequência positiva e para sequência zero há uma redução da amplitude da impedância e redução das frequências de ressonância, o que mostra uma possível redução não muito significativa das sobretensões, porém reduzir o amortecimento pela redução das frequências de ressonância.

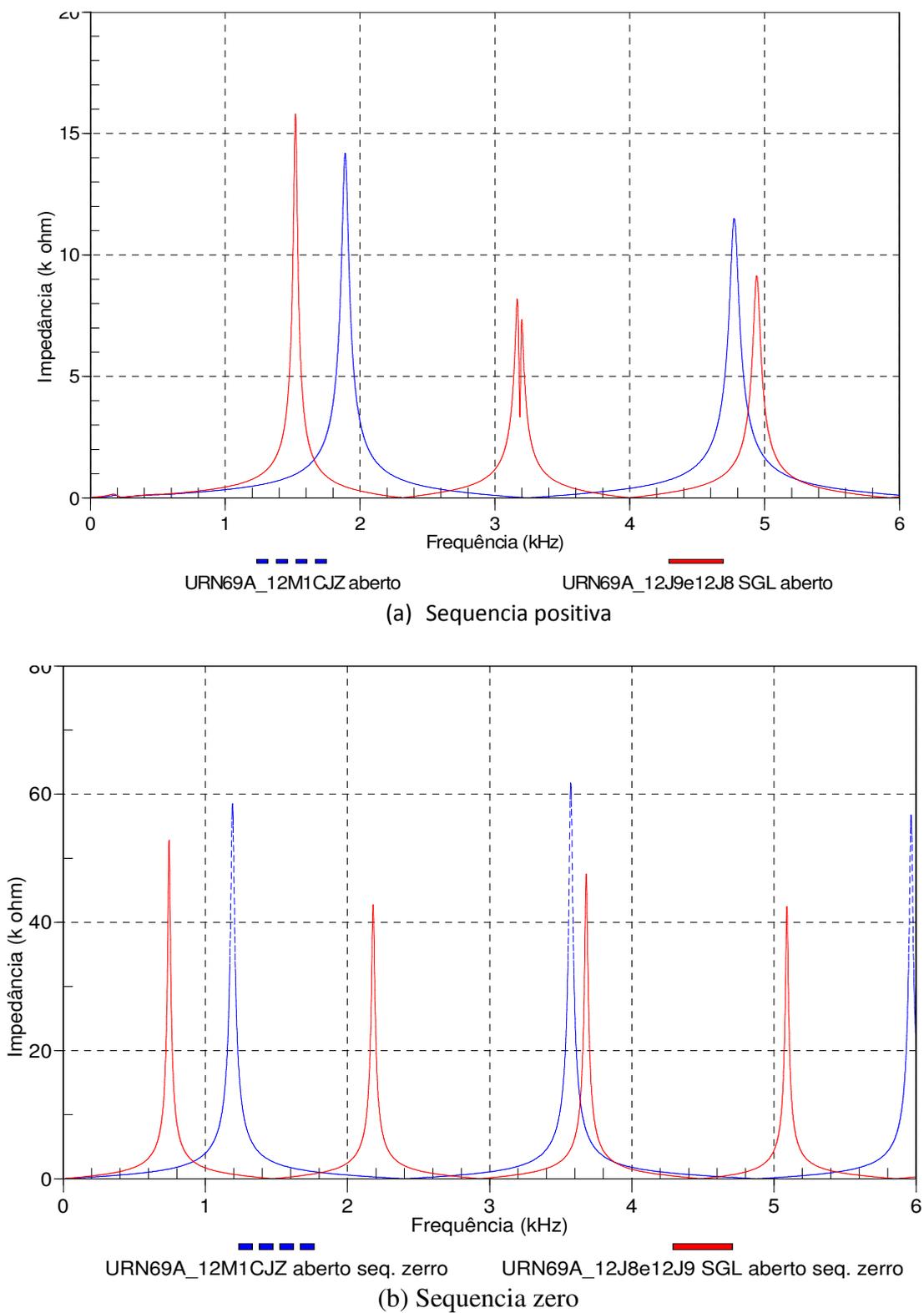


Figura 61 – Comparação da resposta em frequência vista do barramento 69 kV da SE URN considerando sistema completo (12J8 e 12J9 SGL abertos) e sistema até SE CJZ (12Y2 SGL aberto). Injeção de corrente de seqüência positiva (a) e zero(b) barramento 69 kV da SE URN.

Na tabela 15 com o resultado das simulações usando a chave estatística confirma-se que as amplitudes das sobretensões observadas não sofreram muita influencia comparando-se com o resultado da tabela 11.

Tabela 15 - Resultado simulação estatística da energização do circuito CMA-MLT em duas operações de disjunção.

	Passo	69 kV					13,8 kV				
		SGL	SZA	CJZ	SPX	URN	SGL	SZA	CJZ	SPX	URN
10%	1-Energização SGL e SZA	1,65	1,75	-	-	-	1,95	1,95	-	-	-
	2 – Energização CJZ, SPX e URN	1,45	1,5	1,65	1,85	1,9	1,7	1,9	2,05	2,55	2,4
50%	1-Energização SGL e SZA	1,35	1,45	-	-	-	1,45	1,55	-	-	-
	2 – Energização CJZ, SPX e URN	1,25	1,45	1,35	1,5	1,55	1,35	1,35	1,5	1,6	1,7

Simulações determinísticas tomando como base os resultados do estudo estatístico, instante de fechamento do disjuntor. Observa-se na Figura 62 (a), uma sobretensão no barramento 13,8 kV da SE URN que está no limiar da suportabilidade, devido o baixo amortecimento, porém essa é uma situação extrema de carregamento leve em que a subestação estaria praticamente sem carga e com o sistema no patamar de carga leve. Ao encontrar o sistema com 50% da carga nominal para o patamar, na Figura 62 (b) existe um forte amortecimento e não há violação dos limites de suportabilidade adotados.

