

**FABRÍCIO SILVEIRA CHAVES**

**AVALIAÇÃO TÉCNICA DO DESEMPENHO DA  
COMPENSAÇÃO REATIVA SHUNT CAPACITIVA  
APLICADA À EXPANSÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de Concentração: Engenharia de Potência  
Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Maria Helena Murta Vale**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG  
BELO HORIZONTE  
2007**

Dedico este trabalho a todos que entraram na minha história de vida e me ensinaram a crescer e a ser gente – Deus, meus pais, minha irmã, Prof<sup>ª</sup>. Maria Helena Murta Vale – minha grande orientadora, minha namorada Michelle, meus amigos verdadeiros, meus parentes, meus professores de ontem e de hoje.

# AGRADECIMENTOS

## Obrigado, Senhor!

Por ter permitido que fossem meus pais: Saturnino e Luciana, senhores de tanta coragem, responsabilidade, energia e amor. Sem a dedicação deles não teria chegado onde estou hoje.

Por ter dado à minha mãe tamanha paciência, habilidade e persistência para me ajudar em tudo de que precisei.

Por ter sido eu a prova mais concreta de tudo aquilo que meus pais plantaram.

Por ter sido eu alvo do incentivo e da alegria de minha irmã Sabrina.

Por ter como namorada Michelle que suportou o estresse da finalização da tese e, com muita compreensão, esteve sempre ao meu lado.

Por ter colocado em meu caminho a professora Maria Helena Murta Vale que me reergueu nos momentos difíceis, nunca me abandonando mesmo em situações embaraçosas, e me orientando para que eu conseguisse alcançar a glória.

Por ter sido propiciada por engenheiros da CEMIG a oportunidade de se fazer um estudo dentro daquela empresa.

Por ter convivido com Francisco, José Roberto, Roberto Márcio Coutinho, Sebastião Otávio, Tiago, engenheiros da CEMIG que me esclareceram as dúvidas e me ajudaram a solucionar as dificuldades encontradas durante a pesquisa.

Por ter recebido o apoio dos meus amigos do LRC – Alberto, Amilton, Cláudia, Fernando, Fuad, Luiz Mariano Júnior, Marcelo, Renato, Rosilene, Walmir, Werveson – para resolver problemas de ordem técnica e burocrática e também por terem tornado o doutorado uma luta mais amena.

Por ter colocado a meu lado pessoas tão especiais.

Por tudo enfim que tornou possível eu ser digno desta grande vitória.

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma Estratégia para definição da Compensação Reativa Shunt Capacitiva aplicada às atividades de Expansão dos Sistemas Elétricos de Potência. A compensação reativa traz vários benefícios para os sistemas elétricos dentre os quais destacam-se: maior e melhor aproveitamento do sistema existente, equilíbrio no balanço geração/consumo de potência reativa, fatores de potência ajustados e perfil de tensão adequado. Adicionalmente, constitui-se em alternativa bastante atrativa em termos econômicos.

Controlar os sistemas elétricos de forma otimizada tem se configurado cada vez mais uma tarefa não trivial, fato este que vem justificar o grande interesse do setor elétrico no desenvolvimento de Estratégias de Controle. A definição da compensação reativa se torna ainda mais complexa quando se deseja melhor qualidade de energia sem problemas de colapso de tensão, sem sobretensões e sobrecorrentes e com o mínimo possível de distorção harmônica da tensão e da corrente.

O planejamento da expansão, no que concerne à compensação reativa, é composto por quatro passos básicos: (i) seleção do sistema a ser estudado; (ii) definição da compensação reativa e controle de tensão; (iii) avaliação técnica e econômica da alternativa; (iv) estruturação do plano de expansão.

Neste trabalho são definidos e detalhados procedimentos relativos à avaliação técnica de alternativas. Tal avaliação é realizada por meio da análise do comportamento do sistema elétrico nos seguintes aspectos: *estabilidade de tensão*, através de curvas PV e QV; *transitórios eletromagnéticos*, onde são realizadas simulações de manobra de capacitores para barras críticas; *harmônicos*, em que se verificam as distorções das formas de onda de tensão e corrente amplificadas pelos capacitores sugeridos. A tese expõe propostas de alteração da compensação inicialmente indicada, caso os resultados da avaliação apontem tal necessidade.

Três procedimentos são apresentados: Individual, Global e Otimizado Expandido. Os resultados da aplicação da metodologia proposta na tese em redes elétricas reais são registrados, de maneira a demonstrar, detalhar e exemplificar os diversos passos dos procedimentos para cada avaliação técnica.

# ABSTRACT

This work presents a strategy for definition of the Capacitive Shunt Reactive Compensation applied to Power Systems Expansion activities. The reactive compensation brings some benefits for electrical systems: greater and better exploitation of the existing electrical system, power factor correction and adequate voltage profile. Besides, this is an attractive expansion alternative regarding economic aspects.

The problem involved with reactive compensation is not trivial and the expansion plan preparation becomes a complex task, fact that justifies the great interest of the electric sector in the development of Control Strategies. The definition of the reactive compensation becomes still more complex when a better quality of energy is desired, without voltage collapse, overvoltage and overcurrent problems and with small harmonic distortion of voltage and current waves. These problems result in damage for energy companies, consumers and electrical power system sector.

Expansion planning tasks considers the following steps: (i) Power System Diagnosis Evaluation, in order to detect any deficiency; (ii) Reactive Compensation Equipment Definition; (iii) Economical and Technical Evaluation of the alternatives; (iv) Selection of the most adequate alternative and Preparation of the Expansion Plan.

In this work, the procedures related to the technical evaluation of alternatives are defined and detailed. This evaluation is realized by the analysis of the electrical system behavior with respect to the following aspects: *voltage stability*, by the use of PV and QV curves; *electromagnetic transient*, where simulations of switching capacitors for critical buses are done; *harmonic*, where the distortions of the voltage and current wave forms, amplified by the suggested compensation, are verified. The thesis presents also specific procedures for compensation alteration, if the evaluation step indicates this necessity.

Three procedures are detailed in this work: Individual, Global and Extended Optimized. Application results of the proposed strategy in real electric networks are presented, in way to demonstrate and illustrate the steps of the procedures.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. Considerações Iniciais.....	1
1.2. Relevância do Tema e Contribuições.....	2
1.3. Motivação e Objetivo .....	4
1.4. Estrutura do Trabalho .....	4
<b>2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E CONCEITOS BÁSICOS</b> .....	<b>6</b>
2.1. Contextualização do Tema .....	6
2.1.1. Compensação Reativa e Controle de Tensão .....	6
2.1.1.1. Políticas, Critérios e Procedimentos para CR/CT .....	9
2.1.2. Estabilidade de Tensão.....	11
2.1.3. Transitórios Eletromagnéticos.....	13
2.1.4. Harmônicos .....	15
2.2. Conceitos Básicos e Literatura Técnica Relevante .....	16
2.2.1. Compensação Reativa <i>Shunt</i> Capacitiva .....	16
2.2.2. Estabilidade de Tensão.....	18
2.2.3. Transitórios Eletromagnéticos.....	25
2.2.4. Harmônicos .....	38
2.3. Considerações Finais .....	54
<b>3. AVALIAÇÃO DA COMPENSAÇÃO REATIVA – PROCEDIMENTOS INDIVIDUAIS</b> .....	<b>55</b>
3.1. Considerações Preliminares.....	55
3.2. Estabilidade de Tensão .....	56
3.2.1. Questão a ser Solucionada.....	56
3.2.2. Procedimento Proposto.....	56
3.2.3. Aplicação do Procedimento Proposto.....	59
3.3. Transitórios Eletromagnéticos .....	78
3.3.1. Questão a ser Solucionada.....	78
3.3.2. Procedimento Proposto.....	78
3.3.3. Aplicação do Procedimento Proposto.....	85
3.4. Harmônicos .....	95

3.4.1.	Questão a ser Solucionada.....	95
3.4.2.	Procedimento Proposto.....	96
3.4.3.	Aplicação do Procedimento Proposto.....	105
3.5.	Análise dos Resultados dos Procedimentos Individuais .....	115
3.6.	Considerações Finais .....	118
<b>4.</b>	<b>PROCEDIMENTO GLOBAL PARA A AVALIAÇÃO TÉCNICA DA COMPENSAÇÃO REATIVA.....</b>	<b>119</b>
4.1.	Considerações Iniciais.....	119
4.2.	Procedimento Global para a Avaliação Técnica.....	120
4.3.	Aplicação do Procedimento Global .....	125
4.4.	Procedimento Otimizado Expandido .....	141
4.5.	Considerações Finais .....	146
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE .....</b>	<b>147</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>149</b>
	<b>APÊNDICE A – ESTABILIDADE DE TENSÃO – DEFINIÇÕES DE INTERESSE</b>	<b>159</b>
A.1.	Definições de Interesse.....	159
A.2.	Análise de Sensibilidade – Barras Candidatas .....	161
	<b>APÊNDICE B – TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS – ESTUDOS COMPLEMENTARES.....</b>	<b>164</b>
B.1.	Definições de Termos Utilizados no Texto.....	164
B.2.	Barras Críticas de Transitórios Eletromagnéticos .....	165
B.3.	Simulações de Chaveamento de Capacitores – Resultados Adicionais.....	172
B.4.	Modelagem Utilizada na Simulação dos Transitórios .....	178
	<b>APÊNDICE C – ESTUDOS BÁSICOS SOBRE HARMÔNICOS .....</b>	<b>180</b>
	<b>APÊNDICE D – RESTRIÇÕES IMPOSTAS PELO SETOR ELÉTRICO .....</b>	<b>190</b>
D.1.	Tensão em Regime Permanente .....	190
D.2.	Fator de Potência .....	191
D.3.	Distorção Harmônica.....	192
D.4.	Recomendação IEEE para Práticas e Requisitos para Controle de Harmônicas no Sistema Elétrico de Potência: IEEE-519 .....	194

# Lista de Tabelas

## Capítulo 2

Tabela 2.1. Distorção da corrente de algumas cargas [Arentz 03].	44
Tabela 2.2. Comparação entre filtros ativos e passivos [Izhar 03].	53

## Capítulo 3

Tabela 3.1. Dados do sistema elétrico exemplo.	60
Tabela 3.2. Resultados do cálculo do vetor tangente.	61
Tabela 3.3. Compensação reativa sugerida (Mvar) para cada ano de planejamento.	64
Tabela 3.4. Fator de potência das barras em cada ano de planejamento.	64
Tabela 3.5. Tensões das barras em cada ano de planejamento.	64
Tabela 3.6. Parâmetros de estabilidade de tensão da barra B12 em cada ano de planejamento.	66
Tabela 3.7. Compensação reativa necessária para se atingir a tensão desejada no ano 7.	67
Tabela 3.8. Compensação reativa necessária para se atingir o fator de potência desejado no ano 7.	68
Tabela 3.9. Alteração da compensação reativa no ano 7.	68
Tabela 3.10. Limites de compensação reativa para a alteração do ano 9.	69
Tabela 3.11. Alteração da compensação reativa no ano 9.	69
Tabela 3.12. Limites de compensação reativa para a alteração do ano 10.	70
Tabela 3.13. Alteração da compensação reativa no ano 10.	70
Tabela 3.14. Nova compensação reativa (Mvar) e parâmetros de estabilidade de tensão para cada ano de planejamento.	71
Tabela 3.15. Resultados da análise de sensibilidade do WANAREDE-GRF.	72
Tabela 3.16. Variação da tensão (em pu) das barras da primeira coluna com a alocação de 1 Mvar nas da primeira linha.	72
Tabela 3.17. Parâmetros de estabilidade de tensão no ano 10 para diferentes barras candidatas.	73
Tabela 3.18. Escolha de B4 como barra candidata comparada à seleção de B3 e B5.	74
Tabela 3.19. Parâmetros de estabilidade de tensão no ano 10 para várias alternativas de CR.	74
Tabela 3.20. Resultados do cálculo do vetor tangente para o ano 10.	75
Tabela 3.21. Margem de potência reativa, MET e TPC no ano 10 para várias alternativas de CR.	75
Tabela 3.22. Perdas elétricas e carregamento de linhas para várias alternativas de CR.	77
Tabela 3.23. Coeficientes de reflexão e refração do circuito da figura 3.12.	82
Tabela 3.24. Limites de sobretensão e sobrecorrente para 400 manobras por ano.	84
Tabela 3.25. Dados do sistema elétrico exemplo.	86
Tabela 3.26. Dados dos níveis de carga (leve, média e pesada) e sua CR sugerida.	86
Tabela 3.27. Dados de linha e carga do circuito simplificado da figura 3.16 para o cálculo dos coeficientes da tabela 3.28.	87
Tabela 3.28. Coeficientes de reflexão e refração do sistema elétrico exemplo.	87
Tabela 3.29. Classificação das barras pelos índices $C_{i \text{ total}}$ .	88
Tabela 3.30. Tensões e fatores de potência nas barras com a compensação sugerida inicialmente e com a modificada.	95

Tabela 3.31. Dados do sistema elétrico exemplo.....	106
Tabela 3.32. Distorções totais de cada barra e $DHl_V$ e $DHT_V$ globais e seus limites.....	109
Tabela 3.33. Fatores de potência das barras com a presença de harmônicos.....	109
Tabela 3.34. Valores de $r_{lim}$ para cada barra na 5ª, 6ª e 9ª ordens harmônicas.....	110
Tabela 3.35. Distorções totais de cada barra e $DHl_V$ e $DHT_V$ globais e seus limites depois da alteração do plano de expansão.....	111
Tabela 3.36. Fatores de potência das barras com a presença de harmônicos depois da alteração do plano de expansão.....	112
Tabela 3.37. Tensões e FP das barras com a CR sugerida inicialmente e com a modificada.....	113
Tabela 3.38. Resultados de compensação reativa dos procedimentos individuais.....	115
Tabela 3.39. Perdas elétricas para as CRs indicadas para cada avaliação técnica e para a CR Final.....	117

## **Capítulo 4**

Tabela 4.1. Dados iniciais e a CR sugerida pela alteração feita na avaliação técnica de estabilidade de tensão.....	126
Tabela 4.2. Dados de entrada para a AVT.....	126
Tabela 4.3. Dados dos níveis de carga do sistema elétrico exemplo no ano 10 e sua CR Sugerida.....	127
Tabela 4.4. CR Modificada pela AVT que corresponde aos dados de entrada da AVH.....	131
Tabela 4.5. Dados de entrada da AVH.....	131
Tabela 4.6. Distorções totais de cada barra e $DHl_V$ e $DHT_V$ globais e seus limites.....	133
Tabela 4.7. Capacitores indesejados para cada conjunto de compensação reativa em carga média.....	134
Tabela 4.8. Distorções totais de cada barra e $DHl_V$ e $DHT_V$ globais e seus limites para CR Média 1.....	135
Tabela 4.9. Capacitores indesejados para cada conjunto de compensação reativa em carga pesada.....	136
Tabela 4.10. Restrições de mínimo ( $CR_{harm1}$ ) e máximo ( $CR_{harm2}$ ) de compensação reativa (em Mvar) da AVH.....	139
Tabela 4.11. CR do passo ii para níveis de carga para o ano 10.....	139
Tabela 4.12. Compensações reativas sugeridas para cada avaliação técnica do passo ii para o ano 10.....	140
Tabela 4.13. Perdas elétricas e carregamento de linhas para as CR sugeridas após as avaliações técnicas....	140
Tabela 4.14. Restrições de máximo e mínimo de compensação reativa (em Mvar) para cada avaliação técnica e para os limites resultantes.....	143
Tabela 4.15. Restrições de tensão máxima e mínima para cada barra.....	144
Tabela 4.16. Tensão e compensação reativa das barras após a otimização.....	144
Tabela 4.17. Comparação das perdas elétricas e carregamento de linhas para as CR sugeridas neste texto...145	
Tabela 4.18. CR OTM Final para níveis de carga para o ano 10.....	145

## **Apêndice A**

Tabela A.1. Resultados do exemplo da análise de sensibilidade.....	162
--	-----

## **Apêndice B**

Tabela B.1. Coeficientes de reflexão e refração do circuito da figura B.1.....	169
Tabela B.2. Parâmetros que atingem maiores valores de ST e SC.....	175
Tabela B.3. Resultados das simulações descritas anteriormente.....	177

**Apêndice D**

Tabela D.1. Limites para os valores de tensão de nível igual ou superior a 230 kV.....	190
Tabela D.2. Limites para os valores de tensão de nível igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV.....	191
Tabela D.3. Limites para os valores de tensão de nível igual ou superior a 1 kV e inferior a 69 kV.....	191
Tabela D.4. Fator de Potência Operacional nos pontos de conexão.....	191
Tabela D.5. Limites globais de tensão expressos em porcentagem da tensão fundamental. ....	193
Tabela D.6. Limites individuais expressos em porcentagem da tensão fundamental.....	193
Tabela D.7. Limites de distorção da corrente para sistemas de distribuição (120 V a 69 kV). ....	195
Tabela D.8. Limites de distorção da corrente para sistemas de sub-distribuição (69001 V a 161 kV). ....	195
Tabela D.9. Limites de distorção de corrente para sistemas de alta tensão (>161kV) e sistemas de geração e co-geração isolados.....	195

# Lista de Figuras

## Capítulo 2

Figura 2.1. Passos básicos do procedimento.....	10
Figura 2.2. Curvas PV – chaveamento de capacitores [Prada 06]. .....	12
Figura 2.3. Circuito equivalente da equação 2.15. ....	28
Figura 2.4. Circuito exemplo para as equações 2.17 e 2.18. ....	31
Figura 2.5. Modelo do resistor de pré-insersão. ....	35
Figura 2.6. Ressonância paralela (a) entre o sistema e o capacitor ( $X_S = X_C$ ) e (b) entre a carga e o capacitor ( $X_L = X_C$ ) .....	46
Figura 2.7. Ressonância série (a) entre o sistema e o capacitor ( $X_S = X_C$ ) e (b) entre $X_B$ e o capacitor ( $X_B = X_C$ ). .....	46
Figura 2.8. (a) Rede simplificada para a representação da impedância própria e (b) seu circuito equivalente. ....	47
Figura 2.9. (a) Harmônica de corrente inserida pela carga; (b) harmônica de tensão inserida pelo sistema. ....	48
Figura 2.10. Ilustração da ressonância paralela e série em um gráfico de impedância própria versus frequência. ....	49

## Capítulo 3

Figura 3.1. Fluxograma da avaliação técnica de compensação reativa. ....	56
Figura 3.2. Fluxograma da avaliação técnica de CR com relação à estabilidade de tensão. ....	57
Figura 3.3. Sistema elétrico exemplo de 14 barras da região Sudeste do Brasil. ....	60
Figura 3.4. Curva PV da barra B12 sem e com a CR sugerida e com a modificação do <i>tap</i> . ....	62
Figura 3.5. Curva QV das barras de carga com a CR sugerida e alteração do <i>tap</i> . ....	62
Figura 3.6. Curva QV da barra B12 sem e com a CR sugerida e com a modificação do <i>tap</i> . ....	63
Figura 3.7. Curva PV da barra B12 com a instalação de diferentes capacitores durante o horizonte de planejamento. ....	65
Figura 3.8. Curva PV da barra B12 com a instalação dos novos montantes de CR durante os anos. ....	71
Figura 3.9. Curva PV da barra B12 com a instalação de 17,7 Mvar em B4. ....	73
Figura 3.10. Curva QV da barra B7 para o ano 10 para várias alternativas de CR. ....	76
Figura 3.11. Fluxograma da avaliação técnica de CR com relação a transitórios eletromagnéticos. ....	79
Figura 3.12. Circuito para o cálculo dos coeficientes de reflexão e refração e, conseqüentemente, $C_{i \text{ total}}$ . ....	80
Figura 3.13. Sobretensões geradas nos pontos $N_2$ , $N_3$ , $N_4$ e $N_5$ do circuito da figura 3.12 quando são consideradas as situações: (a) os capacitores instalados e as reatâncias são desprezadas; (b) são incluídos os bancos de capacitores; (c) situação (b) com a consideração também das reatâncias ....	82
Figura 3.14. Sobretensões e sobrecorrentes em função do número de manobras e do tempo de ocorrência em segundos [Freire 01a]. ....	84
Figura 3.15. Sistema elétrico exemplo de 14 barras da região Sudeste do Brasil. ....	85
Figura 3.16. Circuito simplificado para se calcular os coeficientes de reflexão e refração das matrizes C e D. ....	87
Figura 3.17. Rede elétrica equivalente modelada para simular no ATPDraw a análise 1 para as barras B9 e B14. ....	88
Figura 3.18. Rede elétrica equivalente modelada para simular no ATPDraw a análise 2 para B14. ....	89

Figura 3.19. Transitórios eletromagnéticos causados pela manobra dos bancos das barras B9 e B14, respectivamente. ....	89
Figura 3.20. Transitórios eletromagnéticos causados pela manobra do segundo banco da barra B14. ....	90
Figura 3.21. Transitórios eletromagnéticos causados pela manobra do banco da barra B12 com a adição de 1,2 Mvar de B9. ....	92
Figura 3.22. Transitórios eletromagnéticos causados pela manobra do segundo banco da barra B12 com a adição de 6 Mvar de B14. ....	93
Figura 3.23. Corrente do segundo banco da barra B14 com a utilização de diferentes equipamentos de manobra: (a) disjuntor comum; (b) reator de pré-inserção; (c) resistor de pré-inserção; (d) chaveamento controlado. ....	93
Figura 3.24. Rede elétrica equivalente modelada para simulação no ATPDraw da análise 1 para B7. ....	95
Figura 3.25. Fluxograma da avaliação técnica da CR com relação aos harmônicos. ....	96
Figura 3.26. Representação de $Z_0$ e $Y_P$ em um circuito simplificado. ....	97
Figura 3.27. Representação do lugar geométrico de $Y_0$ , $Y_m$ e $B_{cm}$ . ....	98
Figura 3.28. Exemplo de um capacitor cujo $Z_P$ é menor que a impedância própria na ressonância ( $Z_m$ ). ....	99
Figura 3.29. Representação de $Y_{lim}$ , $Y_{lim}'$ , $B_c$ e $B_c'$ para três situações: (a) $Y_{lim} < Y_0$ ; (b) $Y_{lim} = Y_0$ ; (c) $Y_{lim} > Y_0$ . ....	101
Figura 3.30. Representação dos limites de fator de potência e tensão. ....	102
Figura 3.31. Representação de um mesmo capacitor em duas frequências. ....	103
Figura 3.32. Alteração da admitância de uma barra ( $Y_0$ ) ao se modificar o capacitor de outra. ....	104
Figura 3.33. Sistema elétrico exemplo de 14 barras da região Sudeste do Brasil. ....	106
Figura 3.34. Impedância própria das barras B7, B12 e B14 com capacitores que provocam ressonância em, respectivamente, 540, 300 e 360 Hz. ....	107
Figura 3.35. $Z_P$ de B7, B12 e B14 com a CR selecionada pela otimização e as CR da figura 3.34. ....	108
Figura 3.36. Distorção harmônica individual de tensão e de corrente das barras B7, B9, B12 e B14 com a compensação reativa escolhida pela otimização. ....	108
Figura 3.37. Gráficos dos lugares geométricos: (a) susceptâncias de B12 na 5ª e 6ª ordens; (b) representação dos limites para o $B_c$ da barra B12 e (c) da B7. ....	110
Figura 3.38. Distorção harmônica individual de tensão e de corrente das barras B7, B9, B12 e B14 com a alteração da compensação reativa indicada pela otimização. ....	112
Figura 3.39. Impedância própria das barras B7, B12 e B14 após a alteração da CR sugerida. ....	112
Figura 3.40. Distorção harmônica de tensão da barra B7 para a CR sugerida e com alteração. ....	113
Figura 3.41. Variação da admitância própria de B14 com a mudança nos capacitores de outras barras. ....	114
Figura 3.42. Fluxograma da inter-relação entre os procedimentos individuais das avaliações técnicas. ....	117

## **Capítulo 4**

Figura 4.1. Fluxograma do Procedimento Global da Avaliação Técnica. ....	121
Figura 4.2. Fluxograma detalhado do passo ii do procedimento global da avaliação técnica. ....	124
Figura 4.3. Transitórios eletromagnéticos causados pela manobra do banco de B14 em carga leve no ano 10. ....	128
Figura 4.4. Transitórios eletromagnéticos causados pela manobra do banco de B12 em carga leve no ano 10. ....	128
Figura 4.5. Transitórios causados pela manobra do banco de B14 em carga média no ano 10 e com a alteração sugerida. ....	129
Figura 4.6. Transitórios causados, em B2 e em B9, pela manobra de 1,2 Mvar em B9 em carga média no ano 10. ....	129

Figura 4.7. Transitórios causados, em B3 e em B4, pela manobra de 12 Mvar em B4 em carga média no ano 10.....	130
Figura 4.8. Transitórios causados, em B14 e em B9, pela manobra de capacitores nas respectivas barras em carga pesada no ano 10.....	130
Figura 4.9. Impedância própria de B12 e de B14 com os capacitores indesejados e com a CR sugerida.....	133
Figura 4.10. Distorção Harmônica Individual de Tensão das barras candidatas à CR antes da alteração. ....	134
Figura 4.11. Impedância própria de B4 em carga pesada na configuração 2 para várias CR alocadas. ....	137
Figura 4.12. Impedância própria de B4 em carga média na configuração 2 para várias CR alocadas. ....	137
Figura 4.13. Passos básicos do Procedimento Otimizado Expandido.....	142

## **Apêndice A**

Figura A.1. Diagrama da análise de sensibilidade utilizada em [Chaves 01]. ....	162
---	-----

## **Apêndice B**

Figura B.1. Circuito simples analisado para o estudo dos coeficientes de reflexão e refração. ....	167
Figura B.2. Gráfico das tensões provocadas em cada ponto do circuito da figura B.1.....	169
Figura B.3. Gráfico das tensões provocadas em cada ponto do circuito da figura B.1 para $\tau$ igual a 1 $\mu$ s na linha 4. ....	169
Figura B.4. Gráfico das tensões provocadas em cada ponto do circuito da figura B.1 para $\tau$ igual a 1 $\mu$ s na linha 1. ....	170
Figura B.5. Propagação de ondas através do circuito exemplo. ....	172
Figura B.6. Sistema elétrico exemplo para simulação de chaveamentos de bancos de capacitores. ....	173

## **Apêndice C**

Figura C.1. Circuito simplificado que representa $Z_0$ . ....	181
Figura C.2. Circuito exemplo de quatro barras. ....	182
Figura C.3. Distorção harmônica de tensão em B4 para diferentes fontes harmônicas. ....	183
Figura C.4. Distorção harmônica individual de tensão em B4 para diferentes localizações das fontes harmônicas. ....	183
Figura C.5. Variação da impedância própria de B4 devido às alterações no capacitor alocado na barra. ....	184
Figura C.6. Variação da distorção harmônica de tensão e de corrente em B4 para diferentes impedâncias próprias.....	185
Figura C.7. (a) Impedância própria de B4 e (b) sua distorção harmônica de tensão para diferentes configurações. ....	186
Figura C.8. Variação da impedância própria de B4 devido às alterações dos parâmetros das linhas (R e X). ....	187
Figura C.9. (a) Variação do perfil da impedância própria e (b) da distorção harmônica de B4 devido à modificação do montante e da localização da compensação reativa.....	188
Figura C.10. Variação do perfil da impedância própria devido à modificação do montante da compensação reativa <i>shunt</i> capacitiva de B4.....	189

# 1

## Introdução

### 1.1. Considerações Iniciais

Um amplo espectro de atividades é necessário para que os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) cumpram seu objetivo de fornecer energia elétrica aos consumidores, dentro de padrões de qualidade, segurança e economia. Tais atividades englobam desde a elaboração de planos de expansão eletro-energéticos até a execução de ações de controle na operação em tempo real.

Dentre as atividades, encontra-se o Planejamento da Expansão Elétrica, caracterizado pela preparação de planos relacionados com alterações no SEP introduzidas de forma que o mesmo atenda ao mercado futuro de energia. Os estudos são realizados para horizontes com projeção de vários anos à frente. Na expansão elétrica são considerados os horizontes de 5 anos – determinativo – e 10 anos – indicativo.

As etapas clássicas da expansão elétrica partem do diagnóstico atual e do prognóstico do comportamento futuro do SEP, para os mercados previstos no horizonte em estudo. Detectado algum problema (tensões fora dos limites, sobrecarregamentos, perdas elevadas etc.), os planejadores passam a analisar as diversas opções que lhes são apresentadas para solucioná-lo. Dentre elas, encontram-se a construção de novas linhas e subestações, a inclusão de novos equipamentos de compensação e controle da rede, o recondutoramento de circuitos e outras obras de reforço e reforma do sistema.

O tema deste doutorado se refere à alternativa de expansão relacionada à Compensação Reativa Shunt Capacitiva (CR) e ao Controle de Tensão (CT) do sistema elétrico. Conforme tratado no desenvolvimento deste texto, além desta ser uma alternativa das mais atrativas, sob o ponto de vista econômico, vários benefícios podem ser obtidos com a sua aplicação: melhor utilização da rede, diminuição das perdas, ajuste de fator de potência, aumento do perfil de tensão, dentre inúmeros outros.

Apesar de a Compensação Reativa e o Controle de Tensão já serem realizados no setor, é tarefa bastante complexa a criação de planos que atendam a todas as restrições impostas ao SEP – técnicas, econômicas, sociais, ambientais e de legislação.

Este tema tem sido objeto de intensa pesquisa por parte da equipe do LRC<sup>1</sup>, incluindo várias dissertações de mestrado já defendidas, projeto P&D e diversas publicações. Tais pesquisas constituíram os pilares deste doutorado. A partir delas, unindo as experiências acadêmica e prática, foi possível identificar as investigações necessárias à realização de uma estratégia completa de CR/CT. Com os estudos básicos bem fundamentados, observou-se que os procedimentos de CR/CT demandavam o desenvolvimento de análises mais específicas e aprofundadas sobre importantes questões – estabilidade de tensão, transitórios eletromagnéticos e harmônicos – nem sempre incluídas no âmbito da expansão e que influenciam significativamente o processo de decisão na elaboração dos planos.

## 1.2. Relevância do Tema e Contribuições

Por ser uma alternativa atrativa, a instalação de compensação reativa *shunt* capacitiva tem aumentado, deixando, por vezes, os sistemas sobrecompensados fato que pode trazer a tensão no ponto de colapso para níveis de operação normal. Nesta situação, um pequeno aumento de carga pode levar o sistema à instabilidade de tensão, sem que o operador a perceba a tempo de evitar o problema. Tal condição precisa ser prevista e evitada.

Devido também ao grande número de instalações, o chaveamento de capacitores se tornou uma das ocorrências mais comuns em concessionárias de energia e, conseqüentemente, o número de sobretensões e sobrecorrentes transitórias que os equipamentos vizinhos estão sujeitos aumentou significativamente. Dependendo da magnitude destas grandezas, pode haver queima ou dano de dispositivos, fato que exige decisões para sua mitigação.

Além dos impactos citados acima, verifica-se que a presença acentuada de cargas que utilizam eletrônica de potência associada aos capacitores é capaz de elevar expressivamente a distorção harmônica na onda de tensão e de corrente, prejudicando a qualidade da energia entregue aos consumidores. Este impacto também precisa ser investigado e minimizado.

Para se evitarem tais conseqüências prejudiciais ao sistema elétrico, propõe-se que seja feita uma avaliação técnica criteriosa e detalhada de qualquer compensação reativa que esteja sendo sugerida (sob análise), já na etapa do planejamento. Neste trabalho, a

---

<sup>1</sup> LRC – *Lightning Research Center* – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas – Convênio UFMG/CEMIG

estratégia proposta é a realização de uma avaliação técnica relativa aos impactos da CR nos três aspectos apontados acima, a partir de uma *solução ótima* no sentido de minimização de Mvar instalados [Chaves 01], conforme salientado ao longo do texto. Tal proposta pretende contribuir de forma significativa para a área de sistemas elétricos de potência através da indicação de locais e montantes ótimos para se compensar a potência reativa do sistema elétrico que torna os perfis de tensão e os fatores de potência mais adequados e resulta em menor custo para a empresa com a diminuição das interrupções e dos danos em equipamentos e a melhor qualidade da energia entregue aos consumidores.

O procedimento proposto para a avaliação técnica de estabilidade de tensão é baseado na tradicional análise de curvas PV e QV, trazendo, como *inovação*, a preocupação, já no planejamento, com o módulo da tensão no ponto de máximo carregamento. A etapa de análise de transitórios envolve modelagem de equipamentos do sistema elétrico e simulações de energização de capacitores, medindo as sobretensões e sobrecorrentes geradas. Tal simulação é realizada para as denominadas barras críticas no sentido do comportamento transitório, cuja caracterização é *inédita na literatura*. A avaliação dos harmônicos amplificados pela compensação reativa sugerida é efetuada utilizando uma *nova metodologia* (lugar geométrico) baseada no cálculo das admitâncias próprias das barras para determinar os capacitores que não violam as restrições de distorção harmônica.

A estratégia apresentada nesta tese também indica a seqüência ideal para acoplar todas as avaliações técnicas relativas aos aspectos acima. Esta é aplicada a um sistema elétrico real, indicando como deve ser alterado o plano de expansão, se necessário, a fim de que sejam atendidas todas as restrições.

Neste trabalho é mostrada a evolução da estratégia para avaliação técnica da compensação reativa desenvolvida na pesquisa do doutorado. Inicialmente, tais avaliações são realizadas de forma separada, por meio de *Procedimentos Individuais*, indicando a CR mais adequada para cada aspecto – estabilidade de tensão, transitórios eletromagnéticos e harmônicos. Tal implementação originou o questionamento de qual seria a ordem mais propícia para as análises, gerando, assim, o denominado *Procedimento Global*. Posteriormente, foi concebido o *Procedimento Otimizado Expandido* que leva em consideração as restrições de estabilidade de tensão, transitórios e harmônicos já na etapa de otimização. A utilização destes procedimentos, individualmente ou de forma complementar, visa obter maior confiabilidade do sistema elétrico.

### 1.3. Motivação e Objetivo

Esta tese de doutorado tem como **objetivo** propor procedimentos para se avaliar tecnicamente a compensação reativa sugerida pelo plano de expansão com relação à estabilidade de tensão, transitórios eletromagnéticos e harmônicos. Dando continuidade a trabalhos anteriores do LRC, constitui avanço significativo para as pesquisas da UFMG sob a forma de uma estratégia bem caracterizada. Espera-se que a aplicação da metodologia apresentada resulte em plano otimizado de expansão, atendendo às diversas restrições técnicas impostas à rede, partindo da escolha do SEP a ser analisado.

Além da importância acadêmica, uma das grandes **motivações** para a realização desta pesquisa é a concreta possibilidade de sua aplicação prática em redes do setor elétrico. Os resultados positivos têm comprovado esta expectativa.

### 1.4. Estrutura do Trabalho

A presente tese de doutorado está estruturada da seguinte maneira: apresentação do tema CR/TC, contextualização do assunto em pauta, destaque de alguns conceitos básicos, citação de referências relevantes para a pesquisa, apresentação de propostas de procedimento específico para cada avaliação técnica da compensação reativa seguidas de comentário sobre a interação de tais análises. Para se atingir a meta deste trabalho com maior propriedade, o texto encontra-se dividido em cinco capítulos.

O *capítulo 2* – Contextualização do Tema e Conceitos Básicos – foi desenvolvido com a intenção de facilitar a compreensão dos capítulos seguintes e caracterizar o presente trabalho no contexto daqueles já desenvolvidos, com respeito aos procedimentos de expansão de compensação reativa e controle de tensão. São transcritos alguns conceitos básicos importantes para melhor entendimento dos assuntos abordados nesta tese – estabilidade de tensão, transitórios eletromagnéticos e harmônicos. Reúnem-se, neste ponto, algumas referências relevantes para complementar e enriquecer, com exemplos, as definições expostas.

O *capítulo 3* contém a explicação detalhada dos Procedimentos Individuais propostos para a avaliação técnica da compensação reativa em relação à estabilidade de tensão, transitórios eletromagnéticos e harmônicos. São apresentados os resultados obtidos com a aplicação de cada uma das avaliações em uma rede elétrica real e, ainda, é feita uma análise da compensação reativa final, sugerida para o plano de expansão, após a realização de todos os procedimentos.

No *capítulo 4* é indicado como tais avaliações devem se interagir. São propostos dois métodos denominados: Procedimento Global, que sugere uma seqüência das análises, e Procedimento Otimizado Expandido, que propõe a realização de uma avaliação técnica prévia antes do processo de otimização da compensação reativa. Para ambos os procedimentos são apresentados os resultados de suas aplicações em um sistema elétrico real.

No *capítulo 5*, é apresentada a conclusão do trabalho e são apontadas as propostas de continuidade. A seguir, são relacionadas as *referências bibliográficas* consultadas.

Este texto inclui ainda quatro apêndices. O *apêndice A* acrescenta ao trabalho definições de interesse a respeito do assunto estabilidade de tensão e detalha a análise de sensibilidade empregada. O *apêndice B* se dedica ao tema transitórios eletromagnéticos, reunindo os significados de termos utilizados no texto, explicações sobre a indicação de barras críticas e alguns resultados adicionais de simulações. O *apêndice C* registra resultados de investigações básicas iniciais realizadas com relação ao tema harmônicos. O *apêndice D* indica as restrições de tensão, de fator de potência e de injeção de harmônicos na rede impostas pelo setor elétrico.

## 2

# Contextualização do Tema e Conceitos Básicos

### 2.1. Contextualização do Tema

Os desenvolvimentos propostos se inserem na pesquisa relativa à expansão de CR/CT de sistemas elétricos. Visando identificar com clareza o objetivo do trabalho, o presente capítulo o contextualiza dentro do procedimento geral de compensação reativa. Para tal, são discutidos alguns aspectos relevantes sobre CR/CT e sumarizam-se as *Políticas, Critérios e Procedimentos* que constituíram ponto de partida da tese.

Os tópicos iniciais do capítulo permitem identificar que o trabalho se dedica, de forma mais específica, à etapa do procedimento que elabora a Avaliação Técnica de Alternativas de Expansão. Mostram, também, que os desenvolvimentos propostos envolvem análises que avaliam o impacto da CR no comportamento do sistema elétrico nos aspectos de Estabilidade de Tensão, Transitórios e Harmônicos. A influência da compensação reativa é enfatizada para cada um destes aspectos e registrada em itens específicos.

#### 2.1.1. Compensação Reativa e Controle de Tensão

Controlar os sistemas elétricos tem se tornado cada vez mais uma tarefa não trivial, fato que justifica o grande interesse do setor elétrico no desenvolvimento de *Estratégias de Controle*, envolvendo as etapas desde o Planejamento da Expansão até a Operação em Tempo Real. A complexidade decorre de inúmeros fatores, dentre os quais destacam-se: a atual filosofia de maior exploração dos recursos disponíveis no Sistema Elétrico de Potência; o constante adiamento dos planos de investimento nas redes elétricas, acarretando operação próxima aos limites; os padrões preestabelecidos de qualidade de fornecimento de energia cada vez mais exigentes; o ambiente competitivo, próprio do atual cenário do setor; restrições técnicas, ambientais e econômicas mais rígidas.

Nesta perspectiva, uma das principais questões envolvidas é a determinação de formas para se obter melhor aproveitamento dos recursos do sistema. A adequada

compensação reativa *shunt* capacitiva do SEP é uma das alternativas nesta direção e pode representar, além de ganhos relativos à facilidade de controle e qualidade da energia entregue ao consumidor, grande economia de investimentos. Com uma compensação reativa em pontos adequados do SEP, otimiza-se a circulação de potência reativa, obtendo-se os diversos ganhos decorrentes de sua minimização. Além da compensação do sistema, faz-se necessário o controle de tensão, para manter o perfil adequado de tensão nas suas barras.

Conforme tratado em [Vale 00], a estratégia de CR/CT, para ser efetiva, deve ser utilizada dentro de uma visão de controle *sistêmico* de potência reativa e de tensão e deve ser elaborada considerando-se a integração entre todas as atividades envolvidas com os sistemas elétricos, desde a preparação dos planos de expansão até a operação em tempo real.

Nesta referência, são discutidas e apresentadas as diversas questões envolvidas na concepção de estratégias – filosofia de operação, variáveis do sistema, tipos do controle e condições de contorno, dentre outras. São analisados os conhecimentos relacionados às diversas etapas, da expansão à operação, mostrando-se que o enfoque varia de acordo com os principais objetivos de cada uma delas, dentro de uma visão global. No contexto deste trabalho, interessa o enfoque dado ao *Planejamento da Expansão do SEP*.

Dentro desta visão, uma compensação reativa adequada é necessária, dentre outras razões, para atingir as seguintes metas:

- garantir maior e melhor aproveitamento do sistema elétrico existente;
- propiciar equilíbrio no balanço geração/consumo de potência reativa;
- ajustar fatores de potência, tanto da carga quanto da rede, e módulos de tensão;
- eliminar o uso inadequado de equipamentos controlados como, por exemplo, a utilização de compensadores síncronos, atendendo à potência reativa da carga;
- disponibilizar, para a operação, condição adequada de controle de tensão e, principalmente, de atendimento ao sistema.

Além dos inúmeros ganhos citados acima a serem obtidos pela CR/CT, várias questões práticas apresentadas pelos sistemas das empresas de energia elétrica motivam o desenvolvimento de políticas de compensação adequadas. Dentre elas, encontram-se: redes próximas aos limites (carregamento, SIL – *Surge Impedance Loading*, regulação de tensão, colapso de tensão); perdas elevadas; altos valores de queda de tensão; restrições cada vez mais severas (legislação, qualidade de fornecimento); dificuldade de controle de tensão.

O problema básico relacionado à CR/CT, na expansão, é a alocação de equipamentos – capacitores, reatores, compensadores síncronos e estáticos – a qual deve ser feita de forma otimizada. O montante e a alocação “ótima” dos componentes estão relacionados aos diversos objetivos e restrições impostas ao sistema elétrico. Deseja-se obter maior e melhor aproveitamento dos recursos do SEP, atendendo às condições de contorno impostas à rede, a um custo mínimo. Isto leva a formulações que buscam:

- *Minimizar* o montante de injeção de potência reativa (Mvar) a instalar;
- *Minimizar* o fluxo de potência reativa pela rede e as perdas ativas e reativas;
- *Minimizar* os custos de aquisição, manutenção e operação dos equipamentos a serem alocados, considerando-se inclusive o local de instalação dos mesmos, o qual poderá exigir desapropriação;
- Atender a *restrições* de ordem econômica, social e ambiental, às ditadas pela segurança do sistema e de seus usuários e pelas exigências da nova legislação do setor, incluindo critérios impostos por padrões de qualidade de suprimento de energia. Tais restrições incluem o atendimento aos limites:
  - máximos e mínimos de tensões e fatores de potência nos barramentos;
  - máximos de fluxo de potência ativa nos ramos;
  - posições máximas e mínimas dos *taps* dos transformadores;
  - valores relacionados à estabilidade de tensão, penetração harmônica e efeitos transitórios ocorridos com a introdução dos equipamentos.
- Proporcionar um *controle de tensão eficaz*; isto inclui a determinação do tipo de compensação reativa (fixa/manobrável) e do tipo da variável que será utilizada no controle (tensão, corrente, etc.).

O tema Compensação Reativa Shunt Capacitiva / Controle de Tensão vem sendo objeto de intensa investigação no LRC/UFMG. Diversos têm sido os trabalhos acadêmicos [Cardoso 99, Chaves 01, 02, 03, 04, 05a, 05b, Silveira 99, Vale 00 e 05b] e práticos [P&D 02, 04a e 04b, Valadares 01a e 01b, Vale 03, 04 e 05a] estes últimos em conjunto com a CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

Em [Silveira 99] são discutidas estratégias globais de CR/CT e, em [Cardoso 99], ferramentas aplicadas ao assunto são detalhadas. A referência [Vale 00] trata do tema sob uma visão sistêmica e integrada entre as diversas atividades do SEP.

Partindo destas pesquisas, em [Valadares 01a] são propostas *Políticas, Critérios e Procedimentos* para CR/CT aplicados à preparação de planos de expansão. Os resultados práticos de sua aplicação em sistemas elétricos reais se mostram extremamente eficientes,

culminando, inclusive, em um projeto de P&D [P&D 04a] em que uma ferramenta de apoio ao planejador, denominada PlanEx, foi criada. Esta ferramenta é detalhada nas referências [P&D 04b, Vale 03].

Tendo como base os procedimentos mostrados em [Valadares 01a e 01b], foi proposto um procedimento otimizado para CR/CT na dissertação [Chaves 01]. A presente tese de doutorado tem como ponto de partida tais realizações, portanto torna-se importante situá-la neste contexto.

### **2.1.1.1. Políticas, Critérios e Procedimentos para CR/CT**

Este item mostra, de forma sucinta, as Políticas, Critérios e Procedimentos que constituem os pilares deste trabalho. Todos os desenvolvimentos podem ser encontrados de forma detalhada nas referências [Chaves 01 e 02, Valadares 01a e 01b, Vale 05a].

Basicamente, a Política se relaciona com as diretrizes que orientam as atividades (ações) de planejamento e de operação do sistema. Critérios são regras básicas estabelecidas que retratam os limites e restrições a serem respeitados. Procedimentos são passos a serem seguidos de acordo com a política proposta, respeitando-se os critérios estabelecidos [Valadares 01a].

#### **Política**

A **política** trabalha a potência reativa e o valor de tensão de forma integrada, visando minimizar o fluxo de potência reativa. Para alcançar o objetivo, realizam-se a compensação reativa shunt capacitiva a partir das barras de carga em direção às tensões mais elevadas e o controle de tensão – ajuste do módulo da grandeza para situações de carga leve/média/pesada – da alta para a baixa tensão.

#### **Critérios**

Como **critérios** adotados nas pesquisas, em especial naquela de natureza aplicada, relacionam-se [Valadares 01a e 01b]: análise de contingências (critério N-1 para transmissão e N para a subtransmissão); tipos de contingências (saída das linhas mais severas); transição de condição normal para emergência (admitida apenas a atuação dos compensadores síncronos e estáticos, dos reguladores e dos LTC – *Load Tap Change*); transição da carga leve para média e pesada (permitida a manobra de bancos de capacitores e de reatores); compensadores síncronos e estáticos (em condição normal de operação, devem gerar o mínimo possível e não podem ser usados para atender à

compensação de carga); *limites de tensão* (estabelecidos pela legislação em vigor); *manobras dos bancos* (não podem provocar flutuações de tensão maiores que 5%).

Os critérios acima citados referem-se a condições de contorno às quais o SEP deve atender. Foram elaborados com base, principalmente, na experiência de planejamento das equipes de expansão, podendo sofrer mudanças visando ao melhor comportamento do sistema. A modificação dos critérios não implica alteração na estratégia proposta nesta pesquisa de doutorado.

### **Procedimentos**

Os procedimentos adotados podem ser resumidos em quatro passos básicos apresentados no fluxograma da figura 2.1.

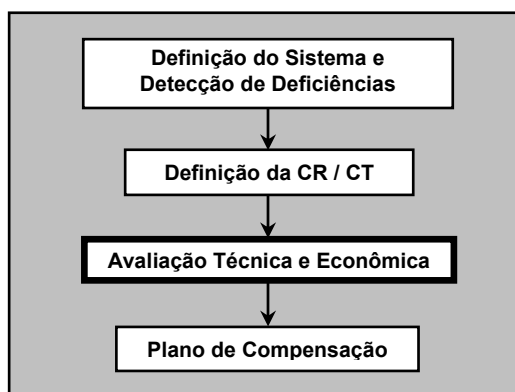


Figura 2.1. Passos básicos do procedimento.

#### ***Passo 1 – Definição do Sistema e Detecção de Deficiências***

É definido o sistema a ser estudado cuja situação é avaliada com relação à carência ou excesso de potência reativa.