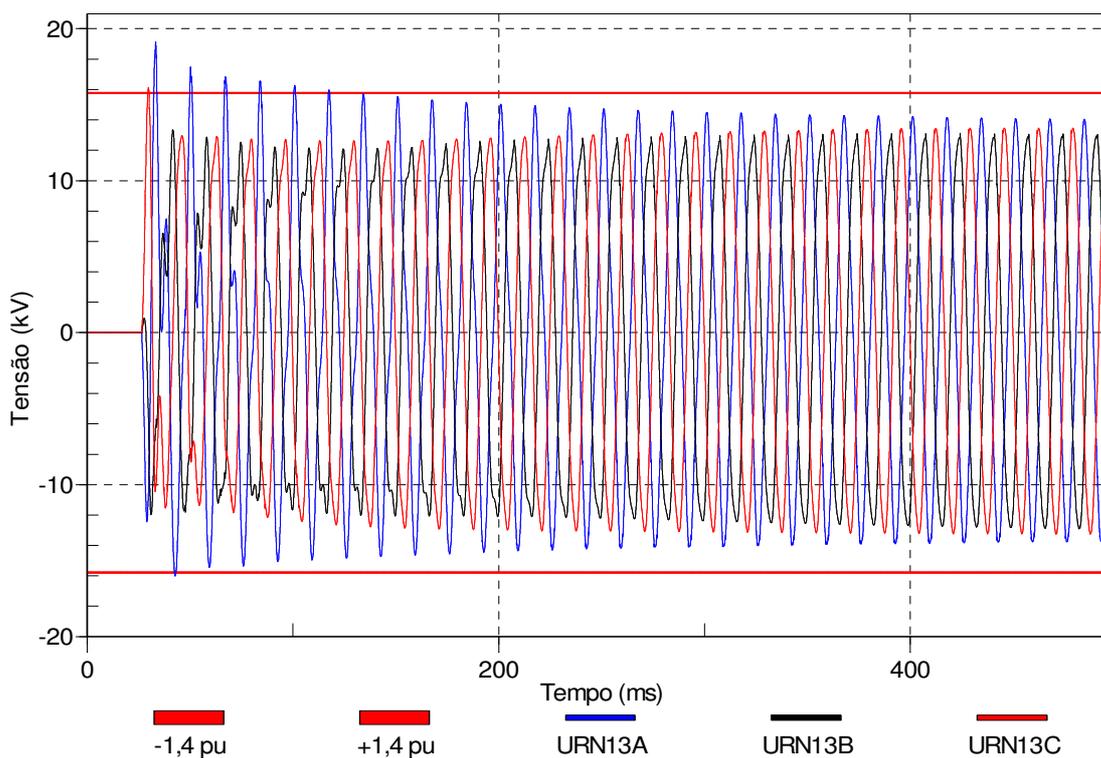
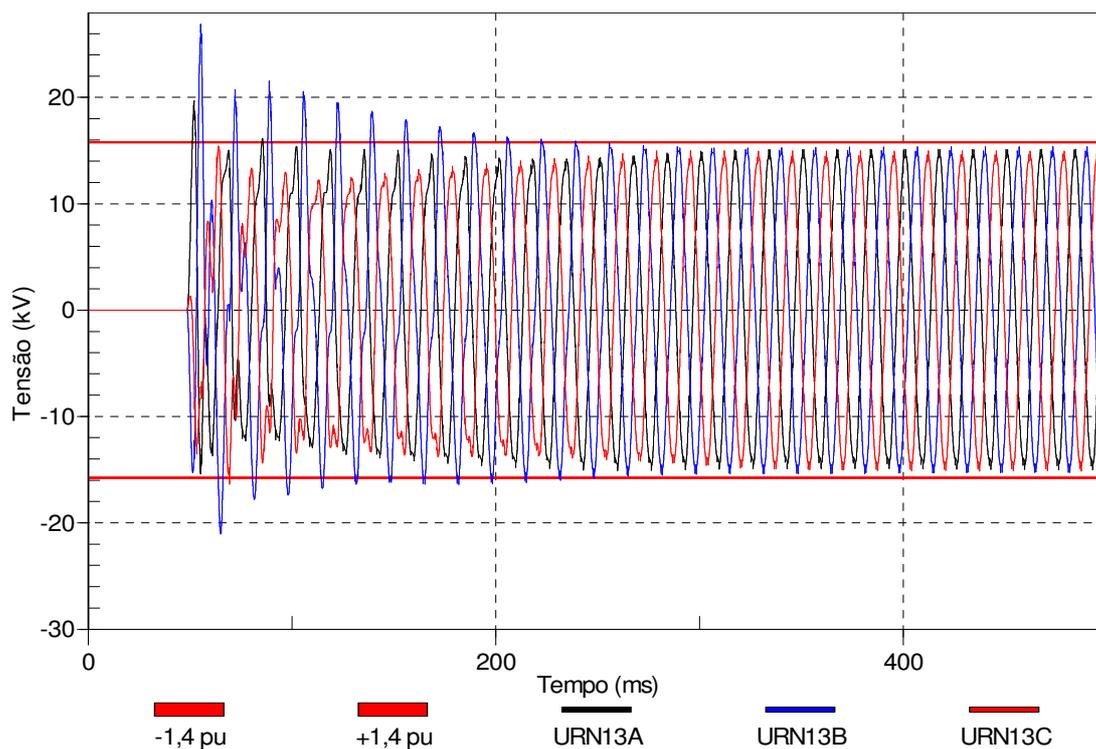


Figura 62 - Tensão no barramento 13,8 kV da SE URN com o fechamento do disjuntor 12M1 da SE CJZ. Circuito com bancos de capacitores conectados.

4.8.2.3 Circuito CMA - PBL

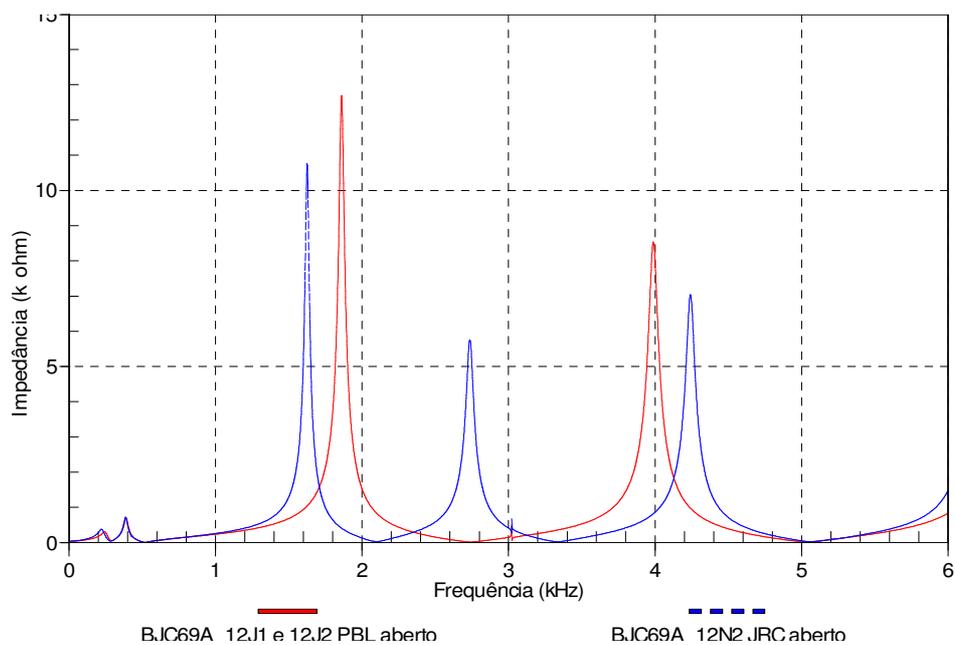
Nas seções anteriores foi observado nos barramentos de 69 kV e 13,8 kV das SE SBT e BJC (desconsiderando a exceção SE CTR) apresenta as maiores sobretensões. A energização parcial do sistema em comparação a energização do sistema por uma única disjunção é uma possível alternativa para mitigar as sobretensões nestes barramentos.

Considerando os disjuntores 12J1 e 12J2 da SE PBL abertos, a manobra consiste nas seguintes etapas:

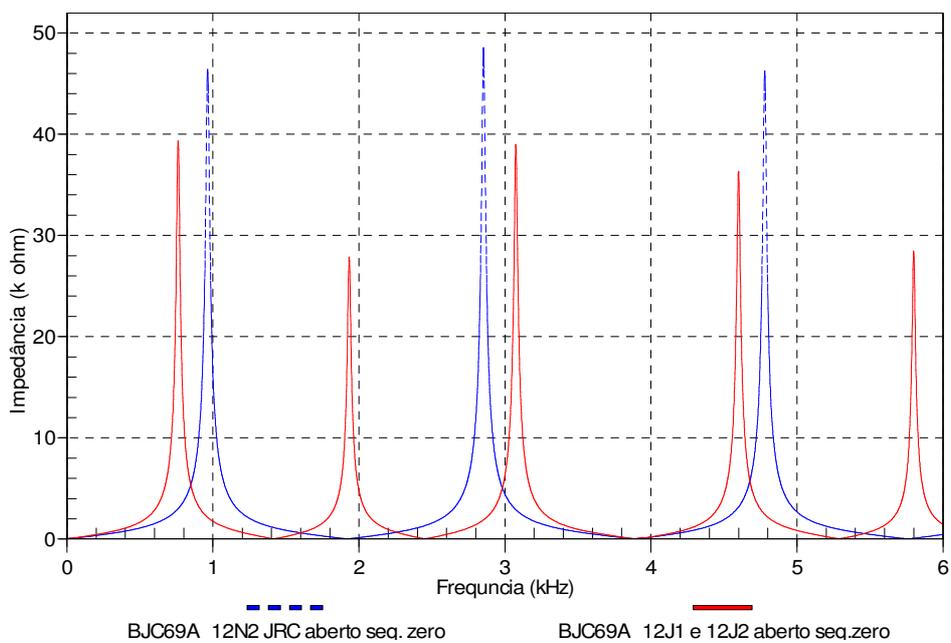
- i. Abertura do disjuntor 12J3 da SE SGL e 12N2 da SE JRC;
- ii. energização das SE PBL e JRC, com o fechamento do disjuntor 12J2 da SE PBL;
- iii. em sequência a energização das SE CTR e BJC, com o fechamento do disjuntor 12N2 da SE JRC;
- iv. e finalmente a energização das SE PLT e SBR com o fechamento do disjuntor 12J3 da SE PBL.

Para avaliar esta configuração de manobra no domínio da frequência se fez a injeção de corrente no barramento de 69 kV da SE BJC para duas situações: a primeira com o sistema completo até a SE PBL (12J1 e 12J2 da SE PBL abertos); e a outra conectado do barramento de 69 kV da SE BJC até o barramento 69 kV da SE CTR (12N2 JRC aberto). O mesmo é feito para o barramento 69 kV da SE SBT a primeira situação com os disjuntores 12J1 e 12J2 da SE PBL abertos e na segunda situação com o disjuntor 12J3 da SE PBL aberto.

Conforme se pode observar com a comparação das respostas em frequência da injeção de corrente no barramento 69 kV da SE BJC na Figura 61, em que para sequência positiva há uma redução da amplitude da impedância e redução das frequências de ressonância e para sequência zero há um aumento da amplitude e deslocamentos das frequências de ressonância o que mostra um possível aumento das sobretensões e redução do amortecimento pela redução das frequências de ressonância.