#### ***Passo 2 – Definição da Compensação Reativa / Controle de Tensão***

São selecionadas as barras que podem receber equipamentos de compensação reativa. A partir desta escolha são introduzidas as restrições à otimização – fator de potência desejado, limites máximos e mínimos de tensão, de fluxo de potência nas linhas e de *tap* dos transformadores. Como resultado da otimização tem-se a definição do montante e da localização dos capacitores a serem alocados [Chaves 01 e 02].

É importante comentar que este passo foi estudado em [Chaves 01] de maneira aprofundada, gerando resultados e análises de tal forma positivos e promissores que estimularam a continuação das pesquisas sobre este tema.

### Passo 3 – *Avaliação Técnica e Econômica*

A proposta gerada no passo 2 é analisada com relação aos aspectos técnicos e econômicos.

A avaliação técnica da CR sugerida, muitas vezes, tem se resumido a simulações de fluxo de potência convencional – verificando valores de sobrecarga, módulo de tensão, perdas, etc. – e de cálculo de curto-circuito – confirmando se a razão entre a potência do banco alocado e a de curto-circuito da barra é menor que 5%.

Quanto à avaliação econômica, a compensação sugerida e os equipamentos de controle associados são analisados, considerando-se seus custos – valores de instalação, operação e manutenção – e benefícios – ganhos de atendimento adicional de mercado, diminuição de perdas e redução de energia não suprida, garantidos pela alocação da compensação. Avalia-se ainda o benefício da instalação, no caso de adiamento de obras planejadas. Atualmente, também têm sido analisadas a indisponibilização de equipamentos e a tarifação da energia reativa.

A avaliação técnica efetuada neste passo constitui o **foco da pesquisa desenvolvida nesta tese de doutorado**. Os estudos específicos são realizados nos regimes permanente e transitório – manobras de bancos de capacitores, penetração harmônica e estabilidade de tensão.

### Passo 4 – *Plano de compensação*

Passo final do procedimento, refere-se à elaboração do plano final de compensação.

Os resultados positivos obtidos pelas pesquisas anteriores apontaram para o desenvolvimento deste trabalho, como direção promissora aos estudos. Por outro lado, mostraram, também, que os avanços iriam requerer investigações detalhadas sobre o impacto da CR no comportamento do SEP e, principalmente, sobre a forma de considerá-las e integrá-las ao procedimento de expansão. Tais questões são introduzidas a seguir e detalhadas nos próximos capítulos.

## **2.1.2. Estabilidade de Tensão**

Um sistema de potência mal compensado em termos de bancos de capacitores *shunt* pode apresentar um baixo limite de carregamento, entretanto uma CR inadequada pode levar o sistema a um ponto de operação instável. Para que a compensação reativa

seja utilizada apropriadamente, é necessário compreender sua influência na estabilidade de tensão [Chaves 03 e 04, Vale 04 e 05b].

A análise do problema causado pela sobrecompensação pode ser feita por meio da figura 2.2, retirada de [Prada 06], a qual exhibe curvas PV de uma barra cuja carga é compensada através de capacitores *shunt* variáveis. Para se construírem tais curvas, adota-se uma carga com fator de potência unitário e de modelo potência constante alimentada por um sistema radial. A faixa de tensão operacional (de 0,95 a 1,05 pu) é destacada.

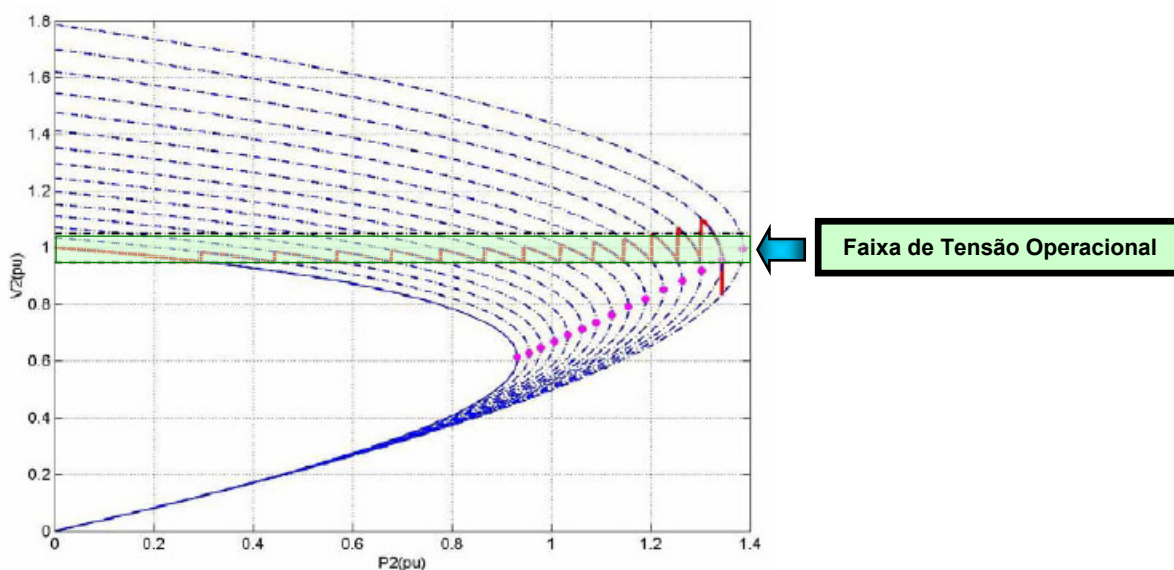


Figura 2.2. Curvas PV – chaveamento de capacitores [Prada 06].

À medida que a carga aumenta, o módulo da tensão na barra diminui e, para mantê-lo dentro dos limites permitidos, são inseridos os capacitores. Com os bancos sendo introduzidos, verifica-se um ganho no perfil de tensão da barra de carga e constata-se que o valor de máximo carregamento se eleva. Este aspecto é bastante positivo, fato que tem justificado o uso deste tipo de equipamento como alternativa de expansão, postergando obras mais dispendiosas.

Para cargas do tipo potência constante, o ponto de máxima transferência de potência tem sido considerado o de colapso de tensão. Logo, pela figura 2.2, vê-se que, quanto mais compensado é o sistema, o valor de tensão do ponto de colapso mais se aproxima da faixa operacional. Pode-se chegar a uma determinada compensação em que qualquer acréscimo na carga leva o sistema a um ponto de operação instável, configurando um grande risco para a operação do SEP. A referência [Vale 04] registra casos onde esta situação já é sentida na prática.

A figura 2.2 exemplifica tal problema. As curvas PV são construídas considerando um controle automático de tensão por meio de capacitores de 8 Mvar para manter as tensões dentro dos limites. Os equipamentos são programados para serem chaveados com o aumento da carga, assim que a tensão atinge seu limite inferior. Caso não seja verificado se o ponto de operação está próximo ao máximo carregamento, tais manobras podem acelerar o processo de perda de estabilidade de tensão.

Caso o impacto da CR no SEP não seja avaliado na etapa de sua especificação, é provável que ocorra o problema durante a operação do sistema. O operador, verificando a diminuição de tensão, poderá agir conectando mais bancos quando, na realidade, tal ação seria mais prejudicial.

Por estas análises conclui-se que, antes de se compensar um sistema, devem-se avaliar os riscos para a operação no contexto de instabilidade de tensão. Em alguns casos, pode-se constatar que a solução é construir uma nova linha, pois a sobrecompensação do sistema não permite que sejam instalados mais capacitores.

### **2.1.3. Transitórios Eletromagnéticos**

O chaveamento de capacitores é um evento dos mais comuns nas subestações e sua manobra pode produzir transitórios eletromagnéticos oscilatórios que causam sobretensões (STs) e sobrecorrentes (SCs). A suportabilidade dos equipamentos às solicitações de ST e SC depende do número de manobras realizadas. Quanto mais elevado este número, mais restritivos devem ser os critérios para estabelecimento dos limites destas grandezas transitórias.

As maiores sobretensões surgem na manobra de um único banco e as mais elevadas sobrecorrentes com o chaveamento de capacitores em paralelo, configuração *back-to-back*. A desenergização de bancos de capacitores só se torna um problema quando ocorre o *restrike*. Tais manobras podem originar excesso de energia dissipada pelos pára-raios.

Na ligação de capacitores a uma rede ocorre um processo transitório severo até que seja atingido o valor nominal de carga. Durante este processo, podem surgir picos de corrente elevados (*inrush*), em frequências na faixa de centenas até milhares de Hertz, exigindo muito dos dispositivos de manobra. Os transitórios de corrente podem alcançar valores superiores a dez vezes a corrente nominal do capacitor e com duração de vários milissegundos.

São fatores determinantes para frequência e amplitude das correntes de ligação: a capacitância dos bancos, reatâncias do circuito e o valor instantâneo de tensão. Vários parâmetros podem interferir no valor da máxima corrente de *inrush*, dentre eles, destacam-se: dispersão dos pólos, resistência de amortecimento inserida no reator limitador de corrente, frequência natural, saturação do reator limitador de corrente [Coury 02].

Dentre os elementos que afetam a amplificação das tensões transitórias no consumidor, durante o chaveamento de bancos de capacitores no sistema de distribuição primário, incluem-se: tipos de chaveamento, dimensões do sistema, valores das capacitâncias, a potência do capacitor chaveado, a capacidade de curto-circuito no local da manobra, a potência do transformador abaixador do consumidor e as características da carga do consumidor [Coury 02, Pamplona 02].

Apesar da ocorrência de sobretensões na subestação onde o banco é manobrado, as maiores STs, em geral, surgem em barras adjacentes, principalmente no caso de linhas radiais e com baixo nível de carga no momento do chaveamento. Os efeitos na subestação local incluem elevados níveis de sobretensão e de sobrecorrente, que stressam dielétrica e mecanicamente o banco e demais equipamentos da subestação. Nas subestações remotas, as sobretensões são de até 4 pu e podem levar ao estresse e a danos de transformadores, pára-raios e de outros equipamentos ligados em redes de média ou baixa tensão, como dispositivos eletrônicos e de telecomunicação. Os transitórios rápidos de tensão podem se propagar através de acoplamento capacitivo de transformadores e podem ter seus valores amplificados nos secundários na razão de 4 vezes.

As análises de transitórios eletromagnéticos são normalmente efetuadas apenas na fase de especificação da alternativa de CR já selecionada (etapa de projeto), ao contrário dos estudos de regime permanente à frequência fundamental (fluxo de potência, curto-circuito e confiabilidade) conduzidos desde a fase de comparação de alternativas (planejamento da expansão). São técnicas disponíveis, para atenuar sobretensões e sobrecorrentes transitórias durante a manobra de bancos de capacitores: pré-inserção de reatores e resistores; chaveamento controlado; instalação de pára-raios de óxido metálico.

A estratégia apresentada neste trabalho propõe a inclusão de tais análises no processo de escolha da compensação reativa mais adequada. A modificação do montante e da localização da CR é investigada visando assegurar que não surjam solicitações de tensão ou corrente que venham a colocar em risco os diversos equipamentos da rede.

### 2.1.4. Harmônicos

A preocupação em relação aos harmônicos não é recente. No início do século 20 já se realizavam estudos sobre o terceiro harmônico gerado pela saturação do ferro do transformador e do motor. Com o passar dos anos, a eletrônica de potência se tornou de fácil controle e muito eficiente, o que proporcionou aos dias de hoje sua grande proliferação nos vários níveis de tensão. Como consequência do elevado número de equipamentos que utilizam diodos, retificadores, transistores, etc., aumentou-se significativamente a injeção de harmônicos na rede elétrica, trazendo danos ao funcionamento normal de cargas sensíveis e outros dispositivos [Grady 01]. Este crescimento dos harmônicos no sistema, devido à eletrônica de potência, tornou-se alvo de pesquisas que visam evitar os problemas causados.

Atualmente, as cargas que mais prejudicam a qualidade de energia são as que utilizam eletrônica de potência presente em consumidores industriais (retificadores, conversores, variadores de velocidade, etc.), residenciais e comerciais (lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos, computadores, televisores, etc.). Em alguns casos, a inserção de harmônicos por tais cargas, com a presença de ressonâncias, causa distorções de tensão a níveis inadequados, acima dos limites máximos. Em tal situação, é necessário alterar-se a configuração do sistema para que o fluxo de harmônicos seja reduzido nas barras mais sensíveis e naquelas onde ocorreram as violações dos limites. Esta mudança pode ser realizada em vários pontos da rede.

A solução mais apropriada seria atuar no foco do problema: a fonte de harmônicos. Tal medida requer que os consumidores, que distorcem as correntes, tornando-as não senoidais, instalem filtros ou adquiram equipamentos que insiram menos harmônicos. Ambos os recursos nem sempre são viáveis, pois exigem altos investimentos do consumidor que, se estiver respeitando a lei de injeção de harmônicos na rede, normalmente, não se manifestará a favor da qualidade de energia. Resta à empresa distribuidora de energia resolver o problema.

A concessionária pode construir novas linhas ou instalar compensação série para diminuir a reatância de determinada linha e, conseqüentemente, sair da frequência de ressonância perigosa, atenuando a distorção harmônica (DH). No entanto, esta opção é muito cara. Pode-se instalar, também, um grande resistor na linha, para aumentar o amortecimento do sistema e reduzir a DH. Esta solução eleva as perdas, o que não é desejado. Portanto, restam à concessionária duas alternativas viáveis: modificar o montante e a localização dos capacitores sugeridos ou indicar o uso de filtros passivos ou ativos.

## 2.2. Conceitos Básicos e Literatura Técnica Relevante

Este item apresenta alguns conceitos básicos relevantes ao trabalho e comenta algumas referências da literatura técnica pertinente aos temas compensação reativa *shunt* capacitiva, estabilidade de tensão, transitórios eletromagnéticos e harmônicos. As referências exemplificam ou complementam os conceitos básicos descritos. Procura-se apontar artigos mais recentes que tratam dos temas específicos citados no texto. São mostrados índices adotados pela literatura, equações utilizadas para se analisar o comportamento do sistema, definições de alguns tópicos e algumas características típicas encontradas na prática. A revisão bibliográfica completa está registrada em [Chaves 04] e [P&D 02].

### 2.2.1. Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva

Conforme já citado, os capacitores *shunt* têm se mostrado a alternativa econômica mais viável para maximizar o carregamento das linhas, retardando os investimentos em expansão. A identificação dos pontos mais adequados para a alocação destes equipamentos de forma a otimizar o desempenho do sistema é a questão a ser resolvida pelos planejadores. Além da localização, é necessário conhecer o montante mínimo que atende a este objetivo, obtendo o menor investimento com o melhor aproveitamento de seus recursos de injeção de potência reativa.

Em [Mohagheghi 05] é feita uma comparação entre as alternativas de expansão com o objetivo de aumentar o carregamento das linhas. Entre as opções são avaliadas as compensações reativa série e *shunt* e um transformador regulador de tensão. É mostrado que a compensação reativa *shunt* na barra de carga pode obter ganhos no carregamento de 184% a 258% dependendo do fator de potência da carga e da razão X/R da linha, confirmando que, tecnicamente, é uma alternativa muito atrativa.

Um dos estudos interessantes mostrados em [Mohagheghi 05] é a verificação do montante de compensação reativa *shunt* necessário para alimentar uma carga fixa de 1 MW variando a distância da alocação da mesma. Como já era esperado, o menor montante é encontrado instalando-se o capacitor na própria barra da carga. No exemplo do autor, considerando a carga a uma distância de 100 km da fonte, caso a CR fosse alocada a aproximadamente 90 km da carga, o montante seria cerca de 6 vezes maior (2,5 Mvar) que o mínimo, e as perdas aumentariam perto de 75% para este caso.

Em [Tinggren 99, Shwehdi 00], são descritas as vantagens de se instalar bancos de capacitores no sistema elétrico, melhorando o fator de potência e o perfil de tensão. É feita

uma análise geral dos possíveis problemas gerados com tal instalação quanto à ressonância harmônica e aos transitórios eletromagnéticos. Também são apontados os fatores de potência comuns de vários tipos de cargas, como: indústria química (0,65 a 0,75), hospital (0,75 a 0,80), prédio de escritórios (0,80 a 0,90), motor de indução (0,70 a 0,80), lâmpada fluorescente (0,70), forno a arco (0,75 a 0,90), soldador (0,35 a 0,60) e outros.

Existem vários artigos que tratam do problema da alocação ótima de capacitores shunt e indicam índices para facilitar a resolução do mesmo. A seguir são destacados os principais pontos de alguns destes trabalhos.

O artigo [Yehia 98] apresenta duas maneiras para se encontrarem os capacitores a serem alocados. O primeiro tem um enfoque econômico que aponta o menor custo para a instalação, chegando a soluções com menores perdas elétricas. O segundo tem o objetivo de melhorar a qualidade da energia entregue ao consumidor, tendo um perfil de tensão mais adequado, dentro dos limites desejados. O problema de alocação ótima de capacitores não é uma tarefa trivial e envolve vários objetivos. Na referência, adota-se uma solução intermediária entre os enfoques econômico e técnico, utilizando-se o conjunto de barras candidatas de ambos os procedimentos.

Em [Momoh 98] é proposto um índice de análise de sensibilidade ( $SM_i$ ) da potência reativa injetada em uma barra com relação à tensão nas demais. O cálculo de  $SM_i$  é realizado pela equação 2.1 onde  $V_j(\Delta Q_i)$  é a tensão na barra  $j$  após a alocação de  $\Delta Q_i$  Mvar na barra  $i$  e  $V_j(0)$  é a tensão antes da instalação do capacitor. Vale destacar que os termos das equações citadas a seguir não têm nomenclaturas idênticas àquelas apresentadas nas referências. Tal mudança é realizada para sintonizar estes termos com os já encontrados no presente texto.

$$SM_i = \frac{\sum_{j \in N} [V_j(\Delta Q_i) - V_j(0)]}{\Delta Q_i} \quad (2.1)$$

O índice de análise de sensibilidade relacionada com cada barra individualmente ( $SM_{ij}$ ) é calculado pela equação 2.2. A única diferença entre as equações 2.1 e 2.2 é que, na primeira, é feito o somatório das alterações da tensão. A análise de sensibilidade explicada no apêndice A segue o mesmo princípio aplicado em [Momoh 98].

$$SM_{ij} = \frac{V_j(\Delta Q_i) - V_j(0)}{\Delta Q_i} \quad (2.2)$$

Calcula-se a compensação reativa necessária ( $Q_n$ ) para se obter uma tensão desejada ( $V_{desej}$ ) por meio da equação 2.3 citada em [Maheshwarapu 98]. O valor de  $\alpha$  é definido pela equação 2.4. O termo  $V_0$  corresponde à tensão na condição inicial do sistema, e  $V_{yc}$  equivale à tensão quando uma CR de valor igual a  $y_c$  é instalada, por exemplo, de 10 Mvar.

$$Q_n = \left( \frac{V_{desej} - V_0}{\alpha V_0} \right) y_c \quad (2.3)$$

$$\alpha_i = \frac{V_{yc}}{V_0} - 1 \quad (2.4)$$

Nesta tese de doutorado, adotam-se as equações 2.3 e 2.4 para se encontrar o montante máximo de compensação reativa que assegura o nível de tensão que se manterá abaixo do limite relacionado à estabilidade de tensão. O emprego deste índice é detalhado no próximo capítulo.

Neste trabalho, o montante de potência reativa ( $q_{Ci}$ ) a ser injetado em uma barra para que se alcance determinado fator de potência é calculado pela equação 2.5 [Shwehdi 00]. As variáveis  $\theta_a$  e  $\theta_d$  são iguais, respectivamente, ao arco co-seno do fator de potência atual e do desejado (equação 2.6) e  $P_i$  é a potência ativa da carga da barra  $i$ .

$$q_{Ci} = P_i (\tan \theta_a - \tan \theta_d) \quad (2.5)$$

$$\theta_a = \cos^{-1}(FP_{atual}) \quad \text{e} \quad \theta_d = \cos^{-1}(FP_{desejado}) \quad (2.6)$$

### 2.2.2. Estabilidade de Tensão

As pesquisas realizadas no LRC/UFMG relacionadas ao tema estabilidade de tensão deram origem às dissertações de mestrado [Cortez 01a] e [Lobato 98]. Nestes trabalhos, foi realizada uma ampla revisão bibliográfica a respeito do tema. Para complementá-la, efetuou-se nova pesquisa, registrada em [Chaves 04]. Neste item, são enfatizados trabalhos desta revisão considerados relevantes para o desenvolvimento dos procedimentos de avaliação técnica de estabilidade de tensão. Destacam-se, também, as referências [Kundur 94], [Miller 82] e [Taylor 94].

Os comentários sobre os trabalhos estão estruturados da seguinte maneira: visão geral sobre o tema; casos em que são observados colapsos de tensão; relação entre as

perdas elétricas e o colapso; índices relacionados ao tema; inclusão da estabilidade de tensão nas restrições do planejamento; critérios adotados nas análises. Em cada tópico, são apontadas as referências mais relevantes.

### **Visão Geral**

O artigo [Ajarapu 98] merece atenção por apresentar ampla referência bibliográfica a respeito do tema Estabilidade de Tensão, contendo 308 citações agrupadas por categorias: livros, relatórios, artigos expostos em congressos e periódicos.

Os conceitos básicos abordados em [Cortez 01a e 01b, Kopcak 02, Martins 00] são interessantes pela forma de tratar a margem de estabilidade de tensão (MET). O apêndice A resume os principais conceitos e definições a respeito de estabilidade de tensão.

Vários autores debatem sobre as metodologias de análise estática [Garcia 99, Lobato 98, Valle 01] e dinâmica [Martins 00]. Outros fazem uma comparação entre as duas metodologias [Cortez 01b, Ferreira 00, Garcia 99, Lachs 00, Mazoni 02]. Ainda com relação à parte básica de estabilidade de tensão, citam-se as análises sobre colapso de tensão tratadas em [Cortez 01a, Crow 94, Freire 99, Pontes 01, Silva 99].

Em [Manzoni 02] é apresentada uma análise efetuada em um sistema reduzido equivalente da região Sul do Brasil. É determinado o ponto em que o cálculo de fluxo de potência não mais converge. Este é comparado ao ponto em que ocorre a singularidade da matriz Jacobiana (colapso de tensão). Os resultados encontrados, através da monitoração do menor autovalor da matriz Jacobiana do fluxo de potência, mostram que a diferença foi muito significativa.

O modelo estático é suficiente quando se procura determinar a margem de estabilidade de tensão e identificar a área crítica para o colapso de tensão e quando o foco da análise é a compensação de potência reativa [Souza 04], principalmente no contexto do planejamento da expansão onde as incertezas são expressivas.

As características das cargas e dos equipamentos de controle de tensão do sistema estão entre os fatores mais relevantes no que se refere à estabilidade de tensão. A influência de tais características foi investigada em [Aromataris 01, Coker 99, Lopes 02, Martins 00] para os modelos de cargas e em [Begovic 95, Cortez 01c, Efthymiadis 96, Ferreira 00, Lachs 00, Martins 02, Naturesa 02, Silva 99] para os equipamentos de controle de tensão.

O artigo [Souza 04] cita que os controles geralmente empregados para melhorar a estabilidade de tensão são: compensação reativa, transferência de potência ativa, corte de carga, etc.

As referências [Begovic 95, Martins 00, Moura 03] ressaltam a importância de serem simuladas contingências para se estudar o ponto de colapso e a margem de estabilidade de tensão. Em [Moura 03, Poshtan 04], são sugeridas formas para se classificarem as contingências com o objetivo de reduzir o tempo gasto com as análises. Em [Ferreira 99, Venkatesh 02, Menezes 02a], verifica-se que as contingências provocadas no sistema não são as únicas a diminuir a MET; a otimização do fluxo de potência reativa também pode reduzi-la, apesar do aumento na disponibilidade de potência reativa.

Os artigos [Ferreira 99, Lachs 00, Kopcak 02, Menezes 02b, Silva 01, Soares 01] abordam indicadores para o colapso de tensão e barras críticas. Em [Garcia 99, Musirin 02a], são apresentados métodos para se encontrarem ramos críticos de um sistema elétrico.

Com relação aos critérios e metodologias adotadas para a análise estática da estabilidade de tensão, na qual são utilizadas as curvas PV e QV, uma das ferramentas que vem sendo utilizada no setor é o ANAREDE Continuado [WANAREDE 03]. Informações específicas são encontradas em [Abed 99, CCPE 02, Cortez 01a, Lachs 00, ONS 04, Takahata 00].

### **Colapso de Tensão**

Em [Cortez 01a, Lachs 00, Kundur 94], são descritas situações de um cenário típico de colapso de tensão as quais são apontadas abaixo em ordem cronológica:

- redes de transmissão muito carregadas;
- múltiplas contingências;
- distúrbio rápido que eleva o carregamento em algumas linhas, aumentando significativamente suas perdas de potência reativa;
- redução de tensão abrupta em subestações adjacentes a estas linhas;
- potência reativa de saída de geradores aumenta em resposta às baixas tensões;
- fase lenta inicial, por alguns minutos, quando só uma região limitada é afetada;
- proteções convencionais não funcionam durante esta fase lenta;
- rápida fase de distúrbio, por alguns segundos, com tensões caindo e se estendendo para todas as áreas do sistema;
- relés podem se abrir formando ilhas de áreas.

As causas de um possível colapso são discutidas em várias referências. Costuma-se relacioná-las à redução da margem de estabilidade de tensão a qual ocorre devido a vários fatores [Huang 01], tais como:

- diminuição do valor a ser investido para geração de energia elétrica: as empresas optam por geradores de baixa capacidade de suporte de potência reativa porque possuem uma relação custo/benefício maior por MW produzido;
- redução do pagamento de potência reativa: os consumidores instalam bancos de capacitores em excesso, evitando o uso de fontes reativas mais caras como compensadores síncronos que têm respostas dinâmicas mais rápidas;
- distribuição desigual de potência reativa pelo sistema elétrico, deixando áreas mais vulneráveis à instabilidade de tensão;
- crescimento das perdas de potência reativa em redes de transmissão devido ao aumento dos níveis de energia transferidas entre os subsistemas.

Em [Souza 04, Ajarapu 94] é descrito o funcionamento do fluxo de potência continuado, indicando os parâmetros previsor e corretor utilizados para formar a curva PV que identifica o ponto de máximo carregamento da barra e, conseqüentemente, o colapso de tensão. É sugerida uma análise de sensibilidade, baseada no vetor tangente, para encontrar barras e ramos críticos (maiores valores do vetor tangente) e para apontar os geradores mais eficientes para corrigir a tensão das barras críticas. Tais geradores são aqueles que obtêm a maior variação da tensão da barra crítica [Valle 01]. Seleccionadas tais barras, é utilizado um processo otimizado que indica a instalação de capacitores nelas, a fim de melhorar a margem de estabilidade de tensão.

O vetor tangente associado ao autovetor da matriz Jacobiana pode indicar o ponto de colapso de tensão da rede. Em [Souza 97] é feita uma revisão bibliográfica das técnicas para se determinar o ponto de colapso, apresentando características, vantagens e desvantagens em relação à sua aplicabilidade. Comparando-se a técnica do vetor tangente com a do autovetor à direita, observa-se que a primeira tem cálculos mais simples, exigindo menos do processo computacional. Em ambas as técnicas encontram-se dificuldades para inserir os limites de injeção de potência ativa e reativa, o que reduz a precisão destes métodos, porém os resultados obtidos são bastante satisfatórios, até para grandes sistemas elétricos.

### **Colapso de Tensão e Perdas Elétricas**

Em [Ferreira 02] é proposta uma metodologia que utiliza o FLUPOT, uma ferramenta computacional desenvolvida pelo CEPEL, para aplicar uma otimização baseada em pontos interiores a qual indica as ações de controle requeridas para diferentes funções objetivo empregadas: minimização de perdas reativas; de fornecimento de potência reativa por

geradores; e por compensadores síncronos. Tal metodologia sugere a aplicação do vetor tangente para encontrar barras críticas em relação ao colapso de tensão e barras candidatas para minimizar as perdas no sistema através da alocação de capacitores. Os resultados obtidos em [Ferreira 02] mostram que problemas com o colapso de tensão podem não estar diretamente relacionados a sistemas com altas perdas.

Em [Souza 04], é proposta uma metodologia que otimiza três funções objetivo separadamente: minimiza as perdas ativas da área crítica para o colapso de tensão; maximiza o módulo das tensões nas barras com perfis baixos; e maximiza o carregamento do sistema. Destaca-se a forma de escolha das barras candidatas para alcançar tais objetivos. É observada qual é a influência da mudança das barras candidatas para cada uma destas funções objetivo. Escolhem-se três opções: (1) barras candidatas para a redução das perdas ativas; (2) barras com baixos módulos de tensão; (3) barras críticas para o colapso de tensão. A alternativa (1) é indicada pela análise de sensibilidade de perdas, a (2), pelo fluxo de potência e a (3), pelo cálculo do vetor tangente. A opção (3) obtém os melhores resultados, atingindo uma margem semelhante a das outras alternativas com um montante menor de compensação reativa alocado, sendo, portanto, mais eficiente.

Em síntese, os artigos [Ferreira 02, Souza 04] apontam a importância de se alocar compensação reativa nas barras críticas, indicadas pelo vetor tangente, para melhorar o sistema elétrico com relação à estabilidade de tensão, como verificado nos parágrafos anteriores. Tal estratégia também é utilizada nos procedimentos da avaliação técnica desta tese de doutorado, como descrito no próximo capítulo.

### **Índices de Estabilidade de Tensão**

As referências [Musirin 02a e 02b] aplicam um índice de estabilidade de tensão rápido (FSVI, sigla em inglês) e o comparam com o índice  $L_{mn}$  e com o fator de estabilidade da linha (LQP), definidos pelas equações 2.7, 2.8 e 2.9. Os termos  $Z_{ij}$  e  $X_{ij}$  representam a impedância e a reatância da linha entre as barras  $i$  e  $j$ ;  $V_i$  e  $P_i$  correspondem à tensão e à potência ativa em  $i$ ;  $Q_j$  é a potência reativa que chega em  $j$ ;  $\theta$  é o ângulo da impedância;  $\delta$  é o ângulo entre as tensões das barras  $i$  e  $j$ .

$$FSVI_{ij} = \frac{4Z_{ij}^2 Q_j}{V_i^2 X_{ij}} \quad (2.7)$$

$$L_{mn} = \frac{4Q_j X_{ij}}{[V_i \sin(\theta - \delta)]^2} \quad (2.8)$$

$$LQP = 4 \left( \frac{X_{ij}}{V_i^2} \right) \left( \frac{X_{ij}}{V_i^2} P_i^2 + Q_j \right) \quad (2.9)$$

Os resultados obtidos pelos autores para os três índices são semelhantes, apontando as mesmas linhas como as mais críticas.

Em [Musirin 04], utiliza-se o índice FVSI para selecionar dois conjuntos de áreas fracas: um composto por linhas sensíveis para a análise de estabilidade de tensão e outro por linhas críticas que, ao saírem de operação, tornam o sistema vulnerável. Tais linhas normalmente se encontram próximas da barra que tem seu carregamento aumentado. Verifica-se que a maioria das linhas sensíveis também são críticas.

Em [Rahman 95] é indicado o índice  $L_i$  para apontar as barras críticas com relação ao colapso de tensão estimado pela equação 2.10 onde o subscrito *th* representa a barra do equivalente de Thévenin e  $L_i$ , a da carga (barra onde é calculado  $L_i$ ). Para se encontrar tal índice para determinado local, é preciso calcular o circuito equivalente de Thévenin para o restante da rede. Quando  $L_i$  é maior que 1 significa que o sistema entra em colapso, portanto as barras críticas são aquelas com valores de  $L_i$  mais próximos de 1.

$$L_i = \frac{4(V_{th}V_L \cos(\theta_{th} - \theta_L) - V_L^2 \cos(\theta_{th} - \theta_L)^2)}{V_{th}^2} \quad (2.10)$$

### **Estabilidade de Tensão como Restrição do Planejamento**

Em [Rosehart 03] é proposta e comparada a implementação dos limites da estabilidade de tensão na otimização do fluxo de potência de quatro maneiras: (1) adicionando o máximo carregamento nas restrições; ou (2) incorporando-o na função objetivo através de um peso; (3) utilizando uma combinação destas duas implementações antecedentes; (4) indicando pesos para o custo da potência reativa em relação ao melhoramento do fator de potência e da estabilidade de tensão. O maior desafio deste artigo é selecionar os pesos ideais que não levem a otimização do fluxo de potência à divergência e ainda atinja resultados favoráveis para a estabilidade de tensão sem custos muito elevados.

Em [Medeiros 03], afirma-se que normalmente o carregamento máximo em linhas curtas (menores que 160 km) é determinado por limites térmicos, em linhas médias (entre 160 e 480 km), por limites de queda de tensão e em linhas longas (acima de 480 km), pela

instabilidade de tensão. Estes limites máximos são maiores para níveis de tensão mais elevados.

### **Critérios para Estabilidade de Tensão**

O artigo [Abed 99] apresenta os critérios para estabilidade de tensão, a estratégia de corte de carga e a metodologia de monitoramento de reserva de potência reativa adotados pelo *Western Electricity Coordinating Council* (WECC), conselho muito conceituado da região Oeste da América do Norte.

O trabalho [Cortez 00] propõe critérios e procedimentos para avaliação de estabilidade de tensão, subsidiando os estudos que foram desenvolvidos pela Força Tarefa Brasileira de Estabilidade de Tensão [CCPE 02], para aplicação no planejamento do sistema elétrico brasileiro. São tratadas as metodologias e ferramentas utilizadas que mais contribuem na formulação desses critérios e procedimentos, especialmente quanto a margens de estabilidade. Tais critérios também são adotados nesta tese de doutorado.

As análises, sob o ponto de vista do planejamento, utilizam métodos estáticos que possibilitam grande varredura de situações a que o sistema pode ficar submetido. Dentre as metodologias analisadas pela Força Tarefa, o levantamento de curvas PV se mostrou o mais adequado para a determinação das MET. As metodologias QV e análise modal são importantes para subsidiar tomadas de decisão quanto a margens de potência reativa e locais apropriados para reforços no sistema.

A filosofia adotada em [Cortez 00] se fundamenta na segurança do sistema através da determinação das MET, tanto para condição normal quanto em condições de emergências (contingências simples). As margens mínimas são recomendadas como critério de segurança para a rede elétrica e se baseiam nos erros médios históricos de previsão de carga, no âmbito do planejamento, e no atraso de um ano nas obras.

Segundo o WECC, a margem de estabilidade de tensão em MW para o caso base do sistema elétrico (condições normais de operação) tem que ser maior que 5% para permitir imprevistos como aumento de carga ou fluxo entre subsistemas sem esquemas de ação que seriam ativados durante condições de contingência, mas não em condições normais [Abed 99]. Para o ONS, tal margem deve ser de 6% (taxa de crescimento médio de 4,5% e erro médio da previsão de carga 25%) mais a razão entre demanda máxima instantânea e a integralizada em uma hora [CCPE 02, ONS 04].

A taxa média de crescimento anual (TMCA) do mercado de energia elétrica entre 1995 e 2000 da região Sudeste foi de 4,5%, com crescimento mínimo de 2,2% e máximo de 6,2%, e a TMCA da região Sul foi de 6%, sendo seu menor valor de 3,9% e o maior de 8%.

O erro médio da previsão de mercado (diferença entre o valor previsto e o verificado) tem sido de 20% no Sudeste e de 30% no Sul [Cortez 01a].

### **Análises Finais**

O sistema elétrico se encontra num cenário de baixos investimentos no planejamento da expansão, deixando as redes próximas aos limites. A compensação reativa é uma alternativa interessante, porém é importante que os poucos investimentos sejam muito bem empregados, escolhendo-se a solução ótima do montante e da localização dos equipamentos a serem instalados. É, portanto, necessário criar um procedimento que atenda aos requisitos de compensação reativa e estabilidade de tensão, o qual é proposto no próximo capítulo.

Através da pesquisa apresentada neste item, confirma-se que a análise estática (curvas PV e QV), apesar de seu resultado menos preciso, é bem aceita para se avaliar a estabilidade de tensão no contexto do planejamento da expansão. Sendo assim, tal análise é a utilizada nos procedimentos sugeridos no próximo capítulo.

Verifica-se a necessidade de serem identificadas as barras críticas para se obterem maiores margens de estabilidade de tensão. Para a análise de sensibilidade e determinação de tais barras críticas, é indicado o uso do vetor tangente que é eficaz neste propósito.

Os critérios adotados para a avaliação técnica de estabilidade de tensão no contexto nacional são baseados naqueles indicados pelo CCPE (Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos) e ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) [CCPE 02, Cortez 00, ONS 04].

Com o estudo, foram adquiridas informações fundamentais para: selecionar os critérios a adotar; escolher a ferramenta a ser utilizada; determinar os tipos de análises que devem ser realizadas; decidir que resultados a se obter; indicar os limites a serem estabelecidos para que o sistema não atinja o ponto de colapso de tensão; realizar análises de sensibilidade que apontam barras críticas; identificar possíveis medidas a tomar, com relação à compensação reativa, para se evitar a instabilidade de tensão.

### **2.2.3. Transitórios Eletromagnéticos**

O estudo realizado sobre o tema *Transitórios Eletromagnéticos* foi baseado nas referências: [Carvalho 95], [D'Ajuz 85 e 87], [Kizilcay], [Eletrobrás 85], [Naidu 85] e [Greenwood 91]. A pesquisa completa sobre o tema está registrada em [Chaves 04]. O presente item está estruturado da seguinte maneira: apresentação resumida de algumas definições básicas; descrição do fenômeno ocorrido ao se manobrar bancos de capacitores;

caracterização do disjuntor; detecção das conseqüências dos transitórios eletromagnéticos; identificação das influências do sistema elétrico e da compensação reativa no fenômeno; apresentação de soluções e estratégias adotadas; destaque das vantagens de cada mecanismo mitigador; indicação das ferramentas computacionais existentes para a realização das simulações. Nestes tópicos são apontadas as referências estudadas mais relevantes. A definição dos termos de transitórios eletromagnéticos utilizados a seguir é mostrada no apêndice B.

O chaveamento de um banco de capacitor está associado a três parcelas de corrente e tensão distintas:

- regime permanente que está presente somente após o término do transitório;
- transitório que depende das constantes do circuito: R, L e C;
- valor inicial da corrente e tensão.

Ao se ligar um capacitor descarregado, sua tensão não se altera instantaneamente, levando a mesma para zero e oscilando até chegar no valor nominal de 60 Hz. O pico teórico alcançado pela sobretensão é de 2 pu, mas normalmente tal valor é menor devido ao amortecimento (resistências do sistema) [Grebe 96].

O fenômeno oscilatório (transitórios eletromagnéticos) é conseqüência da troca de energia entre os elementos indutivos ( $\frac{1}{2}LI^2$ ) e capacitivos ( $\frac{1}{2}CV^2$ ) do circuito. Quando é energizado **apenas um capacitor** a freqüência de oscilação é baixa de **300 a 1000 Hz**, durando de 0,25 a 0,5 ciclo com sobretensões que variam entre 1,1 e 1,5 pu [Grebe 96, Santoso 01]. Neste caso, o banco interage com a fonte. Quando é chaveado um **banco em paralelo** com um já existente (configuração *back-to-back* – vide apêndice B), a freqüência de oscilação é de **2 a 10 kHz**. Dependendo da ressonância do sistema, pode-se obter sobretensões maiores que 2 pu [Coury 98, Santoso 01].

O maior valor inicial e conseqüente maior sobretensão ocorre quando há um carregamento prévio do banco de capacitor na polaridade inversa à da forma de onda da fonte no instante da manobra. Em [Blooming 05] é descrito um caso real em que o banco e seus fusíveis falham devido ao carregamento prévio das unidades capacitivas.

As sobretensões e sobrecorrentes causadas pelos transitórios eletromagnéticos podem ser classificadas pela *amplitude do pico, freqüência e duração*.

Durante o chaveamento dos capacitores podem surgir picos de corrente elevados (*inrush*) com duração de vários milisegundos [Alves 99, Castro Jr. 03, Pamplona 02, Santos 02]. Ao se manobrar um único banco de capacitor, a corrente *inrush* (apêndice B) é de aproximadamente 5 pu com freqüência entre 200 e 600 Hz. Na configuração *back-to-back*,

tal sobrecorrente fica entre 40 e 100 pu com uma frequência de oscilação de 5 a 20 kHz [Castro Jr. 03].

A corrente *inrush* é proporcional à tensão inicial do capacitor e à frequência de ressonância. O valor máximo da corrente *inrush* depende da separação dos pólos, do amortecimento do resistor, da frequência natural e da saturação da corrente limitadora do reator [Coury 98]. Desprezando a parte resistiva, o pico da corrente *inrush* na energização de um único banco de capacitor é dada pela equação 2.11, onde  $V_L$  é a tensão de linha da fonte,  $Z_0$  é a impedância de surto ( $\sqrt{L_{eq}/C_{eq}}$ ). A frequência da corrente *inrush* é calculada pela equação 2.12 [Das 92, McCoy 94].

$$i_{inrush_{max}} = \frac{\sqrt{2} V_L}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{C_{eq}}{L_{eq}}} = \frac{\sqrt{2} V_L}{\sqrt{3} Z_0} \quad (2.11)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C_{eq}}} \quad (2.12)$$

Uma outra forma de se calcular  $f$  é pela equação 2.13, onde se têm os termos de: frequência da fonte ( $f_s$ ), reatância equivalente do capacitor ( $X_{Ceq}$ ) e da indutância ( $X_{Leq}$ ). O aumento da tensão em regime permanente ( $\Delta V$ ) pode ser determinado pela razão entre a potência trifásica do banco (MVar) e a de curto-circuito ( $MVA_{sc}$ ), mostrado na equação 2.14 [Grebe 98].

$$f \approx f_s \sqrt{\frac{X_{Ceq}}{X_{Leq}}} \approx f_s \sqrt{\frac{MVA_{sc}}{MVar}} \approx f_s \sqrt{\frac{1}{\Delta V}} \quad (2.13)$$

$$\Delta V = \frac{MVar}{MVA_{sc}} \cdot 100\% \quad (2.14)$$

Na configuração *back-to-back*, caso não haja reatâncias em série com a capacitância, a indutância da fonte ( $L_s$ ) pode ser desprezada, pois a corrente que flui para o capacitor chaveado ( $I_C$ ) é fornecida quase totalmente por aquele já em funcionamento, muito pouco vem da fonte ( $I_s$ ). Nesta situação (mostrada na figura 2.3), nas equações 2.11 e 2.12,  $L_{eq}$  é a indutância entre os capacitores e  $C_{eq}$ , a capacitância em série destes equipamentos, representada pela equação 2.15.

$$C_{eq} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.15)$$

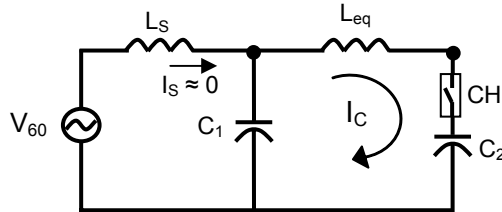


Figura 2.3. Circuito equivalente da equação 2.15.

A frequência natural de cada circuito em paralelo ( $\omega_n$ ) é calculada pela equação 2.16, onde n identifica o circuito correspondente de cada capacitor.

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_n C_n}} \quad (2.16)$$

Para se evitarem altas sobretensões e sobrecorrentes, o instante ótimo para a **energização** do banco de capacitor *descarregado* é quando a tensão atravessa o zero, sendo o pior caso quando a tensão está em seu pico, porque a sobretensão atinge teoricamente 2 pu.

Quando é realizada a **desenergização**, a corrente no circuito do capacitor é interrompida e uma carga elétrica é armazenada na capacitância. Como o disjuntor interrompe a corrente em zero, a tensão está no valor de pico [Das 92].

Ao se desenergizar um capacitor pode ocorrer o *restrike*, também conhecido como reacendimento (apêndice B), caso os pólos do disjuntor não tenham rigidez dielétrica suficiente para suportar a tensão máxima imposta durante o período de interrupção. O resultado é uma oscilação de alta frequência que é sobreposta à tensão de 60 Hz. Múltiplos reacendimentos podem existir, tornando a tensão cada vez mais alta. Este fenômeno se extingue com o aumento do comprimento entre os contatos do disjuntor e também quando as resistências do sistema conseguem amortecer as oscilações [Das 92, Zalucki 00].

Na desenergização sem *restrike*, normalmente não são verificados transitórios [Santoso 01]. Considerando a incidência de reacendimento, observam-se maiores sobretensões e sobrecorrentes do que na energização. Um capacitor com carga de 1 pu alcança sobretensões de 2 pu de 1,5 ciclo e, com *restrike* no ponto máximo, atinge-se 3 pu [Comitê IEEE 96].

O reacendimento está diretamente relacionado com a *Tensão de Restabelecimento Transitória* (TRT – apêndice B) que atravessa os contatos do disjuntor. A TRT inicia de um baixo valor e pode atingir 2 a 3 pu após meio ciclo. Este valor depende da configuração do sistema: capacitor aterrado, fonte aterrada, presença de outras cargas, etc. [Das 92]. As maiores TRT ocorrem nos capacitores não aterrados, sendo de 2,5 a 3 pu em 1,5 ciclo, e, às vezes, até 4 pu [Comitê IEEE 96].

A seguir são feitos comentários sobre o **disjuntor**, equipamento que realiza as manobras de capacitores (energização e desenergização) e sofre os fenômenos descritos anteriormente (*restrike* e tensão de restabelecimento transitória) [Carvalho 95].

Atualmente, a maioria dos disjuntores instalados são os a vácuo. Este tipo de dispositivo tem como vantagens o elevado número de ciclos permitidos na operação e o alto valor de rigidez dielétrica entre seus contatos em um pequeno volume [Fugel 03], diminuindo a ocorrência de reacendimentos ou reignições. Segundo [Zalucki 00], até o ano 2000, tais dispositivos se mostraram muito instáveis, porém a tecnologia de interrupção a vácuo dos disjuntores progrediu muito, tornando mais raros os *restrikes*, *prestrikes* (ou pré-ignição) e correntes de *chopping* (apêndice B) [Das 05].

O reacendimento e a reignição (apêndice B) dependem dos parâmetros da operação de chaveamento. Quanto maior o número de operações, mais alta é a probabilidade de ocorrer *restrikes*. Segundo [Dullni 06], 60% dos bancos de capacitores são chaveados 300 vezes por ano e 30%, 700 vezes por ano.

Ao se fechar a chave, ocorrendo uma pré-ignição (apêndice B), o arco funde a superfície dos contatos localmente e quando é feita sua abertura a fundição é rompida e fornece grandes possibilidades para um reacendimento [Dullni 06]. Um *restrike* ocorre num período de tempo de algumas centenas de milissegundos enquanto o *prestrike* em algumas centenas de microssegundos [Dullni 06].

Com relação ao aspecto de *suportabilidade dielétrica do disjuntor*, verifica-se que as características da dispersão de seus contatos e o comportamento da rigidez dielétrica entre eles são muito importantes para o desempenho do chaveamento e determinam a máxima tensão possível entre os contatos. A ocorrência de um arco elétrico depende da precisão mecânica do equipamento e da tangente da curva de tensão do sistema no instante de tensão zero [Rocha 97].

Revisadas as principais características e fenômenos das manobras de capacitores, é importante citar as **conseqüências dos transitórios eletromagnéticos** para os equipamentos do sistema elétrico. Elas são tratadas em diversas referências: [Alves 99], [Freire 01a e 01b] e [Leão 01], dentre outras. São principais conseqüências:

- degradação do isolamento ou queima de fusíveis internos de capacitores;
- sobretensões elevadas que podem danificar transformadores e pára-raios e causar rupturas em isoladores;
- atuação indesejada de proteções;
- danos dielétricos e mecânicos em células de bancos de capacitores e em disjuntores;
- disparo de pára-raios convencionais sem resselagem ou dissipação de energia elevada em pára-raios ZnO, causando degradação excessiva ou até danificação destes dispositivos;
- danificação de equipamentos, inclusive os de manobra, pelo reacendimento do arco durante a desenergização.