(a) Sequencia positiva



(b) Sequencia zero

Figura 63 – Comparação da resposta em frequência vista do barramento 69 kV da SE BJC considerando sistema completo (12J1 e 12J3 PBL abertos) e sistema até SE CTR (12N2 JRC aberto). Injeção de corrente de seqüência positiva (a) e zero(b) barramento 69 kV da SE BJC.

Na tabela 16 com o resultado da simulação usando a chave estatística confirma-se que as amplitudes das sobretensões observadas sofreram elevação comparando-se com o resultado da tabela 13 confirmando as expectativas inferidas no domínio da frequência.

Tabela 16 – Resultado simulação estatística da energização do circuito CMA-PBL em três operações de disjunção.

	Passo	69 kV						13,8 kV					
		PBL	JRC	CTR	BJC	PLT	SBT	PBL	JRC	CTR	BJC	PLT	SBT
10 %	1-Energização PBL e JRC	1,65	1,8	-	-	-	-	1,8	2,25	-	-	-	-
	2-Energização CTR e BJC	1,45	1,45	1,7	1,8	-	-	1,45	1,45	2,25	2,1	-	-
	3-Energização PLT e SBT	1,4	1,4	1,7	1,8	1,75	1,85	1,55	2,2	1,75	1,7	1,8	2,1
50 %	1-Energização PBL e JRC	1,55	1,7	-	-	-	-	1,6	2,0	-	-	-	-
	2-Energização CTR e BJC	1,3	1,3	1,5	1,55	-	-	1,3	1,6	1,65	1,55	-	-
	3-Energização PLT e SBT	1,25	1,35	1,55	1,65	1,6	1,65	1,35	1,4	1,4	1,4	1,45	1,75

Simulações determinísticas tomando como base os resultados do estudo estatístico, instante de fechamento do disjuntor. Observa-se na Figura 65 (a), uma sobretensão no barramento 13,8 kV da SE BJC que ultrapassa o limiar da suportabilidade, devido o baixo amortecimento, porém essa é uma situação extrema de carregamento leve em que a subestação estaria praticamente sem carga e com o sistema no patamar de carga leve. Ao encontrar o sistema com 50% da carga nominal para o patamar, na Figura 65 (b) existe um forte amortecimento e não há violação dos limites de suportabilidade adotados.

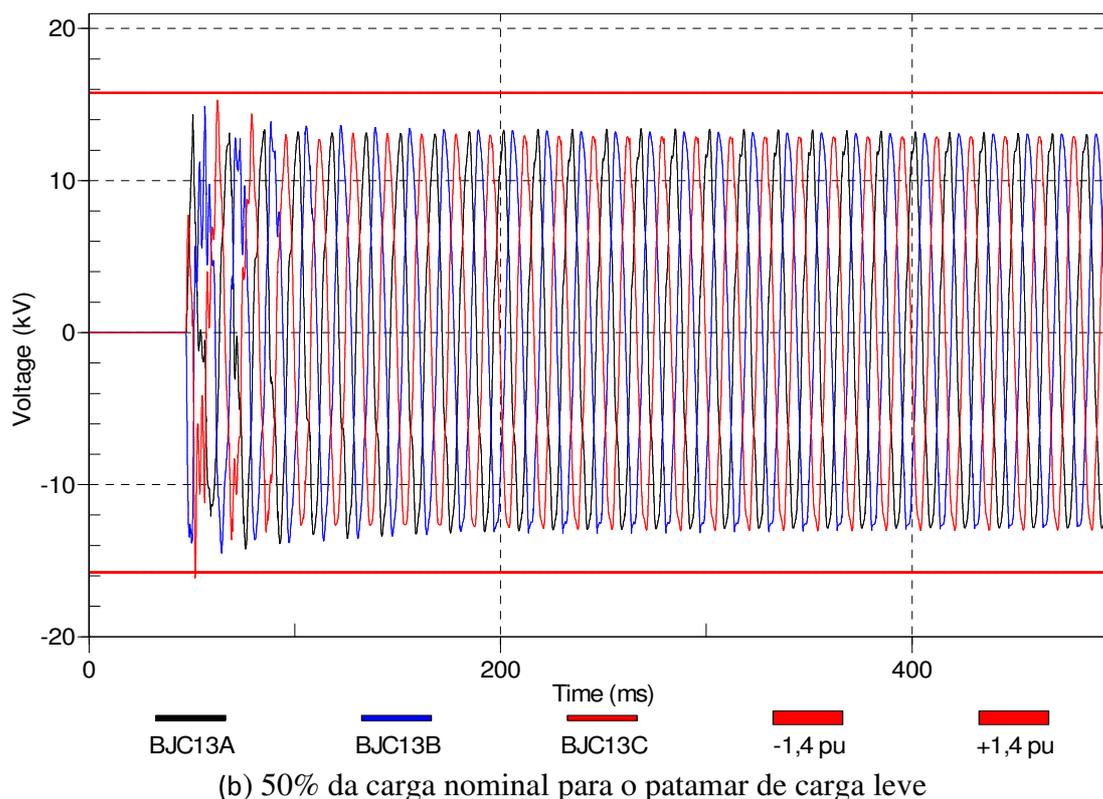
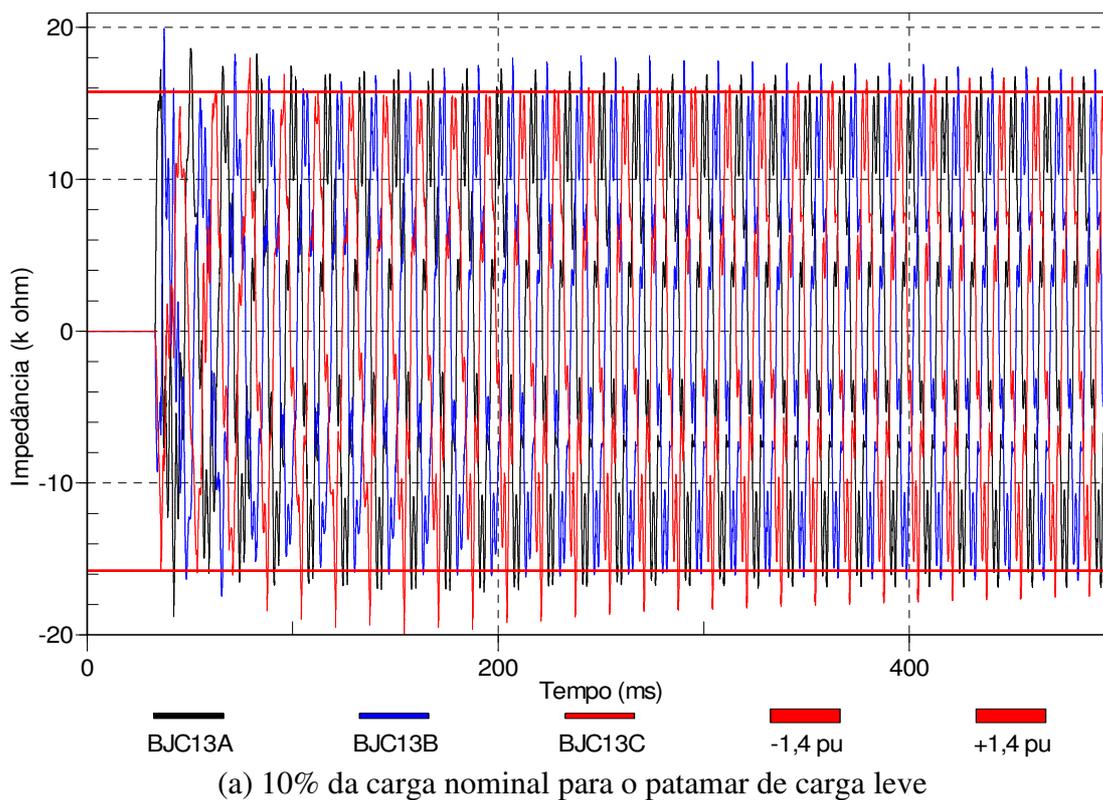


Figura 64 - Tensão no barramento 13,8kV da SE BJC na energização das SEs CTR e BJC por meio do fechamento do disjuntor 12N2 da SE JRC . Bancos de capacitores conectados

Neste capítulo 4 foram apresentadas aplicações de estudos no domínio da frequência, estudo estatístico e determinístico a um sistema real. Desde a modelagem

dos elementos e considerações para adequação ao sistema de distribuição em alta tensão a interpretação dos resultados. Com os resultados das simulações para cada circuito ficou evidente a possibilidade de execução das manobras de energização do sistema sem a necessidade de desconexão das cargas, energizando o sistema com a operação de um único disjuntor.

Manobras alternativas em comparação da energizando o sistema com a operação de um único disjuntor forma mostradas e se verificou que não ganho significativo que justifique realizar a energização do sistema por etapas. Dentre as alternativas a desconexão dos bancos de capacitores é a que produz o melhor resultado reduzindo drasticamente as sobretensões.

Capítulo 5

Conclusões

Neste trabalho foram apresentadas técnicas e ferramentas de análise de transitórios em sistema de distribuição de alta tensão resultados de manobra que provocam sobretensões. O objetivo desse trabalho foi avaliar a possibilidade de efetuar a energização de um circuito de alta tensão em 69 kV com a operação de apenas um único equipamento de disjunção sem que haja violação dos limites de suportabilidade dos equipamentos do sistema, reduzindo assim sensivelmente o número de operações e o tempo de manobra para recomposição.

Para isso foram utilizadas ferramentas de análise no domínio da frequência para uma primeira inferência limitando a investigação, no domínio do tempo por estudos estatísticos e determinísticos, aos cenários mais adequados aos objetivos do estudo. Executado o estudo estatístico a partir dos cenários inferidos no estudo no domínio da frequência se obtêm instantes de fechamento do disjuntor que produzem as sobretensões de maiores amplitudes. De posse desse instante de fechamento do disjuntor executa-se um estudo determinístico e avalia-se o cenário quanto à violação dos limites de suportabilidade dos equipamentos do sistema.

A metodologia aplicada usando a varredura em frequência, estudo estatístico e determinístico e simulação em massa garante abranger a maior diversidade de cenário de configuração do sistema, garantindo a avaliação das situações mais severas, servindo de limiar para comparação a outros resultados no domínio da frequência.

Um estudo de caso do regional Coremas do sistema de distribuição da Energisa Paraíba foi apresentado mostrando que é possível executar a energização do sistema com a operação de um único equipamento de disjunção. Porém, para aumentar a garantia de sucesso da operação, alternativas a essa manobra foram apresentadas, como a desconexão de bancos de capacitores e a energização parcial do sistema de distribuição.

A energização parcial do sistema mostra-se uma opção viável, há uma redução significativa das sobretensões, porém menor quando comparada à energização do sistema com apenas uma disjunção.

A desconexão dos bancos de capacitores do barramento é alternativa que produz o melhor resultado quanto à redução das sobretensões, porém para sua aplicação é necessário investimento no sistema de automação e sistemas auxiliares das subestações para que possibilite o desligamento dos bancos de capacitores com as subestações desenergizadas.

Atualmente na Energisa Paraíba aplica-se a manobra de reenergização do sistema com a operação em um único equipamento de disjunção. O que trouxe melhorias nas rotinas e indicadores operacionais como evitar erro do operação e redução do tempo médio de restabelecimento.

Além disso, foi implantado em mais de 60% do sistema de distribuição em 69 kV um esquema de proteção para desligamento dos bancos de capacitores por falta de tensão, com perspectiva de atingir 100% do sistema de distribuição.