Em [Grijp 96], é citado um exemplo prático de manobras de bancos de capacitores de 275 kV com o neutro não-aterrado que tem provocado problemas como: explosão de latas dos capacitores, explosão de câmaras de disjuntores devido ao *restrike*, acionamento de abertura de disjuntores de barras adjacentes devido à amplificação da tensão, sobretensões severas em subestações remotas resultando em falhas da isolação de transformadores, entre outros efeitos.

Excessivos transitórios em tensões fase-fase e ressonância nos enrolamentos de transformadores são conseqüências provocadas pelo *restrike*. Como as freqüências deste fenômeno são relativamente baixas, entre 300 e 1000 Hz, os transitórios passam para o secundário do transformador, sendo os equipamentos de baixa tensão os mais afetados pelas sobretensões e perturbações [Grebe 96].

As sobretensões são amplificadas pelos seguintes fatores: rede com baixa potência de curto-circuito; linha de transmissão longa conectada à barra onde ocorre a energização do capacitor; sintonia entre a freqüência de ressonância da linha e a da corrente *inrush*. Além destes fatores, podem-se citar: a característica da carga; o tamanho do capacitor energizado, do transformador do consumidor e da compensação reativa para correção de fator de potência; o sistema de amortecimento; a freqüência de oscilação de cada circuito ( $\omega_1$  próximo de  $\omega_2$ ) e a impedância  $Z_2$  maior que a  $Z_1$  (equações 2.17 e 2.18) [Coury 98, McGranaghan 92]. Os subscritos de  $\omega$ ,  $Z$ ,  $L$  e  $C$ , que possuem maior valor, pertencem a um menor nível de tensão. Por exemplo, para a figura 2.4, o subscrito “2” refere-se a 13,8 kV enquanto o subscrito “1” está relacionado a 36 kV.

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \text{ e } Z_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad (2.17)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}} \text{ e } Z_2 = \sqrt{\frac{L_2 (C_1 + C_2)}{C_1 C_2}} \quad (2.18)$$

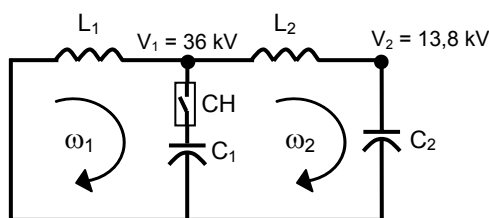


Figura 2.4. Circuito exemplo para as equações 2.17 e 2.18.

As **conseqüências de sobretensões muito elevadas** são: distúrbios, danos ou falhas em equipamentos dos consumidores (particularmente os eletrônicos de baixa tensão), parada de processos ou motores de velocidade controlada e problemas em redes de computadores. Interrupções de uma hora no sistema elétrico podem gerar perdas da ordem de centenas de milhares de dólares para consumidores comerciais e industriais [Coury 98].

Segundo [McGranaghan 92], os equipamentos de proteção atuam para sobretensões maiores que 1,8 pu. Neste artigo é constatado que os transitórios são amplificados para a faixa de 2 a 3 pu quando ocorrem as **piores condições** possíveis [Grebe 96]:

- o tamanho do capacitor chaveado é significativamente maior (mais de 10 vezes) que o banco de correção de fator de potência;
- a frequência de energização e de ressonância série formada pelo transformador e o banco de correção de fator de potência estão próximas;
- é pequeno o amortecimento do sistema fornecido pela carga de baixa tensão, por exemplo, uma planta industrial típica composta principalmente de motores.

Através das afirmações anteriores observa-se que as conseqüências dos transitórios eletromagnéticos estão fortemente relacionadas às características do chaveamento e do sistema elétrico onde é realizada a manobra. A seguir, descreve-se a influência de cada uma das diferentes características existentes.

Considerando o chaveamento de um capacitor conectado através de uma **linha de transmissão** à barra adjacente, a sobretensão depende do tempo de trânsito da onda (comprimento da linha) e da frequência de ressonância causada pelas capacitâncias e as indutâncias que compõem o circuito. A sobretensão na barra adjacente atinge os maiores picos para comprimentos de linha que têm o inverso do tempo de trânsito igual a 4 vezes a frequência de ressonância do sistema. A variação do comprimento da linha exerce pouca influência no valor da tensão da subestação onde ocorre a manobra. Além disso, quanto maior o capacitor, mais elevada é a sobretensão na barra adjacente [Bhargava 93].

Os resultados de [Jota 98] indicam que uma **carga** com maior fator de potência atinge valores menores de sobretensão. Em sistemas com pequeno amortecimento, que é o caso de consumidores com carga predominante de motores, a sobretensão pode chegar a ser 0,3 pu maior que uma carga resistiva equivalente, segundo [McGranaghan 92].

Um ponto importante da pesquisa é a **influência da CR/CT nos transitórios eletromagnéticos**, já identificada no item 2.1.3, tratada em [Fernandez 97 e 04, Freire 01b, Pamplona 02], entre outras referências. Esta influência se deve, principalmente, às sobretensões e às sobrecorrentes provocadas, respectivamente, ao se manobrar um único capacitor e na configuração *back-to-back*.

Maiores montantes de compensação reativa e sistemas mais fracos têm mais problemas com os transitórios gerados [Santoso 01]. Quanto menor o capacitor (em  $\mu\text{F}$ ), maior é a frequência de oscilação (equação 2.12). Quanto mais perto da carga ou mais longe da fonte estiver a compensação reativa, menor é a frequência de oscilação e as sobretensões, porém a onda contém mais picos [Saied 04b].

Os artigos [Dunsmore 92, Jota 98, McGranaghan 92, Saied 04a] tratam de estudos de sobretensões atingidas quando o sistema tem **circuítos em paralelo** formados por capacitores e indutores (por exemplo, figura 2.4).

Em [Dunsmore 92], é energizado um capacitor em uma subestação em 36 kV e observadas as sobretensões causadas por este chaveamento. É verificado que, quanto menor o nível de tensão, maiores são as sobretensões. Os artigos [Dunsmore 92, Jota 98] apresentam gráficos da sobretensão em função da razão entre as frequências naturais ( $\omega_2/\omega_1$ , figura 2.4) dos circuitos em paralelo para diversas razões de capacitores ( $C_1/C_2$ , figura 2.4). Na distribuição, o resultado generalizado alcançado é: quanto maior é  $C_1/C_2$ , mais elevada é a sobretensão, porém este valor também depende de  $\omega_2/\omega_1$ . Segundo [Dunsmore 92], se as frequências naturais são significativamente maiores que a fundamental ( $\omega_n \gg \omega_0$ ), a sobretensão máxima ocorre quando as frequências do nível de alta e baixa tensão são iguais ( $\omega_1 = \omega_2$ ).

O artigo [McGranaghan 92] mostra que as maiores sobretensões ocorrem com o chaveamento de grandes bancos de capacitores ( $C_1$ ) ou com a presença de pequenos montantes de compensação reativa para correção de fator de potência ( $C_2$ ). Isto porque a razão entre o banco manobrado e esta compensação ( $C_1/C_2$ ) aumenta, confirmando o que é constatado em [Dunsmore 92, Jota 98]. Resultados semelhantes são gerados por [Saied 04a].

Em [Barbosa 05], é apresentado um exemplo prático de como o chaveamento da compensação reativa em uma subestação da concessionária influencia os bancos de capacitores e os disjuntores de uma indústria. Neste exemplo, as várias manobras da compensação reativa em níveis de tensão mais altos causaram sobretensões nos equipamentos do consumidor, desgastando-os. A consequência disto foi a explosão de latas de capacitores e de um disjuntor.

Foram pesquisadas as **soluções e estratégias adotadas** para mitigar as sobretensões e sobrecorrentes as quais são encontradas em [Alves 99, Castro Jr. 03, Freire 01a, Sabot 93] e outras referências. Estas soluções vêm para estender a vida útil dos componentes dos bancos de capacitores e de equipamentos adjacentes.

Segundo [Grebe 96], medições em plantas industriais indicam transitórios amplificados entre 2,0 e 4,0 pu, dependendo do montante da compensação reativa de baixa tensão. As soluções adotadas para minimizar estes transitórios são:

- aplicação de pára-raios de alta energia (MOV) em sistemas de baixa tensão;
- utilização de filtros harmônicos para diminuir a frequência de ressonância;
- instalação de resistores ou reatores de pré-inserção ou chaveamento controlado;
- emprego de reatores em série com os motores para reduzir a probabilidade de perturbações;
- uso de reatores fixos de algumas centenas de  $\mu\text{H}$  para limitar a corrente *inrush*.

A eficácia dos equipamentos mitigadores depende do sistema elétrico onde estes dispositivos estão localizados. Análises detalhadas são necessárias para a escolha do melhor tipo de mitigador. A seguir são descritas as características dos pára-raios, filtros harmônicos, resistores e reatores de pré-inserção e chaveamento controlado, sendo que para os três últimos é feita uma comparação.

O artigo [Paul 93] discorre sobre os **pára-raios** ZnO e SiC que são utilizados para proteger os equipamentos do sistema. O ZnO é mais atrativo para os modernos MOV (*Metal Oxide Varistor*) por causa da sua baixa condução de corrente em tensão nominal.

A instalação de pára-raios em paralelo é recomendada para ajudar a descarregar o capacitor em situações de aumento de energia causado por sobretensões no equipamento e para limitar as TRT. Na desenergização de capacitores, a análise da ocorrência de reignição com frequência e amplitude elevadas é importante para determinar a energia que deverá ser dissipada pelos pára-raios durante tal distúrbio. Os principais parâmetros a serem especificados para o pára-raios MOV são [Paul 93]:

- tensão de operação contínua máxima (MCOV, sigla em inglês);
- amplitude, forma de onda e duração da sobretensão;
- energia absorvida se a sobretensão exceder a tensão máxima de operação.

A MCOV deve ser igual a, no mínimo, 125% da tensão de linha nominal. O limite comum de sobretensão para o pára-raios é de 2,0 pu, onde 1,0 pu corresponde à equação 2.19.

$$\frac{\sqrt{2} V_N}{\sqrt{3}} \quad (2.19)$$

A energia absorvida pelo pára-raios é calculada pela equação 2.20, onde C é a capacitância do banco,  $V_0$  e  $V_1$  são, respectivamente, tensão anterior e posterior à manobra.

$$E = \frac{1}{2} C (V_0^2 - V_1^2) \quad [J] \quad (2.20)$$

Quanto maior o capacitor chaveado, mais alta é a taxa de energia absorvida pelo pára-raios. Em níveis de baixa tensão, a taxa de energia absorvida pelos pára-raios costuma ser alta, sendo necessário verificá-la para a escolha do equipamento ideal [McGranaghan 92].

Outra opção para minimizar os transitórios é a utilização de **filtros harmônicos** para os capacitores de baixa tensão dos consumidores. Este dispositivo reduz a frequência de ressonância para valores abaixo de 300 Hz, não havendo grande amplificação da tensão porque os transitórios excitam frequências entre 300 e 1000 Hz. As sobretensões diminuem significativamente, chegando, em alguns casos, a 1,0 pu de redução. Logo, para se chegar a resultados mais precisos nas simulações de transitórios, devem-se modelar tais filtros [Grebe 98, McGranaghan 92].

Ainda hoje, o **resistor de pré-inserção** está presente em grande número no sistema elétrico como mitigador de transitórios. Tal resistor é conectado à rede através de um ramo auxiliar que está em paralelo ao circuito principal, mostrado na figura 2.5. Primeiro, fecha-se mecanicamente a chave do circuito auxiliar ( $CH_A$ ) e, após um pequeno período de tempo, o

circuito principal (CH<sub>P</sub>) é ligado à rede. As duas manobras causam transitórios eletromagnéticos.

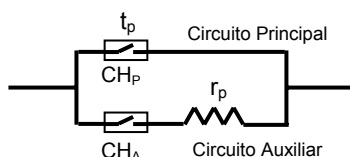


Figura 2.5. Modelo do resistor de pré-inserção.

O resistor de pré-inserção reduz a sobretensão inicial e fornece um amortecimento para o sistema. A eficácia deste equipamento depende do valor da resistência ( $r_p$ ) e do tempo de pré-inserção ( $t_p$ ). A ocorrência de transitórios no chaveamento do circuito auxiliar é inversamente proporcional a  $r_p$ . Na energização do circuito principal, a amplitude do transitório cresce com o aumento da resistência e diminui com maior tempo de pré-inserção.

Esta resistência é calculada pela equação 2.21, onde  $C$  é a capacitância do banco de capacitor chaveado e  $\tau$  é o tempo de amortecimento do circuito. Considerando a potência do banco ( $Q_c$ ), a equação 2.21 se torna a 2.22. O termo  $V_N$  corresponde à tensão nominal da barra e  $\omega$  à frequência angular ( $2\pi f$ ).

$$r_p = \frac{\tau}{C} \quad (2.21)$$

$$r_p = \tau \frac{\omega V_N^2}{Q_C} \quad (2.22)$$

Para bancos de capacitores de elevado montante, onde o transitório do chaveamento do circuito principal se torna significativo, deve-se utilizar o **reator de pré-inserção** com baixa resistência e, nos demais casos, com alta resistência. Os reatores de pré-inserção alcançam maiores valores de impedância durante os transitórios de elevada frequência. Desta forma, a impedância deste equipamento diminui a sobretensão e limita a amplitude da corrente *inrush* inicial [Adams 98].

Grandes reatores de pré-inserção limitam a corrente *inrush* mas também podem induzir ressonâncias que amplificam os harmônicos presentes na rede elétrica. A vantagem do reator de pré-inserção é o baixo custo e a redução da corrente de curto-circuito na barra do capacitor chaveado [Fernandez 04].

Uma das alternativas mais eficientes para mitigar as sobretensões geradas pela manobra de capacitores é o **chaveamento controlado**, que tem como função comandar o

fechamento ou a abertura de chaves em instantes ótimos. Estes equipamentos de controle detectam a passagem por zero, calculam o tempo de atraso e, a partir destes dados, enviam um sinal de potência para a manobra [Fernandez 97 e 04, Piantino 99]. De forma teórica pode-se dizer que o chaveamento controlado utiliza a seguinte lógica:

- para o capacitor aterrado descarregado: fechamento sucessivo das três fases quando a tensão fase-terra zera ( $60^\circ$  de separação);
- para o capacitor não-aterrado descarregado: fechamento simultâneo de duas fases quando a tensão entre elas é zero e a próxima fase fecha  $90^\circ$  depois (tensão fase-terra igual a zero).

O chaveamento controlado, geralmente, tem como meta energizar as três fases depois que a tensão passa por zero. Em situações antes do zero, o desvio do fechamento pode causar um *prestrike* próximo ao pico. Normalmente os instantes das manobras são fixados em 0,5 ms ou 1 ms depois da passagem por zero. É difícil manter o desvio em  $\pm 1$  ms. Na prática, são observados desvios maiores que 2 ms. A sobretensão varia com este erro no chaveamento controlado. Melhor precisão pode ser obtida por sofisticados dispositivos eletrônicos de alto custo [Chang 00].

Para se detectar o momento exato de se manobrar o disjuntor, a fim de que a tensão seja zero, determina-se o tempo de operação mecânica e o tempo elétrico que é ajustado para fazer o fechamento no instante esperado. O tempo de operação mecânica varia com a frequência de manobras, com a temperatura ambiente e com a técnica de manutenção.

O chaveamento controlado trabalha para compensar o acúmulo de operações consecutivas e melhora a confiabilidade de não ocorrência de *restrikes* nos disjuntores. Este equipamento possibilita uma grande redução dos estresses elétricos e/ou mecânicos oriundos dos transitórios de manobra de bancos de capacitores. Dentre estas vantagens e benefícios destacam-se [Fernandez 04]:

- a eliminação de câmaras auxiliares (com resistores de fechamento ou abertura) em disjuntores, podendo reduzir em até 30% seu preço;
- obtenção de menores margens de dimensionamento de equipamentos, o que traz como consequência a diminuição de custos de aquisição dos mesmos;
- significativa redução de custos de manutenção em disjuntores;
- aumento da disponibilidade operativa;
- melhoria da qualidade de energia fornecida, pela minimização dos transitórios de manobra e de seus efeitos indesejáveis no sistema elétrico de potência.

Para **concluir** esta parte sobre os dispositivos mitigadores de sobretensões é realizada uma **comparação** entre eles.

O resistor de pré-inserção é menos eficiente que o disjuntor dotado de controlador e introduz perdas momentâneas no sistema. Além disso, segundo [Filion 03], o seu investimento e manutenção são mais elevados que os de chaveamento controlado, ainda requerendo recondicionamento completo em menor tempo. Utilizando-se, então, chaves controladas, não só os bancos de capacitores são mais confiáveis operativamente como também reduzem significativamente os custos de aquisição dos disjuntores e de manutenção/indisponibilidade do equipamento.

O reator de pré-inserção é uma alternativa mais barata em relação ao resistor de pré-inserção devido ao fato de não necessitar de uma manobra adicional. Entretanto, o reator é menos eficaz que os outros dois equipamentos mitigadores citados porque introduz no sistema uma nova frequência de ressonância, causando oscilações que podem limitar a mitigação ou até mesmo amplificar os transitórios [Chang 00]. Com isto a diminuição da sobretensão nem sempre é significativa.

Se for adicionado um reator de pré-inserção na manobra do capacitor, a frequência de ressonância é alterada e, conseqüentemente, a sobretensão máxima ocorre para um novo comprimento de linha. O valor do reator de pré-inserção (indutor em mH) deve ser analisado detalhadamente para não aumentar a sobretensão existente. Com o resistor não ocorre tal problema, são alcançados melhores resultados que com o reator, se for considerada a análise da variação do comprimento da linha [Bhargava 93].

Conclui-se que, para se obter uma redução de manutenção e custo final, a manobra controlada é a melhor opção, apesar de a aplicação de interruptores sob carga com resistores e reatores de pré-inserção alcançar resultados satisfatórios para a mitigação de transitórios. É importante avaliar cada caso para a escolha mais adequada do dispositivo mitigador.

Para finalizar este item, são citadas algumas ferramentas computacionais e modelos que são utilizados nas análises de transitórios eletromagnéticos: EMTP (*Electromagnetic Transients Program*), o ATP (*Alternative Transients Program*), o RTDS™ (*Real Time Digital Simulator*), o EMTDC ou MICROTRAN.

As simulações digitais servem para, dentre outras questões, entender como os distúrbios se propagam na rede, determinar a distorção na forma de onda causada por diferentes fontes, quantificar o impacto dos transitórios eletromagnéticos, testar técnicas de atenuação de sobretensões e sobrecorrentes e avaliar o efeito da representação de cargas, linhas de transmissão e pára-raios.

Em [Castro Jr. 03, Fernandez 97, Martinez 05a, 05b e 05c, Meister 05, Pamplona 02], os autores tratam da modelagem dos equipamentos elétricos essenciais para o estudo de manobras de capacitores.

### **Análises Finais**

Este item apresentou as características básicas dos transitórios eletromagnéticos gerados pela manobra dos capacitores. Ficou claro que as sobretensões e as sobrecorrentes obtidas estão fortemente relacionadas à configuração do sistema elétrico e da compensação reativa introduzida – energização e desenergização de um único banco ou de dois em paralelo; confirmadas no apêndice B. Abordam-se questões que ajudam o planejador a identificar as configurações do sistema as quais são mais susceptíveis a elevadas sobretensões e sobrecorrentes.

Foi mostrado através de citações de exemplos práticos e constatações de algumas referências que sobretensões e sobrecorrentes geradas pelas manobras de capacitores podem causar danos em equipamentos do SEP, entre outros efeitos indesejados. Este é um dos motivos que justificam a proposta de um procedimento para avaliar a compensação reativa em relação aos transitórios eletromagnéticos. Dentre as vantagens do procedimento, podem-se destacar a facilidade de análise para o planejador e a diminuição do número de simulações realizadas.

A pesquisa realizada, na etapa de estudos de transitórios decorrente de manobra de capacitores, resumida neste item, serviu de subsídio para: identificar os modelos de equipamentos elétricos necessários nas simulações, saber quais análises devem ser realizadas (energização e desenergização do primeiro e segundo bancos), descobrir quais resultados precisam de avaliação (sobretensões, sobrecorrentes e energia no pára-raios) e determinar quais implementações são necessárias para a mitigação dos transitórios eletromagnéticos no planejamento da expansão. Concluindo, com os conhecimentos obtidos foi possível o desenvolvimento de uma proposta de procedimento para a avaliação técnica de transitórios eletromagnéticos, descrito no item 3.3.

#### **2.2.4. Harmônicos**

Este item relembra algumas definições e conceitos básicos acerca do tema harmônicos retirados, principalmente, das referências [IEEE 81, Dugan 03, Pomilio 97, Rocha 99], visando introduzir aspectos relevantes ao desenvolvimento do trabalho. Um resumo da extensa revisão bibliográfica registrada em [Chaves 04] é também incluído, destacando-se os principais pontos de interesse e as referências atuais.

São apresentadas as definições de *fator de potência* (FP), *distorção harmônica* (DH) e *impedância própria da barra* ( $Z_P$ ). Dentre os principais tópicos tratados encontram-se: fontes harmônicas; efeitos dos harmônicos no SEP; desvantagens de um baixo FP e uma alta DH; as ressonâncias paralela e série; influência dos capacitores na DH; procedimentos para mitigação dos harmônicos presentes no SEP; ferramentas computacionais aplicáveis; filtros passivos e ativos.

Harmônicos representam um fenômeno contínuo de longa duração e não devem ser confundidos com os de curta duração que duram apenas alguns ciclos. Transitórios, distúrbios elétricos, picos de sobretensão e subtensão não são harmônicos. Tais perturbações podem normalmente ser eliminadas com a aplicação de filtros de linha, entretanto eles não reduzem ou eliminam correntes e tensões harmônicas.

Existem dois tipos de harmônicos: os característicos ou inteiros e os não-característicos. Os harmônicos inteiros cuja ordem é igual a um múltiplo da frequência fundamental são produzidos por equipamentos semicondutores em operação normal. Os não-característicos são múltiplos não inteiros e se dividem em sub-harmônicos – múltiplos menores que 1 – e inter-harmônicos – múltiplos maiores que 1. Tais harmônicos são provenientes de operações anormais do sistema – uma rede com uma fonte desbalanceada, por exemplo – e são gerados por ciclo conversores [Keneschke 99]. Os procedimentos propostos neste trabalho de doutorado consideram apenas a análise dos harmônicos inteiros.

A natureza e a magnitude dos harmônicos gerados por cargas não-lineares dependem de cada carga especificamente, mas algumas generalizações podem ser feitas: os harmônicos que causam problemas geralmente são os ímpares e a magnitude da corrente harmônica diminui com o aumento da frequência. As características que identificam tais cargas são [Keneschke 99]:

- quando conectada a um sistema de tensão senoidal, passa por ela uma corrente não-senoidal;
- as ondas de tensão e corrente não têm a mesma forma de onda, pois estão nelas inseridas alguns harmônicos;
- a fonte de tensão torna-se não-senoidal.

As cargas não-lineares, **fontes de harmônicos**, são divididas em três grupos [Grebe 96, Pomilio 97]: dispositivos saturáveis (núcleo do ferro de transformadores e máquinas elétricas); equipamentos a arco (fornos a arco, máquinas de solda a arco, lâmpadas fluorescentes com reatores eletromagnéticos); e equipamentos que utilizam eletrônica de

potência. Estes últimos reúnem o maior número de exemplos tanto em *cargas industriais* (comutadores, reatores controlados a tiristores – RCT, retificadores, inversores de frequência, conversores, variadores de velocidade) quanto em *cargas residenciais e comerciais* (lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos, computadores, *no-breaks*, monitores de vídeo, televisões, fornos de microondas, etc.). Em [Abdel-Galil 01] são representados modelos para alguns destes tipos de cargas e em [Arentz 03] são mostradas as formas de ondas típicas de alguns destes dispositivos eletrônicos.

Os **efeitos dos harmônicos** no SEP são diversos [Alegria 02, Charles 03, Gama 99, Grady 01, Pomilio 97, Subjak 90]. Dentre eles, encontram-se:

- redução do fator de potência;
- aumento das perdas em equipamentos como transformadores, motores, cabos, capacitores, etc.;
- sobretensão devido à circulação de correntes harmônicas;
- estresse do isolamento devido à ação de tensões harmônicas;
- operação incorreta de dispositivos de controle e proteção;
- erros em medidores de energia ativa, utilizados nas indústrias, comércios e residências;
- interferência em sistema de comunicação.

A severidade dos problemas causados pela presença de harmônicos depende da sensibilidade de cada carga e da amplitude da distorção. Por este motivo, é importante a análise dos **efeitos dos harmônicos em equipamentos específicos**. Em *motores e geradores*, o maior problema é o aumento do aquecimento devido ao acréscimo das perdas no ferro e no cobre (maior corrente) que, além de diminuir a eficiência e a vida útil da máquina, provoca também variações no torque e aumento de ruído. Nos *transformadores* e nos *cabos* de alimentação, o pior efeito é o aumento nas perdas, principalmente quando ocorrem ressonâncias, reduzindo sua capacidade de carregamento. Nos transformadores, é observada maior influência das capacitâncias parasitas, e nos cabos, com a presença de ressonâncias, podem aparecer elevadas sobretensões ao longo da linha.

Uma elevada distorção harmônica pode ocasionar a operação inadequada dos *relés de proteção*, dos *disjuntores* e dos *fusíveis*. As aferições incorretas em medidores, interferências em telefones, operações errôneas de acionamentos e de fontes ocorrem devido às múltiplas passagens por zero. As falhas em motores, acionamentos, fontes ou o simples “repicar” de disjuntores podem provocar a parada da produção de uma indústria, trazendo enormes prejuízos à mesma como perda de produtividade e de venda.

Neste trabalho de tese, o efeito causado pelos harmônicos nos **capacitores** utilizados na compensação reativa *shunt* merece destaque. As correntes harmônicas podem trazer problema para os capacitores, pois, com um aumento da frequência, a impedância deles diminui, aproximando cada vez mais de um curto-circuito e atraindo correntes harmônicas de ordem elevada. Com o aumento do fluxo de corrente, o capacitor se encontrará constantemente sobrecarregado e sujeito a aquecimento excessivo, podendo até ocorrer uma atuação da proteção, sobretudo dos relés térmicos. Além disto, os harmônicos podem fazer fundirem fusíveis, falharem as latas, e até provocarem ruído audível no equipamento. As sobretensões nos dielétricos e as descargas repetitivas provocadas pelos harmônicos causam erosão e degradação da isolação do material podendo originar falhas [Boonseng 01]. Estes efeitos, isolados ou em conjunto, resultam na diminuição da vida útil do capacitor.

Uma das funções dos capacitores é corrigir o **fator de potência** (FP). Para ondas não senoidais, o FP é representado pela equação 2.23 onde P é a potência ativa instantânea média, S, a potência aparente, T, o período da onda,  $v_i(t)$  e  $i_i(t)$  correspondem, respectivamente, aos valores instantâneos de tensão e de corrente, e  $V_{RMS}$  e  $I_{RMS}$ , aos valores RMS da tensão e da corrente.

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v_i(t) \cdot i_i(t) \cdot dt}{V_{RMS} \cdot I_{RMS}} \quad (2.23)$$

Caso apenas a corrente não seja senoidal, o fator de potência é calculado pela equação 2.24, onde  $I_1$  é o valor RMS da componente fundamental da corrente,  $I_{RMS}$ , o valor RMS da corrente total e  $\cos \phi_1$  corresponde ao co-seno da defasagem entre a tensão e a componente fundamental da corrente.

$$FP = \frac{I_1}{I_{RMS}} \cos \phi_1 \quad (2.24)$$

Assim, o fator de potência FP pode ser dividido em duas componentes:

- **fator forma** – relação entre as correntes:

$$Ff = \frac{I_1}{I_{RMS}} \quad (2.25)$$

- **fator de potência de deslocamento** – termo em co-seno:

$$Fd = \cos \phi_1 \quad (2.26)$$

***É muito importante ressaltar que, nesta tese de doutorado, o fator de potência (FP) é considerado igual à equação completa 2.24 apenas nos estudos de harmônicos. Em todos os outros itens, onde a análise considera o sistema elétrico em regime permanente senoidal o FP torna-se igual ao fator de potência de deslocamento ( $\cos \phi$ ). Nesta situação, optou-se por utilizar o termo FP por ser aquele adotado, tradicionalmente, pela área de planejamento do SEP.***

O valor RMS da corrente de entrada ( $I_{RMS}$ ) pode ser expresso em função das componentes harmônicas, pela equação 2.27, onde  $I_h$  é o valor da componente harmônica de corrente de ordem  $h$  ( $f_h = 60 \cdot h$ ) e  $I_1$  é o valor da corrente fundamental.

$$I_{RMS} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad (2.27)$$

A Distorção Harmônica Total de Corrente ( $DHT_I$ ) é definida como sendo a relação entre o somatório dos valores RMS das componentes harmônicas ( $I_h$ ) e o valor RMS da corrente fundamental ( $I_1$ ), representada pela equação 2.28. Considerando apenas tal distorção, o FP pode ser reescrito como exposto na equação 2.29.

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.28)$$

$$FP = \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1 + DHT_I^2}} \quad (2.29)$$

Supondo que o fator de potência de deslocamento de uma dada carga seja 1,0 (valor máximo de Fd) e sua distorção harmônica de 20%, pela equação 2.29, nota-se que o fator de potência é de 0,98 e, para uma distorção de 32,87%, o FP é igual a 0,95. Isto mostra que uma carga puramente resistiva ou de FP unitário com compensação reativa pode violar os limites de fator de potência impostos pelo ONS, dependendo do nível de harmônicos que circulam na carga. Uma das vantagens da correção do fator de potência é a redução da corrente que chega à carga, diminuindo as perdas. No entanto, caso a distorção harmônica total esteja alta, o fator de potência diminui, aumentando as perdas, apesar de o fator de potência de deslocamento ter melhorado.

Caso haja também uma distorção harmônica de tensão, a equação do FP se torna a 2.30, onde  $k_h$  é chamado de fator de potência harmônico [Izhar 03] e é igual a

$$FP = \frac{1}{\sqrt{(1 + DHT_I^2)(1 + DHT_V^2)}} \cdot \cos \phi_1 = k_h \cos \phi_1 \quad (2.30)$$

A Distorção Harmônica Individual de Corrente (DHI<sub>i</sub>) é definida como sendo a relação entre o valor RMS da harmônica e o valor RMS da corrente fundamental (equação 2.31).

$$DHI_i = \frac{I_h}{I_1} \quad (2.31)$$

As principais **desvantagens de um baixo fator de potência e uma alta distorção de corrente** são a limitação da capacidade de transmissão e o aumento das perdas (efeito pelicular). Além disto [Pomilio 97]:

- as harmônicas de corrente exigem um sobredimensionamento da instalação elétrica e dos transformadores;
- a componente de 3ª harmônica da corrente, em sistema trifásico com neutro, pode ser muito maior do que o normal;
- o achatamento da onda de tensão, devido ao pico de corrente, e a distorção da forma de onda podem causar mau funcionamento de equipamentos conectados à rede;
- as componentes harmônicas podem excitar ressonâncias no sistema elétrico, levando a picos de tensão e de corrente, podendo danificar dispositivos conectados à linha.

A tabela 2.1, retirada de [Arentz 03], apresenta a distorção harmônica de corrente provocada por algumas cargas presentes na rede.

Em sistemas de tensão regulada, a corrente das cargas não-lineares não afeta os equipamentos vizinhos, porque estes compartilham a tensão e não a corrente. Correntes não senoidais por si mesmas não geram problema para as cargas conectadas em paralelo. A distorção harmônica de tensão é a preocupação maior [Grebe 96].

Tabela 2.1. Distorção da corrente de algumas cargas [Arentz 03].

Tipo de Carga	Distorção da Corrente
Alimentação monofásica	80% (3º harmônico elevado)
Semiconversor	2º, 3º e 4º harmônicos elevados quando carga parcial
Conversor de 6 pulsos, sem indutância série	80%
Conversor de 6 pulsos, indutância série maior que 3%	40%
Conversor de 6 pulsos, com indutância elevada	28%
Conversor de 12 pulsos	15%
Regulador de tensão CA	Varia conforme o ângulo de disparo

A Distorção Harmônica Individual de Tensão ( $DHI_V$ ) e a Total ( $DHT_V$ ) são calculadas de forma semelhante à da corrente, sendo necessária só a substituição do valor da corrente pelo da tensão. Para distorções em valores percentuais, multiplicam-se por 100 as equações 2.28 e 2.31.

Em condição normal, sem ressonâncias, a maioria das cargas não-lineares tem sua corrente ou tensão fundamental muito maior que as parcelas harmônicas individuais e que a soma das mesmas. O valor de DHI sempre é muito menor que 100%. A  $DHT_I$  no SEP varia de pequenos valores a maiores que 100%, e a  $DHT_V$  geralmente é menor que 5% [Grady 01]. Valores de  $DHT_V$  maiores que 10% são inaceitáveis e causam problemas a equipamentos e cargas sensíveis.

Uma tensão harmônica de 10%, para qualquer harmônico acima do 3º, aumenta o pico da tensão em aproximadamente 10%, porque o pico da onda harmônica geralmente coincide com o da tensão fundamental ou fica muito próximo a ele [Grady 01]. No capacitor, as distorções de tensão de 5 a 10% podem atingir facilmente de 10 a 50% da amplitude da corrente fundamental. A maior distorção de tensão no circuito ressonante ocorre no banco de capacitor.

Circuitos contendo capacitâncias e indutâncias têm uma ou mais **freqüências de ressonância naturais**. A ocorrência de ressonâncias nem sempre constitui problema nos estudos de harmônicos. Entretanto, quando a freqüência de ressonância ( $f_r$ ) é igual à dos harmônicos ( $f_h$ ) introduzidos pelas cargas não-lineares no sistema, a distorção harmônica é amplificada, o que não é desejado [Boonseng 01, Rocha 99]. A forma completa de se calcular a freqüência de ressonância é indicada na equação 2.32, onde R é a resistência do sistema, C, a capacitância e  $L_{eq}$ , a indutância equivalente da rede.

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{eq}C} - \frac{R^2}{4L_{eq}^2}} \quad (2.32)$$

Considerando-se a resistência da rede muito menor que a reatância ( $R \ll X_{Leq}$ ), pode-se calcular a frequência de ressonância de forma simplificada através da equação 2.33 [Murthy 98], onde a indutância, a reatância e a capacidade de curto-circuito são representadas, respectivamente, por  $L_{sc}$ ,  $X_{SC}$ ,  $MVA_{SC}$  e a potência reativa instalada, por  $Mvar$ .

$$f_r = 60h_r$$

$$h_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{SC}C}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_{SC}}} = \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{Mvar}} \quad (2.33)$$

Uma barra com capacidade de curto-circuito alta (ou impedância equivalente do sistema baixa) tem uma pequena distorção harmônica de tensão porque a corrente não senoidal varia muito pouco a tensão da barra [Arentz 03].

A seguir são tratadas as diferenças entre a ressonância paralela e a série. Para simplificar as análises, a resistência é considerada muito pequena ( $R \ll X_{Leq}$ ).

A **ressonância paralela** ocorre quando a reatância indutiva equivalente da rede ( $X_S$ ) ou da carga ( $X_L$ ) se iguala à reatância capacitiva da compensação reativa ( $X_C$ ). Deve-se mencionar que  $X_S$  se altera devido à mudança da configuração do sistema e  $X_C$ , devido à alocação de novos bancos de capacitores.

Na figura 2.6(a), é mostrada uma rede elétrica simplificada que possui uma fonte de tensão de 60 Hz alimentando uma carga não-linear através de uma linha e de um transformador representados apenas por reatâncias ( $X_{LT}$  e  $X_T$ , respectivamente). Com a presença do capacitor instalado ( $X_C$ ) na barra de carga, ocorre uma ressonância paralela entre este equipamento e as reatâncias do restante do sistema na frequência da harmônica injetada pela carga não-linear. A figura 2.6(b) apresenta um circuito simplificado onde é exibida a situação em que é inserida uma corrente harmônica na rede, chegando à carga ( $X_L$ ) através de  $X_S$  (reatância do sistema). A ressonância paralela acontece quando a corrente harmônica vinda do sistema depara com uma carga cuja reatância indutiva ( $X_L$ ) é igual à reatância capacitiva ( $X_C$ ) do *shunt* alocado, destacada na figura 2.6(b). Em ambos os casos da figura 2.6, a corrente harmônica encontra uma impedância própria muito alta, tendendo a um circuito aberto.

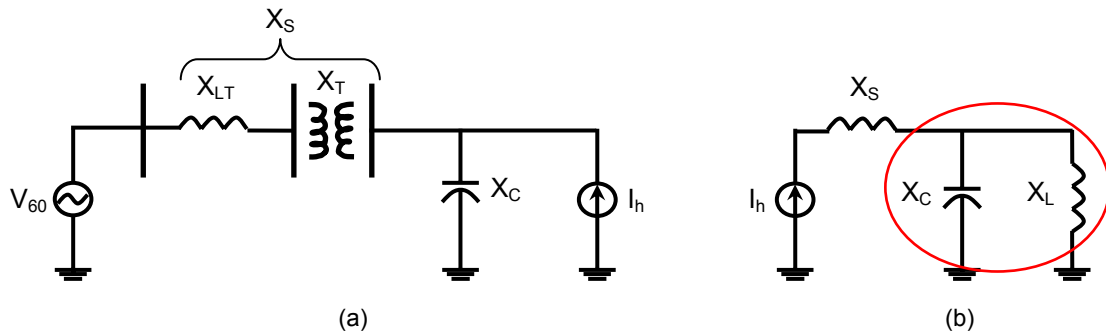


Figura 2.6. Ressonância paralela (a) entre o sistema e o capacitor ( $X_s = X_c$ ) e (b) entre a carga e o capacitor ( $X_L = X_c$ ).

Na **ressonância série**, há uma combinação série de bancos de capacitores e indutâncias das linhas ou transformadores que se constitui de um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas de frequência igual à de ressonância, sendo capaz de sobrecarregar tais equipamentos.

A figura 2.7(a) apresenta um circuito em que  $X_c$  é a reatância do capacitor,  $X_T$ , a do transformador,  $X_{LT}$ , a da linha de transmissão, e  $X_s$  é a soma destas duas últimas. Uma corrente harmônica vinda do sistema encontra a combinação  $X_c$  e  $X_s$  como uma ressonância série quando tais reatâncias são iguais em determinada frequência. Desconsiderando  $X_s$ , a ressonância série, destacada na figura 2.7(b), também pode ser observada na mesma barra onde está situada a fonte harmônica. Isto ocorre quando a reatância entre o capacitor e esta fonte ( $X_B$ ) se iguala a  $X_c$ .

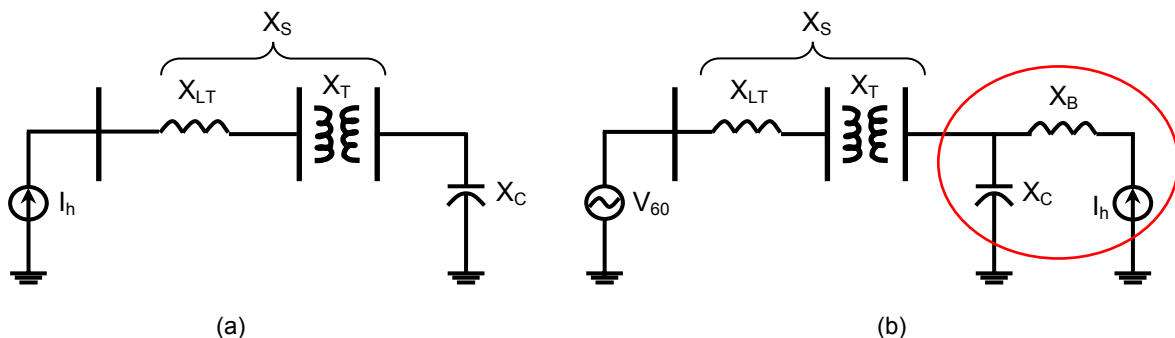


Figura 2.7. Ressonância série (a) entre o sistema e o capacitor ( $X_s = X_c$ ) e (b) entre  $X_B$  e o capacitor ( $X_B = X_c$ ).

Na frequência de ressonância, a impedância total se reduz ao valor da componente resistiva do sistema. Caso esta componente seja pequena, altas correntes harmônicas fluem no circuito série [Subjak 90]. O grau de amplificação da ressonância série é limitado pelo fator de amortecimento dado pela equação 2.34 [Murthy 98].

$$\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2.34)$$

A figura 2.8(a) mostra uma rede simplificada com uma fonte de tensão de 60 Hz ( $V_{60}$ ) conectada a uma barra através de uma linha de transmissão ( $R + j X_{LT}$ ) e um transformador ( $X_T$ ). Nesta barra, existem um capacitor ( $X_C$ ) e uma fonte harmônica ( $I_h$ ). A **impedância própria** ( $Z_p$ ) da barra é representada no circuito equivalente da figura 2.8(b) e pode ser calculada através da equação 2.35, onde  $X_{Leq}$  é a reatância equivalente da rede.

$$Z_p(\omega) = \frac{X_C(X_{Leq} + R)}{X_C + X_{Leq} + R} \quad (2.35)$$

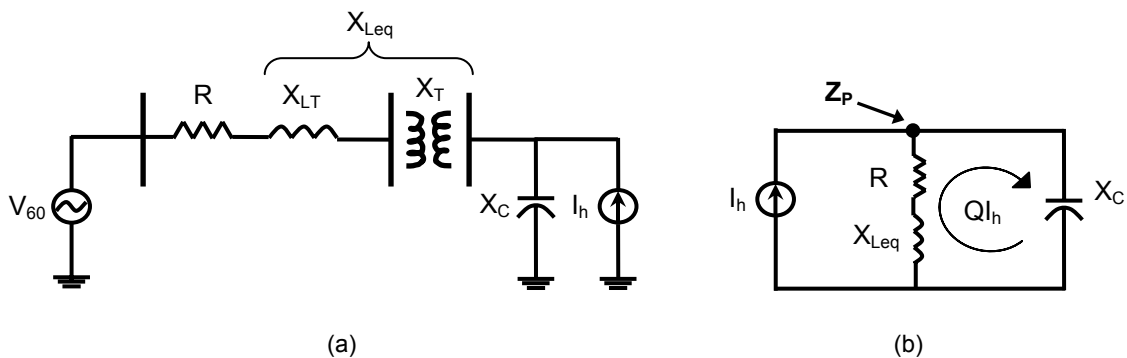


Figura 2.8. (a) Rede simplificada para a representação da impedância própria e (b) seu circuito equivalente.

Na frequência de ressonância paralela,  $Z_p$  toma a forma da equação 2.36, pois  $X_C$  é igual a  $X_{Leq}$  com sinais opostos.

$$Z_p(\omega) = \frac{X_C(X_{Leq} + R)}{R} \quad (2.36)$$

Ainda considerando  $R \ll X_{Leq}$ , a impedância própria se torna aproximadamente igual à equação 2.37, onde  $Q$  é conhecido como fator de qualidade e é igual à razão entre a reatância e a resistência da rede (equação 2.38). Este fator de qualidade pode ser menor que 5 na distribuição e maior que 30 no lado da barra secundária do transformador [Santoso 05].

$$Z_p(\omega) \approx \frac{X_{Leq}^2}{R} = \frac{X_C^2}{R} = QX_{Leq} = QX_C \quad (2.37)$$

$$Q = \frac{X_{Leq}}{R} = \frac{X_C}{R} \quad (2.38)$$

A tensão ( $V_p$ ) que aparece na barra de carga, na ressonância, é calculada pela equação 2.39, e a corrente ( $I_{cap}$ ) que flui no capacitor pela equação 2.40 (figura 2.7). Se  $Q$  e  $X_{Leq}$  forem grandes, mesmo uma pequena corrente harmônica pode elevar muito  $V_p$  da barra [Santoso 05].

$$V_p = Z_p I_h = Q X_C I_h \quad (2.39)$$

$$I_{cap} = \frac{V_p}{X_C} = \frac{Q X_C I_h}{X_C} \Rightarrow I_{cap} = Q I_h \quad (2.40)$$

A impedância própria ( $Z_p$ ) é alta para a frequência de ressonância paralela (equação 2.37), provocando uma alta distorção harmônica de tensão (equação 2.39) e uma amplificação da corrente (equação 2.40) [Murthy 98]. O valor da resistência corresponde ao fator de amortecimento do sistema. Quanto menor a resistência, maiores são a impedância própria e as distorções harmônicas.

A figura 2.9 mostra dois circuitos simplificados que representam situações comuns de ressonâncias paralela e série, considerando a resistência. Na condição de ressonância paralela ( $X_{Leq} = X_C$ ), representada na figura 2.9(a), a corrente harmônica inserida pela carga que atravessa o capacitor ( $I_C$ ) é calculada pela equação 2.41. Percebe-se que a corrente harmônica no capacitor está limitada pelo valor da resistência da rede ( $R$ ), quanto menor for  $R$  maior é  $I_C$ . A distorção harmônica de tensão ( $X_C I_C$ ) também é aumentada por ser proporcional a  $I_C$ .

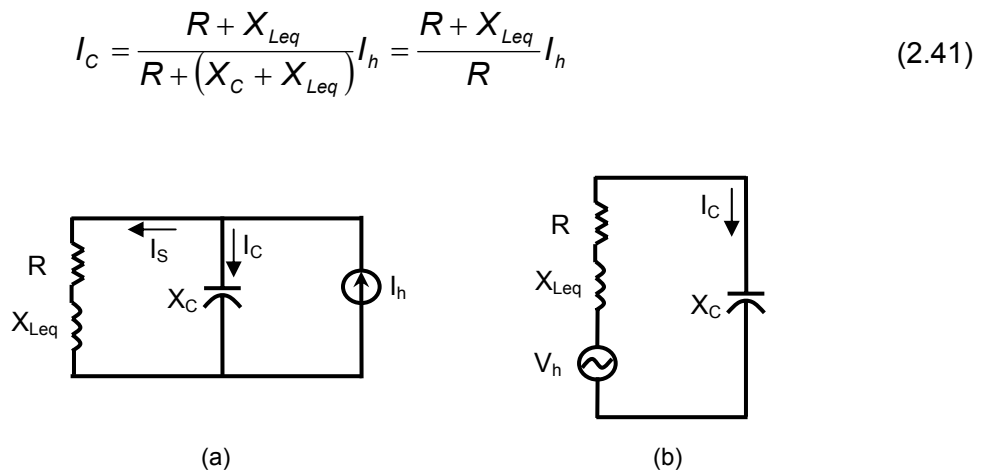


Figura 2.9. (a) Harmônica de corrente inserida pela carga; (b) harmônica de tensão inserida pelo sistema.

Na condição de ressonância série ( $X_{Leq} = X_C$ ), representada na figura 2.9(b), a fonte harmônica de tensão proveniente do sistema provoca um aumento na corrente do capacitor ( $I_C$ ), verificado pela equação 2.42. A corrente harmônica no capacitor é inversamente

proporcional à resistência da rede. Também, quanto menor for R, maior é a distorção harmônica de tensão, o que pode ser verificado pela equação 2.43.

$$I_C = \frac{1}{R + (X_C + X_{Leq})} V_h = \frac{1}{R} V_h \quad (2.42)$$

$$V_C = \frac{R + X_{Leq}}{R + (X_C + X_{Leq})} V_h = \frac{R + X_{Leq}}{R} V_h \quad (2.43)$$

Na condição de ressonância paralela, a impedância própria é igual à equação 2.37 e, na série, igual à equação 2.44. Verifica-se que, na ressonância paralela,  $Z_P$  atinge um valor alto (inversamente proporcional a R) e, na série, um pequeno valor (igual a R). Tal ocorrência é ilustrada pela figura 2.10.

$$Z_P = R + X_{Leq} + X_C = R \quad (2.44)$$

A figura 2.10 apresenta um gráfico do valor da impedância própria da barra com relação à frequência (ordem dos harmônicos). A curva gerada possui quatro picos, em 276, 348, 408 e 600 Hz, e três vales na 5ª, 6ª e 9ª harmônicas. Os picos destacados com um círculo correspondem às ressonâncias paralelas e os vales, às séries.