Como perspectiva de trabalhos futuros:

- Usar a varredura na frequência para encontrar equivalentes dinâmicos de sistemas de distribuição em alta tensão que servirão para representar cargas dinâmicas para estudos no sistema de transmissão.
- Avaliar impacto da manobra caso exista um curto-circuito na linha a ser energizada. Avaliando afundamentos de tensão.
- Uso de método computacional, otimização/heurístico, para distinguir situação de transitório de maior severidade a partir da resposta em frequência observada.

Referências Bibliográficas

- ADIBI, M. M.; ALEXANDER, R. W.; AVRAMOVIC, B.; “Overvoltage Control During Restoration”. in: IEEE Transactions Power Systems, pp 146 – 1470on Vol:7 , N°4, Nov 1992.
- ADIBI, M.M.; BORKOSKI, S.M.; KAFKRA, R.J. “Analytical Tool Requirements for Power System Restoration”, in: IEEE Transaction on Power Systems, pp. 1582-1591, Vol. 8, N°3, Aug 1994.
- AGNEHOLM, E. (1999). Cold load pick-up, PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica - Revisão 6 de 01/01/2015.
- ARAUJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A., “Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia Elétrica”, Belo Horizonte, MG – Brasil, Editora UFMG, 2005.
- AZEVEDO, V. S., “Contribuições para Análise e Resolução de Tensão de Restabelecimento Transitória”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. 2009.
- CARRAMASCHI, I. H. C.; “Análise de Equivalentes de Transitórios Eletromagnéticos Obtidos no Domínio do tempo e da Frequência”. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.
- CHIANG, F.; “Implications of Temporary Overvoltages for Insulation Coordination for Equipment within Low-voltage Systems” in: Product Compliance Engineering (PSES), 2011 IEEE Symposium on Topic(s): General Topics for Engineers (Math, Science & Engineering) ; Power, Energy, & Industry Applications.

- CIGRÉ WORKING GROUP 33.02, Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients. Technical Brochure CE/SC GT/WG 02, 1990.
- D'AJUZ, ARY - Transitórios Eletromagnéticos e Coordenação de Isolamento: Aplicação em sistemas de potência de alta tensão. Rio de Janeiro, Furnas Niterói Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987. Capítulo 5.
- DOMMEL, H.W. “*Eletromagnetic Transients Program Reference Manual: EMTP Theory Book*”. Portland, BPA, 1986.
- DUGAN, R. C., MC GRANAGHAN, M. F., SANTOSO, S., BEAT, H. W.: *Electrical Power Systems* Quatliy 2 Edição, Mc Graw Hill, 2004.
- FERNANDES , A. B.; LIMA A. C. S., “Aspectos Relevantes em Estudos Probabilísticos de Religamento Automático de Linhas de Transmissão”. SBSE 2006 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Campina Grande, PB, Brasil, 17 a 19 de junho de 2006.
- FERNANDES , A. B.; SAMUEL NETO, A.: Análise no Domínio da Frequência Visando Quantificar o Impacto do Desligamento de Circuitos para Controle de Tensão, in 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.; MOURA, D. F. P.; SOARES, R. M.: Desempenho no Domínio da Frequência de um sistema de Distribuição com Geração Eólica, in CBQEE – Conferência Brasileira Sobre Qualidade de Energia, Cuiabá, MT, Brasil de 31 de julho a 03 de agosto de 2011.
- FRANÇA, F. A. X., “Estratégias para Estudo de Recomposição de Sistemas Elétricos via Análise de Varredura em Frequência”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. 2009.
- FONTES A. V.; NEVES W. L. A “Avaliação do Impacto de Manobras de Recomposição No Sistema de Distribuição 69 kV”. XV Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ (ERAC) Foz do Iguaçu-PR, Brasil 19 a 23 de maio de 2013.

- IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "Load Representation for Dynamic Performance Analysis", IEEE Transaction on Power Systems, pp. 472-482, Vol. 8, N°2, May 1993.
- IEEE Task Force on Harmonic Modeling and Simulation, IEEE Power Eng. T&D Committee, "Impact of Aggregate Linear Load Modeling on Harmonic Analysis: A Comparison of Common Practice and Analytical Models", IEEE Transaction on Power Delivery, pp. 625-630, Vol. 18, N°2, April 2003.
- LEMOS, FLAVIO A. B. MANZONI, ALESSANDRO ; DA ROSA, MAURO A. ; ZAMPIERI, ANTONIO V.; FILHO, JAIME JEFFEMAN ; FEIJO, WILSON L. ; KOBER, FELIPE ; DOS SANTOS, LUCAS L.; BERTANI, RODRIGO ; BRASIL, LUCIANO,: "Application of a computational system to support real time restoration and switching actions in distribution systems":18th International Conferência on Electricity Distribution, CIRED – (Congrès International des Réseaux Electriques de Distribution), Turin 6 - 9, June 2005.
- LEUVEN EMTP CENTER. "ATP - Alternative Transients Program - Rule Book", Heverlee, Belgium, July 1987.
- LI LING; LIAO ZHIWEI; HUANG SHAOXIAN; WANG GANG A.: "Distributed Model for Power System Restoration Based on Ant Colony Optimization Algorithm" Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES
- LUNA, E. K; DECKMANN, S. M.: Avaliação do Impacto de Variações de Tensão Sobre Cargas in CBA – Congresso Brasileiro de Automática, Gramado, RS, Brasil, de 21 a 24 de setembro de 2004.
- MANDOULIDIS, P.; LAMBROU, C.; VOURNAS, C., "Effect of Load Restoration on an Integrated Autonomous Protection System Against Voltage Instability" IEEE PES PowerTech, Trondheim, Norway, 19-23 June 2011 IEEE PES
- MARTINEZ, J.A.; NATARAJAN, R.; CAMM, E., "Comparison of statistical switching results using Gaussian, uniform and systematic switching approaches," Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE , vol.2, no., pp.884,889 vol. 2, 2000

- MOTA, A. A.; MOTA L. T. M.; FRANÇA, A. L. M.: Metodologia de Recomposição Coordenada de sistemas de Elétricos com Base em Técnica de Lógica Nebulosa e Busca Heurística in CBA – Congresso Brasileiro de Automática, Gramado, RS, Brasil, de 21 a 24 de setembro de 2004.
- NETO, S. A.; FERNANDES, A. B., “Efeito da Modelagem da Carga para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Transmissão”, CBQEE – Conferência Brasileira Sobre Qualidade de Energia, Blumenau, SC, Brasil de 02 a 05 de agosto de 2009.
- NEVES, W. L. A., FERNANDES D. JR. DANTAS, K. M.C. , SILVA J. A. C. B.: Manobras em Sistemas de Distribuição: Impacto em Consumidores Residenciais in CBQEE – Conferência Brasileira Sobre Qualidade de Energia, Blumenau, SC, Brasil de 02 a 05 de agosto de 2009.
- NUNES, R. R., “Coordenação de Isolamento para Transitórios de Manobra Considerando a Forma de Onda das Sobretensões”. Dissertação Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. 2006.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS, Procedimentos de Rede – Módulo 23: Critérios para Estudos, Submódulo 23.3 - Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos, Revisão 2.0, Datado de 11/11/2011, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. Filter Design Techniques. “Discrete-Time Signal Processing. New Jersey Editora Prentice Hall, 1989.
- PARIS, L. Basic Considerations of Magnitude Reduction of Switching Surges Due to Line Energization. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, [S.l.], v. 87, n. 1, p. 295-305, jan. 1968.
- REGALLER, K. (Ed.) Surges in High- Voltage Networks. New York: Plenum Press, 1980.
- RIOUAL, M; MARTINEZ,M.; “Energization of two transformers in series through long lines: Correlation between fluxes in both transformers, and determination of the efficiency of palliative solutions” IPST (International Conference on Power Systems Transients), Lyon, France, June 4-7, 2007.

- SADEGHKHANI, I.; KETABI, A.; FEUILLET, R., “Estimation of Temporary Overvoltages during Power System Restoration using Artificial Neural Network”. 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems,- ISPA, Curitiba, Brazil 8-12 Nov. 2009.
- SOUZA B. A.; BRITO N. S. D.; NEVES W.; DANTAS K. M. & FONTES A. V. “Construção automática de bases de dados – Uma experiência de P&D entre CHESF e a UFCG”. XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Outubro de 2005, Curitiba, Brasil.
- TRUAX, C. J.; BROWN, J. D.; NEUGEBAUER, W. ,“The Study of Reclosing Transients on a 765 kV Shunt Compensated Transmission Line”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, [S.l.], v. 97, n. 4, p. 1447-1457, jul./ago. 1978.
- WANIK, M.Z.C.; YUSUF, Y.; AL-YOUSIF, S.N.; UMEH, K.C.; MOHAMED, A., "Simulation of harmonic resonance phenomena in industrial distribution system". TENCON 2004. 2004 IEEE Region 10 Conference , vol.C, no., pp.240,243 Vol. 3, 21-24 Nov. 2004
- WART, G. T.; MORK, B. A. MUSTAPHI, K. K., “ A New Method to Determine Frequency Characteristics of a Power System Including Nonlinear Effects”. IPST (International Conference on Power Systems Transients), Seattle, EUA, June 22-26, 1997.
- WOODFORD, D. A.; WEDEPOHL, L. M., “Transmission Line Energization with Breaker Pre-Strike”. In: IEEE WESCANEX 97: CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, POWER AND COMPUTING, 1997, Winnipeg. Proceedings... [S.l]: IEEE, 1997. p. 105-108.
- ZANETA JÚNIOR, L. C. Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potencia, 1. Ed. Edusp, 2003. p 411 – 441.

Anexo I

Tabela 17 - Carregamento e potência instalada de bancos de capacitores no regional
Coremas

Nome da Subestação	Código da Subestação	Potência Instalada (MVA)	Bancos de Capacitores (MVar)	Patamar de Carga					
				Pesada		Média		Leve	
				P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)
Coremas	CRM	5/6,25	0,3	3,39	2,13	2,41	1,6	1,91	1,58
Malta	MLT	5/6,25	1,2	2,93	1,62	2,26	1,77	1,94	1,44
Patos	PTS	20/25	5,1	12,82	6,93	9,86	5,1	6,84	6,07
Jatoba	JTB	10/12,5	1,8	8,51	4,18	8,14	3,9	5,06	3,3
Teixeira	TXR	10/12,5	1,8	4,82	3,01	4,84	2,69	2,08	1,8
Pombal	PBL	10/12,5	1,8	5,96	3,76	5,88	3,94	4,11	2,83
Paulista	PLT	10/12,5	1,2	2,93	1,79	1,86	1,74	1,88	1,58
Jericó	JRC	10/12,5	1,2	2,17	1,51	1,7	1,76	1,21	1,71
Catolé do Rocha	CTR	10/12,5	5,4*	7,58	6,48	6,37	6,31	5,05	6,43
Brejo do Cruz	BJC	10/12,5	1,8	2,65	2,18	2,88	2,81	1,48	2,1
São Bento	SBT	10/12,5	1,2	5,25	1,95	4,96	2,04	3,94	1,76
Piancó	PCO	10/12,5	1,8	5,43	3,18	5,17	3,36	2,88	2,75
Itaporanga	ITO	10/12,5	1,2	6,04	2,43	3,42	2,44	2,6	1,73
Ibiara	IBR	7/8,25	1,2	5,3	2,53	3,34	2,18	2,63	1,73
São Gonçalo	SGL	5/6,25	1,5	4,22	2,08	4,22	2,89	3,26	2,32
Souza	SZA	20/25	3,6	15,88	5,86	10,28	4,64	7,41	4,12
Cajazeiras	CJZ	15/16,25	7,2	15,43	9,37	13,24	7,2	8,38	7,2
São João do Rio do Peixe	SPX	10/12,5	1,2	4,44	1,83	3,14	1,84	2,14	1,51
Uiraúna	URN	5/6,25	1,2	2,5	1,03	1,89	0,85	1,21	0,47