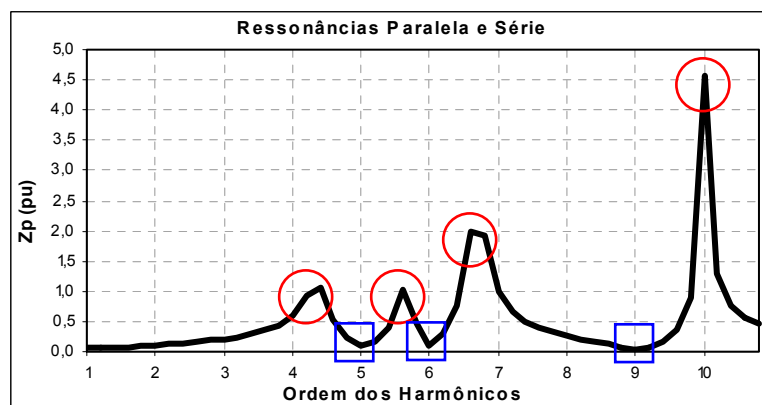


Figura 2.10. Ilustração da ressonância paralela e série em um gráfico de impedância própria versus frequência.

Na ressonância paralela, a maior distorção de tensão ( $DH_V$ ) é na carga não-linear. Já na ressonância série, a maior  $DH_V$  ocorre em um ponto distante (às vezes, até quilômetros de distância), ou em um alimentador adjacente conectado a um mesmo transformador [Grady 01].

Do exposto, confirma-se que a instalação de capacitores tem grande **influência nos níveis de distorção harmônica**. Se não for feito um planejamento adequado de tais equipamentos, todos os benefícios – liberação do sistema para transmitir potência ativa sem novos investimentos, facilidade de controle de tensão, etc. – serão anulados em função dos problemas de qualidade de energia que podem surgir [Gama 99], tais como:

- amplificação do conteúdo harmônico presente no sistema bem como seus malefícios sobre os diversos equipamentos;
- estabelecimento de condições de ressonância com conseqüentes sobretensões harmônicas;
- queima prematura dos bancos de capacitores devido ao aquecimento das unidades capacitivas sob condições harmônicas, etc.

Para se mitigar os harmônicos presentes no sistema elétrico devem ser adotados alguns **procedimentos**. Dentre os artigos que tratam deste assunto encontram-se [Atkinson-Hope 04, Corasaniti 03, Gama 99, Gonçalves 00, Moor Neto 01]. Basicamente, tem-se, como solução para a melhoria da qualidade de energia, quatro importantes medidas a serem tomadas [Gama 99]:

- Pelo *consumidor*: instalação de filtros harmônicos;
- Pela *concessionária de energia*: alteração em procedimentos de operação e na rede – configuração e localização e montante de bancos de capacitores;
- Pelos *fabricantes*: modificações no projeto das cargas, tanto aquelas injetoras de harmônicos quanto aquelas sensíveis a eles;
- Pelo *órgão regulador de energia* (ANEEL): implantação de regulamentações que garantam uma boa qualidade de energia, por meio de mudança tarifária ou propondo limites rígidos, principalmente, de injeção de harmônicos no sistema, da mesma forma como é feito para o fator de potência.

Dentre as **ferramentas computacionais** usadas para análises de harmônicos, há o *HCONV*, que calcula os harmônicos de corrente gerados por sistemas industriais com um ou mais conversores de 6 pulsos, e o *HARMZW* [Harmzw 02], que calcula a impedância própria e de transferência em função da frequência, a distorção e o fluxo de harmônicos e outros parâmetros relacionados com interferência. O *HARMZW* permite que o usuário defina diversos modelos de correção das impedâncias com a frequência [Ross 97]. Alguns autores utilizam outros programas para efetuar os cálculos, por exemplo, o Matlab [Matlab 01].

O *HARMZW* é utilizado para cálculo do desempenho harmônico de um sistema a partir das correntes injetadas nos locais onde existem cargas não-lineares. É uma ferramenta importante na análise de qualidade de energia a qual ajuda a detectar, em fase inicial, os principais pontos onde há a necessidade de medições e de mitigação do conteúdo harmônico.

A instalação de filtros é uma das opções para se mitigar os harmônicos inseridos na rede. A pesquisa sobre *filtros passivos* incluiu, principalmente, o estudo das referências [Izhar 03, Moura 02, Pomilio 97, Quadros 01, Yousif 04] e sobre *filtros ativos* os trabalhos [Pomilio 97, Rocha 99, Watanabe 02]. A instalação destes dispositivos na distribuição e transmissão do SEP torna-se um problema mais complexo que em uma indústria pelos seguintes motivos [Ortmeyer 96]:

- necessidade de chaveamento dos capacitores, variando a frequência de ressonância;
- grandes distâncias elétricas e diferentes relações X/R;
- maior número de bancos de capacitores envolvidos com mais de uma frequência de ressonância;
- larga variação da carga com informação limitada de suas características, sendo o modelo adotado apenas aproximado;
- uso dos capacitores para controlar a tensão e minimizar as perdas, além de corrigir o fator de potência;
- a excitação harmônica provém de várias partes da rede e de distintas fontes.

Várias configurações devem ser analisadas para se determinar qual é a localização onde o filtro é mais eficiente, diminuindo a distorção harmônica o máximo possível. Tal eficiência depende da própria localização do filtro, do nível de carga, do capacitor estar conectado ou não, e do período de tempo em que a carga não-linear tem seu maior valor de corrente [Abdel-Galil 01, Ortmeyer 96].

Os **filtros passivos** utilizam combinações de capacitores, indutores e resistores. Para diminuir os custos destes dispositivos, pode-se usar o próprio capacitor da compensação reativa para a composição do filtro. Neste caso, deve-se analisar se as manobras do capacitor não diminuirão a eficiência do filtro. Para equipamentos manobráveis, tem-se como opção utilizar reatores (indutores) variáveis, por exemplo, com mudança de *tap*. Há dois tipos de filtros passivos: sintonizados e amortecidos. Os sintonizados (passa-faixa), além de específicos para certas frequências, têm um fator de qualidade melhor que os amortecidos, que funcionam basicamente como um filtro passa-

alta. Eles são ligados em série ou em paralelo dependendo do seu objetivo. Para solucionar o problema da ressonância paralela utiliza-se a ligação série bloqueando o fluxo do harmônico indesejado; no caso, a impedância do circuito é máxima na frequência de ressonância ( $f_r$ ). Para resolver o problema da ressonância série usa-se a ligação paralela (*shunt*) por onde circula o harmônico prejudicial aos equipamentos; o filtro é projetado para que, em  $f_r$ , a impedância do mesmo seja mínima [Izhar 03]. Os filtros mais encontrados são os de configuração *shunt*. As desvantagens da ligação série são: ter que suportar toda a corrente da carga e sua isolação precisar ser projetada para a tensão de linha total. Estes fatores tornam o filtro série mais caro que o *shunt* que, além de fornecer potência reativa na frequência fundamental, por ele só passa uma fração da corrente da carga [Yousif 04].

Em [Yousif 04] são representadas as ligações de vários tipos de filtros passivos *shunt*. O tipo mais comum e mais simples é o RLC série. Este filtro é composto pelo próprio capacitor, que faz a correção de fator de potência, em série com uma resistência e uma indutância. Um outro filtro muito útil é o de dupla sintonia, que pode mitigar duas componentes harmônicas simultaneamente. Ele é formado por elementos LC série e paralelo para evitarem, respectivamente, as ressonâncias série e paralela.

Os filtros passivos têm como vantagens seu custo, facilidade de projeto e, para o de ligação paralela, ainda fazem a compensação reativa da rede. No entanto, os filtros passivos têm como principal desvantagem a introdução de novas frequências de ressonância, em geral de ordem mais baixa que as já existentes na rede e que podem causar problemas harmônicos adicionais. Além disto, é necessário um filtro para cada frequência harmônica; ambas as correntes harmônica e fundamental passam pelo equipamento, sendo que seus limites devem considerar esta condição; se houver um aumento da componente harmônica, o filtro sobrecarrega [Izhar 03].

Um método comum aplicado para se escolher o filtro passivo é selecionar a mais baixa frequência harmônica gerada, que normalmente é a 5ª. Caso os limites ainda sejam violados, há a necessidade de múltiplos filtros, por exemplo, para 5ª e 7ª harmônicas. É importante verificar se o filtro projetado não leva a ressonâncias próximas às frequências harmônicas geradas. Um filtro para 7ª harmônica pode criar uma ressonância na 5ª harmônica [Grebe 96].

Os filtros ativos têm uma eficiência mais alta, podendo reduzir os harmônicos a níveis muito satisfatórios. Basicamente, eles são compostos por equipamentos eletrônicos que, através de chaveamentos, absorvem apenas o harmônico da frequência a ser filtrada.

Os filtros ativos apresentam as seguintes vantagens: projetados para atenuar várias harmônicas; não sobrecarregam quando a corrente harmônica aumenta; normalmente não é

necessário considerar a corrente fundamental na sua capacidade limite; seu peso e tamanho são bem menores que os dos filtros passivos; se o harmônico inserido na rede mudar de ordem, não é preciso trocar o dispositivo, apenas ajustá-lo à nova frequência. O filtro ativo tem suas desvantagens: exige uma fonte isolada; os circuitos desenvolvidos e as estratégias de controle são complicados; há perdas durante o chaveamento de alta frequência. Estas características o tornam bem mais caro que o filtro passivo. Em [Izhar 03] é feita uma comparação de filtros ativos e passivos a qual é apresentada na tabela 2.2.

Tabela 2.2. Comparação entre filtros ativos e passivos [Izhar 03].

<b>Efeitos</b>	<b>Filtro Passivo</b>	<b>Filtro Ativo</b>
Influência de um aumento na corrente	Risco de sobrecarga e dano	Sem risco de sobrecarga, mas baixa eficácia
Acréscimo de um equipamento	Em certos casos, requerem modificações	Sem problema se a corrente harmônica se altera
Controle harmônico de cada ordem	Muita dificuldade	É possível via alteração dos parâmetros
Controle da corrente harmônica	Necessita de um filtro para cada frequência	Monitora simultaneamente muitas frequências
Influência da variação da frequência	Reduz sua eficácia	Sem efeito
Influência da modificação da impedância	Risco de ressonância	Sem efeito
Modificação da frequência fundamental	Não pode ser modificado	É possível via reconfiguração
Dimensão	Grande	Pequeno
Peso	Alto	Baixo
Custo	Baixo	Alto

### **Análises Finais**

Os efeitos prejudiciais causados pelos harmônicos no SEP foram um dos fatores que incentivaram a concepção de uma metodologia para análise e mitigação dos mesmos. Principalmente, porque, com a instalação de capacitores, os harmônicos são amplificados bem como seus efeitos indesejados. Todas as conseqüências geradas pelos harmônicos são relevantes, porém as que mais importam para o estudo do planejamento da expansão são: a redução do fator de potência, o aumento das perdas e os danos a longo prazo causado nos equipamentos.

Para se propor o procedimento mostrado no capítulo 3, foi necessário conhecer as definições do fator de potência (equação 2.23 e 2.24), da distorção harmônica (equações 2.28 e 2.31), das ressonâncias paralela e série ( $X_C = X_{Leq}$ ) e da impedância própria (equação 2.35). Tais conceitos estão interligados: o FP depende da DH, como visto pela equação 2.30; a distorção harmônica está diretamente relacionada com a impedância própria (apêndice C); a ressonância paralela ocorre para valores elevados de  $Z_P$  e a série para valores baixos. Observa-se que a resistência do circuito também merece destaque por ser o elemento que mais limita a impedância própria e, conseqüentemente, o máximo da distorção harmônica.

Neste item também são citados os procedimentos básicos adotados para a mitigação dos harmônicos e ferramentas computacionais utilizadas para as análises. Para finalizar, são fornecidas informações sobre filtros passivos e ativos, que é uma das alternativas para se minimizar o fluxo de harmônicos no SEP, apontando as características, vantagens e desvantagens de cada um.

Com o estudo realizado sobre harmônicos foram adquiridas informações fundamentais para saber quais simulações devem ser realizadas; descobrir quais resultados precisam de avaliação (distorção harmônica e fator de potência); e saber quais são as soluções para manter o nível de harmônicos baixo (filtros passivos e ativos e escolha adequada de capacitores). Concluindo, com os conhecimentos obtidos foi possível o desenvolvimento de uma proposta de procedimento para a avaliação técnica da compensação reativa com relação aos harmônicos, apresentada no item 3.4.

## 2.3. Considerações Finais

Neste capítulo, procurou-se identificar, com clareza, o contexto onde se insere o desenvolvimento deste trabalho. Dentro das atividades de expansão, enfoque é dado à etapa de Avaliação Técnica de alternativas de compensação reativa *shunt* capacitiva, no que concerne aos seus impactos no SEP, nos aspectos de estabilidade de tensão, transitórios eletromagnéticos e harmônicos.

As análises sobre cada um destes aspectos, aqui discutidas, permitiram identificar os pontos relevantes a serem considerados na elaboração das estratégias propostas. A caracterização das particularidades de cada tema tornou possível a concepção de procedimentos de avaliação individuais, e posterior evolução para os procedimentos globais propostos nesta tese.

## 3

# Avaliação da Compensação Reativa – Procedimentos Individuais

### 3.1. Considerações Preliminares

No capítulo 2, evidenciou-se a importância de se realizar uma **Avaliação Técnica** criteriosa, por meio da qual são analisados os efeitos da compensação reativa no sistema elétrico no que concerne aos aspectos de estabilidade de tensão, transitórios eletromagnéticos e penetração de harmônicos.

O presente capítulo tem como **objetivo** indicar os procedimentos para se cumprir a avaliação técnica. Devido à complexidade dos temas, e para que haja um melhor detalhamento e profundidade do assunto, este capítulo levanta questões a serem solucionadas e contém propostas de procedimentos individuais. No capítulo 4 é apresentada a interação entre esses processos.

O procedimento adotado na avaliação técnica é mostrado por meio do fluxograma da figura 3.1. O primeiro passo, Plano da Expansão, apresenta os equipamentos inicialmente sugeridos, indicando o tipo de equipamento (capacitor, compensador síncrono, LTC, etc.), sua localização elétrica, capacidade nominal (Mvar) e o tipo de controle (fixo ou manobrável). Considerando-se a alocação de compensação reativa e o controle de tensão escolhidos pelo plano de expansão em elaboração, é realizada a avaliação técnica, para verificar se esta nova configuração (instalação de equipamentos) leva o sistema elétrico a regiões de operação que prejudiquem o seu funcionamento normal.

Além das análises aqui discutidas, outros aspectos que fogem ao escopo deste trabalho devem ser examinados, tais como a disponibilidade física das subestações (SE) e a oportunidade de compatibilização da instalação da compensação de potência reativa com outras obras previstas, definindo-se um cronograma de obras. Adicionalmente, outros estudos podem ser incorporados, tais como, cálculos de correntes de curtos-circuitos, transitórios eletromecânicos e sobretensões dinâmicas.

Caso alguma análise constate problemas causados no sistema elétrico devido à instalação da compensação reativa *shunt*, deve ser efetuada a alteração do plano de expansão de forma a atender aos requisitos impostos pela avaliação técnica. Se nada for observado, o plano sugerido está adequado.

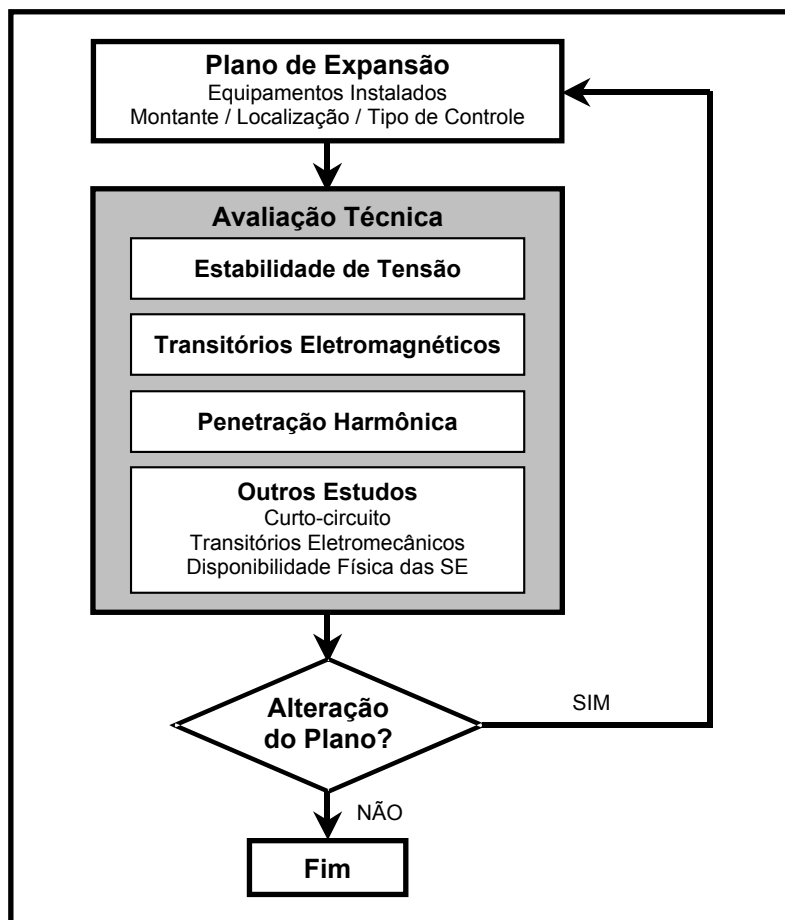


Figura 3.1. Fluxograma da avaliação técnica de compensação reativa.

## 3.2. Estabilidade de Tensão

### 3.2.1. Questão a ser Solucionada

Para que a compensação reativa *shunt* capacitiva não eleve o risco do sistema em termos de perda de estabilidade de tensão, já na etapa de planejamento da expansão deve-se avaliar se há possibilidade de a tensão no ponto de máximo carregamento ficar dentro dos limites de operação normal, para que seja evitado um possível colapso de tensão causado pela compensação *shunt* capacitiva inadequada. Com os conhecimentos abordados no item 2.2.2 e com a identificação da influência da CR/CT na estabilidade de tensão foi possível desenvolver o procedimento descrito a seguir [Vale 05b].

### 3.2.2. Procedimento Proposto

O procedimento proposto para a avaliação técnica da compensação reativa em relação à estabilidade de tensão se constitui de análises estáticas (curvas PV e QV)

seguindo a recomendação do CCPE [CCPE 02] e do ONS [ONS 04]. A figura 3.2 mostra os passos deste procedimento e seu fluxograma. É importante salientar que o procedimento deve ser aplicado tanto para a condição normal do sistema quanto para a situação em que existe uma ou mais contingências.

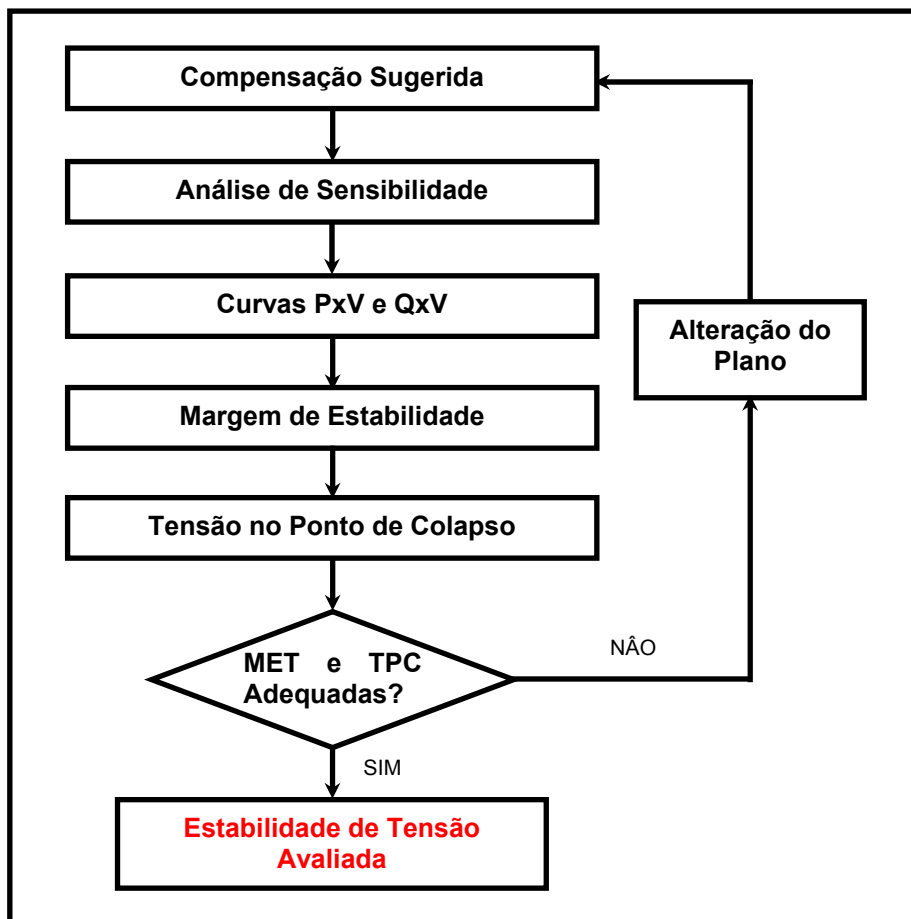


Figura 3.2. Fluxograma da avaliação técnica de CR com relação à Estabilidade de Tensão.

i. Compensação Sugerida

Esta etapa está relacionada à entrada de dados para a avaliação técnica que corresponde à compensação reativa inserida no sistema pelo plano de expansão sugerido.

ii. Análise de Sensibilidade

O vetor tangente [Souza 97 e 04] é adotado como ferramenta para se fazer a análise de sensibilidade. Neste trabalho, tal vetor é obtido por meio do *software* WANAREDE-GRF [WANAREDE 03]. O elemento de maior valor do vetor tangente indica a barra mais

vulnerável no que diz respeito à estabilidade de tensão. Neste trabalho, é denominada *barra crítica*. Neste passo, apontam-se duas barras críticas.

iii. Curvas PV e QV

Nesta etapa, geram-se curvas PV e QV para as barras críticas, através do fluxo de potência continuado do WANAREDE-GRF. Estas curvas também podem ser preparadas para barras adicionais indicadas pelo planejador. Vale observar que a curva QV serve apenas como uma análise adicional, dando subsídio à tomada de decisão a respeito da margem de potência reativa a ser adotada. Este processo segue as orientações descritas nos procedimentos de expansão registrados no documento [CCPE 02, ONS 04].

Para se produzirem tais curvas, as cargas são aumentadas, mantendo-se o fator de potência constante, e considerando-se os limites de fornecimento de potência reativa pelos geradores. Nas simulações, adota-se a carga como sendo do tipo potência constante.

iv. Margem de Estabilidade de Tensão (MET)

A variação da margem de estabilidade de tensão é extraída do resultado da curva PV, comparando o caso sem nenhuma alocação de CR com aquele da compensação sugerida pelo plano de expansão.

v. Tensão no Ponto de Colapso (TPC)

Pela curva PV detecta-se o valor da tensão no ponto de colapso e, desta forma, é verificado se este está próximo aos limites da operação normal do sistema.

vi. MET e TPC Adequadas?

A MET adequada é aquela que é superior à margem anterior, com a compensação reativa sugerida inicialmente. A TPC adequada é aquela que é inferior ao limite mínimo de tensão em operação normal e não está próxima a ele. Propõe-se que:

- a MET seja maior que a anterior e superior ao valor correspondente a 6% mais a razão entre demanda máxima instantânea e a integralizada em uma hora, critério adotado em [CCPE 02, ONS 04];
- a TPC esteja a, no mínimo, 0,05 pu do limite inferior da tensão de operação normal, por exemplo, limite inferior normal 0,95 pu e TPC 0,90 pu;

- a TPC esteja a, no mínimo, 0,03 pu do limite inferior da tensão de operação de emergência, por exemplo, limite inferior de emergência 0,90 pu e TPC 0,87 pu.

Vale salientar que o valor máximo da TPC é proposto neste trabalho de tese baseado na experiência em planejamento adquirida pelo autor.

#### vii. Alteração do Plano

Caso a MET e/ou a TPC não estejam adequadas, deve-se rever o plano de expansão sugerido, através da escolha de uma ou mais barras críticas, cuja CR poderá ser modificada ou, até mesmo, eliminada. Torna-se necessário indicar quais seriam as *barras candidatas* a receberem tal compensação. As barras candidatas são aquelas que têm maior influência nas tensões das barras críticas e não permitem a elas atingirem valores de TPC acima do limite.

No presente estudo, para se identificar as barras candidatas, utiliza-se a análise de sensibilidade do programa WANAREDE-GRF, por meio do índice  $V_J / \Delta Q_i$  (relação entre a tensão na barra J e a variação da potência reativa injetada na barra I).

O apêndice A descreve a idéia básica para se escolherem barras candidatas à redistribuição da potência reativa injetada, método descrito em [Chaves 01].

A injeção máxima de potência reativa ( $Q_{\max}$ ) que poderá permanecer na barra crítica dependerá do valor máximo de tensão ( $V_{\text{desej}}$ ) que não viole sua restrição de TPC. Sua determinação é feita a partir do índice  $\alpha_i$  proposto em [Maheshwarapu 98], conforme equações 3.1 e 3.2. Nestas expressões,  $V_{\text{desej}}$  é a tensão desejada para a barra crítica,  $V_0$  é a tensão na condição inicial do sistema e  $V_{\Delta Q_i}$  é o valor ao se injetar uma potência reativa de  $\Delta Q_i$  que, para este trabalho, é de 1 Mvar.

$$Q_{\max} = \left( \frac{V_{\text{desej}} - V_0}{\alpha V_0} \right) \Delta Q_i \quad (3.1)$$

$$\alpha_i = \frac{V_{\Delta Q_i}}{V_0} - 1 \quad (3.2)$$

### 3.2.3. Aplicação do Procedimento Proposto

Para validar o procedimento proposto foram realizadas várias simulações sendo apenas uma delas apresentada neste texto. O objetivo deste item é demonstrar todos os passos do procedimento para melhor esclarecimento. Para se alcançar esta meta, elege-se

a rede de 14 barras pertencente à região Sudeste do sistema elétrico brasileiro mostrada na figura 3.3 cujos dados dos parâmetros são reais. A rede selecionada possui duas cargas em 138 kV (B3 e B5) e quatro em 13,8 kV (tabela 3.1), nove linhas e quatro transformadores de 138/13,8 kV.

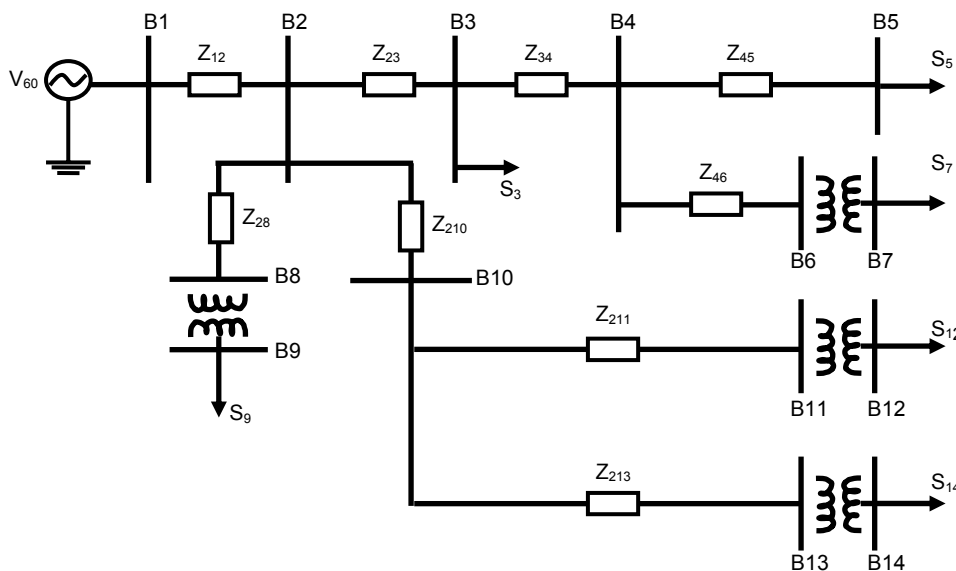


Figura 3.3. Sistema elétrico exemplo de 14 barras da região Sudeste do Brasil.

Tabela 3.1. Dados do sistema elétrico exemplo.

Barra	Tensão Nominal	Vinicial (pu)	Vtap (pu)	P (MW)	Q (Mvar)	CR (Mvar)	FP sem CR
B3	138 kV	1,025	1,028	56,0	42,0	-	0,80
B5	138 kV	1,023	1,025	23,1	19,1	-	0,77
B7	13,8 kV	0,974	1,040	11,2	9,9	6,2	0,75
B9	13,8 kV	0,992	1,045	4,6	2,0	0,5	0,92
B12	13,8 kV	0,965	1,043	35,0	35,7	24,2	0,70
B14	13,8 kV	0,985	1,045	12,5	21,6	17,5	0,50
-	-	-	<b>Total</b>	<b>142,4</b>	<b>130,3</b>	<b>48,4</b>	-

### Passo i – Compensação Sugerida

Na tabela 3.1, a coluna Vinicial exibe a tensão nas barras com a compensação reativa sugerida e Vtap expõe esta mesma situação com a alteração dos taps dos transformadores para se obter maior margem de estabilidade de tensão. A tensão nominal e a carga instalada (potência ativa e reativa) de cada barra também são mostradas. Na coluna CR está a compensação reativa indicada pelo plano de expansão para se atingir um fator de

potência de 0,95. A última coluna da tabela 3.1 mostra qual é o fator de potência sem alocação dos capacitores sugeridos para as barras.

As barras de 138 kV são consideradas grandes consumidores industriais cujo fator de potência deve ser por eles ajustado, cabendo à empresa de distribuição apenas manter a tensão dentro dos limites permitidos.

Neste exemplo (figura 3.3), o máximo carregamento da rede é limitado pelas cargas S3, S5 e S7, pois estão ligadas à fonte por apenas uma linha (B2-B3), e também pela maior carga de 13,8 kV (S12) presente em B12.

### Passo ii – Análise de Sensibilidade

A tabela 3.2 exibe os resultados apontados pelo vetor tangente para todas as barras de carga. Na coluna “Sem CR”, são apresentados os valores do vetor tangente com o sistema sem nenhuma compensação reativa e, na coluna “Com CR”, com os capacitores sugeridos pelo plano de expansão. Para se chegar aos resultados da coluna “Com CR e Tap”, considera-se a alteração dos *taps* dos transformadores citada anteriormente. Verifica-se que as barras críticas são B12 e B7, visto que B3 e B5 não são utilizadas como candidatas à alocação de CR por serem grandes consumidores industriais.

Tabela 3.2. Resultados do cálculo do vetor tangente.

Ordem	Sem CR	Com CR	Ordem	Com CR e Tap
<b>B12</b>	<b>-1,000</b>	<b>-1,000</b>	<b>B7</b>	<b>-1,000</b>
<b>B7</b>	<b>-0,6483</b>	<b>-0,7937</b>	B5	-0,8037
B5	-0,2513	-0,6716	B3	-0,6763
B3	-0,2249	-0,5738	<b>B12</b>	<b>-0,6318</b>
B14	-0,2030	-0,2870	B14	-0,2533
B9	-0,1089	-0,1747	B9	-0,1756

Os resultados da tabela 3.2 indicam que B12 é um pouco mais crítica que B7. Além disso, B12 atinge tensões mais elevadas no ponto de colapso e menores níveis de margem de potência reativa (figura 3.5). Por este motivo, a seguir são apresentadas as curvas da barra crítica B12.

### Passos iii, iv e v – Curvas PV e QV (iii), Margem de Estabilidade de Tensão (iv), Tensão no Ponto de Colapso (v)

A figura 3.4 apresenta as curvas PV da barra crítica B12 para os três casos da tabela 3.2. Verifica-se que sem nenhum capacitor alocado, o máximo carregamento chega a apenas 185 MW, com a compensação reativa atinge 199,4 MW (ganho de 7,8%) e com a

modificação do *tap* dos transformadores chega a 202,9 MW (aumento de 1,8%). As margens de estabilidade de tensão das três condições descritas são, respectivamente, 29,9%, 40% e 42,5%. Observa-se que a tensão no ponto de máximo carregamento se eleva a cada condição, obtendo os seguintes módulos: 0,546 pu, 0,625 pu e 0,713 pu.

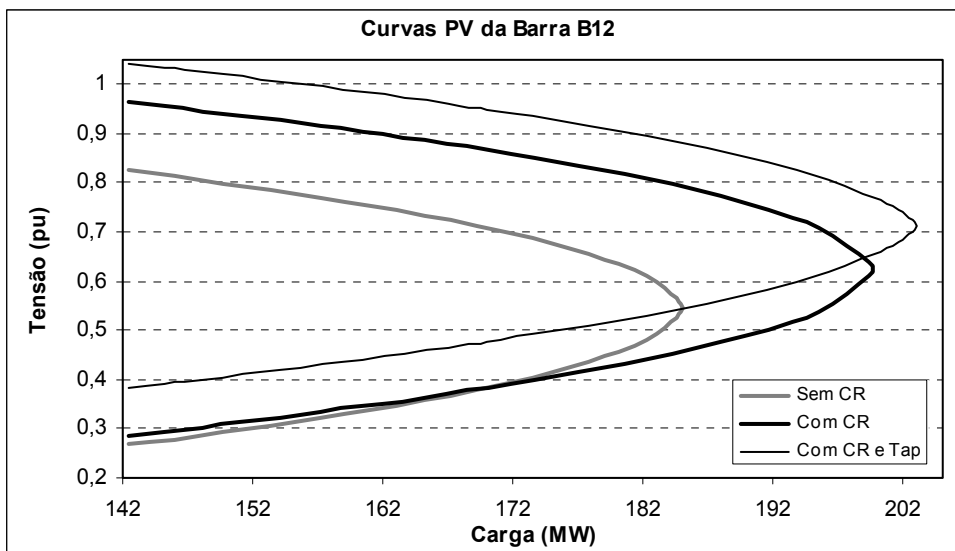


Figura 3.4. Curva PV da barra B12 sem e com a CR sugerida e com a modificação do *tap*.

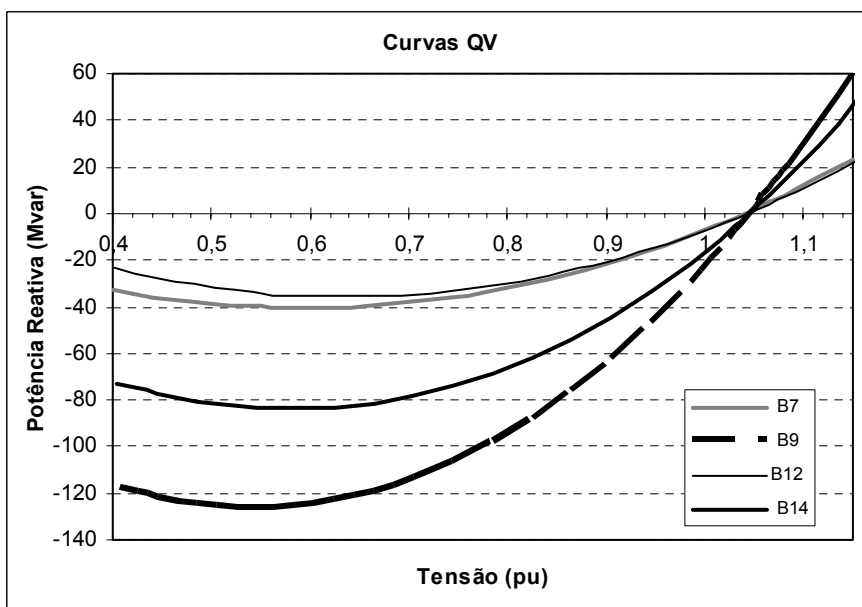


Figura 3.5. Curva QV das barras de carga com a CR sugerida e alteração do *tap*.

Tanto a MET quanto a TPC não violam as restrições (maior que 6% e menor que 0,90 pu, respectivamente) – *Passo vi*.

Conforme registrado em [CCPE 02, ONS 04], é relevante avaliar as curvas QV, para se complementarem as análises elaboradas a partir das curvas PV. A figura 3.5 mostra as curvas QV para as barras de carga quando se aloca a compensação reativa sugerida na tabela 3.1 e é feita a mudança do *tap* dos transformadores. As margens de potência reativa das barras B12, B7, B14 e B9 são, respectivamente, 35,6, 40,5, 83,8 e 126,2 Mvar. A figura 3.5 indica que as barras mais críticas em relação à estabilidade de tensão possuem uma margem de potência reativa menor.

A figura 3.6 apresenta as curvas QV da barra B12 para as três condições citadas anteriormente cujas margens de potência reativa (MR) são: 21,7, 31,4 e 35,6 Mvar. Tem-se um ganho total de 13,9 Mvar. Ao se alocarem 24,2 Mvar na barra B12, a margem de potência reativa se eleva de 9,7 Mvar. Cada 2,5 Mvar instalados neste local diminui em 1 Mvar a reserva de potência reativa necessária.

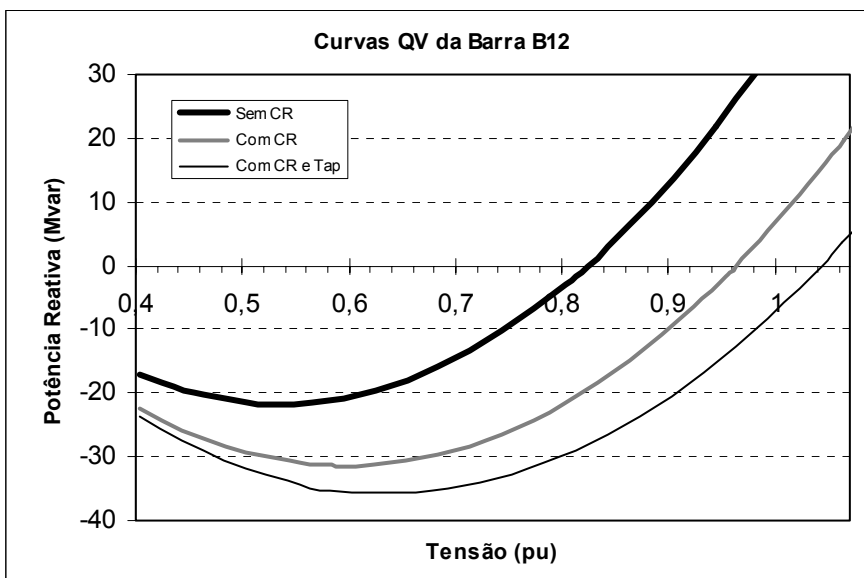


Figura 3.6. Curva QV da barra B12 sem e com a CR sugerida e com a modificação do *tap*.

A rede elétrica exibida na figura 3.3 pertence à região Sudeste do sistema elétrico brasileiro. Se o crescimento médio da carga no Sudeste for de 4,5%, conforme previsto [MME 06], tem-se no máximo 6,6 anos sem a necessidade de se construírem novas linhas de transmissão caso não haja capacitores instalados. Já para a condição com compensação reativa e mudança dos *taps*, esta margem aumentaria para 9,4 anos, sendo necessário investimentos apenas para se fazer o controle de tensão e se corrigir o fator de potência das cargas. Vale salientar que para se estimar tais períodos adotam-se os limites térmicos da linha.

Para melhor serem visualizados os próximos passos do procedimento, consideram-se as compensações sugeridas ao longo de um horizonte de planejamento da expansão. As indicações dos capacitores se baseiam no objetivo de serem mantidos o fator de potência acima de 0,95 indutivo e a tensão dentro dos limites. Quando a tensão cai para 0,95 pu é instalada uma compensação reativa adicional que a eleva para próximo de 1,05 pu. Para atingir tal objetivo, algumas barras ficam sobrecompensadas, chegando a fatores de potência 0,868 capacitivo.

A CR sugerida (CR Ano), o fator de potência (FP Ano) e a tensão das barras de carga (V Ano) para cada ano são apresentados, respectivamente, nas tabelas 3.3, 3.4 e 3.5. Na tabela 3.3, “CR Total” é a potência reativa total sugerida pelo plano de expansão. Na tabela 3.4, a letra *c* à frente dos valores significa que o fator de potência é capacitivo. Vale observar que a *mudança de tap só é permitida no ano 0*; nos demais anos, o único método de controle de tensão é através da compensação reativa. É importante frisar que a coluna representada como Ano 10 tem a função de apenas aumentar a margem de estabilidade de tensão do ano 9. Portanto, a margem adicional conseguida pela compensação reativa indicada é somada àquela do ano 9.

Tabela 3.3. Compensação reativa sugerida (Mvar) para cada ano de planejamento.

Barra	CR Ano 0	CR Ano 4	CR Ano 7	CR Ano 9	CR Ano 10
B7	6,2	19,3	20,3	21,2	22,2
B9	0,5	0,6	2,4	5,2	5,8
B12	24,2	35,7	46,7	54,0	60,0
B14	17,5	21,8	27,6	40,6	45,6
<b>CR Total (Mvar)</b>	<b>48,4</b>	<b>77,4</b>	<b>97,0</b>	<b>121,0</b>	<b>133,6</b>

Tabela 3.4. Fator de potência das barras em cada ano de planejamento.

Barra	FP Ano 0	FP Ano 4	FP Ano 7	FP Ano 9	FP Ano 10
B7	0,95	0,868c	0,908c	0,928c	0,928c
B9	0,95	0,951	0,999	0,949c	0,934c
B12	0,95	0,988	0,999	0,999c	0,996c
B14	0,95	0,969	0,996	0,903c	0,843c

Tabela 3.5. Tensões das barras em cada ano de planejamento.

Barra	V Ano 0	V Ano 4	V Ano 7	V Ano 9	V Ano 10
B7	1,040	1,038	0,954	0,871	0,807
B9	1,045	1,040	1,030	1,025	1,018
B12	1,043	1,050	1,050	1,045	1,049
B14	1,045	1,038	1,028	1,039	1,038

Pela tabela 3.4, constata-se que, desde o ano 4, é necessário manter o FP capacitivo para se conservar a tensão na barra B7 acima de 0,95 pu e, a partir do ano 9, esta meta não é mais alcançada. Calculando-se a diferença entre os valores das colunas CR Ano 0 e CR Ano 4 (tabela 3.3), nota-se que B7 é a que mais precisa de compensação reativa adicional para se atingir a tensão mínima (13,1 Mvar). Nos anos seguintes, as complementações de CR nesta barra são de apenas 1 Mvar devido à limitação do baixo FP capacitivo. A partir do ano 9, tem-se que adotar um outro método de controle de tensão. Este problema ocorre na barra B7 porque ela está perto de dois grandes consumidores (B3 e B5) que, no ano 0, têm uma carga somada de 100 MVA, enquanto que a de B7 não chega a 15 MVA. Isto provoca grandes quedas de tensão nas linhas que conectam tais cargas.

Comparando-se as duas barras críticas (B12 e B7), B12 alcança a tensão de 1,050 pu mais facilmente que B7, sem atingir fatores de potência capacitivos muito baixos, sendo o menor de 0,996. A barra B12 tem a carga mais pesada das barras de 13,8 kV e um baixo fator de potência indutivo, possibilitando a instalação de um grande montante de compensação reativa. No ano 0, para se obter um FP unitário, precisa-se alocar 35,7 Mvar, 65% a mais que na barra B14 e 3,6 vezes o necessário para B7.

A figura 3.7 exhibe as curvas PV da instalação de diferentes capacitores com o passar dos anos. Na legenda, os anos de 0 a 10 significam uma projeção da curva PV, se a compensação reativa de cada ano (tabela 3.3) se mantivesse inalterada até o ponto de colapso de tensão, e CR Sugerida é a curva PV correspondente à instalação dos capacitores durante os períodos determinados pela tabela 3.3. Os limites da tensão na operação normal do sistema – inferior (0,95 pu) e superior (1,05 pu) – são representados pela reta tracejada.

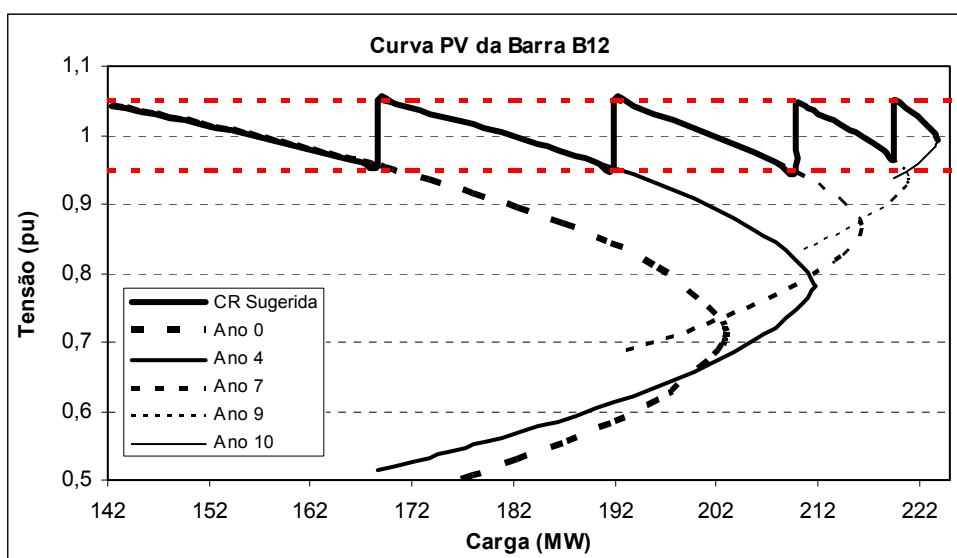


Figura 3.7. Curva PV da barra B12 com a instalação de diferentes capacitores durante o horizonte de planejamento.

Passo vi – MET e TPC Adequadas?

No atual estudo, é desprezado o limite da margem de estabilidade de tensão referente à razão entre a demanda máxima instantânea e a integralizada em uma hora, portanto a MET mínima é de 6%.

As margens de estabilidade de tensão (MET), as tensões no ponto de colapso (TPC), o máximo carregamento (*Load Max*) e a potência ativa total instalada (*Ptotal*) no sistema em estudo para cada ano de planejamento são mostrados na tabela 3.6. Verifica-se que a margem de estabilidade de tensão cai com o passar dos anos. No ano 9, a MET já não está mais adequada, ficando abaixo de 6%, havendo necessidade de adição de compensação reativa, indicada na coluna Ano 10. Com tal atualização o limite máximo para se construir uma nova linha aumenta para 10,4 anos, um ano a mais quando se utiliza a compensação reativa indicada no ano 0. Além disso, a margem se torna superior a 6%. O máximo carregamento no ano 10 aumenta 20,9 e 2,9 MW com relação ao obtido, respectivamente, no ano 0 e no ano 9.

Tabela 3.6. Parâmetros de estabilidade de tensão da barra B12 em cada ano de planejamento.

<b>Limites</b>	<b>Ano 0</b>	<b>Ano 4</b>	<b>Ano 7</b>	<b>Ano 9</b>	<b>Ano 10</b>
TPC (pu)	0,713	0,782	0,866	0,938	0,993
MET (%)	42,5	25,5	12,7	5,2	6,6
MET (MW)	60,5	43,1	24,4	11,0	13,9
Load Max (MW)	202,9	211,8	216,3	220,9	223,8
<b>Ptotal (MW)</b>	<b>142,4</b>	<b>168,7</b>	<b>191,9</b>	<b>209,9</b>	<b>209,9</b>

Na figura 3.7 é mostrado o crescimento gradativo do máximo carregamento e a elevação da tensão no ponto de colapso com a nova compensação reativa instalada a cada ano de planejamento. Nota-se que, a partir do ano 9, a TPC não está adequada (0,938 pu), estando superior a 0,90 pu (tabela 3.6). A alteração do plano de expansão é necessária para se evitar um possível colapso de tensão na operação em tempo real do SEP. Suponha-se que, no ano 9, durante a operação do sistema, a carga (220 MW) sofra uma pequena alteração (aumento de 2 MW). Será chaveado um capacitor de 6 Mvar, totalizando 60 Mvar instalados em B12. Com esta manobra, a tensão em B12 passará de 0,958 pu para 0,961 pu. O operador pode não perceber que a tensão está muito próximo ao ponto de colapso, pois a mesma apresenta valores dentro dos limites de operação normal (entre 0,95 e 1,05 pu). Sendo assim, caso seja tomada a decisão de energizar novos capacitores, muito provável nestas circunstâncias, pode-se piorar ainda mais a situação.

### Passo vii – Alteração do Plano

Neste passo são apresentadas duas opções para alteração do plano de expansão: (1) utilização do índice  $\alpha_i$  da equação 3.2 como parâmetro de escolha da modificação das compensações reativas das barras; (2) aplicação da ferramenta de análise de sensibilidade do WANAREDE-GRF para tal mudança.

#### Alternativa 1 – Índice $\alpha_i$

A compensação reativa exibida na tabela 3.3 é selecionada considerando-se o menor custo do Mvar para que sejam obtidos o ajuste do fator de potência e o controle de tensão com o maior carregamento possível nestas condições. A alternativa 1 propõe uma nova CR que prioriza a não violação da restrição de TPC (0,90 pu). Tal prioridade reduz o máximo carregamento que pode ser obtido, conforme evidenciado nos resultados finais da alternativa 1.

A tabela 3.7 apresenta a tensão inicial no ano 7 ( $V_0$ ), a tensão com a alocação de 1 Mvar na barra ( $V_{\Delta Q}$ ), o valor de  $\alpha_i$ , e a CR Atual e a máxima permitida (CR Max) para se atingir a tensão desejada ( $V_{desj}$ ).

Tabela 3.7. Compensação reativa necessária para se atingir a tensão desejada no ano 7.

ANO 7	$V_0$	$V_{\Delta Q}$	$\alpha_i$	CR Atual	CR Max	$V_{desj}$
B7	0,954	0,961	0,007338	20,3	28,3	1,01
B9	1,030	1,032	0,001942	2,4	12,4	1,05
B12	1,050	1,058	0,007619	46,7	<b>39,2</b>	0,99
B14	1,028	1,031	0,002918	27,6	34,9	1,05

Para se respeitar o limite da TPC e se conseguir que o fluxo de potência seja sempre convergente, é necessário alterar a CR a partir do ano 7. Como a TPC fica acima de 0,95 pu em B12, a tensão nesta barra tem que ser mais baixa ao se alocar um novo capacitor, em vez de 1,05 pu como anteriormente. Opta-se por um  $V_{desj}$  de 0,99 pu para o ano 7 (tabela 3.7).

O procedimento proposto tenta alcançar a potência reativa necessária ao sistema (CR Total da tabela 3.3), sem violar o FP máximo e chegando o mais próximo possível da tensão desejada (tabela 3.7). Como a barra B7 está com o nível de tensão muito baixo, considera-se como fator de potência limite 0,93 capacitivo e, para as demais barras, 0,95 capacitivo.

A tabela 3.8 mostra a carga ativa e reativa no ano 7 para cada barra, o fator de potência desejado ( $FP_{desj}$ ) e a compensação reativa necessária para se atingir o FP

indutivo (CRind), calculada através da equação 2.5 do item 2.2.1, e o FP capacitivo (CRcap), igual a duas vezes Q subtraído de CRind.

Tabela 3.8. Compensação reativa necessária para se atingir o fator de potência desejado no ano 7.

ANO 7	P (MW)	Q (Mvar)	FPdesej	CRind	CRcap
B7	15,09	13,34	0,93c	7,38	<b>19,30</b>
B9	6,2	2,70	0,95c	0,66	<b>4,73</b>
B12	47,17	48,12	0,95c	32,62	63,62
B14	16,84	29,11	0,95c	23,57	<b>34,65</b>

A tabela 3.9 expõe a compensação reativa sugerida anteriormente (CR Original), o valor da CR com a alteração (CR Nova), o fator de potência (FPnovo) e a tensão (Vnova) novos. É indicada também a potência reativa total alocada (CR Total) em ambos os casos.

Tabela 3.9. Alteração da compensação reativa no ano 7.

ANO 7	CR Original	CR Nova	FPnovo	Vnova
B7	20,3	19,3	0,93c	0,946
B9	2,4	4,8	0,947c	1,033
B12	46,7	39,2	0,983	1,004
B14	27,6	34,6	0,951c	1,039
<b>CR Total (Mvar)</b>	<b>97,0</b>	<b>97,9</b>	<b>Diferença</b>	<b>0,9 Mvar</b>

Apenas na barra B12 utiliza-se a restrição de tensão para sua compensação reativa máxima, como é verificado comparando-se a tabela 3.9 com a 3.7 e 3.8 (valores em negrito). Poderiam ser alocados 63,62 Mvar (tabela 3.8) para se alcançar o fator de potência de 0,95 capacitivo, porém a tensão de 0,99 pu é obtida com 39,2 Mvar (tabela 3.7). Nas outras barras ocorre o contrário, é preciso mais potência reativa para se atingir a tensão desejada, entretanto o FP limite é alcançado primeiro. A alteração sugerida aloca 0,9 Mvar a mais no sistema em estudo, obtendo tensões mais baixas nas barras B7 e B12 e o fator de potência se torna capacitivo nas barras B9 e B14 que são as únicas a terem aumentado o montante de CR com a alteração (vide tabelas 3.4 e 3.5). O fator de potência melhora em B7 (originalmente muito capacitivo) e piora em B12, em decorrência da restrição da TPC.

Na coluna Vnova, nota-se que a tensão em B12 não é igual a 0,99 pu como calculado pelo índice  $\alpha_i$ . Isto se deve ao fato de tal estimativa ser pontual, não se levando em conta o aumento de potência reativa injetada em outras barras. Mesmo assim, o erro não é tão significativo (1,4%), podendo ser considerada como uma boa estimativa.

De modo semelhante ao processo descrito anteriormente, são obtidas as tabelas 3.10 e 3.11 para a alteração do ano 9. A tabela 3.10 mostra os limites calculados de CR relativos

ao FP e à  $V_{desej}$ . Novamente, a única barra que é limitada pela restrição de tensão para sua compensação reativa máxima é a B12. Em relação ao limite do fator de potência poderiam ser alocados 69,6 Mvar. As outras barras precisam de muito mais potência reativa para alcançar a tensão desejada ( $V_{desej}$ ). Para a barra B7, é necessário um montante muito grande de compensação reativa para se atingir 1,05 pu. Logo, para se obter um valor de potência reativa injetada em B7 mais próximo daquele sugerido no ano 7, opta-se por diminuir o valor da  $V_{desej}$  desta barra. Tal redução também é observada para B12, porém a razão neste caso é diferente. Para B12,  $V_{desej}$  tem que ser menor para garantir que a TPC não viole o limite permitido.

Tabela 3.10. Limites de compensação reativa para a alteração do ano 9.

ANO 9	FPdesej	CR cap	Vdesej	CR Max
B7	0,93c	<b>21,11</b>	1,000	41,2
B9	0,95c	<b>5,18</b>	1,050	27,8
B12	0,95c	69,59	0,988	<b>49,8</b>
B14	0,95c	<b>37,89</b>	1,050	54,9

Observa-se, pela tabela 3.11, que a compensação reativa original se mantém apenas na barra B9. Nas demais há diminuição do montante sugerido. Isto provoca uma redução da CR total instalada de 7,0 Mvar e das tensões das barras (vide tabela 3.5). Os fatores de potência de B7 e B9 se mantêm quase inalterados e, em B12 e B14, melhoram, comparados aos da tabela 3.4. A CR Total é o montante máximo permitido para se manter a TPC de B12 dentro dos limites.

Tabela 3.11. Alteração da compensação reativa no ano 9.

ANO 9	CR Original	CR Nova	FPnovo	Vnova
B7	21,2	21,1	0,93c	0,856
B9	5,2	5,2	0,949c	1,019
B12	54,0	49,8	0,999	1,001
B14	40,6	37,9	0,95c	1,023
<b>CR Total (Mvar)</b>	<b>121,0</b>	<b>114,0</b>	<b>Diferença</b>	<b>-7,0 Mvar</b>

Fazendo o mesmo para o ano 10, obtêm-se as tabelas 3.12 e 3.13 como solução. Para que a TPC de B12 fique abaixo de 0,90 pu, a tensão desejada para esta barra deve ser ainda mais baixa que nos anos anteriores (0,95 pu), conforme tabela 3.12. De novo B12 é a única barra limitada pela restrição de tensão. Constata-se pela tabela 3.13 que, em todas as barras, a compensação reativa nova é menor que a original. A redução da CR total instalada é de 17,7 Mvar, isto é necessário para se manter a TPC da barra B12 dentro dos limites.

Também é verificada a diminuição das tensões das barras (vide tabela 3.5) e todos os fatores de potência se tornam menos capacitivos do que os encontrados na tabela 3.4.

Tabela 3.12. Limites de compensação reativa para a alteração do ano 10.

ANO 10	FPdesej	CR cap	Vdesej	CR Max
B7	0,93c	<b>21,75</b>	1,000	39,4
B9	0,95c	<b>5,33</b>	1,010	7,7
B12	0,95c	71,69	0,950	<b>49,8</b>
B14	0,95c	<b>39,04</b>	1,050	54,9

Tabela 3.13. Alteração da compensação reativa no ano 10.

ANO 10	CR Original	CR Nova	FPnovo	Vnova
B7	22,2	21,7	0,931c	0,791
B9	5,8	5,4	0,947c	1,002
B12	60,0	<b>49,8</b>	0,997	0,955
B14	45,6	39,0	0,95c	1,004
<b>CR Total (Mvar)</b>	<b>133,6</b>	<b>115,9</b>	<b>Diferença</b>	<b>-17,7 Mvar</b>

A tabela 3.14 apresenta os resultados finais da compensação reativa de todos os anos com a alteração indicada anteriormente. Verifica-se que a margem de estabilidade de tensão diminui para os anos 7, 9 e 10, respectivamente, 0,6%, 0,7% e 1,9%. No último ano há maior redução do máximo carregamento (3,9 MW), porque a TPC de B12 já está muito próxima do limite no ano 9 (0,897 pu), não admitindo que se instale nenhum capacitor nesta barra (vide tabelas 3.11 e 3.13). Verifica-se pela tabela 3.14 que, com a nova compensação reativa, a TPC se mantém dentro dos limites a qual é violada em 0,003 pu apenas no ano 10. É diminuído 0,09 pu da TPC no ano 10 em relação à CR Original. Constata-se que as margens de estabilidade de tensão dos anos 9 e 10 permanecem abaixo de 6%.

A figura 3.8 apresenta a curva PV da barra B12 com a modificação dos montantes da compensação reativa exibidos na tabela 3.14. Como se observa, o ganho de margem de estabilidade de tensão no ano 10 é insignificante. Isto ocorre porque não se pode adicionar nenhum capacitor em B12. São alocados 1,9 Mvar (diferença de CR entre os anos 9 e 10) no sistema para se ter um aumento de 0,5 MW na MET (3,8 Mvar por MW).

### Alternativa 2 – Análise de Sensibilidade

Para se obter um ganho mais significativo na margem de estabilidade de tensão no ano 10 de forma a garantir que a MET ultrapasse os 6%, é necessário que se aplique a alternativa 2. Para isto selecionam-se as barras candidatas à compensação reativa as quais devem ter pequena influência na tensão de B12, para que a TPC seja baixa. As barras B3 e

B5 merecem atenção, pois apresentam significativa limitação para o SEP por elas estarem com fatores de potência baixos. A barra candidata escolhida tem que elevar bastante a tensão de B3, B5 e B7 com o mínimo de Mvar e suprir parte da potência reativa demandada por B3 e B5.

Tabela 3.14. Nova compensação reativa (Mvar) e parâmetros de estabilidade de tensão para cada ano de planejamento.

Barra	CR Ano 0	CR Ano 4	CR Ano 7	CR Ano 9	CR Ano 10
B7	6,2	19,3	19,3	21,1	21,7
B9	0,5	0,6	4,8	5,2	5,4
B12	24,2	35,7	39,2	<b>49,8</b>	<b>49,8</b>
B14	17,5	21,8	34,6	37,9	39,0
<b>CR Total (Mvar)</b>	<b>48,4</b>	<b>77,4</b>	<b>97,9</b>	<b>114,0</b>	<b>115,9</b>
TPC Original em B12 (pu)	0,713	0,782	0,866	<b>0,938</b>	<b>0,993</b>
TPC Nova em B12 (pu)	0,713	0,782	0,818	0,897	<b>0,903</b>
MET Original (%)	42,5	25,5	12,7	<b>5,2</b>	6,6
MET Nova (%)	42,5	25,5	12,1	<b>4,5</b>	<b>4,7</b>
MET Original (MW)	60,5	43,1	24,4	11,0	13,9
MET Nova (MW)	60,5	43,1	23,3	9,5	10,0
Load Max Original (MW)	202,9	211,8	216,3	220,9	223,8
Load Max Nova (MW)	202,9	211,8	215,2	219,4	219,9
<b>Ptotal (MW)</b>	<b>142,4</b>	<b>168,7</b>	<b>191,9</b>	<b>209,9</b>	<b>209,9</b>

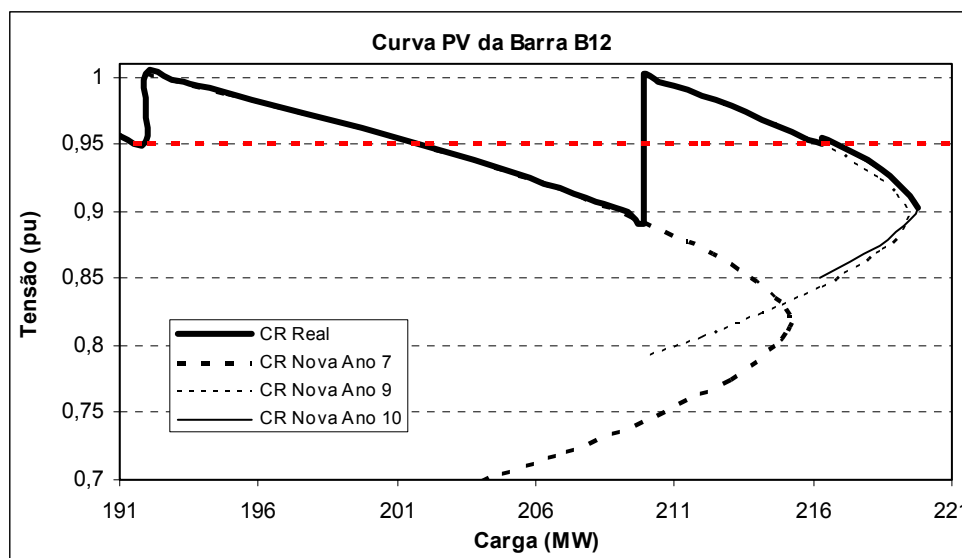


Figura 3.8. Curva PV da barra B12 com a instalação dos novos montantes de CR durante os anos.

A análise de sensibilidade é realizada, neste trabalho, utilizando-se o programa WANAREDE-GRF, sendo considerada a variação de 1 Mvar em cada barra (primeira linha da tabela 3.15) e verificando-se sua influência nas demais (primeira coluna da tabela 3.15).

O apêndice A se dedica ao detalhamento da análise de sensibilidade. Os maiores valores indicam que a potência reativa injetada em uma barra tem maior influência na tensão da outra. A seqüência da primeira coluna (B7, B5, B3, B12, B14 e B9) corresponde às barras que têm maior sensibilidade (valores mais elevados) à variação de potência reativa em B4. A primeira linha (B4, B6, B11, B10, B13, B2 e B8) está ordenada de acordo com a barra que mais influencia a tensão de B7 (ordem decrescente). Os números em negrito são os maiores de cada linha.

Tabela 3.15. Resultados da análise de sensibilidade do WANAREDE-GRF.

	<b>B4</b>	<b>B6</b>	<b>B11</b>	<b>B10</b>	<b>B13</b>	<b>B2</b>	<b>B8</b>
<b>B7</b>	<b>0,006791</b>	0,006785	0,003128	0,002272	0,002222	0,002060	0,002045
<b>B5</b>	<b>0,005419</b>	0,005405	0,002496	0,001813	0,001773	0,001644	0,001632
<b>B3</b>	<b>0,004390</b>	0,004379	0,002183	0,001586	0,001551	0,001438	0,001427
<b>B12</b>	0,002300	0,002294	<b>0,006410</b>	0,002207	0,002159	0,001430	0,001419
<b>B14</b>	0,001332	0,001328	<b>0,001758</b>	0,001278	0,001544	0,000828	0,000822
<b>B9</b>	<b>0,001000</b>	0,000998	0,000944	0,000686	0,000671	0,000622	0,000754

A tabela 3.16 expõe a variação da tensão com a alocação de 1 Mvar em cada barra separadamente. A análise desta tabela é realizada de forma idêntica a da 3.15.

Tabela 3.16. Variação da tensão (em pu) das barras da primeira coluna com a alocação de 1 Mvar nas da primeira linha.

	<b>B4</b>	<b>B6</b>	<b>B11</b>	<b>B10</b>	<b>B13</b>	<b>B2</b>	<b>B8</b>
<b>B7</b>	<b>0,0067</b>	<b>0,0067</b>	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002
<b>B5</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
<b>B3</b>	<b>0,004</b>	<b>0,004</b>	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
<b>B12</b>	0,0023	0,0023	<b>0,007</b>	0,002	0,003	0,002	0,002
<b>B9</b>	<b>0,002</b>	0,001	0,001	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>B14</b>	0,001	<b>0,002</b>	<b>0,002</b>	<b>0,002</b>	<b>0,002</b>	0,001	0,001

A análise das tabelas 3.15 e 3.16 pode ser explicada por meio do seguinte exemplo: a barra mais sensível à B4 é a B7, pois tem o maior valor da coluna B4 (0,006791 pu – tabela 3.15 e 0,0067 pu – tabela 3.16); aquela que mais influencia B14 é a B11, que tem o valor mais elevado da linha B14 (0,001758 pu – tabela 3.15 e 0,002 pu – tabela 3.16).

Observa-se pela tabela 3.15 que as barras B7, B5 e B3 são mais sensíveis a variações de potência reativa de B4 e B6. As barras B4 e B6 influenciam pouco B12, cerca de 2,95 vezes menos que a B7. A tabela 3.16 confirma B4 e B6 como barras candidatas.

Escolhe-se B4 como barra candidata por influenciar um pouco mais B7, B5 e B3 que a barra B6. Em B4 são alocados 17,7 Mvar – potência reativa da diferença entre a CR Original e a Nova (tabela 3.13). Com esta compensação, a margem de estabilidade de

tensão aumenta 2,9% em relação à CR Nova, indo para 15,9 MW e sua TPC cai para 0,881 pu, conforme tabela 3.17. Esta nova configuração é melhor que aquela com a CR Original em relação à estabilidade de tensão, atingindo 225,8 MW de máximo carregamento (tabela 3.17).

Tabela 3.17. Parâmetros de estabilidade de tensão no ano 10 para diferentes barras candidatas.

Limites	CR Original	CR Nova	CR B4	CR B6	CR B11	CR B10	CR B13	CR B2	CR B8
MET (%)	6,6	4,7	<b>7,6</b>	7,5	6,4	5,9	5,9	5,8	5,8
MET (MW)	13,9	10,0	<b>15,9</b>	15,8	13,5	12,3	12,3	12,1	12,1
Load Max (MW)	223,8	219,9	<b>225,8</b>	225,7	223,4	222,2	222,2	222,0	222,0
TPC em B12 (pu)	0,993	0,903	<b>0,881</b>	0,881	0,988	0,922	0,918	0,905	0,903

A tabela 3.17 apresenta os resultados de máximo carregamento, MET e TPC obtidos se fossem selecionadas outras barras como candidatas para serem alocados os 17,7 Mvar. Comparando-se tais resultados para todas as barras, verifica-se que B4 realmente alcança a melhor MET com a tensão no ponto de colapso mais baixa. Para se alcançar a MET de 15,9 MW (obtida por B4), seria necessário alocar 47,4 Mvar em B2 (29,7 Mvar adicionais). Estas afirmações confirmam B4 como barra candidata.

A figura 3.9 mostra a curva PV da barra B12 com a instalação de 17,7 Mvar em B4. Comparando-se com o resultado obtido pela CR Nova do ano 10, nota-se como a MET aumenta e a TPC diminui.

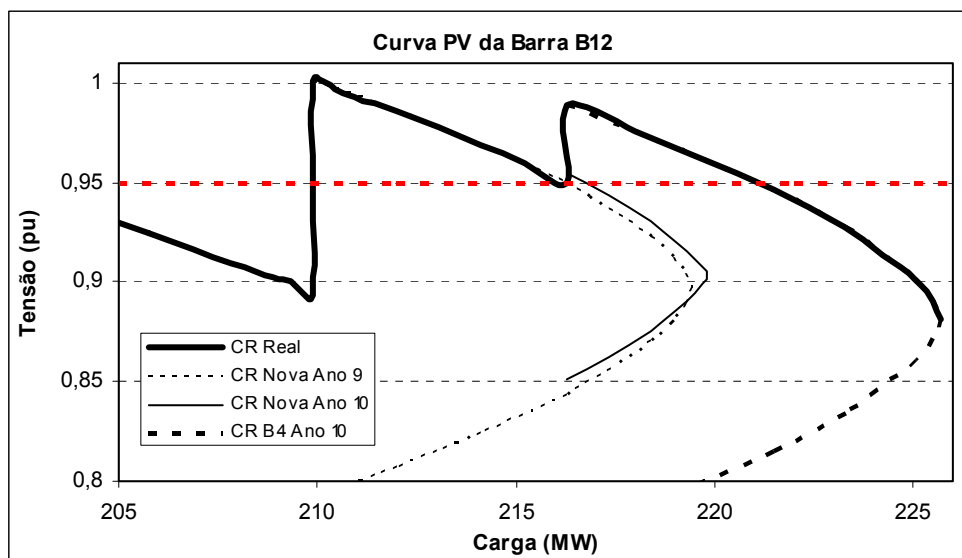


Figura 3.9. Curva PV da barra B12 com a instalação de 17,7 Mvar em B4.

A tabela 3.18 apresenta as alternativas de compensações reativas para melhorar a MET a partir do ano 9 e, na tabela 3.19, são exibidos resultados da MET em porcentagem e

em MW, da TPC e do máximo carregamento para tais alternativas. As colunas de CR Original e a CR Nova são daquelas compensações já citadas anteriormente. Na condição da coluna “CR Nova e Tap”, os capacitores alocados são os sugeridos na CR Nova e altera-se somente o *tap* do transformador da barra B7, para que sua tensão seja maior que 0,95 pu. A coluna CR B4 indica os resultados da adoção de B4 como barra candidata, exibido na tabela 3.17. Para a coluna “CR B4 e Tap” é utilizado B4 como candidata e modifica-se o *tap* do transformador de B7. Na situação da coluna “CR B3 e B5”, são indicados capacitores para B7, B9, B12 e B14 que fazem a barra ficar com fatores de potência indutivos entre 0,98 e 1,0, conforme tabela 3.18. A soma do montante de potência reativa destas barras corresponde a 99,8 Mvar. O restante da compensação reativa original (33,8 Mvar) é distribuído entre as barras dos grandes consumidores (B3 e B5, tabela 3.18) proporcionalmente ao tamanho de suas cargas reativas.

Tabela 3.18. Escolha de B4 como barra candidata comparada à seleção de B3 e B5.

ANO 10	CR Original	CR B4	FP B4	CR B3 e B5	FP B3 e B5
B7	22,2	21,7	0,931c	15,0	1,000
B9	5,8	5,4	0,947c	1,6	0,979
B12	60,0	49,8	0,997	54,2	1,000
B14	45,6	39,0	0,951c	29,0	0,981
B4	-	17,7	-	-	-
B3	-	-	0,800	21,9	0,897
B5	-	-	0,770	11,8	0,898
<b>CR Total (Mvar)</b>	<b>133,6</b>	<b>133,6</b>	-	<b>133,5</b>	-

Tabela 3.19. Parâmetros de estabilidade de tensão no ano 10 para várias alternativas de CR.

Limites	CR Original	CR Nova	CR Tap	CR B4	CR B4 e Tap	CR B3 e B5
MET (%)	6,6	4,7	6,3	7,6	8,3	7,96
MET (MW)	13,9	10,0	13,2	15,9	17,4	16,7
TPC (pu)	0,993	0,903	0,892	0,881	0,875	0,902
Load Max (MW)	223,8	219,9	223,1	225,8	227,3	226,6

Constata-se pela tabela 3.19 que, ao se modificar apenas o *tap* do transformador de B7, quase se atinge a margem obtida pela CR Original com 17,7 Mvar a menos. Tem-se um ganho de 1,6% (3,2 MW) em relação a CR Nova. Quando tal alteração é associada à alocação de 17,7 Mvar na barra candidata, o crescimento da MET chega a 3,6% (7,4 MW). Uma alternativa que alcança bons resultados é a instalação da compensação reativa mais distribuída entre as barras com fatores de potência indutivos (opção CR B3 e B5) os quais podem ser constatados pelas tabelas 3.18 e 3.19. A MET desta opção é maior do que a

obtida pela CR Nova e pela alternativa da barra candidata B4 (respectivamente, 6,7 e 0,8 MW).

A alocação de capacitores em barras de grandes consumidores não é, em geral, adotada pelas empresas, porém é mostrado neste trabalho que tal medida pode ser vantajosa nos aspectos técnicos e econômicos, pois, para um mesmo montante de potência reativa instalado (133,6 Mvar), são obtidos melhores valores de fator de potência, MET e margem de potência reativa (tabela 3.21). No exemplo da figura 3.3, considera-se que os grandes consumidores não corrigem seus fatores de potência, sendo simulado o pior caso para a estabilidade e controle de tensão.

A tabela 3.20 mostra os resultados do cálculo do vetor tangente para o ano 10 os quais confirmam as barras B4 e B6 como as mais adequadas para melhorar a estabilidade de tensão da rede elétrica em estudo. Verifica-se que a barra crítica torna-se a B7, deixando de ser a B12. Em relação à tensão no ponto de colapso, a B12 é a mais crítica, pois sua tensão está mais alta que a de B7. A figura 3.10 exhibe as curvas QV de B7 (nova barra crítica) para as CR expostas na tabela 3.19 (ano 10).

Tabela 3.20. Resultados do cálculo do vetor tangente para o ano 10.

Ordem	Ano 10	Ordem	Ano 10
B7	-1,000	B14	-0,1593
B5	-0,7832	B13	-0,1457
<b>B6</b>	<b>-0,7578</b>	B10	-0,1440
<b>B4</b>	<b>-0,7548</b>	B9	-0,1372
B3	-0,6451	B8	-0,1355
B12	-0,2325	B2	-0,1354
B11	-0,1881	-	-

A margem de potência reativa (MR) da CR Original e da CR Nova tem valores muito próximos, porém estão muito perto de 0 Mvar (figura 3.10 e tabela 3.21). Com a adição de mais capacitores e mudanças de *tap* esta margem cresce, chegando ao maior valor na situação em que é alocada compensação reativa nas barras B3 e B5 (19,22 Mvar).

Tabela 3.21. Margem de potência reativa, MET e TPC no ano 10 para várias alternativas de CR.

ANO 10	CR Original	CR Nova	CR Nova e Tap	CR B4	CR B4 e Tap	CR B3 e B5
MET (%)	6,6	4,7	6,3	7,6	8,3	7,96
TPC (pu)	0,993	0,903	0,892	0,881	0,875	0,902
MR B7 (Mvar)	4,40	3,70	7,17	9,33	11,04	19,22

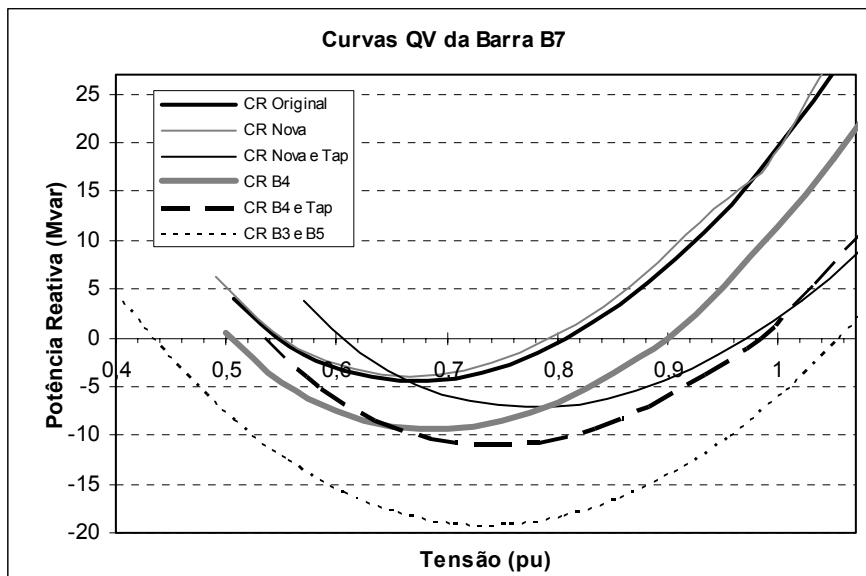


Figura 3.10. Curva QV da barra B7 para o ano 10 para várias alternativas de CR.

Sendo analisada a tabela 3.21, chega-se à conclusão de que as alternativas reprovadas são: CR Original pela alta TPC e baixa margem de potência reativa, CR Nova pela baixa MET, e as opções “CR Nova e Tap” e CR B4 pela pequena MR. Restam somente as alternativas “CR B4 e Tap” e “CR B3 e B5”. Suas MR correspondem respectivamente a 5,75% e 10,0% do total de Q consumida pelas cargas da rede em estudo (192,1 Mvar, 47,4% de crescimento no ano 10). Tais taxas percentuais são razoáveis visto que a carga cresce 4,5% ao ano. Apesar disso, pode-se propor, através de uma nova barra candidata, uma reserva de potência reativa para o sistema. Entretanto, isto tem que ser feito examinando-se a relação custo/benefício da mesma.

A tabela 3.22 apresenta uma última análise para finalizar esta avaliação técnica. Para as alternativas da tabela 3.19 para o ano 10, são mostrados os dados de perdas ativas e reativas e dos carregamentos das principais linhas desta rede elétrica: B1-B2 – liga a rede básica ao subsistema em estudo; B2-B3 – alimenta as cargas mais pesadas do exemplo (área crítica); e B2-B10 – conecta duas barras, sendo uma delas a mais crítica sob o aspecto de estabilidade de tensão.

Comparando-se a CR Original e a CR Nova, nota-se que as perdas são maiores com a CR Nova e a margem de estabilidade de tensão é maior com a CR Original (tabela 3.22). O motivo é que a CR Original tem 17,7 Mvar a mais instalados. A vantagem da CR Nova é que sua TPC respeita o limite. Entretanto, ao se adicionarem 17,7 Mvar em B4 (CR B4), as perdas se tornam menores do que as da CR Original. A alteração do *tap* do transformador da barra B7 (CR Nova e Tap) não tem efeitos significativos na diminuição das perdas (tabela 3.22).

Tabela 3.22. Perdas elétricas e carregamento de linhas para várias alternativas de CR.

Ano 10	Perdas		Carregamento de Linhas		
	MW	Mvar	B1-B2 (%)	B2-B3 (%)	B2-B10 (%)
<b>Sem Shunt</b>	14,7	53,6	108,4	106,9	143,1
<b>CR Original</b>	7,7	25,3	76,8	94,3	79,6
<b>CR Nova</b>	8,2	26,8	80,1	95,3	79,0
<b>CR B4</b>	7,6	25,0	77,0	89,1	78,4
<b>CR Nova e Tap</b>	8,2	26,6	79,8	94,7	79,0
<b>CR B4 e Tap</b>	7,5	24,9	76,8	88,5	78,3
<b>CR B3 e B5</b>	7,5	24,6	76,9	86,5	79,1

A opção com a perda reativa mais baixa é a que aloca capacitores nos grandes consumidores (CR B3 e B5). Em relação à perda ativa, esta alternativa obtém o mesmo valor da “CR B4 e Tap” (7,5 MW). Se for comparado ao sistema sem nenhuma compensação reativa, verifica-se um ganho de disponibilidade das linhas e de geradores de 7,2 MW e 29 Mvar. Considerando que o total da carga consumida no ano 10 é de 216,3 MW, as perdas ativas representam 3,43% desta potência. Levando-se em conta este dado, pode-se afirmar que com a alternativa “CR B4 e Tap” este subsistema exemplo poderia crescer aproximadamente 28% antes de atingir o limite térmico máximo permitido na linha B1-B2, adiando para cerca de 6 anos a construção de um circuito em paralelo com B1-B2. Isto traz grandes economias para a concessionária.

Pensando apenas no limite da linha B2-B3, com a compensação reativa em B3 e B5, haveria a possibilidade de aumento das cargas das barras B3, B5 e B7 em quase 17%. Logo, as indústrias ligadas às barras B3 e B5 poderiam ser ampliadas, sem a necessidade de investimento imediato em transporte de energia por parte da concessionária. Para a linha B2-B10, este ganho é ainda maior, chegando a valores em torno de 60%.

Concluindo este item, as opções a “CR B4 e Tap” e a “CR B3 e B5” estão aptas a resolverem o problema da estabilidade de tensão e ainda melhorarem as condições de operação do sistema. Qualquer uma destas alternativas pode ser escolhida do ponto de vista técnico, ficando, assim, a decisão final dependente da avaliação econômica.

Como últimas considerações, vale destacar que todas as alternativas mantêm as tensões das barras dentro dos limites através de um controle de tensão feito pela mudança de *tap* e a nova barra crítica (B7) não viola os limites de MET e TPC.

### 3.3. Transitórios Eletromagnéticos

#### 3.3.1. Questão a ser Solucionada

Conforme citado anteriormente, com o maior número de capacitores na rede elétrica, atualmente, as manobras destes equipamentos constituem fonte freqüente de transitórios de tensão na operação do sistema elétrico. As sobretensões geradas colocam em risco disjuntores, transformadores e outros equipamentos do SEP. Por este motivo, neste trabalho, são investigadas as **manobras de capacitores** e propostas as devidas soluções, já na etapa de expansão, para se evitarem problemas na operação em tempo real. Vale ressaltar que a metodologia aqui apresentada visa auxiliar as equipes de planejamento na elaboração de planos de expansão, quanto à definição do montante de compensação mais adequado. Cálculos de transitórios eletromagnéticos detalhados e específicos para os equipamentos a serem instalados são realizados na fase de projeto, posterior à etapa de planejamento.

#### 3.3.2. Procedimento Proposto

O procedimento proposto para a avaliação técnica da compensação reativa levando em conta os transitórios eletromagnéticos gerados foi elaborado com base nos estudos desenvolvidos no item 2.2.3. Tal metodologia tem como **objetivo principal** verificar se a CR sugerida acarreta ou não violação dos limites estabelecidos de sobretensões e sobrecorrentes, e, se necessário, indicar a alternativa de expansão para mitigar tais efeitos. Para se atingir este objetivo o procedimento é composto de quatro análises: energização e desenergização do primeiro banco de capacitores para as solicitações de tensão; energização e desenergização do segundo banco para as solicitações de corrente. Cada uma destas análises tem características distintas, sendo que no caso da desenergização considera-se que há *restrike*. A avaliação técnica tem como dados de entrada a compensação reativa sugerida pelo plano de expansão em elaboração.

Para a realização dos cálculos e das análises apresentadas neste item, foi utilizado o *software* ATPDraw [ATPDraw 03], programa de interface gráfica que facilita a modelagem dos elementos do circuito e a sua simulação.

Nesta tese de doutorado destaca-se o desenvolvimento de um índice inovador adotado para apontar os pontos mais críticos em que os limites de sobretensão e sobrecorrente podem ser desrespeitados. Para estes locais, as barras são modeladas detalhadamente e são efetuadas simulações para as mesmas. Quanto maior o valor do

índice, mais vulnerável é a barra. O valor depende das particularidades do sistema em que ela possa estar situada: capacidade do capacitor alocado, características da carga, distância elétrica da fonte, equipamentos instalados, etc. O processo de classificação das barras (através de tais índices) também indica o local onde se deve alterar o montante de compensação reativa (barras críticas) e para onde pode ser deslocada a instalação de potência reativa (barras candidatas). Todo este processo tem o enfoque na propagação de ondas, verificando-se, respectivamente, os pontos de maior e menor refração.

A seguir são apresentados os passos do procedimento proposto e seu fluxograma (figura 3.11).

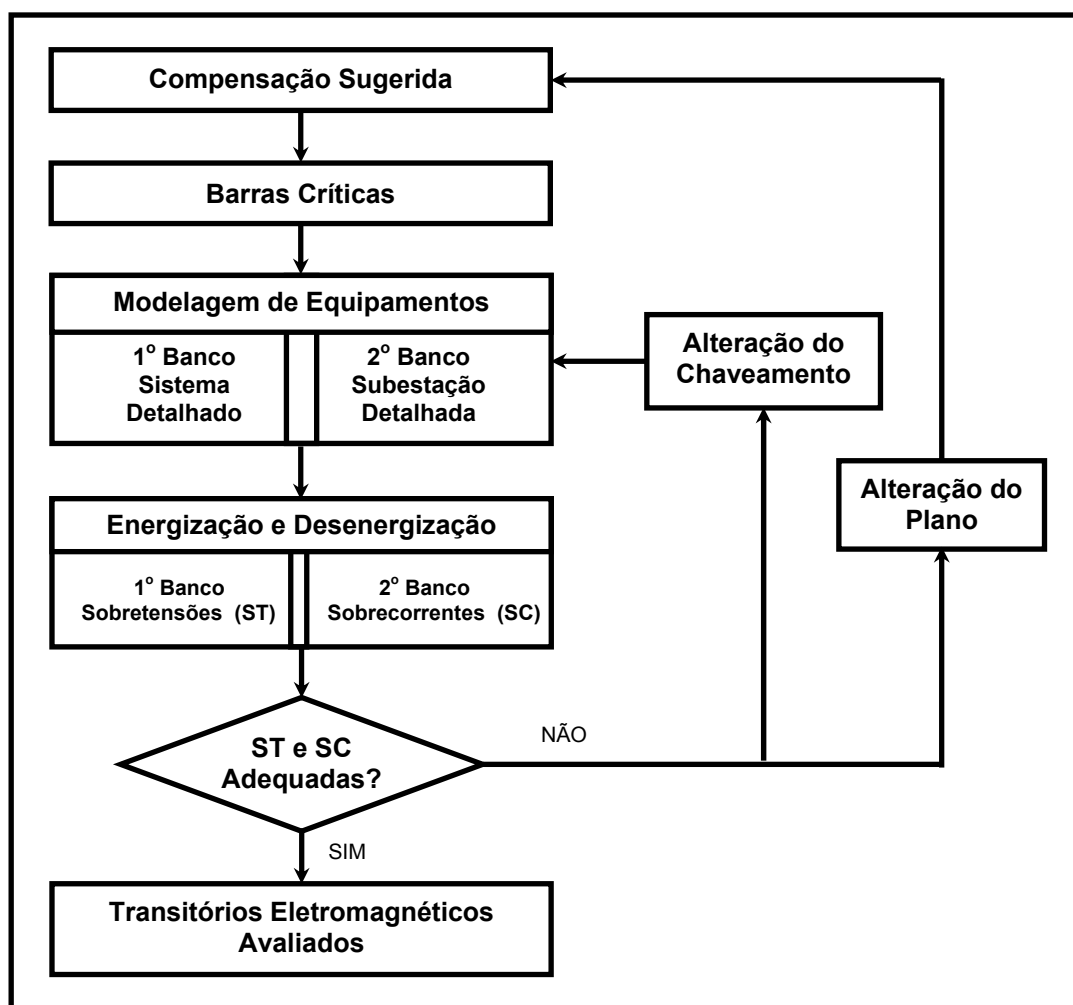


Figura 3.11. Fluxograma da avaliação técnica de CR com relação a Transitórios Eletromagnéticos.

i. Compensação Sugerida

Esta etapa está relacionada à entrada de dados da avaliação técnica que corresponde à compensação reativa sugerida pelo plano de expansão.

ii. Barras Críticas

Neste passo são identificadas as barras críticas – pontos do sistema que atingem as maiores sobretensões e sobrecorrentes. Para a determinação destas barras foi criado, neste trabalho de doutorado, o índice  $C_{i\text{total}}$  calculado através da equação 3.3 e explicado detalhadamente no apêndice B. As barras são classificadas em ordem decrescente do índice cujo maior valor indica a mais crítica. Para as duas de maior valor  $C_{i\text{ total}}$ , são modeladas suas vizinhanças e realizam-se simulações para estimar as sobretensões e sobrecorrentes. Se a primeira barra não viola nenhum limite, não há necessidade de se aplicarem os próximos passos para a segunda barra. Caso contrário, as simulações devem ser realizadas até que todas as barras tenham respeitado os limites.

$$C_{i\text{ total}} = \left[ 1 + c_{i2} \cdot d_{i2} + c_{i2} \cdot d_{i2} + \sum_{j \neq i}^n c_{j2} \cdot d_{j1} \right] \cdot c_{i1} \cdot d_{i1} \quad (3.3)$$

Os termos  $c_{k1}$  e  $d_{k1}$  da equação 3.3 são os coeficientes de refração e  $c_{k2}$  e  $d_{k2}$ , os de reflexão da onda de tensão para as matrizes C e D, onde k pode ser i, j ou qualquer número inteiro. Na matriz C, estão representados os coeficientes para os pontos de conexão da linha com a carga ( $N_2$ ,  $N_3$  e  $N_4$ ) e com a fonte ( $N_0$ ). Na matriz D, tais coeficientes correspondem ao ponto de interseção entre as linhas equivalentes do sistema ( $N_1$ ). A figura 3.12 mostra o circuito que indica a localização dos nós  $N_0$ ,  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  e  $N_4$ .

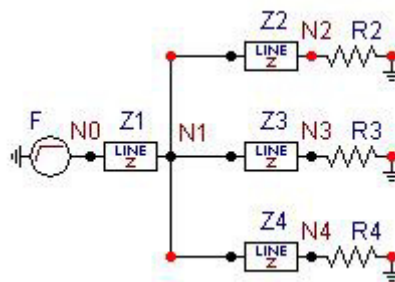


Figura 3.12. Circuito para o cálculo dos coeficientes de reflexão e refração e, conseqüentemente,  $C_{i\text{ total}}$ .

O ponto  $N_1$  é a fronteira entre as regiões externa e interna do subsistema em análise. A externa é representada pelo equivalente de Thévenin no ponto (fonte e impedância equivalentes). A região interna é composta pelas impedâncias equivalentes que conectam, ao ponto  $N_1$ , as barras candidatas à compensação reativa. A escolha da localização de  $N_1$  depende da identificação destas duas regiões.

Para se calcularem os coeficientes de refração e reflexão das matrizes C e D, é realizada uma simplificação da rede em análise, como exposto na figura 3.12. As linhas são representadas por impedâncias equivalentes, as cargas por resistências e as impedâncias dos transformadores são desprezadas. É importante salientar que, como o índice da equação 3.3 não tem o objetivo de indicar o valor da maior sobretensão, tais simplificações não comprometem a qualidade das análises. Isto se deve, principalmente, porque a parte resistiva do circuito possui maior influência na indicação do local mais propício a elevadas sobretensões, conforme mostrado a seguir.

A figura 3.13 apresenta resultados para três situações de representação do circuito: (a) reatâncias da rede e capacitores instalados desprezados; (b) reatâncias da rede desprezadas e capacitores considerados; (c) reatâncias da rede e capacitores instalados considerados. Como se verifica pela figura 3.13, a parte resistiva (figura 3.13(a)) é dominante e é aquela que indica qual é a maior sobretensão. As curvas das figuras 3.13(b) e (c) seguem o formato da figura 3.13(a). Esta condição reforça a consistência das simplificações adotadas e a eficiência do índice.

De forma complementar a essas análises, foram feitos vários testes práticos em circuitos elétricos e os resultados se mostraram extremamente consistentes, validando a metodologia adotada para cálculo do índice. Vale ainda observar que no procedimento se propõe a indicação de duas barras críticas, aumentando ainda mais a margem de acerto do índice.

Feitas as simplificações, os coeficientes de refração e reflexão da onda de tensão  $c_{ij}$  e  $d_{ij}$  são estimados respectivamente pelas equações 3.4 e 3.5 (apêndice B).

$$c_{i1} = \frac{2R_i}{Z_i + R_i} \quad \text{e} \quad c_{i2} = \frac{R_i - Z_i}{Z_i + R_i} \quad \text{para } i > 1 \quad (3.4)$$

$$d_{i1} = \frac{2Z_{pi}}{Z_i + Z_{pi}} \quad \text{e} \quad d_{i2} = \frac{Z_{pi} - Z_i}{Z_i + Z_{pi}} \quad \text{para qualquer } i \quad (3.5)$$

$$\text{onde } Z_{pi} = Z_k // Z_l // Z_m \quad \text{para } k, l, m \text{ diferentes de } i \quad (3.6)$$

$$c_{11} = 0 \quad \text{e} \quad c_{12} = -1 \quad \text{fonte ideal} \quad (3.7)$$

Na equação 3.5,  $Z_{pi}$  representa o equivalente visto por cada uma das impedâncias ( $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  e  $Z_4$ ), conforme equação 3.6. A fonte é considerada um curto-circuito, ou seja, a onda de tensão que chega na fonte é totalmente refletida e sua refração é zero

(equação 3.7). A tabela 3.23 apresenta as matrizes C e D com os respectivos coeficientes para a figura 3.12.

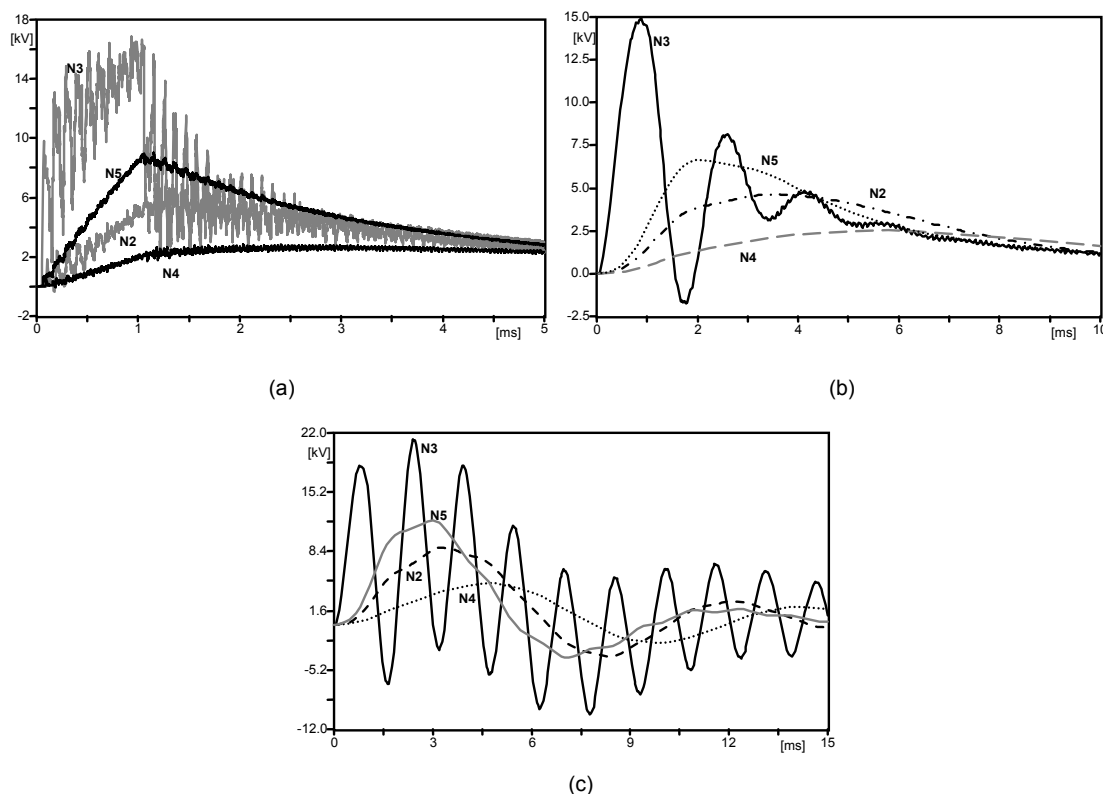


Figura 3.13. Sobretensões geradas nos pontos N2, N3, N4 e N5 do circuito da figura 3.12 quando são consideradas as situações: (a) os capacitores instalados e as reatâncias são desprezadas; (b) são incluídos os bancos de capacitores; (c) situação (b) com a consideração também das reatâncias.