Anexo II

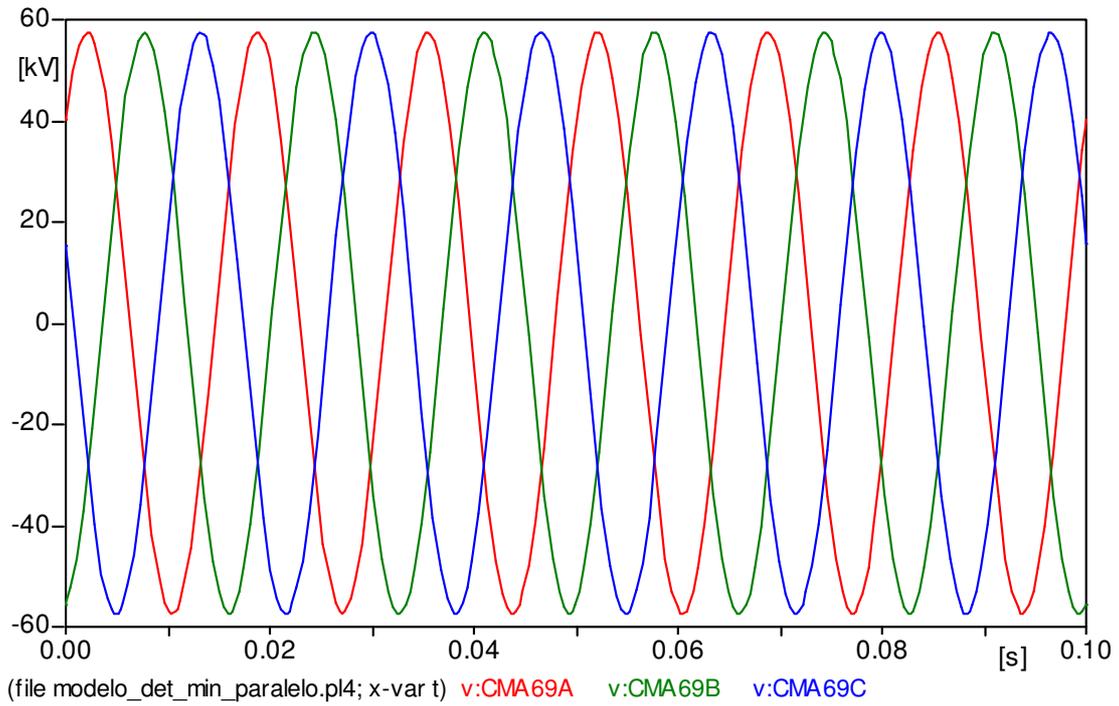


Figura 65 – Tensão em regime permanente no barramento 69kV da SE CMA.

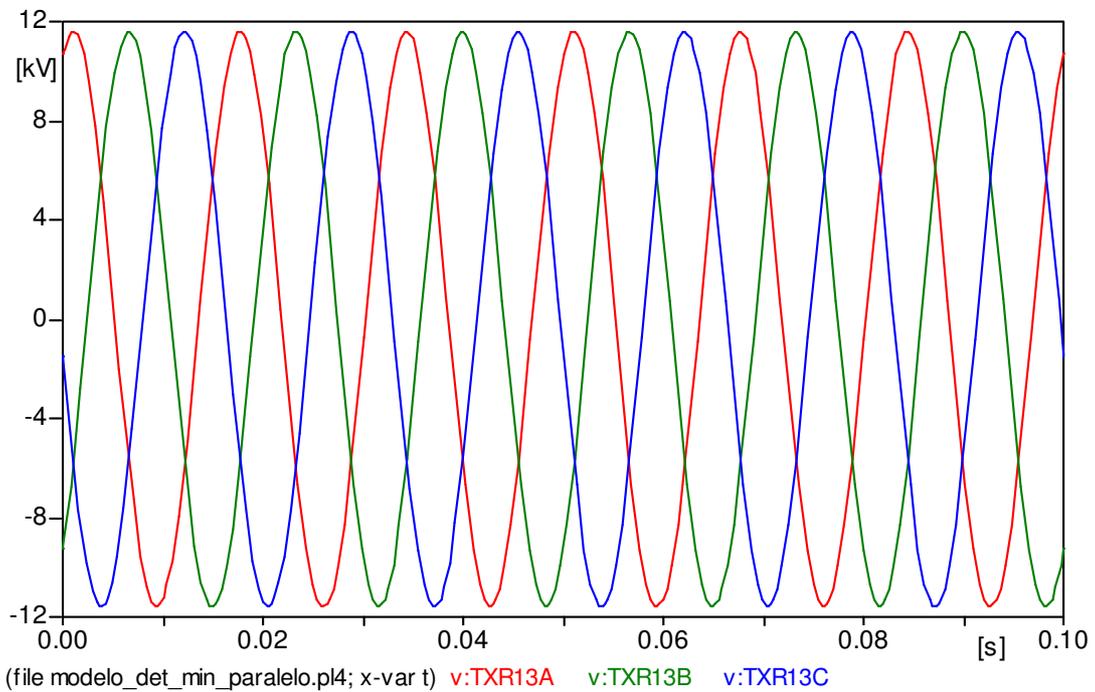


Figura 66 – Tensão em regime permanente no barramento de 13,8 kV da SE TXR.