Tabela 3.23. Coeficientes de reflexão e refração do circuito da figura 3.12.

Matriz C	1 (R <sub>FR</sub> )	2 (R <sub>FL</sub> )	Matriz D	1 (R <sub>FR</sub> )	2 (R <sub>FL</sub> )
<b>N0</b>	0	-1	<b>Z1</b>	d <sub>11</sub>	d <sub>12</sub>
<b>N2</b>	C <sub>21</sub>	C <sub>22</sub>	<b>Z2</b>	d <sub>21</sub>	d <sub>22</sub>
<b>N3</b>	C <sub>31</sub>	C <sub>32</sub>	<b>Z3</b>	d <sub>31</sub>	d <sub>32</sub>
<b>N4</b>	C <sub>41</sub>	C <sub>42</sub>	<b>Z4</b>	d <sub>41</sub>	d <sub>42</sub>

### iii. Modelagem de Equipamentos

A partir deste passo caracterizam-se dois tipos de análises distintas: chaveamento do primeiro banco e do segundo banco. Em ambas, o efeito da dispersão entre os contatos do disjuntor é considerado e os limites do pára-raios representado.

- Análise 1 – 1º Banco

Tem como principal meta a avaliação das **sobretensões** causadas pelo chaveamento de um **único banco** alocado em uma barra. Modela-se o sistema de **forma macro**,

porém detalhadamente. Isto significa que são representadas, para a simulação, de duas a três barras vizinhas àquela em que acontece o chaveamento, abrangendo-se transformadores, linhas adjacentes, fontes equivalentes, capacitores, pára-raios, etc.

- Análise 2 – 2º Banco

Tem como objetivo avaliar as **sobrecorrentes** causadas pelo chaveamento de um **segundo banco**. Representa-se o sistema de **forma micro** detalhadamente. É modelada a subestação onde se encontra o capacitor analisado, incluindo pára-raios, disjuntores, motores, geradores, LTCs, compensadores, etc. As barras e ramos adjacentes à subestação são substituídos por um equivalente de Thévenin.

iv. Energização e Desenergização

Adota-se o instante do chaveamento efetuado no pico de tensão de uma das fases para simular, assim, o pior caso de transitórios eletromagnéticos. Para este objetivo, na desenergização, considera-se que haja *restrike* ao ser feita a manobra. Isto significa que existe um fluxo de corrente em certo período de tempo após o comando de desligamento. Este reacendimento se caracteriza pela incapacidade do disjuntor de suportar determinada tensão entre seus terminais.

Adotando o modelo de circuito adequado para cada análise (passo iii), são realizadas simulações no ATPDraw e, através de arquivos de saída ou gráficos, determinam-se as sobretensões e as sobrecorrentes que resultam do chaveamento do capacitor. São feitos cálculos destas grandezas no capacitor manobrado, na carga, na barra adjacente e em equipamentos sensíveis próximos. Também é computada a energia absorvida pelos pára-raios no momento da manobra do capacitor.

Os **modelos adotados** nas simulações são descritos no item B.4 do apêndice B.

v. SC e ST Adequadas?

As sobretensões (ST) e as sobrecorrentes (SC) devem ser inferiores à máxima suportada pelos equipamentos próximos aos locais onde são realizados os cálculos das grandezas. Além desta avaliação, deve-se verificar se o pára-raios suporta a energia produzida no chaveamento, examinando se há risco deste dispositivo queimar ou abrir o circuito. Deve-se observar se a manobra não causará alteração no funcionamento normal de equipamentos sensíveis ou se ela os depreciará.

Tais limites dependem dos equipamentos instalados e do número de manobras realizadas por ano. A figura 3.14 apresenta as sobretensões e sobrecorrentes permitidas e o tempo de ocorrência em segundos em função do número de manobras.

Para exemplificar, na tabela 3.24 estão indicados os limites de ST, SC e energia para 400 manobras por ano, retirados de [Freire 01a].

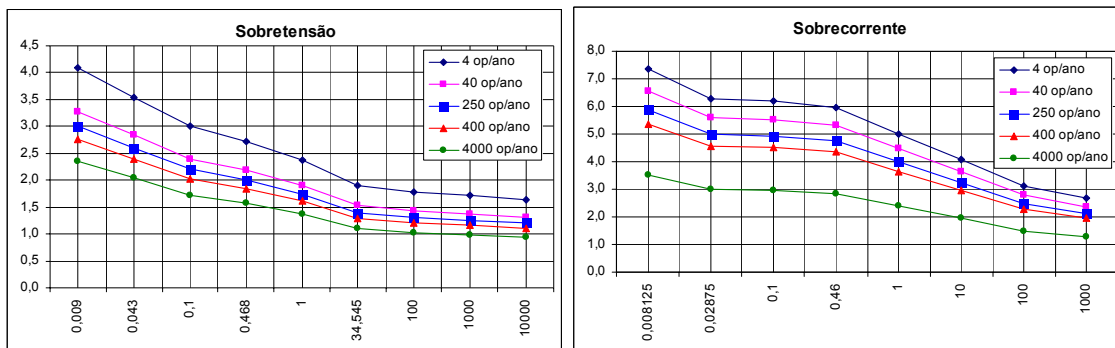


Figura 3.14. Sobretensões e sobrecorrentes em função do número de manobras e do tempo de ocorrência em segundos [Freire 01a].

Tabela 3.24. Limites de sobretensão e sobrecorrente para 400 manobras por ano.

Sobretensão		Sobrecorrente	
Pico	Duração Máxima	Pico	Duração Máxima
2,77 pu	10 ms	5,37 pu	10 ms
2,40 pu	40 ms	4,57 pu	30 ms
2,00 pu	100 ms	4,52 pu	100 ms
1,85 pu	470 ms	4,35 pu	460 ms
1,60 pu	1 s	3,66 pu	1 s
1,30 pu	34 s	2,97 pu	10 s

vi. Alteração do Plano

Caso alguma restrição não seja respeitada, devem ser feitas alterações no plano de expansão sugerido. O procedimento indica as modificações recomendadas através de diferentes opções:

- (a) Alteração do número de capacitores, sem mudar o montante de potência reativa alocado na barra. Por exemplo, em vez de 4 capacitores de 1,2 Mvar, adotar 2 capacitores de 2,4 Mvar ou um de 1,2 Mvar e outro de 3,6 Mvar. Diferentes condições de carga (leve, média e pesada) são consideradas nas simulações.
- (b) Seleção de uma ou mais barras para ter sua compensação reativa modificada ou eliminada. Para escolher estas barras é utilizada a classificação das barras críticas encontradas no passo ii. O capacitor alocado na primeira barra da lista (a mais crítica) deve ser deslocado para a última da classificação. Tal rearranjo de compensação reativa não pode desrespeitar os limites de tensão e o fator de potência de cada barra.

(c) Substituição do capacitor inicialmente proposto por outra alternativa.

vii. Alteração do Chaveamento

Outra alternativa muito utilizada para se alterar o plano é a adoção de um chaveamento controlado ou de um resistor ou reator de pré-inserção para diminuir as sobretensões e sobrecorrentes causadas pela manobra.

Esta opção é bastante eficiente, porém é necessário analisar a relação custo/benefício em comparação com a alteração do passo vi.

### 3.3.3. Aplicação do Procedimento Proposto

A validação do procedimento proposto envolveu a realização de várias simulações (programa ATPDraw) sendo uma delas apresentada neste texto. O objetivo deste item é demonstrar todos os passos do procedimento para melhor esclarecê-lo. A rede elétrica com 14 barras mostrada na figura 3.15 é a mesma já utilizada para analisar a estabilidade de tensão cujos dados são aqui reescritos (tabela 3.25) para facilitar a compreensão dos passos.

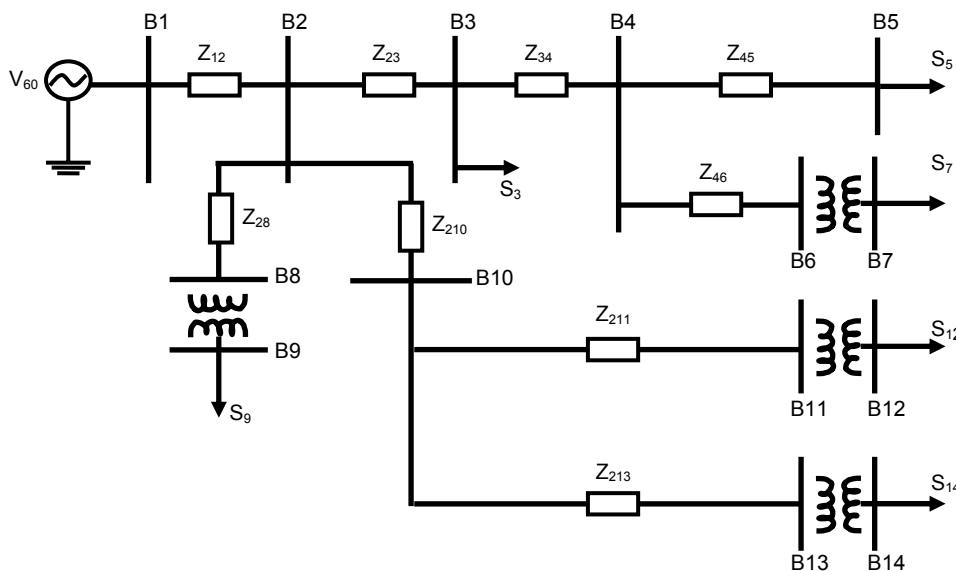


Figura 3.15. Sistema elétrico exemplo de 14 barras da região Sudeste do Brasil.

### Passo i – Compensação Sugerida

A tabela 3.25 apresenta os níveis de tensão das barras, a carga instalada (potência ativa e reativa) e na coluna CR é indicada a compensação reativa sugerida pelo plano de expansão para se atingir um fator de potência de 0,95. A última coluna da tabela 3.25 mostra qual é o fator de potência sem alocação dos capacitores sugeridos para as barras.

Tabela 3.25. Dados do sistema elétrico exemplo.

Barra	Tensão	P (MW)	Q (Mvar)	CR (Mvar)	FP sem CR
B3	138 kV	56,0	42,0	-	0,80
B5	138 kV	23,1	19,1	-	0,77
B7	13,8 kV	11,2	9,9	6,2	0,75
B9	13,8 kV	4,6	2,0	0,5	0,92
B12	13,8 kV	35,0	35,7	24,2	0,70
B14	13,8 kV	12,5	21,6	17,5	0,50

A tabela 3.26 exhibe os valores de potência ativa e reativa (P, Q) para as situações de carga leve, média e pesada para cada barra. Também é mostrada a compensação reativa sugerida pelo plano de expansão para cada nível de carga (CR Leve, CR Média e CR Pesada), indicando qual é o montante e a quantidade de capacitores em paralelo a serem instalados. Por exemplo, para a barra B12 em carga pesada, são propostos dois capacitores: um de 16,8 Mvar e outro de 8,4 Mvar.

Tabela 3.26. Dados dos níveis de carga (leve, média e pesada) e a CR sugerida.

Barra	P Leve (MW)	Q Leve (Mvar)	CR Leve (Mvar)	P Média (MW)	Q Média (Mvar)	CR Média (Mvar)	P Pesada (MW)	Q Pesada (Mvar)	CR Pesada (Mvar)
B3	19,0	14,0	-	37,0	28,0	-	56,0	42,0	-
B5	7,7	6,4	-	15,4	12,7	-	23,1	19,1	-
B7	3,7	3,3	-	7,5	6,6	1 de 7,2	11,2	9,9	1 de 7,2
B9	1,5	0,7	-	3,1	1,3	1 de 1,2	4,6	2,0	1 de 1,2
B12	11,7	11,9	-	23,3	23,8	1 de 16,8	35,0	35,7	1 de 16,8 e 1 de 8,4
B14	4,2	7,2	-	8,3	14,4	1 de 12,0	12,5	21,6	1 de 12,0 e 1 de 6,0

### Passo ii – Barras Críticas

Para serem encontrados os índices  $C_{i\ total}$  e, conseqüentemente, as barras críticas, é necessário simplificar (“equivalentar”) o sistema exemplo da figura 3.15. Escolhe-se a barra B2 como o ponto de interseção entre todas as linhas ( $N_1$ ). Sendo assim,  $Z_1$  é igual a  $Z_{12}$ ,  $Z_2$  é a linha equivalente da barra B2 à B6,  $Z_3$  é igual a  $Z_{28}$ ,  $Z_4$  é a linha equivalente de B2 a B11 e  $Z_5$ , de B2 a B13. Os equivalentes citados são os de Thévenin e foram calculados pelo

programa PSS/E [PSS/E 01]. As cargas do circuito simplificado são compostas pelas partes resistivas de  $S_7$ ,  $S_9$ ,  $S_{12}$  e  $S_{14}$ , chegando-se aos valores de  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  e  $R_5$ . As impedâncias e resistências citadas são representadas na figura 3.16.

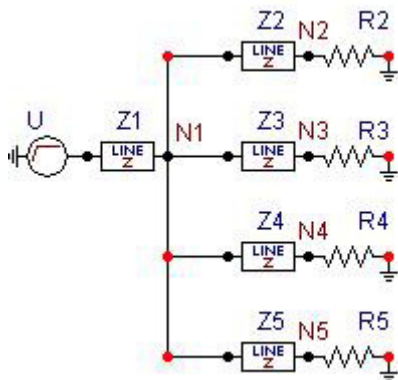


Figura 3.16. Circuito simplificado para se calcular os coeficientes de reflexão e refração das matrizes C e D.

A tabela 3.27 apresenta os dados dos parâmetros do circuito simplificado. As matrizes C e D com os coeficientes de refração e reflexão são mostradas na tabela 3.28.

Tabela 3.27. Dados de linha e carga do circuito simplificado da figura 3.16 para o cálculo dos coeficientes da tabela 3.28.

	Z ( $\Omega$ )	R ( $\Omega$ )
1	11,47	-
2	7,26	9,52
3	0,58	35,04
4	7,27	2,67
5	1,54	3,81

Tabela 3.28. Coeficientes de reflexão e refração do sistema elétrico exemplo.

Matriz C	1 ( $R_{FR}$ )	2 ( $R_{FL}$ )	Matriz D	1 ( $R_{FR}$ )	2 ( $R_{FL}$ )
N0	0	-1,0	Z1	0,06	-0,94
N2	1,14	0,14	Z2	0,1	-0,90
N3	1,97	0,97	Z3	1,26	0,26
N4	0,54	-0,46	Z4	0,10	-0,90
N5	1,43	0,43	Z5	0,47	-0,53

Na tabela 3.29, são mostradas as barras correspondentes aos nós do circuito da figura 3.16 em ordem decrescente com relação aos índices  $C_{i \text{ total}}$ . As duas primeiras barras (B9 e B14) são as mais críticas e apenas para elas são aplicados os próximos passos do procedimento.

Tabela 3.29. Classificação das barras pelos índices  $C_{i\ total}$ .

Ordem	Nó	Barra	$C_{i\ total}$
1	N3	B9	0,294
2	N5	B14	0,262
3	N2	B7	0,230
4	N4	B12	0,129

O ganho na diminuição do número de simulações não é muito elevado devido à reduzida dimensão do sistema exemplo (figura 3.15). Entretanto, para redes elétricas maiores, com mais de 10 barras com compensação sugerida, tal ganho torna-se significativo.

Vale comentar que os procedimentos para desenergização de capacitores são similares àqueles aqui mostrados. Limites relativos à energia absorvida pelos pára-raios durante a manobra podem ser introduzidos no procedimento, via programa de cálculo de transitórios, caso seja de interesse do planejador.

Passo iii – Modelagem de Equipamentos: Análise 1

Para a análise 1, a carga considerada é a média (P e Q Médio da tabela 3.26). Para a carga leve não é efetuado este passo, pois não é sugerido nenhum capacitor.

Modela-se a vizinhança das barras B9 e B14 de forma detalhada. Para ambas, faz-se o equivalente das barras B2 a B7. Logo, a rede elétrica utilizada para a simulação no ATPDraw se torna a da figura 3.17, sendo  $QC_{eq}$  o equivalente da parte capacitiva e  $S_{eq}$  da carga de B2 a B7.

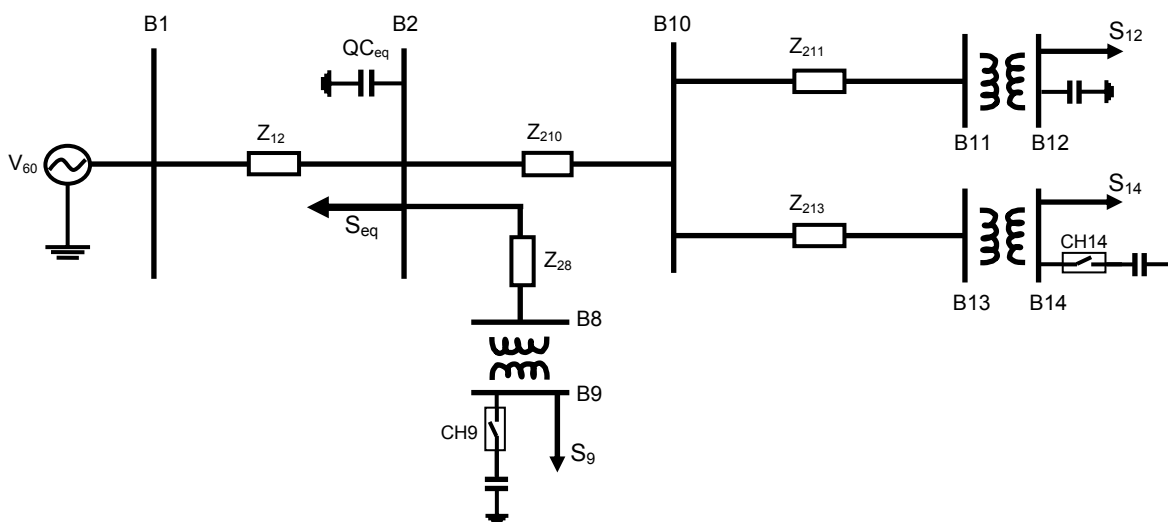


Figura 3.17. Rede elétrica equivalente modelada para simular no ATPDraw a análise 1 para as barras B9 e B14.

**Passo iii – Modelagem de Equipamentos: Análise 2**

Para a análise 2, a carga adotada é a pesada (P e Q Pesada da tabela 3.26) porque apenas para este nível de carga há capacitores em paralelo.

Das barras mais críticas apenas B14 tem capacitores em paralelo, portanto, modela-se detalhadamente somente a subestação de B14. As outras barras do sistema elétrico são reduzidas a um equivalente, restando somente B13 e B14. Na figura 3.18,  $V_{th}$  e  $Z_{th}$  representam a tensão e a impedância de Thévenin que correspondem à fonte e à linha equivalente da rede elétrica da figura 3.15.  $S_{14}$  é a carga pesada de B14 (tabela 3.26),  $Z_1$  e  $Z_2$  são as resistências e reatâncias do barramento da subestação,  $Q_{C1}$  e  $Q_{C2}$  são iguais a 12 Mvar e 6 Mvar, respectivamente, e CH14 é o disjuntor que conecta o segundo capacitor ( $Q_{C2}$ ).

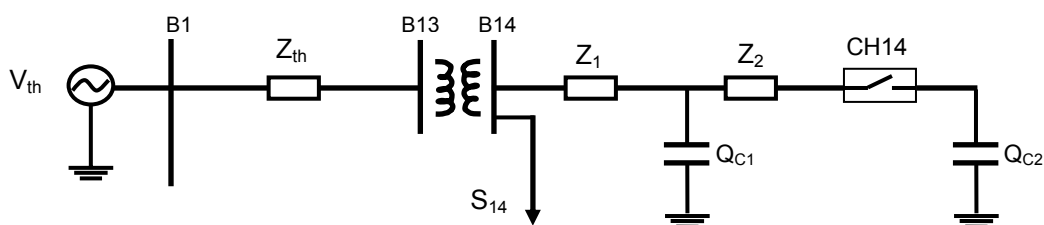


Figura 3.18. Rede elétrica equivalente modelada para simular no ATPDraw a análise 2 para B14.

**Passo iv – Energização (Análise 1)**

Escolheu-se chaveamento em 20 ms, instante próximo ao pico de tensão da fase C. A figura 3.19 apresenta o transitório eletromagnético causado pelo chaveamento do capacitor da barra B9 (1,2 Mvar) e da B14 (12 Mvar). As sobretensões máximas são 1,90 pu e 1,86 pu, respectivamente. Observa-se maior oscilação no primeiro caso, o que faz o transitório durar um pouco mais 430 ms contra 400 ms no segundo caso. No entanto, tais sobretensões diminuem rapidamente, ficando dentro dos limites mostrados na tabela 3.24.

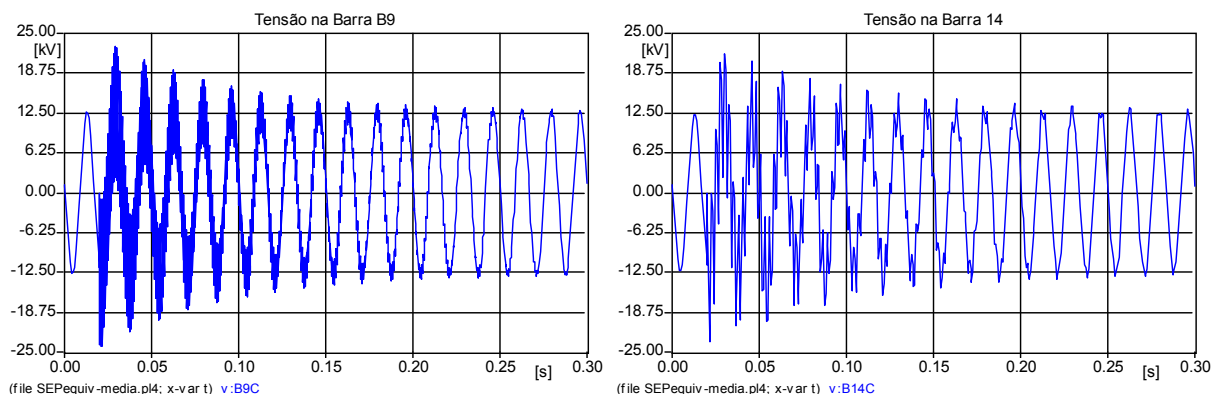


Figura 3.19. Transitórios eletromagnéticos causados pela manobra dos bancos das barras B9 e B14, respectivamente.

Embora não ilustrados, ao se energizar um banco de 12 Mvar em B14, a sobrecorrente alcança 6,42 pu e, após 100 ms, ainda possui o valor de 2,62 pu, abaixo do limite de 4,52 pu (tabela 3.24). Ao se energizar uma CR de 1,2 Mvar em B9, a sobrecorrente chega a 18,85 pu mantendo-se, durante 29 ms, acima de 11,98 pu valor maior que o limite (4,57 pu) para 400 manobras por ano apontado na tabela 3.24.

### Passo iv – Energização (Análise 2)

Uma vez mais, foi feito o chaveamento em 20 ms, instante próximo ao pico de tensão da fase C. A figura 3.20 apresenta o transitório eletromagnético causado pelo chaveamento do segundo capacitor da barra B14 (6 Mvar) que está em paralelo com um capacitor de 12 Mvar. As sobrecorrentes máximas são 7,74 pu e 12,22 pu para o primeiro e segundo bancos. Observam-se grandes oscilações para ambos os casos, fazendo o transitório durar cerca de 1 s.

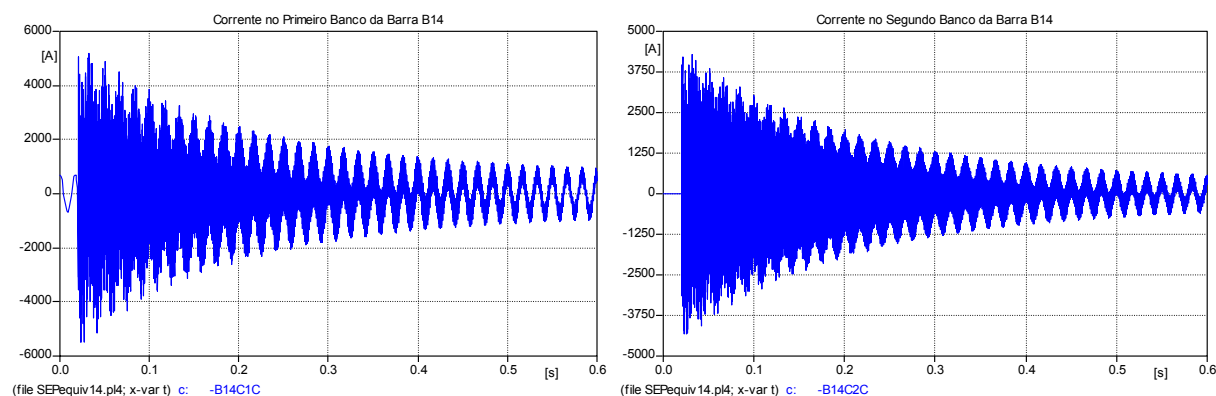


Figura 3.20. Transitórios eletromagnéticos causados pela manobra do segundo banco da barra B14.

A sobrecorrente do primeiro banco se mantém acima de 5,37 pu durante 8 ms (6,26 pu) que é o limite máximo permitido para 400 manobras por ano (tabela 3.24). O mesmo ocorre para o segundo banco que atinge 11,15 pu após estes 8 ms.

A sobretensão chega a 1,59 pu para o primeiro capacitor e 1,78 pu para o segundo. Estes valores diminuem rapidamente, estando assim, dentro dos limites permitidos (tabela 3.24).

O chaveamento na barra B14 confirma que a maior sobretensão é encontrada na energização de um único banco e a sobrecorrente mais elevada, na manobra do segundo banco.

### Passo v – ST e SC Adequadas?

Como se verifica pelos resultados obtidos no passo iv, os limites de sobrecorrente na energização dos capacitores em paralelo em B14 e na manobra do único banco em B9 são desrespeitados. Vale destacar que a violação da restrição de corrente no caso da barra B9 (energização de um único capacitor) ocorre porque há elevada oscilação causada pela configuração do local – linha curta de 1 km chegando à carga – e pelo pouco amortecimento – carga pequena de 5 MVA. Conseqüentemente, é necessário alterar o plano de expansão para ambas as barras.

### Passo vi – Alteração do Plano

Na **barra B9**, não há possibilidade de utilizar dois capacitores menores de 0,6 Mvar, porque 1,2 Mvar é o montante mínimo encontrado no mercado para este nível de tensão. Existem três opções como solução: (a) aumentar para 2,4 Mvar; (b) realocar 1,2 Mvar em outra barra; (c) substituir o capacitor por outra alternativa.

A opção (a) leva a uma sobretensão de 1,88 pu e a uma sobrecorrente de 13,42 pu, melhorando a situação inicial, porém SC se mantém maior que 12 pu durante 8 ms o que não é permitido (tabela 3.24). Outra desvantagem desta opção é que o fator de potência ficaria em 0,94 capacitivo, sendo que antes era quase unitário.

Para a opção (b), escolhem-se duas barras candidatas para a realocação de 1,2 Mvar. A primeira, B8, é selecionada para minimizar o fluxo de potência reativa no sistema. Neste caso, a sobretensão é de 1,54 pu, bem melhor que na situação original. Entretanto a sobrecorrente aumenta para 20,83 pu e, apesar de haver maior amortecimento do transitório, ainda se sustenta acima de 11,79 pu durante 8 ms, violando a restrição de 5,37 pu (tabela 3.24). Além disso, é observada uma sobrecorrente em B2 de 5,31 pu a qual, embora esteja dentro do limite, não ocorria anteriormente.

A outra candidata é a **barra B12** que possui menor índice crítico ( $C_{i \text{ total}}$ ). Feita a alteração, o montante da compensação reativa de B12 muda de 16,8 Mvar para **18 Mvar**. Os valores atingidos de sobretensão e sobrecorrente são 1,79 pu e 4,99 pu respectivamente, ambos dentro dos limites (tabela 3.24). Tais valores podem ser observados no transitório gerado pela manobra deste banco de capacitor exibido na figura 3.21. A opção sugerida como modificação para a barra B9 está adequada.

Para a alteração da compensação reativa da **barra B14**, existem duas possibilidades: (a) deslocar parte do montante do primeiro capacitor para o segundo; (b) realocar 6 Mvar em outra barra, eliminando a manobra de bancos em paralelo.

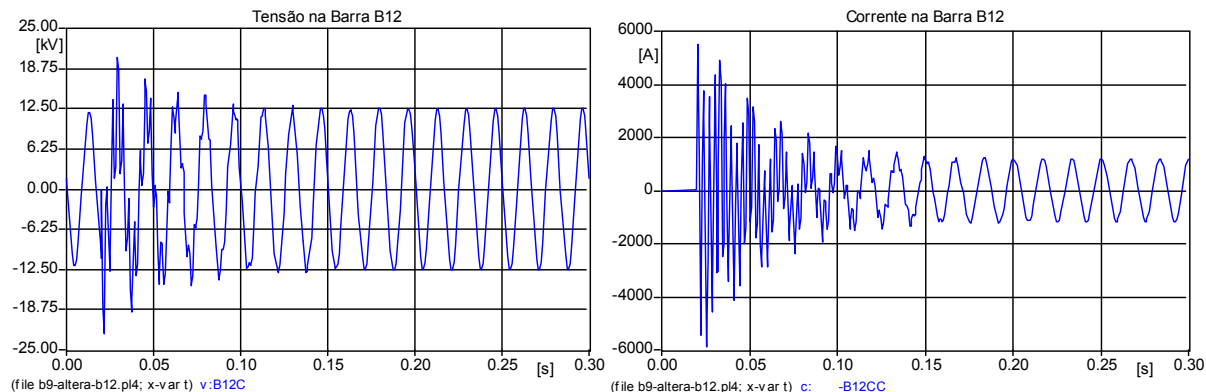


Figura 3.21. Transitórios eletromagnéticos causados pela manobra do banco da barra B12 com a adição de 1,2 Mvar de B9.

Em geral, quanto maior o montante do capacitor menor é a sobrecorrente, logo, na alternativa (a) de B14, opta-se por aumentar a compensação reativa para dois bancos de 14,4 Mvar e 8,4 Mvar (4,8 Mvar adicional), obtendo-se assim um fator de potência de 0,995 capacitivo. Nesta nova configuração, atinge-se uma sobretensão de 1,60 pu no chaveamento do primeiro capacitor e 1,78 pu na manobra do segundo. Apesar de maiores que a situação original, as sobretensões estão dentro dos limites permitidos (tabela 3.24). As sobrecorrentes máximas são 7,44 pu e 10,20 pu para o primeiro e segundo bancos. Embora estes valores sejam menores que os anteriores, as sobrecorrentes alcançadas após 8 ms, 6,82 pu e 9,31 pu, são maiores que a recomendada – 5,37 pu para 400 manobras por ano (tabela 3.24) – impossibilitando a escolha desta alternativa.

A barra candidata para a opção (b) é a B12 que possui menor índice crítico ( $C_{i\ total}$ ). A nova compensação reativa para esta barra fica 18 Mvar em carga média mais 14,4 Mvar em carga pesada, sendo 6 Mvar deste último montante relativo à B14. Para confirmar se esta alternativa é viável é preciso fazer a análise 2 para B12. Os resultados obtidos respectivamente para o primeiro e segundo banco são: 1,63 pu e 1,67 pu de sobretensão e 7,08 pu e 7,55 pu de sobrecorrente. Estes dois últimos valores podem ser observados no transitório da figura 3.22. Apesar de menores, os valores de SC em 8 ms ficam acima de 5,37 pu (tabela 3.24), chegando a 5,69 pu e 6,65 pu. Portanto, tem-se que fazer o passo vii para se encontrar uma solução.

### Passo vii – Alteração do Chaveamento

Antes de iniciar este passo, vale observar que os resistores e reatores de pré-inserção escolhidos têm valores teóricos, sendo necessário, posteriormente, selecionar o equipamento mais próximo ao utilizado nas simulações a seguir.

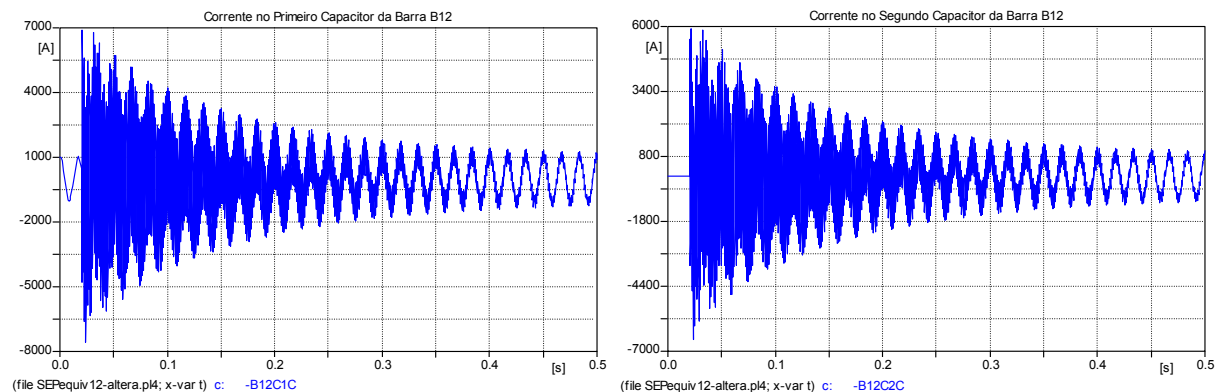


Figura 3.22. Transitórios eletromagnéticos causados pela manobra do segundo banco da barra B12 com a adição de 6 Mvar de B14.

A figura 3.23 apresenta os transitórios eletromagnéticos associados a quatro tipos de chaveamentos diferentes: (a) apenas com um disjuntor comum; (b) com a instalação de um reator de pré-inserção; (c) com o acréscimo de um resistor de pré-inserção; (d) utilizando um chaveamento controlado.

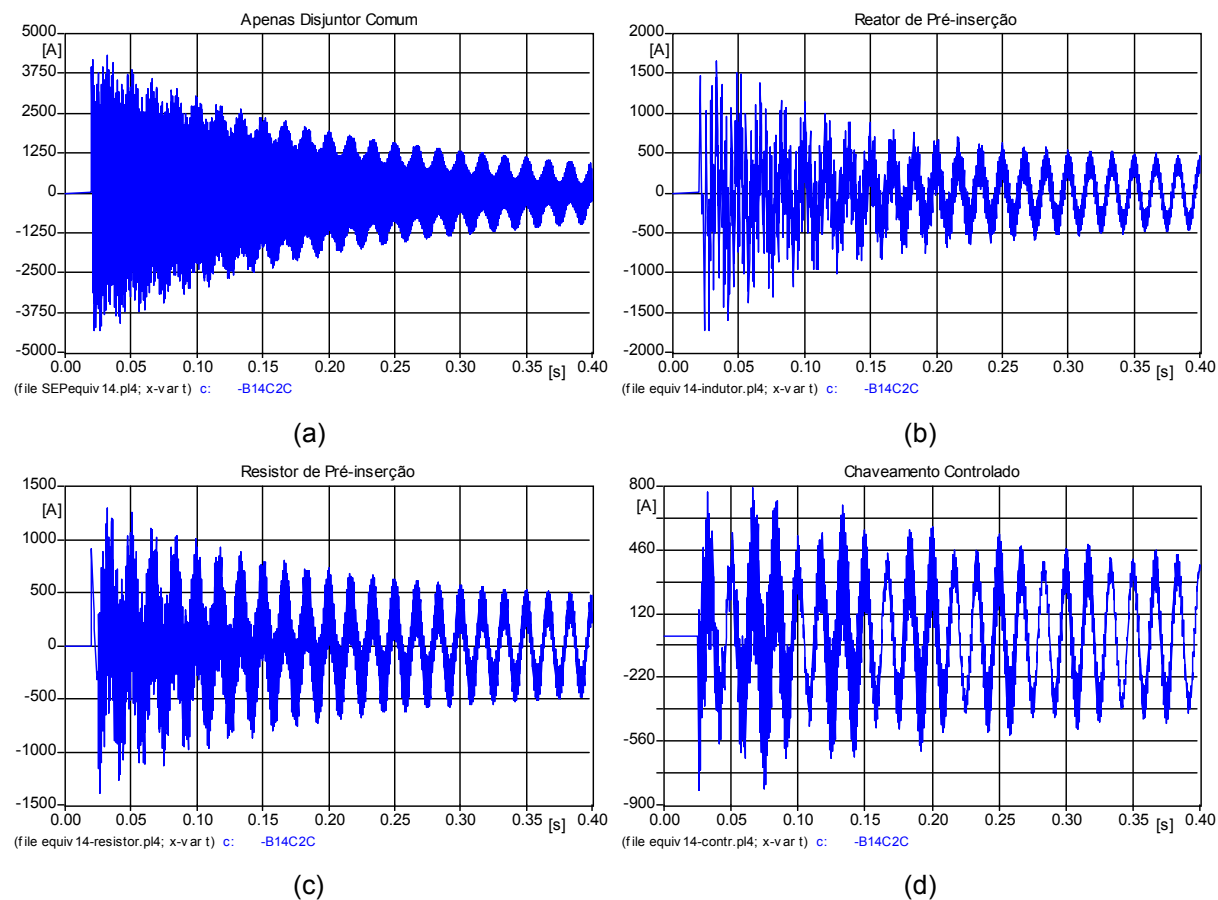


Figura 3.23. Corrente do segundo banco da barra B14 com a utilização de diferentes equipamentos de manobra: (a) disjuntor comum; (b) reator de pré-inserção; (c) resistor de pré-inserção; (d) chaveamento controlado.

Percebe-se, pela figura 3.23(a), que a maior oscilação está presente no caso em que o capacitor é chaveado por um disjuntor comum.

Acrescentando um reator de pré-inserção de 2,65 mH com resistência de  $0,1 \Omega$  na manobra do segundo capacitor (6 Mvar) da barra B14, tem-se o transitório eletromagnético mostrado na figura 3.23(b). O chaveamento do circuito auxiliar ocorre em 20 ms próximo ao pico de tensão da fase C e o circuito principal é energizado 7 ms depois. Os resultados obtidos respectivamente para o primeiro e segundo bancos são: 1,50 pu e 1,56 pu de sobretensão e 3,94 pu e 4,82 pu de sobrecorrente, valores menores que os máximos tolerados (tabela 3.24).

Ao se adicionar um resistor de pré-inserção na manobra do segundo capacitor da barra B14, tem-se o transitório exibido na figura 3.23(c). Opta-se por um resistor de  $10 \Omega$  com chaveamento do circuito auxiliar em 20 ms e a energização do circuito principal 5 ms depois. Os resultados atingidos respectivamente para o primeiro e segundo bancos são: 1,16 pu e 1,22 pu de sobretensão e 2,65 pu e 3,86 pu de sobrecorrente, valores abaixo do limite (tabela 3.24).

Instalando um chaveamento controlado para manobrar o segundo capacitor da barra B14, tem-se o transitório eletromagnético mostrado na figura 3.23(d). As fases são energizadas próximas ao ponto em que a tensão passa por zero, nos instantes 14,1 ms, 19,6 ms e 25,2 ms. Os resultados alcançados respectivamente para o primeiro e segundo bancos são: 1,14 pu e 1,17 pu de sobretensão e 1,87 pu e 2,31 pu de sobrecorrente, valores menores que os máximos admitidos (tabela 3.24).

Pelos resultados obtidos e pela figura 3.23, observa-se que, para mitigar a sobrecorrente, em ordem de eficiência, estão os dispositivos: chaveamento controlado, resistor de pré-inserção e reator de pré-inserção. Resta ao planejador optar por aquele que traz a melhor relação de custo/benefício. Caso o reator de pré-inserção seja escolhido, não se pode esquecer de avaliar se o mesmo não introduz ressonâncias indesejadas no sistema elétrico. Vale salientar que tais dispositivos poderiam chegar a menores sobrecorrentes e oscilações, fazendo-se um estudo detalhado de seus parâmetros para se atingir um ponto ótimo. Entretanto, tal ponto deve sempre ser avaliado segundo sua viabilidade prática e a relação custo/benefício a ela associada.

A **etapa seguinte** consiste em voltar ao passo i do procedimento e desempenhar as análises para a próxima barra da ordem de classificação da tabela 3.29 que é a B7. É feita a análise 1 para B7, obtendo-se o equivalente das barras B1, B2 e de B8 a B14 ( $QC_{eq}$ ,  $S_{eq}$  e  $S_{eq3}$ ), conforme mostrado a seguir na figura 3.24. Ao se energizar o banco de 7,2 Mvar, é obtida uma sobretensão de 1,91 pu que reduz para 1,51 pu em 9 ms, estando dentro dos

limites (tabela 3.24). A sobrecorrente medida é de 7,29 pu que amortece rapidamente para 4,90 pu em 8 ms, mantendo as restrições respeitadas. Como o chaveamento na barra B7 não viola nenhum limite, a avaliação de transitórios eletromagnéticos chega ao seu final.

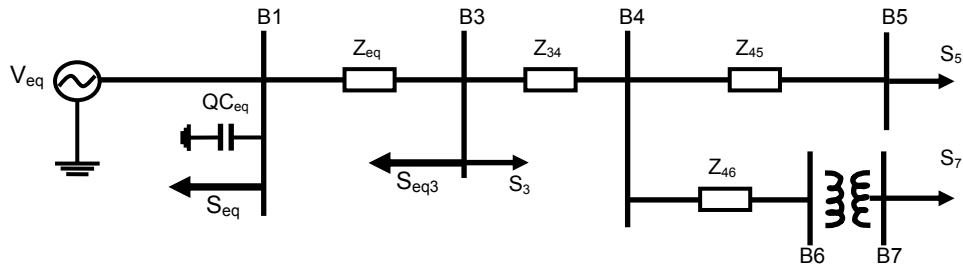


Figura 3.24. Rede elétrica equivalente modelada para simulação no ATPDraw da análise 1 para B7.

A tabela 3.30 apresenta os resultados finais já com todas as alterações realizadas. Só não há mudança na barra B7 e, na B14, é indicado o uso de algum tipo de chaveamento diferenciado. Transfere-se 1,2 Mvar da barra B9 para a B12, ação que eleva o FP e a tensão da última e abaixa os da primeira. Verifica-se que o FP de B9 fica abaixo de 0,95 (limite mínimo), considerado aceitável por dois motivos: a carga conectada em B9 é muito pequena comparada as outras do sistema (5 MVA, um terço da segunda menor); sua potência reativa é suprida pela barra vizinha B12, não demandando um maior fluxo de potência reativa vindo da rede básica. As tensões se mantêm dentro dos limites em todas as barras.

Tabela 3.30. Tensões e fatores de potência nas barras com a compensação sugerida inicialmente e com a modificada.

Barra	CR Inicial	FP	Tensão	CR Modificada – Carga Pesada	FP	Tensão (pu)
B7	7,2 Mvar	0,972	0,9767	1 de 7,2 Mvar	0,972	0,9764
B9	1,2 Mvar	0,985	0,9938	0 Mvar	0,917	0,9921
B12	25,2 Mvar	0,958	0,9680	1 de 18,0 Mvar e 1 de 8,4 Mvar	0,966	0,9703
B14	18,0 Mvar	0,961	0,9873	1 de 12,0 Mvar e 1 de 6,0 Mvar	0,961	0,9874

## 3.4. Harmônicos

### 3.4.1. Questão a ser Solucionada

Como já salientado, a utilização de eletrônica de potência em grande escala tem prejudicado a qualidade de energia no que diz respeito à inserção de harmônicos no SEP. Com a instalação de capacitores, as distorções harmônicas podem ser amplificadas, deformando ainda mais a forma de onda senoidal. Para se evitar o problema é proposto um procedimento para avaliação do nível de harmônicos existente no sistema elétrico e, se

necessário, indica-se um método para mitigar as distorções harmônicas, alterando o plano de expansão sugerido inicialmente.

### 3.4.2. Procedimento Proposto

O procedimento proposto para a avaliação técnica da compensação reativa relacionada aos harmônicos, basicamente, verifica se distorções harmônicas de tensão e de corrente individuais (DHI) e totais (DHT) e também o fator de potência estão todos dentro dos limites permitidos. Caso sejam violadas estas restrições, efetuam-se alterações na CR baseadas no cálculo da impedância própria da barra de forma que a frequência de ressonância do sistema fique afastada da ordem do harmônico predominante existente na rede.

O *software* utilizado nas simulações e nas análises expostas neste item é o Harmzw [Harmzw 02]. Destaca-se a metodologia inovadora indicada para a alteração da compensação reativa. A seguir são apresentados os passos do procedimento proposto e o seu fluxograma (figura 3.25).

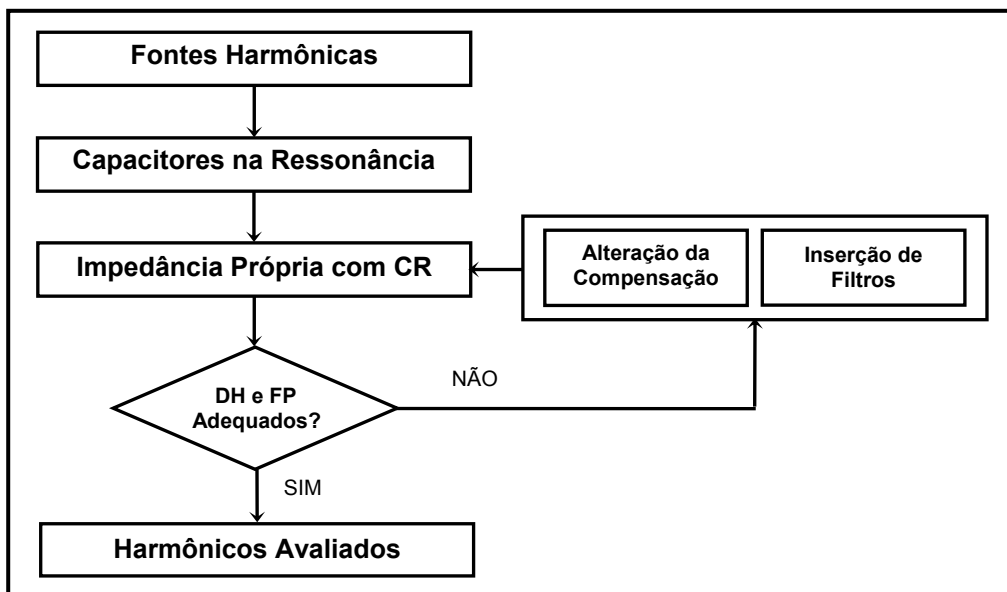


Figura 3.25. Fluxograma da avaliação técnica da CR com relação aos harmônicos.

#### i. Fonte Harmônica

Nesta primeira etapa são identificadas as fontes harmônicas presentes no sistema, apontando sua localização, amplitude e ordem.

ii. Capacitores na Ressonância

Neste passo são indicados os capacitores para cada barra individualmente os quais provocam ressonância nas frequências das harmônicas existentes na rede elétrica, não se considerando a compensação sugerida *apenas* para a barra em análise. Para se encontrar o montante dos capacitores precisa-se conhecer a impedância própria ( $Z_P$ ) de cada barra candidata à alocação. Caso a barra não tenha nenhuma CR instalada previamente, a impedância própria é denominada  $Z_0$  que é o paralelo entre a impedância de Thévenin ( $Z_{th}$ ) e a da carga ( $Z_L$ ). O cálculo de  $Z_0$  ( $Z_{th} // Z_L$ ) é executado pelo programa Harmzw. A figura 3.26(a) mostra  $Z_0$  em um circuito simplificado que contém uma fonte de tensão harmônica ( $V_h$ ),  $Z_{th}$  e  $Z_L$ .

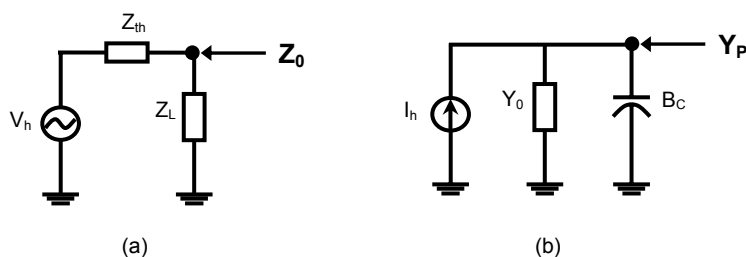


Figura 3.26. Representação de  $Z_0$  e  $Y_p$  em um circuito simplificado.

Para facilitar as análises e melhor visualizar o processo de identificação dos valores indesejados para capacitores, opta-se por trabalhar com admitâncias. A partir deste ponto adota-se  $Y_0$  (inverso de  $Z_0$ ). A figura 3.26(b) mostra o circuito simplificado equivalente em que se tem a fonte de corrente harmônica ( $I_h$ ) alimentando a admitância  $Y_0$  e uma susceptância em paralelo que representa a CR sugerida. A admitância própria da barra ou simplesmente admitância equivalente,  $Y_p$ , é igual à soma de  $Y_0$  e  $B_C$  (equação 3.8).

$$Y_p = Y_0 + B_C = \frac{1}{Z_P} \tag{3.8}$$

Na situação de maior ressonância do sistema, quando a impedância própria da barra é máxima,  $Y_p$  é mínimo e é denominado  $Y_m$ . Tal admitância mínima ( $Y_m$ ) equivale à parte real de  $Y_0$ . A parte imaginária de  $Y_0$  é igual à susceptância do capacitor que provoca a maior ressonância ( $B_{cm}$ ), como se observa pelo gráfico da figura 3.27. É importante destacar que todos os valores devem estar na frequência da fonte harmônica presente na rede.

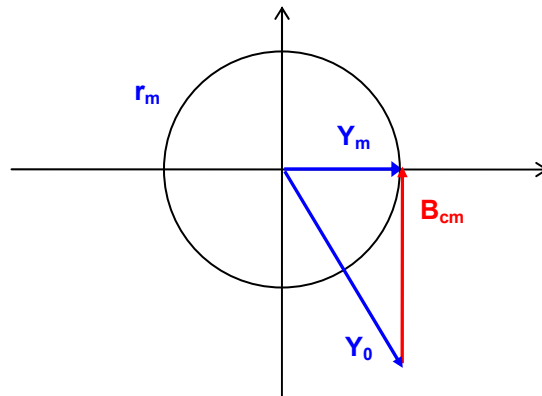


Figura 3.27. Representação do lugar geométrico de  $Y_0$ ,  $Y_m$  e  $B_{cm}$ .

O termo  $r_m$  é chamado de raio mínimo e representa o lugar geométrico que atinge o menor módulo de  $Y_p$ . Os raios  $r_i$ , lugares geométricos, são calculados pela equação 3.9, onde  $i$  está relacionado à admitância  $Y_i$ . Por exemplo,  $r_0$  é o lugar geométrico de  $Y_0$ . Tais raios  $r_i$  têm valores proporcionais à admitância mínima  $Y_m$ . Pela equação 3.9, nota-se que  $r_m$  é igual a 1.

$$r_i = \frac{|Y_i|}{|Y_m|} \quad (3.9)$$

Determina-se a potência reativa gerada pelo capacitor indesejado (equação 3.10), dividindo o módulo de  $B_{cm}$  pela ordem da fonte harmônica analisada ( $h$ ). Tal divisão é realizada para se obter o valor de Mvar em 60 Hz. Esta relação decorre da aplicação da equação 3.11.

$$Q_{cm} = \frac{B_{cm}}{h} \quad (3.10)$$

$$Q_C = \frac{1}{X_{C60}} \Rightarrow X_{C60} = hX_{C0} \quad (3.11)$$

### iii. Impedância Própria com a Compensação Reativa (CR)

Nesta etapa é instalada nas barras a compensação reativa selecionada pela otimização ou pela alteração do plano. A seguir é calculada a impedância própria de cada barra ( $Z_p$ ) onde é alocada a CR. A  $Z_p$  é definida pelo paralelo entre a impedância de Thévenin, a da carga e a reatância do capacitor instalado ( $Z_{th} // Z_L // X_C$ ).

Como no passo ii, a análise dos resultados é efetuada através da admitância  $Y_p$  (equação 3.8). Na figura 3.28, é dado um exemplo de capacitor ( $B_C$ ) que, somado a  $Y_0$ , torna-se  $Y_p$  cujo módulo é maior que  $Y_m$ , por conseguinte  $Z_p$  é menor que a impedância própria na ressonância ( $Z_m$ ).

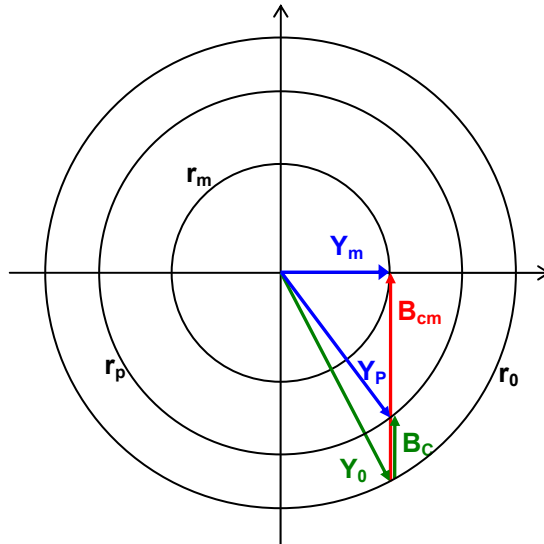


Figura 3.28. Exemplo de um capacitor cujo  $Z_p$  é menor que a impedância própria na ressonância ( $Z_m$ ).

#### iv. DHI, DHT e FP Adequados?

Neste passo, é verificado se as distorções harmônicas individuais (DHI, equação 2.31 e 3.12) e totais (DHT, equação 2.28 e 3.13) de corrente e de tensão estão dentro dos limites e se o fator de potência (FP) está adequado (apêndice D). O FP é representado pelas equações 3.14 e 3.15.

$$DHI_V = \frac{V_h}{V_1} \quad (3.12)$$

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (3.13)$$

$$FP = k_h \cos \phi_1 \quad (3.14)$$

$$k_h = \frac{1}{\sqrt{(1 + DHT_I^2)(1 + DHT_V^2)}} \quad (3.15)$$

Obtém-se do Harmzw a distorção harmônica existente ( $DH_{atual}$ ) com a compensação reativa sugerida. Caso a  $DH_{atual}$  esteja acima dos limites estabelecidos pelo ONS (apêndice D) deve-se fazer o passo v. Caso contrário, finaliza-se o processo de avaliação técnica.

v. Alteração da Compensação

Esta etapa tem como objetivo detectar qual é o capacitor que, ao ser alocado, não ultrapassa a distorção harmônica limite ( $DH_{lim}$ ). Para isto, inicialmente, estima-se a admitância correspondente à  $DH_{lim}$  ( $Y_{lim}$ ) cujo resultado depende de um fator  $\alpha_{lim}$  que multiplica seu módulo. Tal fator é obtido calculando-se quanto se precisa aumentar da admitância atual ( $Y_{atual}$ ) para se obter  $Y_{lim}$ . O  $\alpha_{lim}$  é igual à razão entre a distorção harmônica atual ( $DH_{atual}$ ) e a limite (equação 3.16). A razão das distorções é inversamente proporcional ao módulo das respectivas admitâncias (equação 3.17).

$$\alpha_{lim} = \frac{DH_{atual}}{DH_{lim}} \tag{3.16}$$

$$\alpha_{lim} = \frac{|Y_{lim}|}{|Y_{atual}|} \tag{3.17}$$

Os capacitores considerados são representados por apenas susceptâncias, sendo desprezadas suas resistências, como mostrado pela figura 3.28. Desta forma, ao se alterar a compensação reativa instalada na barra, há variação somente da parte imaginária de  $Y_{atual}$ . Portanto, é necessário achar um fator  $\gamma$  – calculado pela equação 3.19 – que, ao multiplicar a susceptância de  $Y_{atual}$ , faz com que a mesma fique  $\alpha_{lim}$  vezes maior (equações 3.18 e 3.19).

$$|Y_{lim}| = \alpha_{lim} |Y_{atual}| = |G_{atual} + j\gamma B_{atual}| \tag{3.18}$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{\alpha_{lim}^2 - \left(\frac{G_{atual}}{Y_{atual}}\right)^2}{\left(\frac{B_{atual}}{Y_{atual}}\right)^2}} \tag{3.19}$$

Para simplificar a explicação do processo dos cálculos dos capacitores, a seguir é exemplificada a situação em que  $Y_{\text{atual}}$  é igual a  $Y_m$ . Para se encontrar a CR que não ultrapasse  $DH_{\text{lim}}$ , é necessário considerar  $\gamma$  positivo e negativo, resultando em duas soluções: um  $Y_{\text{lim}}$  com um capacitor  $B_C$  e seu conjugado  $Y_{\text{lim}}'$  com  $B_{C'}$ , como mostrado na figura 3.29. Isto ocorre porque o raio limite corta a reta dos capacitores em dois pontos existindo dois montantes de Mvar que atendem ao limite desejado. As admitâncias  $Y_{\text{lim}}$  e  $Y_{\text{lim}}'$  têm o mesmo módulo. A susceptância de CR que ultrapassa  $DH_{\text{lim}}$  ( $B_{cm}$ ) é sempre menor que  $B_C$  e maior que  $B_{C'}$ , fato confirmado pela comparação entre as figuras 3.28 e 3.29.

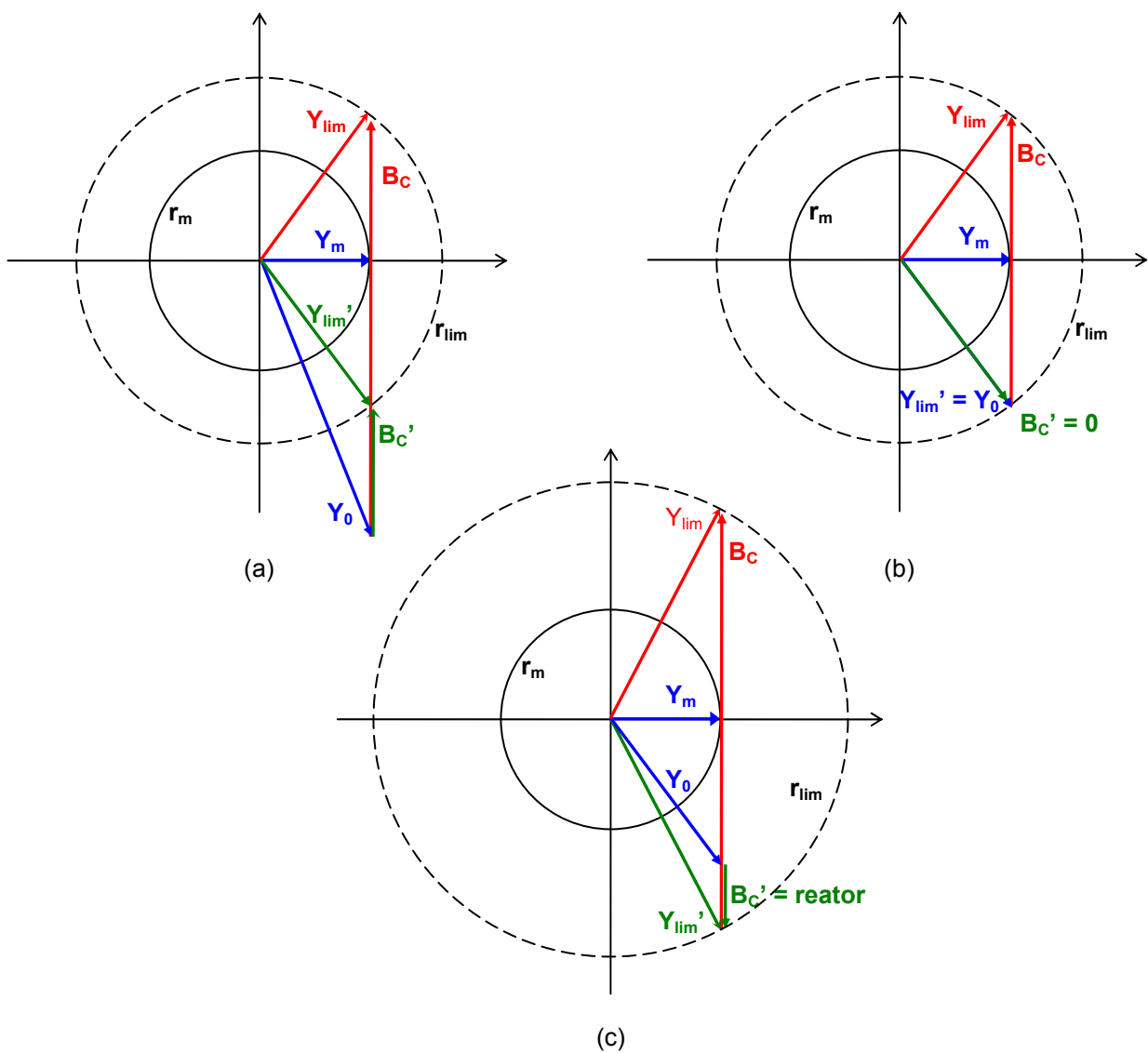


Figura 3.29. Representação de  $Y_{\text{lim}}$ ,  $Y_{\text{lim}}'$ ,  $B_C$  e  $B_{C'}$  para três situações: (a)  $Y_{\text{lim}} < Y_0$ ; (b)  $Y_{\text{lim}} = Y_0$ ; (c)  $Y_{\text{lim}} > Y_0$ .

A ocorrência mais comum, exemplificada pela figura 3.29(a), é quando o módulo de  $Y_{lim}$  é menor que  $Y_0$ , que corresponde às duas soluções citadas anteriormente. Na situação particular em que o módulo de  $Y_{lim}$  é igual a  $Y_0$  uma das soluções é  $B_C$ , que é o dobro de  $B_{cm}$ , e a outra, 0 Mvar (nenhuma compensação reativa instalada), conforme figura 3.29(b). Já quando o módulo de  $Y_{lim}$  é maior que  $Y_0$ , só há uma solução, pois, a partir deste ponto, a segunda solução seria alocar um capacitor “negativo”, ou seja, um reator (figura 3.29(c)). A alocação de reatores não está sendo considerada no estudo atual.

A solução encontrada,  $B_C$  ou  $B_C'$ , para qualquer um dos casos apresentados na figura 3.29 é calculada analiticamente através da equação 3.20, sendo a potência reativa injetada na barra determinada pela equação 3.21.

$$B_C = Y_{lim} - Y_0 = B_{lim} - B_0 \quad (3.20)$$

$$Q_C = \frac{B_C}{h} \quad (3.21)$$

Além de DH, os limites de fator de potência e tensão devem continuar sendo respeitados. Tais restrições são representadas por retas como exemplificado na figura 3.30. As susceptâncias encontradas pela equação 3.20 têm que estar entre as retas mais centrais. No exemplo da figura 3.30, apenas  $B_C'$  atende às restrições de fator de potência e tensão.

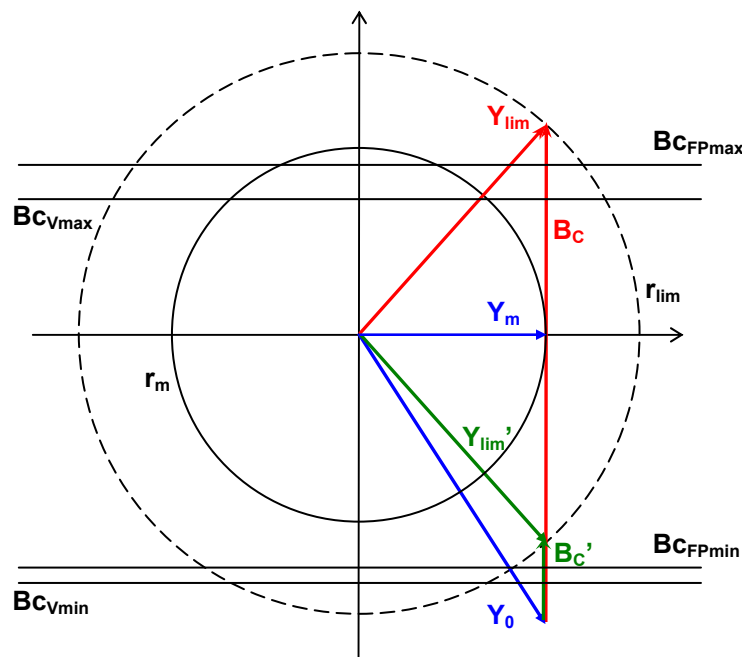


Figura 3.30. Representação dos limites de fator de potência e tensão.



Existe outra opção para se atingir distorções harmônicas dentro dos limites. Tal alternativa é adotada caso o método citado não consiga obter resultados satisfatórios devido a limites de fator de potência e tensão muito restritivos ou ao grande número de freqüências harmônicas inseridas na rede o que torna o problema muito complexo. Como pode ser observado na figura 3.32, com um mesmo capacitor alocado na barra em análise ( $B_c$ ) pode se atingir a circunferência limite da distorção harmônica ( $r_{lim}$ ), modificando-se a admitância própria desta barra sem CR instalada ( $Y_0$ ). Isto é possível com a alteração da configuração do sistema elétrico ( $Z_{th}$ ) que, para este trabalho, significa mudar a localização e o montante dos capacitores de outras barras. Esta alternativa é mais indicada quando se podem modificar várias CR, pois, caso contrário, a influência não é tão significativa quanto àquela apresentada anteriormente. É importante destacar que a escala da figura 3.32 foi ampliada, para melhor visualização de tal alteração.

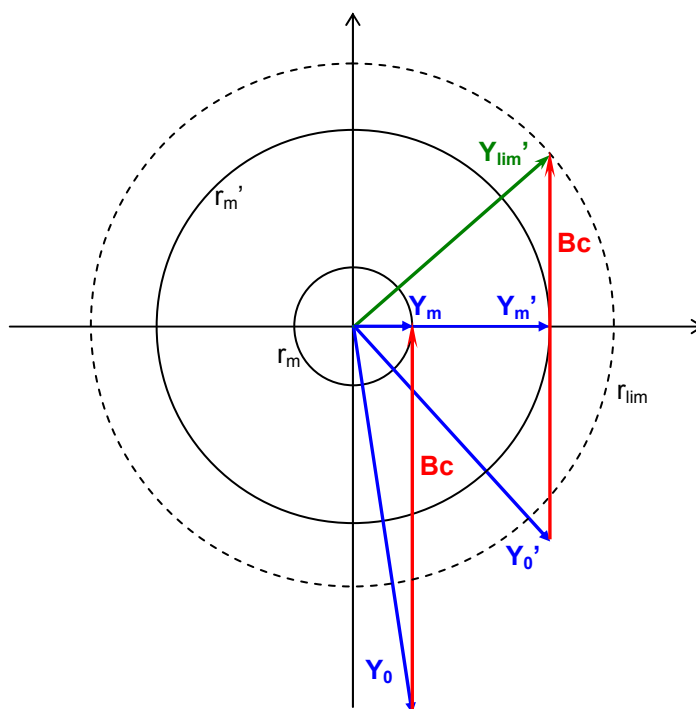


Figura 3.32. Alteração da admitância de uma barra ( $Y_0$ ) ao se modificar o capacitor de outra.

Nota-se que, na situação inicial da figura 3.32 ( $Y_0$ ),  $B_c$  é igual à susceptância que gera a maior ressonância. Com a mudança nos parâmetros da rede tem-se uma nova admitância própria ( $Y_0'$ ). Com esta nova configuração, o mesmo capacitor adotado inicialmente não ultrapassa  $DH_{lim}$  representada pela circunferência de raio  $r_{lim}$ . Outra

observação importante nesta segunda situação é que a admitância mínima ( $Y_m'$ ) aumenta, o que significa que a impedância própria na frequência de ressonância diminui, por conseguinte, houve uma redução da distorção harmônica nesta frequência.

vi. Inserção de Filtros

Caso o passo v não consiga alcançar os resultados adequados de mitigação da distorção harmônica, uma opção eficiente, porém cara, que resta para solucionar o problema é a instalação de filtros passivos ou ativos na barra em que tenha ocorrido a violação dos limites. No item 2.2.4 são apontadas as vantagens de cada filtro e suas principais características. Esta alternativa também é adequada porque mantém os montantes de  $Mvar$  no local selecionado pela otimização os quais são os mais apropriados sob o ponto de vista dos objetivos básicos da compensação reativa: corrigir o fator de potência de deslocamento ( $\cos \phi$ ) e manter as tensões dentro dos limites.

### **3.4.3. Aplicação do Procedimento Proposto**

Para validar o procedimento proposto no item anterior foram realizadas várias simulações, utilizando-se o programa Harmzw e uma delas é apresentada neste texto. O objetivo deste item é demonstrar todos os passos do procedimento para melhor esclarecimento do mesmo.

A rede elétrica de 14 barras da figura 3.33 é adotada, à semelhança dos procedimentos anteriores. A escolha das fontes harmônicas presentes no sistema elétrico é feita de maneira a possibilitar a apresentação de toda a estratégia, visando obter, com os capacitores apontados pela otimização, ressonâncias na frequência dos harmônicos adotados. Assim sendo, as distorções ficam elevadas, requerendo alterações no plano de expansão.

A rede possui dois grandes consumidores, sendo que um deles insere harmônicas no sistema (S3), prejudicando as outras quatro cargas. Os dados de entrada do plano de expansão (P, Q e FP da carga e a compensação sugerida), já utilizados na aplicação dos procedimentos anteriores, são mostrados na tabela 3.31.

A seguir é aplicada a avaliação técnica da compensação reativa com relação aos harmônicos para o sistema elétrico exemplo, adotando-se os capacitores indicados pela otimização no plano de expansão.

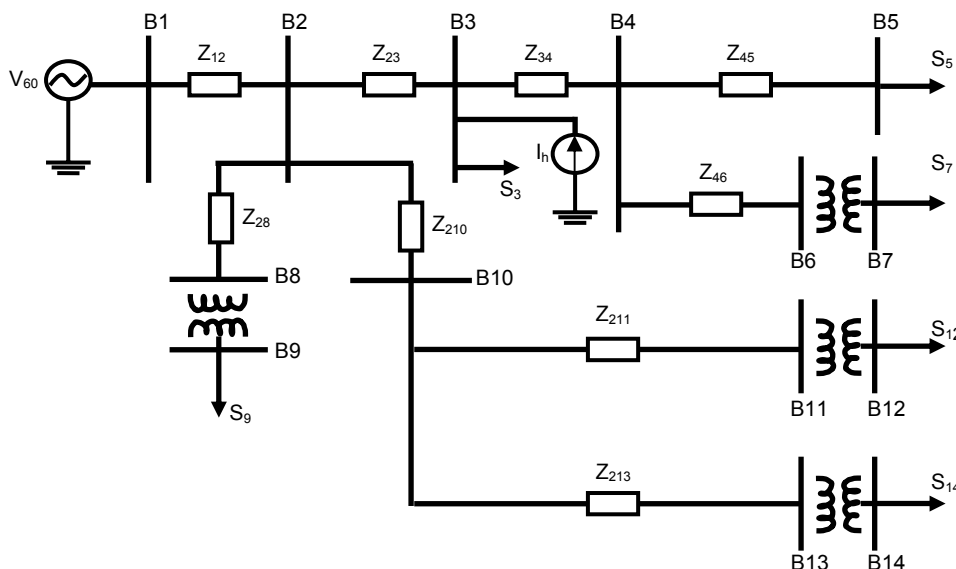


Figura 3.33. Sistema elétrico exemplo de 14 barras da região Sudeste do Brasil.

Tabela 3.31. Dados do sistema elétrico exemplo.

Barra	Tensão	P (MW)	Q (Mvar)	CR (Mvar)	FP sem CR
3	138 kV	56,0	42,0	-	0,80
5	138 kV	23,1	19,1	-	0,77
7	13,8 kV	11,2	9,9	6,2	0,75
9	13,8 kV	4,6	2,0	0,5	0,92
12	13,8 kV	35,0	35,7	24,2	0,70
14	13,8 kV	12,5	21,6	17,5	0,50

### Passo i – Fonte Harmônica

Na barra B3 existe uma grande indústria que insere no sistema correntes harmônicas de 5ª, 6ª e 9ª ordem (dados teóricos). Apesar das ordens 6ª e 9ª não serem encontradas normalmente nos sistemas elétricos, a utilização das mesmas tem como objetivo apontar harmônicas que provocam altas ressonâncias com a instalação dos capacitores sugeridos para o sistema exemplo, possibilitando o detalhamento do procedimento proposto.

### Passo ii – Capacitores na Ressonância

O montante da compensação reativa *shunt* cuja ressonância ocorre na frequência das fontes harmônicas ( $Q_{cm}$ ) é obtido através do cálculo da admitância própria da barra de carga ( $Y_0$ ). Tal cálculo é realizado considerando-se que não haja, nesta barra, nenhum capacitor instalado. Nas outras, adota-se a CR sugerida pelo plano de expansão.

Como existem três fontes, deve-se identificar os valores de capacitância causadores de ressonância que estão próximos dos valores indicados pela otimização. Para a ressonância ser na 5ª harmônica, é preciso serem alocados 21,9 Mvar na barra B12; para ocorrer na 6ª, é necessário instalarem-se 17,2 Mvar em B14; e para que seja na 9ª, deve haver 7,0 Mvar em B7. A figura 3.34 mostra a variação da impedância própria das barras B7, B12 e B14 com a frequência, considerando-se que estejam instalados os capacitores que provocam ressonância no sistema.

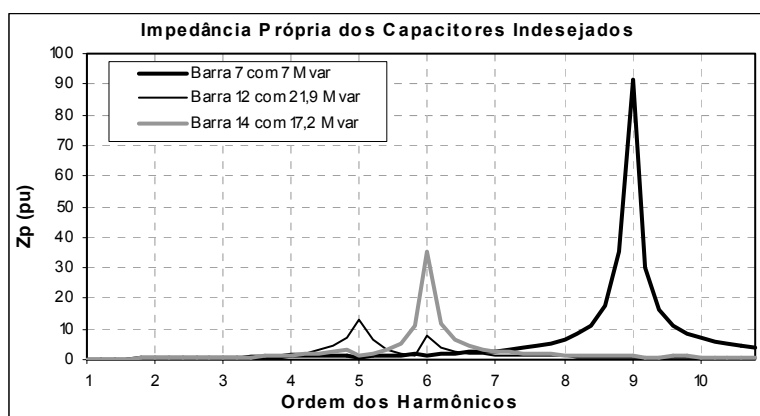


Figura 3.34. Impedância própria das barras B7, B12 e B14 com capacitores que provocam ressonância em, respectivamente, 540, 300 e 360 Hz.

A ressonância relacionada à compensação reativa instalada em B9 ocorre em 564 Hz, não amplificando de forma significativa sua distorção harmônica. Caso fossem instalados 6,9 Mvar nesta barra a ressonância ocorreria na 9ª harmônica, porém este montante é muito maior que o necessário, não sendo necessário avaliá-lo.

Se os capacitores indicados pelo plano de expansão fossem diferentes daqueles apresentados na tabela 3.31, poderiam ser escolhidos valores de potência reativa como: 27,9 Mvar na barra B7 para a 5ª harmônica e 19,5 Mvar em B9 para a 6ª. Isto não é feito porque estes últimos montantes estão muito longe dos mostrados na tabela 3.31.

### Passo iii – Impedância Própria com a Compensação Reativa

Constata-se, pela figura 3.35, que, na ressonância, a impedância própria das barras B7, B12 e B14 com a CR sugerida está muito próxima dos valores de pico de  $Z_p$  com os capacitores indesejados (figura 3.34). Pela figura 3.35, verifica-se que, para os dados da tabela 3.31, apenas B14 tem a frequência de ressonância no valor exato da fonte harmônica de 6ª ordem. Além disso, B7 e B12 ficam próximas da 9ª e 5ª harmônicas com 576 e 288 Hz, respectivamente. A barra B12 ainda tem um pequeno pico em 360 Hz (6ª ordem).

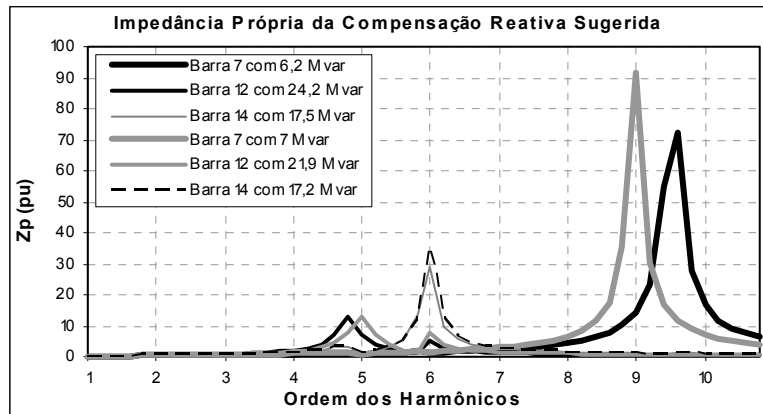


Figura 3.35.  $Z_p$  de B7, B12 e B14 com a CR selecionada pela otimização e as CR da figura 3.34.

Passo iv – DHI, DHT e FP Adequados?

Na figura 3.36, observa-se que DH é proporcional à impedância própria da barra, como esperado. A barra B7 tem sua maior distorção harmônica individual de tensão ( $DH_{IV}$  – equação 3.12) na 9ª ordem, B12 na 5ª e B14 na 6ª. A barra B9 obtém DH muito pequenas nas três ordens. Alguns valores de  $DH_{IV}$  ultrapassam os limites impostos pelo ONS (1,5% para harmônicas ímpares e 0,6% para pares): em B12 os de 5ª e 6ª ordens (1,55% e 0,88%), em B14 o de 6ª ordem (3,05%) e em B7 o de 9ª ordem (2,45%). Na barra B12, apesar da  $Z_p$  ter um pico menor em 360 Hz (figura 3.35), nesta frequência também há violação da distorção. Os valores máximos atingidos de  $DH_{II}$  não chegam a 0,035%.

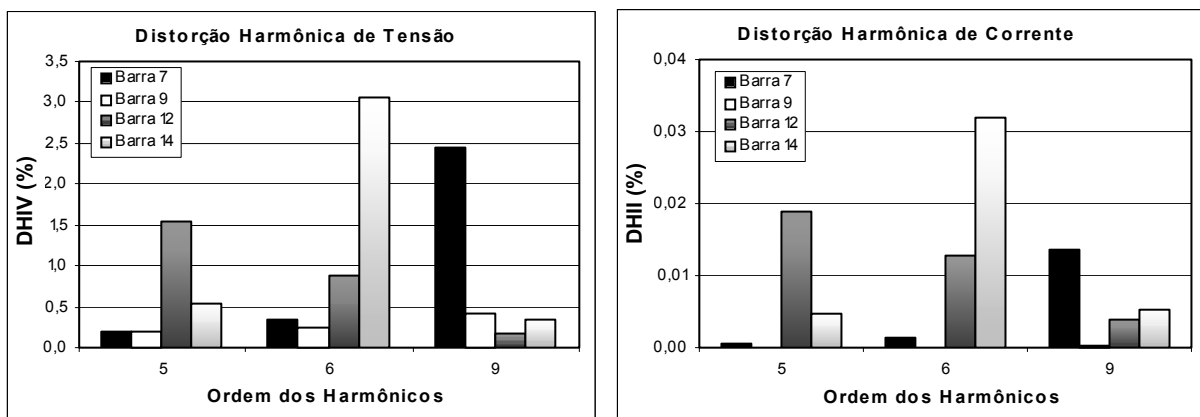


Figura 3.36. Distorção Harmônica Individual de Tensão e de Corrente das barras B7, B9, B12 e B14 com a compensação reativa escolhida pela otimização.

As distorções harmônicas totais de tensão ( $DHT_V$  – equação 3.13) e de corrente ( $DHT_I$ ) de cada barra, as  $DH_{IV}$  e as  $DHT_V$  globais (sistema inteiro) e seus respectivos limites

são expostos na tabela 3.32. Constata-se que os limites violados, em destaque na tabela 3.32, são:  $DHT_V$  de B14,  $DHT_V$  global e  $DHL_V$  global da 6ª e da 9ª harmônica.

Tabela 3.32. Distorções totais de cada barra e  $DHL_V$  e  $DHT_V$  globais e seus limites.

Barras	$DHT_V$ (%)	$DHT_I$ (%)		$DHL_V$ Global (%)	Limites (%)
<b>B7</b>	2,483	1,38E-02	h = 5	2,467	5,0
<b>B9</b>	0,517	2,05E-04	h = 6	<b>4,528</b>	2,0
<b>B12</b>	1,792	2,30E-02	h = 9	<b>3,380</b>	3,0
<b>B14</b>	<b>3,117</b>	3,28E-02	<b><math>DHT_V</math> Global</b>	<b>7,909</b>	<b>6,0</b>
<b>Limite</b>	<b>3,0</b>				

A tabela 3.33 contém os fatores de potência das barras (FP – equação 3.14) e suas parcelas: fator de potência de deslocamento ( $\cos \phi$ ) e fator de potência harmônico ( $k_h$ ). Sem a presença das distorções de tensão e de corrente, os FP são iguais a 0,95. Com os harmônicos, os FP têm uma queda pouco significativa porque as DH não são muito elevadas. Logo, não é um problema a ser atacado neste caso.

Tabela 3.33. Fatores de potência das barras com a presença de harmônicos.

Barras	CR	$\cos \phi$	$k_h$	FP
<b>B7</b>	6,2 Mvar	0,95	0,999692	0,9497
<b>B9</b>	0,5 Mvar	0,95	0,999987	0,9500
<b>B12</b>	24,2 Mvar	0,95	0,999839	0,9498
<b>B14</b>	17,5 Mvar	0,95	0,999515	0,9495

Como visto pela figura 3.36 e pelas tabelas 3.32 e 3.33, há a necessidade de se alterar o plano de expansão para que as restrições sejam respeitadas.

### Passo v – Alteração da Compensação

Para que a distorção harmônica não viole os limites, deve-se aumentar ou diminuir o montante dos capacitores alocados. Como o fator de potência de deslocamento com a CR sugerida já está no limite mínimo de 0,95, a única alternativa viável é adicionar potência reativa injetada nas barras.

Como existe mais de uma ordem harmônica inserida na rede, têm que ser calculados os valores de  $\alpha_{lim}$  para cada frequência destes harmônicos os quais são apresentados na tabela 3.34. Sabe-se que  $\alpha_{lim}$  representa o fator que a admitância atual ( $Y_{atual}$ ) precisa aumentar para não ultrapassar  $DH_{lim}$ , resultando em  $Y_{lim}$ . Deve-se escolher a restrição mais rígida (figura 3.31 e 3.37(a)), isto é, os maiores  $\alpha_{lim}$  (destacados na tabela 3.34). Para a barra B12, que tem violações na 5ª e 6ª ordens, é indispensável que se selecione o  $\alpha_{lim}$  de

uma destas duas harmônicas. Sendo comparados os dois valores, vê-se que o maior é o da 6ª ordem (1,47). A barra B9 não tem distorções violadas, por este motivo, não aparece na tabela 3.34. Os fatores  $\gamma$  – multiplicadores da parte imaginária de  $Y_{\text{atual}}$  – que são mostrados na tabela 3.34 correspondem aos  $\alpha_{\text{lim}}$  destacados.

Tabela 3.34. Valores de  $r_{\text{lim}}$  para cada barra na 5ª, 6ª e 9ª ordens harmônicas.

Barras	5ª	6ª	9ª	$\gamma$
<b>B7</b>	0,13	0,57	<b>1,63</b>	$\pm 1,646$
<b>B12</b>	1,03	<b>1,47</b>	0,12	$\pm 1,703$
<b>B14</b>	0,36	<b>5,08</b>	0,23	$\pm 8,580$

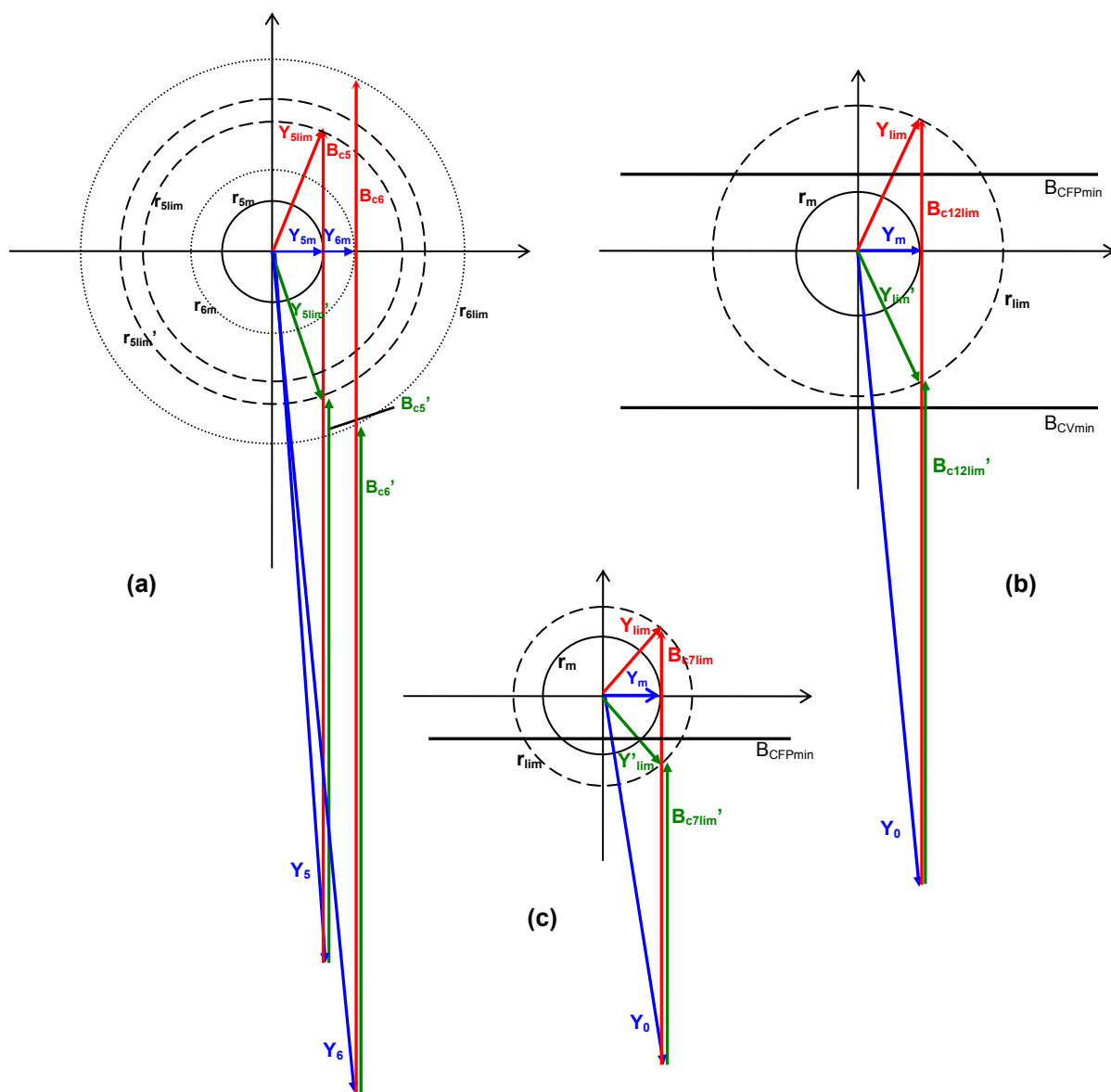


Figura 3.37. Gráficos dos lugares geométricos: (a) susceptâncias de B12 na 5ª e 6ª ordens; (b) representação dos limites para o  $B_c$  da barra B12 e (c) da B7.

A seguir calcula-se a susceptância ( $B_C$ ) que, somada à admitância sem CR ( $Y_0$ ), resulta em  $Y_{lim}$ . A representação gráfica de tais cálculos é mostrada na figura 3.37 que apresenta os lugares geométricos das admitâncias e susceptâncias para B7 e B12. Opta-se por não mostrar o resultado de B14, por seu formato ser semelhante ao da barra B7.

A figura 3.37(a) exhibe a transformação das susceptâncias em 360 Hz (restrição mais rígida) para a de 300 Hz. As admitâncias próprias de B12, sem nenhum capacitor alocado, para a 5ª e 6ª ordens, são representadas por  $Y_5$  e  $Y_6$ , respectivamente. Como já era esperado,  $Y_{5lim}$  e  $Y_{5lim}'$  não pertencem à mesma circunferência.

Na figura 3.37(b) são representados, em forma de susceptâncias, os dois capacitores para a barra B12 ( $B_{C12lim}$  e  $B_{C12lim}'$ ) que não ultrapassam  $DH_{lim}$ . São indicadas as compensações reativas mínimas para atender às restrições de tensão ( $B_{CVmin}$ ) e fator de potência ( $B_{CFPmin}$ ). Observa-se que apenas  $B_{C12lim}$  respeita todos os limites.

Na figura 3.37(c) são mostrados, em forma de susceptâncias, os dois capacitores para B7 ( $B_{C7lim}$  e  $B_{C7lim}'$ ) que não superam a distorção harmônica limite. É apontada a compensação reativa mínima que atende à restrição de fator de potência ( $B_{CFPmin}$ ). A barra B7 sem capacitor já atinge o limite mínimo de tensão de 0,95 pu, não sendo necessário representá-lo no gráfico. Observa-se que  $B_{C7lim}$  é o único que respeita a restrição de FP.

Os fatores de potência e de tensão máximos não são exibidos no gráfico por estarem muito acima da maior CR indicada nas figuras 3.37(b) e 3.37(c).

Dividindo-se  $B_C$ , encontrado pelos cálculos citados anteriormente, pela harmônica obtêm-se os montantes dos capacitores em 60 Hz. Os resultados da nova compensação reativa, dos fatores de potência e das distorções harmônicas são apresentados nas tabelas 3.35 e 3.36 e na figura 3.38 (DHI). Tais resultados mostram que, com a alteração, as distorções diminuem e nenhuma restrição é violada.

Tabela 3.35. Distorções totais de cada barra e  $DHI_v$  e  $DHT_v$  globais e seus limites depois da alteração do plano de expansão.

Barras	$DHT_v$ (%)	$DHT_i$ (%)		$DHI_v$ Global (%)	Limites (%)
<b>B7</b>	1,346	1,01E-02	h = 5	1,181	5,0
<b>B9</b>	0,072	5,15E-05	h = 6	0,972	2,0
<b>B12</b>	0,881	1,16E-01	h = 9	1,356	3,0
<b>B14</b>	0,608	7,35E-03	<b><math>DHT_v</math> Global</b>	<b>2,907</b>	<b>6,0</b>
<b><math>DH_{lim}</math></b>	<b>3,0</b>				

A figura 3.38 mostra que as distorções harmônicas das barras B7 (1,322% na 9ª ordem) e B12 (0,876% na 5ª) diminuem para quase metade e a da B14 (0,583% na 6ª) reduz mais de cinco vezes.

Tabela 3.36. Fatores de potência das barras com a presença de harmônicos depois da alteração do plano de expansão.

Barras	CR	cos $\phi$	$k_h$	FP
<b>B7</b>	<b>8,4 Mvar</b>	0,9912	0,999897	<b>0,9910</b>
<b>B9</b>	<b>1,2 Mvar</b>	0,9852	1,000000	<b>0,9852</b>
<b>B12</b>	<b>26,4 Mvar</b>	0,9665	0,999956	<b>0,9664</b>
<b>B14</b>	<b>20,4 Mvar</b>	0,9954	0,999980	<b>0,9954</b>

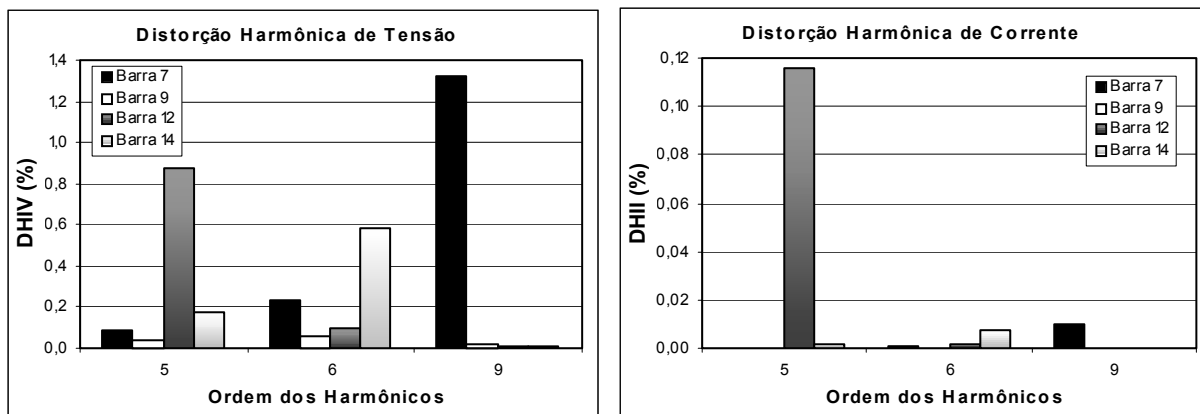


Figura 3.38. Distorção Harmônica Individual de Tensão e de Corrente das barras B7, B9, B12 e B14 com a alteração da compensação reativa indicada pela otimização.

O pico da  $Z_p$  da barra B7 aumenta para 79,57 pu, porém ocorre em 492 Hz, longe da frequência perigosa de 540 Hz, como visto na figura 3.39. Os outros picos da impedância própria das demais barras diminuem. O pico de  $Z_p$  de B12 ocorre em 276 Hz e o de B14 em 336 Hz, frequências diferentes das harmônicas inseridas no sistema, além de serem menores que os anteriores.

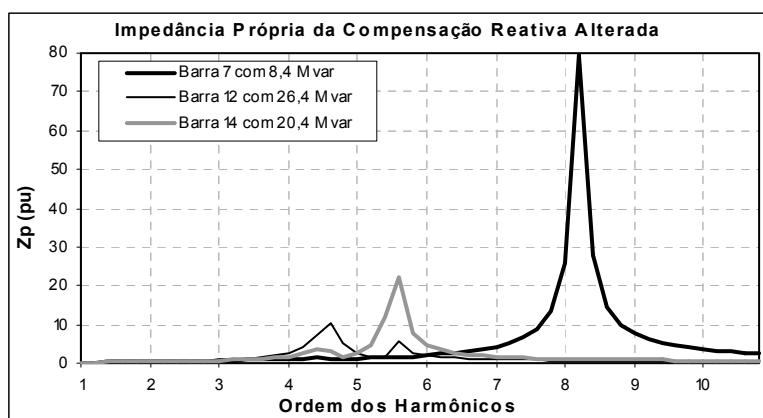


Figura 3.39. Impedância própria das barras B7, B12 e B14 após a alteração da CR sugerida.

A tabela 3.37 apresenta as tensões e fatores de potência nas barras com a compensação sugerida inicialmente e com a modificada. Verifica-se que o nível de tensão se eleva pouco e os fatores de potência melhoram. Isto acontece porque a potência reativa injetada na rede é aumentada.

Tabela 3.37. Tensões e FP das barras com a CR sugerida inicialmente e com a modificada.

Barra	CR	FP	Tensão	CR Modificada	FP	Tensão (pu)
7	6,2 Mvar	0,9497	0,9736	8,4 Mvar	0,9910	0,9796
9	0,5 Mvar	0,9500	0,9918	1,2 Mvar	0,9852	0,9953
12	24,2 Mvar	0,9498	0,9650	26,4 Mvar	0,9664	0,9720
14	17,5 Mvar	0,9495	0,9854	20,4 Mvar	0,9954	0,9928

A compensação reativa da barra B9, apesar de não violar as restrições, é modificada para um valor de capacitor comercial (1,2 Mvar).

Vale observar que nem sempre se obtém uma solução simples para atender aos limites de distorção harmônica. Existem casos em que é preciso achar uma combinação dos Mvar instalados, tornando o problema bem complexo. Se não forem encontrados capacitores que não violem os limites é necessário instalarem filtros nas barras.

### **Análises Finais**

Apesar de se ter uma análise pontual de cada barra, o método proposto neste item mostra-se muito eficiente e preciso, principalmente para sistemas de grande porte cuja influência da mudança da compensação na distorção harmônica de outra barra é menos significativa. Tal precisão é alcançada devido à facilidade de se obter a admitância própria da barra e por sua relação com a DH: o aumento da admitância causa uma redução de mesma razão na distorção harmônica. Para comprovar tal situação é mostrada a figura 3.40 que exemplifica a alteração *apenas* na barra 7 com o objetivo de se atingir *exatamente* 1,5% de  $DH_{I_9}$  na 9ª harmônica. A CR calculada é de 8,223 Mvar.

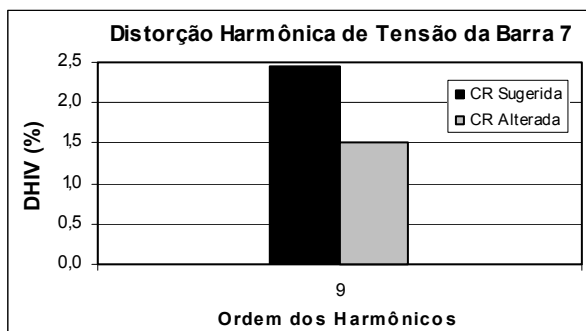


Figura 3.40. Distorção Harmônica de Tensão da barra B7 para a CR sugerida e com alteração.

As compensações reativas da tabela 3.36 não têm a mesma precisão na figura 3.38 porque são modificados os capacitores de todas as barra, variando-se a impedância equivalente do sistema e, conseqüentemente, a admitância própria da barra ( $Y_0$ ), como visto pela figura 3.41. Além disso, há a interferência do arredondamento dos Mvar alocados para se chegar a um valor comercial de capacitor. Devido a estes motivos, às vezes, é necessário fazer um ajuste fino nos resultados. Por exemplo, para B14 o cálculo indica que deveriam ser instalados 20,1 Mvar, porém este montante obteve uma distorção harmônica individual de tensão de 0,631% na 6ª harmônica, ultrapassando o limite que é de 0,6%. Adicionando-se 0,3 Mvar nesta barra, esta violação é eliminada. Também poderiam ser alteradas compensações de outras barras, mas seria necessária maior variação de Mvar.

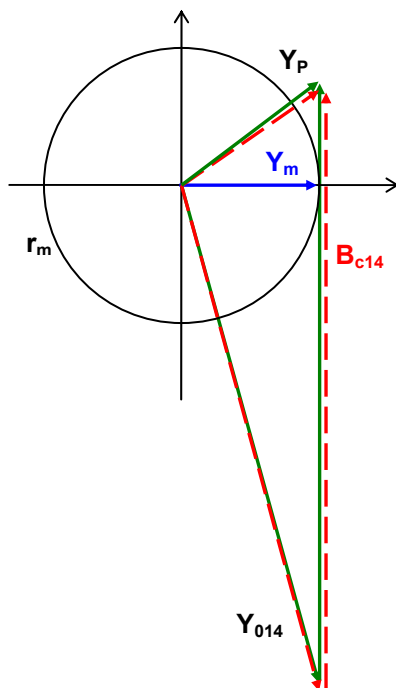


Figura 3.41. Variação da admitância própria de B14 com a mudança nos capacitores de outras barras.

A figura 3.41 mostra a pequena variação obtida na admitância própria de B14 ( $Y_{014}$ ) com a mudança nos capacitores das outras barras. A linha contínua representa a situação em que apenas a compensação reativa de B14 é alterada. Quando modificados os capacitores de todas as barras,  $Y_{014}$  diminui aproximadamente 0,02 pu (linha tracejada), motivo da inexatidão apontada no parágrafo anterior.

Concluindo, a metodologia proposta expõe ao planejador duas informações de extrema importância para melhorar a qualidade de energia na rede: como se alterar a compensação sugerida, minimizando os harmônicos que circulam nas cargas do sistema e

quais são os capacitores impróprios para instalação em cada barra, de acordo com as fontes harmônicas presentes. A metodologia utiliza o cálculo da admitância própria da barra para indicar tais informações.

Os resultados comprovam que, com a alteração do plano de expansão, podem ser obtidas menores distorções harmônicas e a situação do sistema melhora com relação à compensação reativa e ao controle de tensão. Caso isto não seja possível, a alternativa escolhida seria a instalação de filtros ativos ou passivos nas barras com problemas.

### 3.5. Análise dos Resultados dos Procedimentos Individuais

Neste item são comparados os resultados de cada procedimento individual de avaliação técnica para cada aspecto. Adota-se o mesmo sistema elétrico para as três avaliações.

A tabela 3.38 exibe o montante e a localização dos capacitores sugeridos pelos planos de expansão após a realização individual das avaliações técnicas de estabilidade de tensão (CR Est), transitórios eletromagnéticos (CR Tran) e harmônicos (CR Harm). Tais resultados são referentes ao ano 0 com carga pesada, mostrado anteriormente.

Tabela 3.38. Resultados de compensação reativa dos procedimentos individuais.

Barra	CR Est (Mvar)	CR Tran (Mvar)	CR Harm (Mvar)	CR Final Sugerida (Mvar)
B7	6,2	7,2	8,4	<b>8,4</b>
B9	0,5	0,0	1,2	<b>0,0</b>
B12	24,2	26,4	26,4	<b>26,4</b>
B14	17,5	18,0	20,4	<b>20,4</b>
<b>Total</b>	<b>48,4</b>	<b>51,6</b>	<b>56,4</b>	<b>55,2</b>

Para o ano 0 não é necessária a modificação da compensação reativa original com relação à estabilidade de tensão porque a TPC está muito baixa (0,713 pu) e a MET bem elevada (42,5%). A avaliação técnica de transitórios eletromagnéticos indica pequenas alterações para limitar a sobrecorrente na energização dos capacitores as quais chegam a um total de 3,2 Mvar. Na análise de harmônicos a única barra que não apresenta problemas com a distorção harmônica é a B9. Mesmo assim, adota-se para esta barra a compensação reativa mínima de 1,2 Mvar e a diferença total de montante atinge os 8 Mvar.

Uma análise superficial dos resultados aponta a última coluna da tabela 3.38 como sendo a compensação reativa sugerida. Na configuração atual da rede elétrica em estudo (figura 3.3) no ano 0 com carga pesada, quanto maior o montante alocado em B7, B12 e B14 melhor para todas as avaliações técnicas e para o fator de potência que é igual a 0,95

para a coluna CR Est em todas as barras. Somente B9 não pode ter capacitores instalados porque pequenos montantes de compensação reativa nesta barra fazem com que sejam obtidas sobrecorrentes acima da tolerada. Como a carga em B9 é pequena, atinge-se um FP de 0,95 capacitivo com apenas 3,5 Mvar, portanto a única solução é não se instalar CR nesta barra. Os resultados apresentados a seguir confirmam que a “CR Final sugerida” é aprovada em todos os critérios exigidos pela avaliação técnica.

Adotando a “CR Final Sugerida”, com relação à estabilidade de tensão, em B12 (barra crítica) a TPC sobe para 0,725 pu e a MET aumenta para 43,8%, sendo o máximo carregamento de 204,7 MW, um crescimento adicional de 1,8 MW. As restrições de TPC abaixo de 0,90 pu e MET acima de 6% são respeitadas.

Com relação aos transitórios eletromagnéticos, adicionando 2,4 Mvar no segundo capacitor de B14 atinge-se sobretensões de 1,69 pu e 1,77 pu, respectivamente para o primeiro e segundo bancos, as quais estão dentro dos limites aceitáveis. As sobrecorrentes para estes capacitores alcançam 8,14 pu e 9,88 pu inicialmente e após 100 ms caem para 4,94 pu e 6,01 pu. Ambos os valores estão acima dos admitidos (4,52 pu), mostrados na tabela 3.24. Caso seja instalado mais 1,2 Mvar em B14, as sobretensões sobem para 1,73 pu e 1,81 pu, porém se mantêm menores que as restrições impostas. Os picos das sobrecorrentes se tornam iguais a 8,47 pu e 8,95 pu e após 100 ms não caem o suficiente para ficarem abaixo do limite máximo suportável pelos equipamentos (tabela 3.24), tendo valores de 4,83 pu e 5,07 pu. Se a adição de 1,2 Mvar fosse aprovada, seria preciso confirmá-la para os aspectos de estabilidade de tensão e harmônicos. Como isto não acontece, deve-se instalar dispositivos para mitigar estas sobrecorrentes conforme item 3.3.2. O reator de pré-inserção é evitado, pois sua instalação muda a frequência de ressonância da barra, podendo ser necessária a modificação da compensação reativa sugerida. Não levando em consideração a avaliação econômica, opta-se pela instalação do chaveamento controlado por trazer uma redução mais significativa da sobrecorrente. Chega-se então aos seguintes resultados: sobretensão de 1,20 pu para os dois bancos e sobrecorrente de 2,12 pu para o primeiro e 2,49 pu para o segundo.

Retirando a CR Harm da barra B9 (1,2 Mvar) e fazendo-se a avaliação técnica de harmônicos novamente, verifica-se uma variação na distorção harmônica da ordem da terceira casa decimal (0,001). Sendo assim, a CR Sugerida na tabela 3.38 atende a todos os critérios, a avaliação técnica está concluída, portanto o plano de expansão mais adequado está definido.

Para finalizar este item são exibidas na tabela 3.39 as perdas elétricas encontradas para cada CR indicada na tabela 3.38. Obtêm-se as menores perdas na opção CR Harm,

ganho de 0,2 MW e 0,6 Mvar em relação à CR Est. Na opção CR Final Sugerida, a redução de 1,2 Mvar em B9 faz com que as perdas reativas aumentem apenas de 0,1 Mvar se comparada à CR Harm, mostrando ser uma alternativa adequada para o quesito perdas elétricas.

Tabela 3.39. Perdas elétricas para as CRs indicadas para cada avaliação técnica e para a CR Final.

Perdas Elétricas	CR Est	CR Tran	CR Harm	CR Final Sugerida
Ativas (MW)	3,7	3,6	3,5	3,5
Reativas (Mvar)	11,7	11,4	11,1	11,2

Através do exposto neste item conclui-se que se pode chegar a resultados favoráveis aos três aspectos citados sendo cumpridos os procedimentos individuais de cada avaliação técnica de forma independente. Os processos são realizados paralelamente, como se fossem problemas distintos, requerendo uma análise final que inter-relacione todas as restrições e tenha uma única solução. Esta metodologia é ilustrada no fluxograma da figura 3.42.

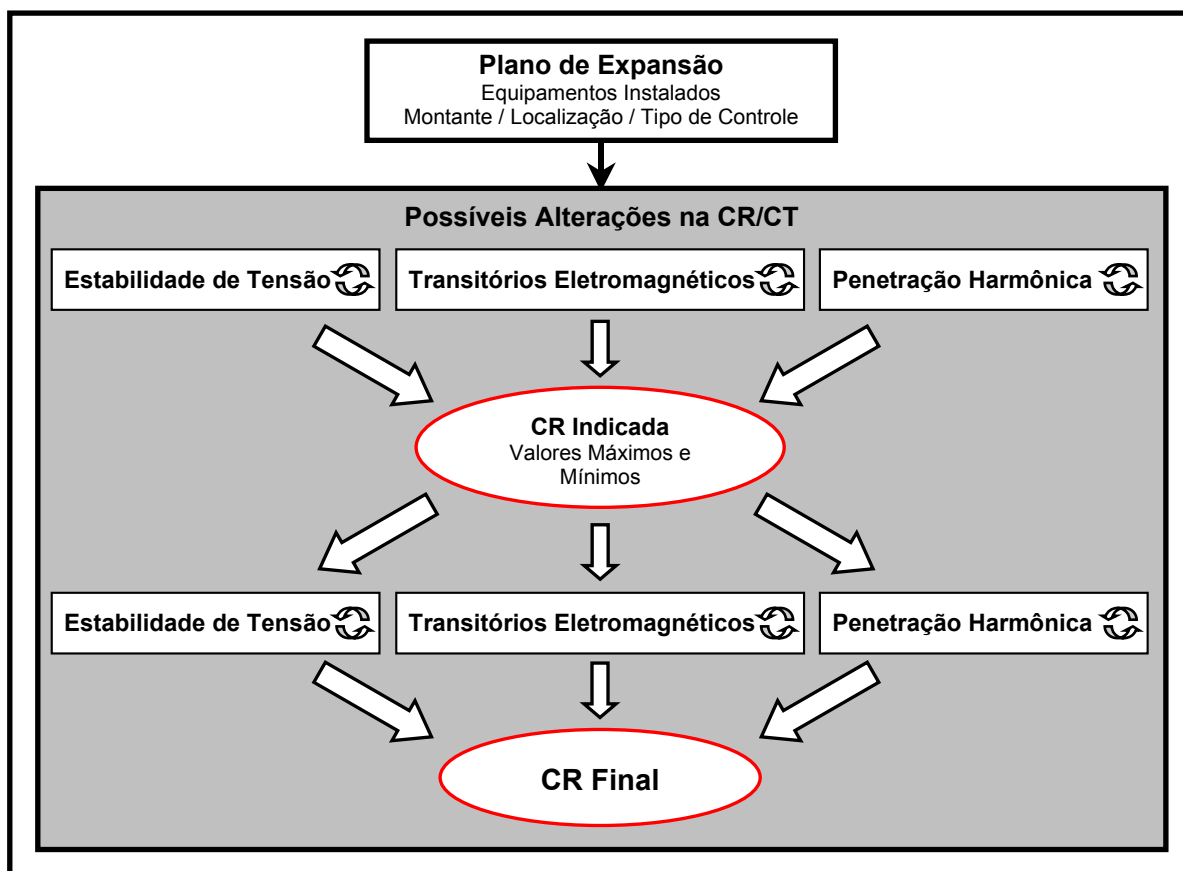


Figura 3.42. Fluxograma da inter-relação entre os procedimentos individuais das avaliações técnicas.

### **3.6. Considerações Finais**

Com o sistema elétrico utilizado como exemplo conseguiu-se chegar a um resultado satisfatório, onde a solução foi facilmente encontrada. Já em sistemas com problemas mais complexos isto nem sempre se torna uma tarefa tão trivial. Podem ocorrer situações em que as soluções parciais sejam divergentes. Uma CR indicada por uma avaliação técnica pode ser muito diferente daquela que acata as restrições das demais.

Para se evitar tal divergência, propõe-se que as alterações sejam realizadas em seqüência. Utilizar como condição inicial o resultado encontrado na avaliação técnica antecedente faz com que a solução não se afaste muito daquela ideal para o critério anterior. Desta forma, todas as restrições podem ser respeitadas mais facilmente. Este procedimento integrado também resulta menor desvio do valor ótimo da compensação reativa inicial que tem como principal objetivo melhorar o perfil de tensão e ajustar o fator de potência das barras. Tal processo seqüencial é denominado neste trabalho de Procedimento Global para a Avaliação Técnica da Compensação Reativa e é explicado no próximo capítulo.

# 4

## Procedimento Global para a Avaliação Técnica da Compensação Reativa

### 4.1. Considerações Iniciais

A escolha da compensação reativa, por meio das avaliações técnicas individuais apresentadas no capítulo 3, mostrou-se bastante consistente. Em decorrência dos resultados positivos alcançados, decidiu-se por investigar uma forma de integrar as análises individuais, facilitando a decisão final sobre a compensação que atenderia a todos os critérios. Desta idéia surgiu a concepção do Procedimento Global para Compensação Reativa apresentado neste capítulo. Este procedimento, com base na experiência adquirida nas abordagens individuais, adota uma ordem para a realização da avaliação técnica global: estabilidade de tensão (AVE), transitórios (AVT), harmônicos (AVH). Vários fatores motivam esta seqüência, conforme explicitado a seguir.

Apesar da instabilidade de tensão estar associada a questões com características localizadas, a avaliação técnica da CR com relação a tal fenômeno requer análise sistêmica que envolve toda a rede. Já para os estudos de transitórios e de harmônicos, são necessárias apenas análises localizadas para ajustes da CR anteriormente sugerida. Na simulação de transitórios, considera-se de uma a três barras adjacentes àquela sob análise. Em harmônicos, a avaliação é realizada através de um equivalente do sistema, visto através da barra em estudo (cálculo da impedância própria). Isto sugere que a avaliação relativa à estabilidade de tensão seja a primeira a ser realizada.

Adicionalmente, vale comentar que, com relação à avaliação sobre os harmônicos do sistema, caso não se encontre uma solução que satisfaça aos outros critérios, ainda há opções, tais como a instalação de filtros passivos e ativos, que permitem que a CR sugerida se mantenha conforme planejado inicialmente. No caso dos transitórios eletromagnéticos, além da modificação dos capacitores indicados, há também uma opção alternativa, que é a adoção de uma manobra mais suave, utilizando-se resistor ou reator de pré-inserção, ou chaveamento controlado. Tais alternativas influenciam praticamente apenas a barra em que é instalado o equipamento de mitigação dos problemas. Estas envolvem custos adicionais

menores, se comparados àqueles das alternativas de expansão para solucionar problemas de instabilidade de tensão (construção de novas linhas e circuitos, subestações, etc.).

Recomenda-se deixar a avaliação harmônica para o final, pois modificações da compensação reativa em uma barra não afetam de forma muito significativa as demais, sob o ponto de vista de harmônicos e transitórios.

A justificativa de se realizar a avaliação relativa aos transitórios antes dos harmônicos se fundamenta em um importante aspecto. A possibilidade de se alterar a seqüência de manobra dos capacitores paralelos se apresenta como alternativa interessante para adequação aos requisitos dos transitórios, porém, causa grande impacto nos harmônicos do sistema, pois, neste estudo, a ordem do chaveamento é fundamental. Conseqüentemente, é recomendável indicar o ajuste dos bancos, antes de serem realizados os estudos dos harmônicos.

Dando continuidade aos desenvolvimentos, é realizada uma terceira proposta para o planejamento de compensação reativa a qual se refere à inclusão de uma etapa adicional ao procedimento otimizado (figura 2.1) exposto em [Chaves 01]. A etapa é composta de uma Avaliação Técnica Prévia, efetuada antes do passo de definição da compensação reativa. Tal proposta é denominada Procedimento Otimizado Expandido e é apresentada neste capítulo.

## 4.2. Procedimento Global para a Avaliação Técnica

A figura 4.1 apresenta o fluxograma do procedimento global para avaliação técnica da compensação reativa que destaca a ordem que é realizada cada uma das etapas: estabilidade de tensão, transitórios eletromagnéticos e harmônicos.

### i. Plano de Expansão

Nesta etapa, é definido o plano de expansão, indicando o montante e a localização da compensação reativa sugerida e o tipo de controle utilizado.

### ii. Possíveis Alterações na CR/CT

Neste passo, são indicadas as possíveis alterações do plano de expansão para atenderem às restrições relacionadas com estabilidade de tensão, transitórios eletromagnéticos e harmônicos. O símbolo de duas setas formando um círculo em cada uma destas partes significa que dentro das mesmas também há realimentações, ou seja, existem modificações para se chegar à melhor compensação reativa para cada aspecto.

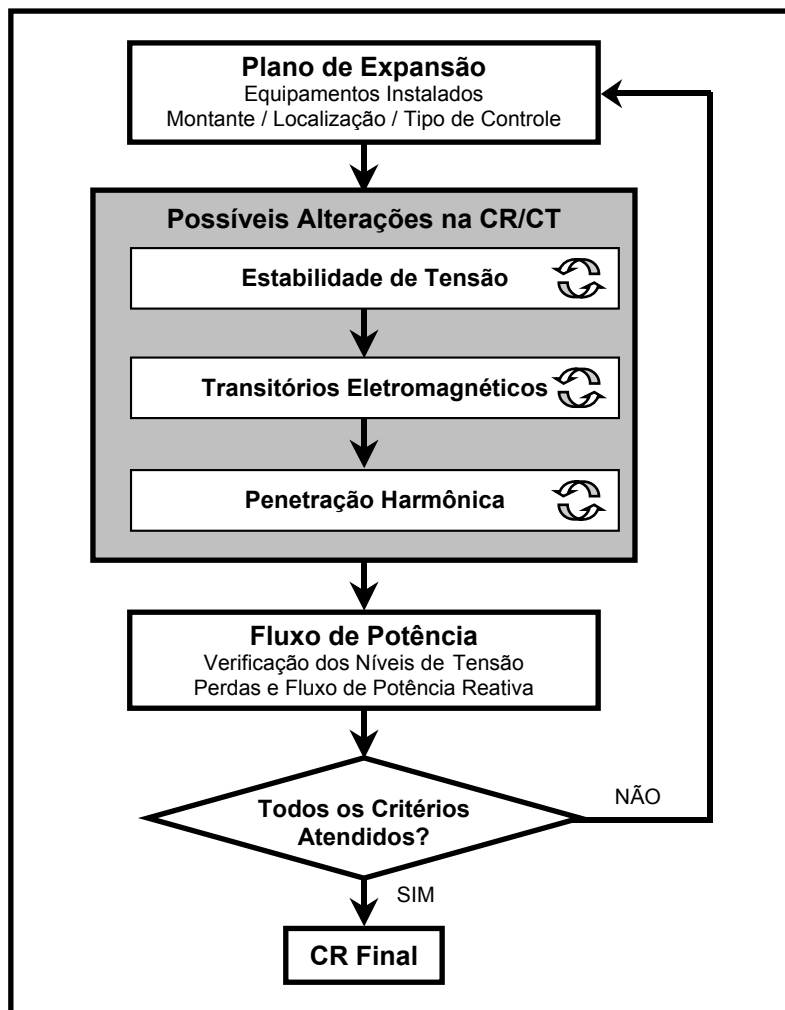


Figura 4.1. Fluxograma do Procedimento Global da Avaliação Técnica.

a. Estabilidade de Tensão

É realizada uma análise de sensibilidade (vetor tangente) que indica as barras críticas para a estabilidade de tensão, e são traçadas curvas PV e QV para as mesmas. Caso as restrições de módulo da tensão no ponto de colapso e de margem de estabilidade de tensão sejam violadas, propõe-se alteração na compensação reativa através da análise de sensibilidade que seleciona barras candidatas para a realocação de potência reativa. Isto é feito para os vários anos de estudo do horizonte de planejamento e todos os níveis de carga. O resultado desta etapa é o montante e a localização de potência reativa a ser injetada em cada barra, respeitando-se os limites de tensão, fator de potência e estabilidade de tensão. Além disso, são apontados os montantes mínimos (CRest1) e máximos (CRest2) de compensação reativa os quais permitem que o sistema atenda ao critério de estabilidade de tensão. Tais valores ajudam na obtenção

de TPC mais baixos (índice  $\alpha_i$  da equação 3.2 do item 3.2.2) e MET mais altas (FP capacitivo máximo).

b. Transitórios Eletromagnéticos

Com o resultado da CR da etapa anterior, fazem-se estudos de transitórios eletromagnéticos para as barras críticas neste contexto. Para tais barras modelam-se os equipamentos e simulam-se energizações e desenergizações. Se existirem sobretensões e sobrecorrentes acima do máximo permitido, são realizadas modificações na compensação reativa ou no chaveamento. Tal mudança tem que ficar entre os valores de CRest1 e CRest2. Esta avaliação é aplicada para vários níveis de carga e todos os anos com os capacitores da análise de estabilidade de tensão. O resultado desta fase é o montante e a localização da nova CR em cada barra, atendendo às restrições de limites de tensão, fator de potência, estabilidade de tensão e transitórios eletromagnéticos. Também são indicados valores mínimos ou máximos da compensação reativa, dependendo da configuração do sistema. Tais valores são denominados, respectivamente, de CRtran1 e CRtran2.

c. Harmônicos

Com o resultado anterior da CR e de posse dos dados das fontes harmônicas da rede em estudo, calculam-se os capacitores que provocam ressonância e a impedância própria das barras. Estimam-se os fatores de potência e as distorções harmônicas, caso estes parâmetros estejam fora dos limites tolerados, alteram-se a compensação reativa através do método dos lugares geométricos (item 3.4). Tal mudança tem que ficar entre os valores de CRest1 e CRest2 e CRtran1 e CRtran2. Esta avaliação é cumprida para todos os níveis de carga do estudo e todos os anos com os capacitores da análise de transitórios eletromagnéticos. O resultado desta etapa é o montante e a localização da **CR Final** em cada barra, respeitando-se os limites de tensão, fator de potência, estabilidade de tensão, transitórios eletromagnéticos e harmônicos. Caso não se tenha chegado a uma solução adequada (alguma restrição violada) são indicados valores mínimos (CRharm1) e máximos (CRharm2) da compensação reativa, baseados nos lugares geométricos da figura 3.27 e 3.29. Tais valores são utilizados como entrada de dados inicial quando a estabilidade de tensão for reavaliada (segunda realimentação). Os limites são escolhidos de forma que estejam próximos dos montantes sugeridos pelo plano de expansão e sua distorção harmônica alcancem 1,5% (máximo permitido pelo ONS). Para isto pode-se optar por montantes indesejados para harmônicas diferentes.

Por exemplo, CR<sub>harm1</sub> igual a 8,2 Mvar (em 9<sup>a</sup> harmônica) e CR<sub>harm2</sub> igual a 20,9 Mvar (em 5<sup>a</sup> harmônica).

iii. Fluxo de Potência

Neste passo, é executado um programa de fluxo de potência para se detectarem as mudanças nos níveis de tensão das barras, nas perdas e na circulação de potência reativa pela rede, comparados ao observado inicialmente. Caso estes parâmetros tenham piorado significativamente, sugere-se uma nova avaliação técnica para se encontrarem equipamentos que obtenham resultados mais favoráveis.

iv. Todos os Critérios Atendidos?

Deve-se verificar se os critérios de estabilidade de tensão, transitórios eletromagnéticos e harmônicos são atendidos, e se o passo anterior indica que o sistema está operando com valores adequados de tensão e perdas com a CR Final. Caso a resposta às questões apontadas seja negativa, é necessário passar mais uma vez pelos procedimentos descritos neste item. Caso seja afirmativa, a CR Final é aquela definida na etapa de harmônicos.

Vale destacar que da forma como são formulados os passos deste procedimento, espera-se que a possibilidade de se refazer a avaliação técnica seja remota, porém pode ocorrer para casos muito complexos. Ocasionalmente, uma solução que atenda a todos os critérios pode não ser obtida. Nesta circunstância, procura-se o resultado favorável para o maior número de critérios e opta-se por outras opções de expansão além da compensação reativa *shunt* capacitiva.

A figura 4.2 apresenta o passo ii do procedimento global da avaliação técnica de forma mais detalhada, exibindo as etapas internas da estabilidade de tensão, transitórios eletromagnéticos e harmônicos. Tais etapas são aquelas propostas no capítulo 3.

Em destaque estão os passos que definem o montante e a localização da compensação reativa em cada fase do processo e os valores máximos e mínimos permitidos. Como se nota pela figura 4.2, este é um procedimento seqüencial onde a entrada de dados de um processo é o resultado do antecedente.

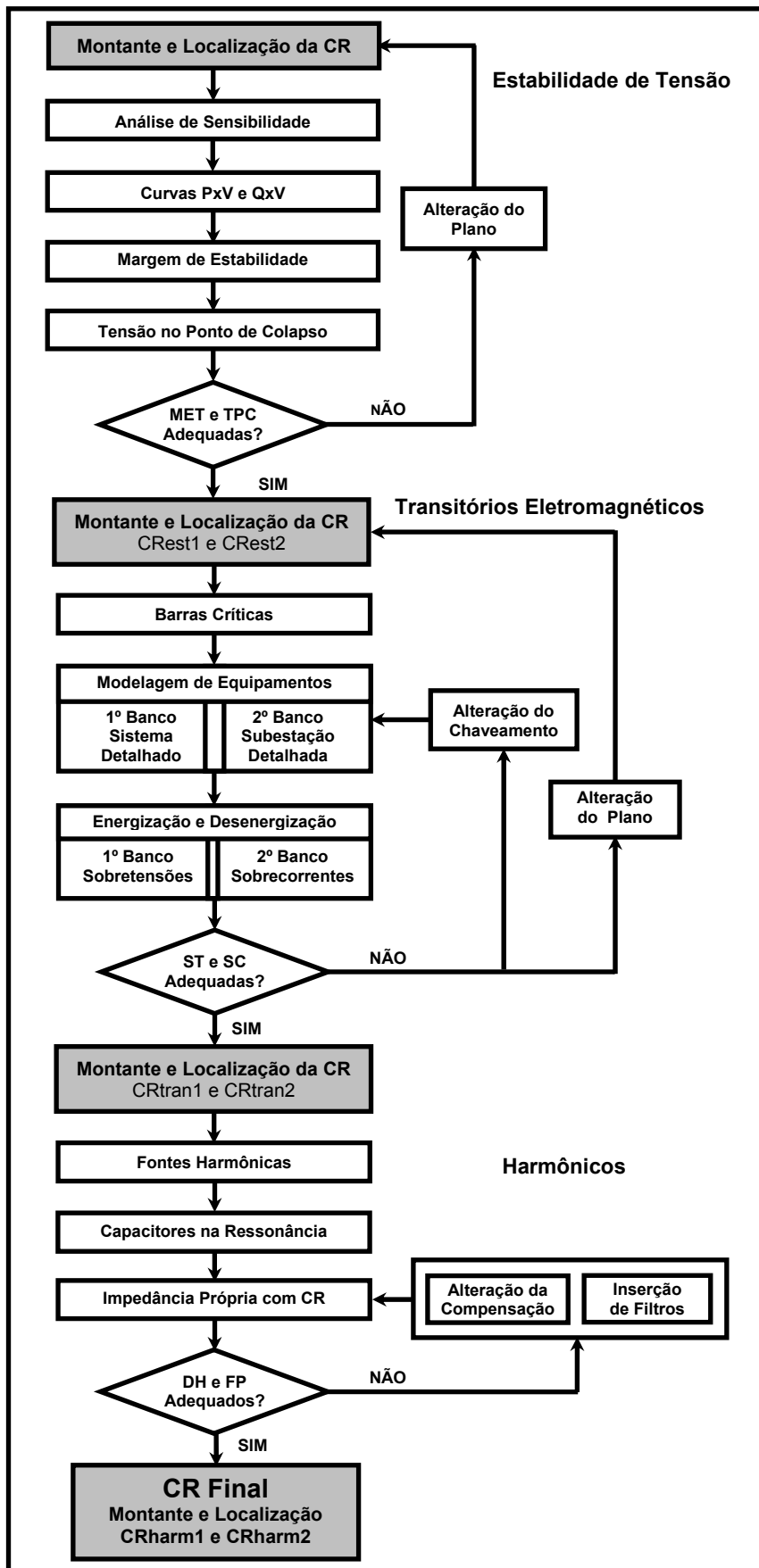


Figura 4.2. Fluxograma detalhado do passo ii do procedimento global da avaliação técnica.

### 4.3. Aplicação do Procedimento Global

Neste item aplica-se, no sistema elétrico exemplo de 14 barras exibido no capítulo 3 (figura 3.3), o procedimento global para avaliação técnica da compensação reativa. Realizaram-se vários testes e, dentre os resultados obtidos, foram selecionados dois deles para ilustrar os passos do procedimento global. O primeiro refere-se ao ano 0 com carga pesada (item 3.2.3) para que seja feita uma comparação com os resultados registrados no item 3.5. O segundo é do ano 10 com carga pesada, escolhido para mostrar a influência das restrições de uma avaliação técnica individual nas demais.

#### Resultado 1

Para o ano 0 com carga pesada, o resultado final da compensação reativa é igual ao apontado na tabela 3.38 em CR Sugerida. Isto ocorre porque a estabilidade de tensão não indica nenhuma restrição às outras avaliações técnicas e os limites impostos pelos transitórios e harmônicos não violam as restrições das demais análises. Nesta situação, a solução encontrada pelo procedimento global é a mesma caso fosse feita cada avaliação técnica individualmente e depois analisados os resultados (item 3.5).

#### Resultado 2 – Passo i – Plano de Expansão

Os dados iniciais são do ano 10 com carga pesada (item 3.2.3) que são exibidos na tabela 4.1. O montante e a localização dos capacitores indicados inicialmente são mostrados na coluna CR Original, retirados do item 3.2.3. Após a execução da avaliação técnica de estabilidade de tensão, a compensação reativa é alterada. Como exposto no item 3.2.3, existem duas possibilidades que chegam às melhores soluções: “CR B4 e Tap” e a “CR B3 e B5”. Para ser apresentada neste capítulo, é escolhida a mais tradicionalmente utilizada pelas concessionárias de energia, a opção “CR B4 e Tap” (tabela 4.1). Os equipamentos sugeridos por esta opção são alterados de forma que sejam instalados nas barras capacitores encontrados no mercado. Nota-se que, apenas nas barras B14 e B4, a CR Modificada tem valores de Mvar maiores do que os da “CR B4 e Tap”. Nestas barras a adição de potência reativa não piora de forma significativa os fatores de potência. Isto é confirmado pela comparação com a tabela 3.13. O nível de tensão também respeita os limites. Em B12 o montante não pode ser aumentado por causa da restrição de tensão no ponto de colapso. Tais mudanças acarretam uma pequena diferença total entre as opções (0,4 Mvar).

Tabela 4.1. Dados iniciais e a CR sugerida pela alteração feita na avaliação técnica de estabilidade de tensão.

ANO 10	P (MW)	Q (Mvar)	CR Original	CR B4 e Tap	CR B4 e Tap Modificada	FP da CR Modificada
B3	85,1	63,8	-	-	-	-
B4	-	-	-	17,7	18,0	-
B5	35,1	29,1	-	-	-	-
B7	17,0	15,0	22,2	21,7	21,6	0,932c
B9	7,0	3,0	5,8	5,4	4,8	0,968c
B12	53,2	54,2	60,0	49,8	49,2	0,996
B14	19,0	32,8	45,6	39,0	39,6	0,942c
<b>Total</b>	<b>216,4</b>	<b>197,9</b>	<b>133,6</b>	<b>133,6</b>	<b>133,2</b>	-

### Resultado 2 – Passo ii – Possíveis Alterações na CR/CT – (a) Estabilidade de Tensão

A tensão no ponto de colapso e a margem de estabilidade de tensão para a “CR B4 e Tap Modificada” tornam-se, respectivamente, 0,872 pu e 17,3 MW (8,2%) cujas quedas são de 0,003 pu e 0,1 MW (0,1%). Logo está adequado em relação à avaliação técnica de estabilidade de tensão.

Os resultados desta etapa e, conseqüentemente, a entrada de dados da AVT são o montante e a localização de CR B4 e Tap Modificada e a CRest1 e CRest2 que estão apresentadas na tabela 4.2. Estes últimos valores são provenientes da tabela 3.12 e têm relação com os valores de fator de potência mínimos indutivos de 0,95 (CRest1) e capacitivos de 0,95 (CRest2) e a tensão máxima para evitar que a TPC viole as restrições (CRest2 de B12). A barra B4 tem somente limite máximo que corresponde à potência reativa que compensa totalmente as cargas de B3 e B5, levando-as a um FP unitário. O limite CRest2 de B7 corresponde a um FP de 0,93 capacitivo por ter sua tensão muito baixa e o CRest2 de B14 obtém um fator de potência de 0,941 capacitivo e não 0,95 por motivo de o capacitor mais próximo no mercado ser de 39,6 Mvar. Esta mudança de 0,6 Mvar não prejudica a estabilidade de tensão. A B12 é a única barra em que CRest2 é limitado pela tensão, que deve ser, no máximo, de 0,90 pu, para que a TPC não ultrapasse 0,95 pu.

Tabela 4.2. Dados de entrada para a AVT.

ANO 10	CRest1 (Mvar)	CRest2 (Mvar)	FP e Tensão para CRest2
B4	0,0	92,9	1,0
B7	9,4	21,75	0,929c
B9	0,7	5,3	0,950c
B12	36,7	49,8	TPC = 0,90 pu
B14	26,6	39,6	0,941c

**Resultado 2 – Passo ii – (b) Transitórios Eletromagnéticos**

Para se efetuar este passo, é preciso conhecer, além da carga pesada, a leve e a média para se saber qual deve ser a parcela da compensação reativa que é chaveada em cada nível. A tabela 4.3 apresenta tais níveis para todas as barras de carga e os capacitores a serem instalados em cada um deles (colunas CR).

Tabela 4.3. Dados dos níveis de carga do sistema elétrico exemplo no ano 10 e sua CR Sugerida.

Barra	P Leve (MW)	Q Leve (Mvar)	CR Leve (Mvar)	P Média (MW)	Q Média (Mvar)	CR Média (Mvar)	P Pesada (MW)	Q Pesada (Mvar)	CR Pesada (Mvar)
B3	28,3	21,2	-	56,7	42,5	-	85,1	63,8	-
B4	-	-	-	-	-	1 de 12,0	-	-	3 de 6,0
B5	11,7	9,7	-	23,4	19,4	-	35,1	29,1	-
B7	5,7	5,0	-	11,3	10,0	7,2	17,0	15,0	1 de 7,2 e 1 de 14,4
B9	2,3	1,0	-	4,7	2,0	1,2	7,0	3,0	1 de 1,2 e 1 de 3,6
B12	17,7	18,0	12,0	35,4	36,1	12,0 e 13,2	53,2	54,2	12,0; 13,2 e 24,0
B14	6,3	10,9	8,4	12,7	21,8	8,4 e 9,6	19,0	32,8	8,4; 9,6 e 21,6

Calculando-se os índices  $C_{i \text{ total}}$  para se encontrarem as barras críticas, têm-se os seguintes valores para, respectivamente, B9, B14, B4, B7 e B12: 0,309, 0,291, 0,282, 0,239 e 0,192. Observa-se que as barras críticas são novamente B9 e B14, porém a B4 obtém um valor muito próximo destas barras, portanto também é incluída nas simulações.

Para a carga leve não são realizadas simulações de transitórios eletromagnéticos porque os capacitores sugeridos são fixos. Apenas como ilustração são mostrados os resultados do chaveamento do capacitor de 8,4 Mvar em B14. A figura 4.3 exibe os transitórios eletromagnéticos advindos desta manobra. O pico de sobretensão é de 1,90 pu, não violando a restrição (tabela 3.24), e de sobrecorrente 6,42 pu, porém seu amortecimento é rápido alcançando 2,38 pu antes de 100 ms, estando dentro dos limites suportáveis (4,52 pu). As sobretensões nas barras adjacentes B2, B9 e B12 alcançam respectivamente, 1,09 pu, 1,28 pu e 1,16 pu. As sobrecorrentes significativas são em B2 e B12 de 3,80 pu e 3,84 pu, mas não sobrepõem o máximo permitido (tabela 3.24).

A figura 4.4 mostra os transitórios eletromagnéticos do chaveamento de 12,0 Mvar na barra B12. A sobretensão atinge 1,84 pu e a sobrecorrente 5,46 pu, caindo para 4,60 pu em 10 ms, ficando abaixo do máximo admitido (5,37 pu). Este resultado confirma ser B14 a barra crítica.

Na carga média, é simulado o chaveamento de 9,6 Mvar da barra B14 em paralelo com um capacitor de 8,4 Mvar. O pico de sobretensão é de 1,77 pu, não violando a restrição (tabela 3.24). A sobrecorrente é de 8,64 pu e, após 100 ms, ainda se mantém acima de

4,52 pu, chegando a 5,25 pu. Isto exige que se altere a compensação reativa sugerida. O deslocamento de 2,4 Mvar do montante do primeiro banco para o segundo obtém uma sobretensão maior (1,80 pu), mas dentro dos limites, e uma sobrecorrente de 7,61 pu que diminui para 4,14 pu em menos de 100 ms respeitando as restrições (tabela 3.24). Logo os novos capacitores da barra B14 para a carga média são um de **6,0 Mvar** e outro de **12,0 Mvar**. A figura 4.5 mostra os transitórios eletromagnéticos antes e depois da mudança da compensação reativa. A diferença é pouco visível, mas o segundo gráfico tem um amortecimento um pouco mais rápido que o primeiro.

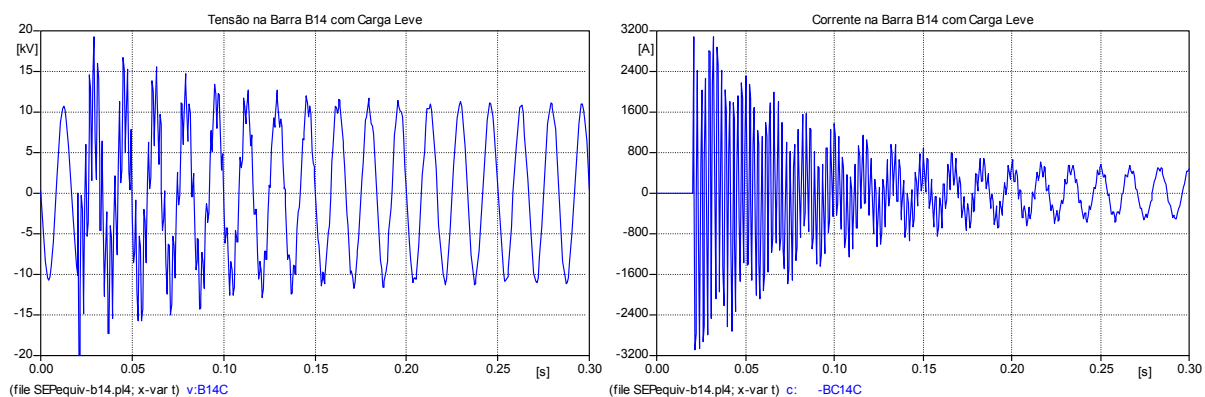


Figura 4.3. Transitórios eletromagnéticos causados pela manobra do banco de B14 em carga leve no ano 10.

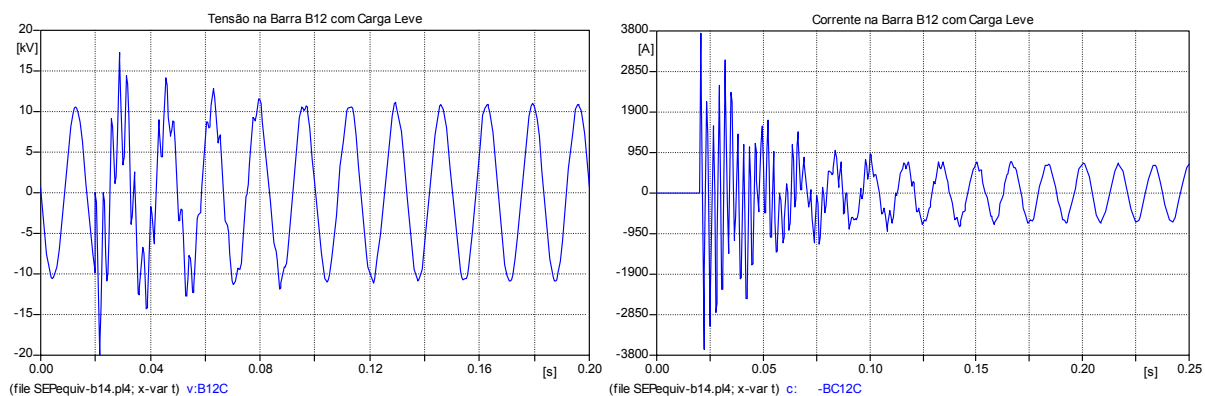


Figura 4.4. Transitórios eletromagnéticos causados pela manobra do banco de B12 em carga leve no ano 10.

É simulada também a manobra de 1,2 Mvar em B9 a qual atinge uma ST de 1,83 pu e uma SC de 18,87 pu. A sobrecorrente é amortecida rapidamente, porém não o suficiente, permanecendo acima de 4,57 ms após 30 ms (tabela 3.24), chegando a 10,86 pu. A barra B2, adjacente a B9 sente uma sobrecorrente de 3,52 pu. Os transitórios eletromagnéticos de corrente de B2 e B9 são exibidos na figura 4.6.

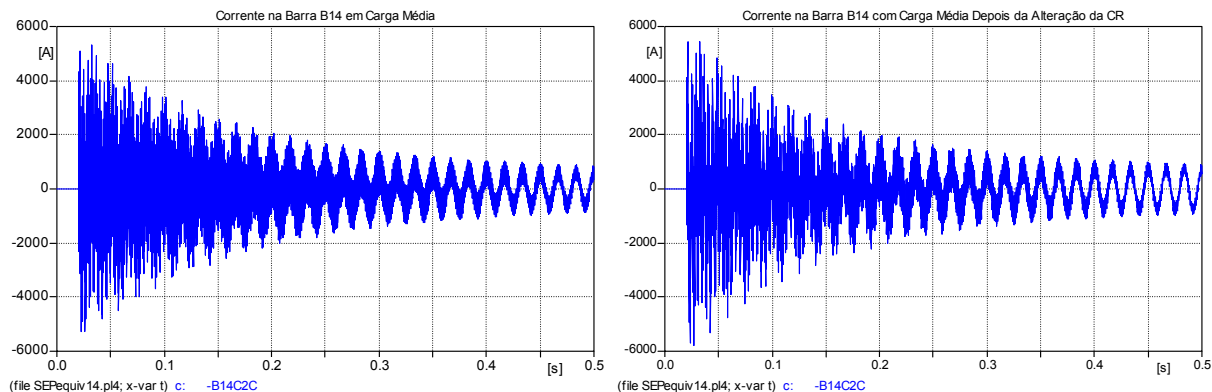


Figura 4.5. Transitórios causados pela manobra do banco de B14 em carga média no ano 10 e com a alteração sugerida.

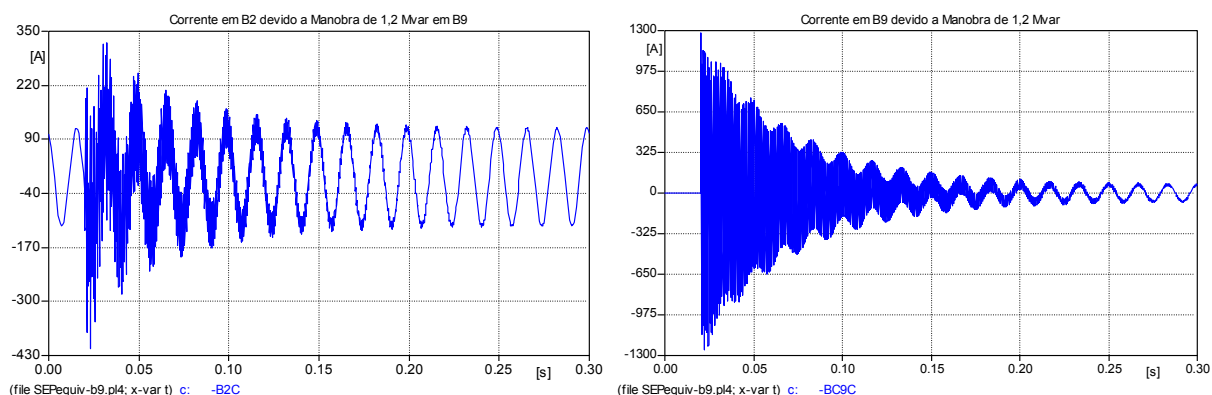


Figura 4.6. Transitórios causados, em B2 e em B9, pela manobra de 1,2 Mvar em B9 em carga média no ano 10.

Devido à elevada SC em B9 é necessária a modificação da compensação reativa desta barra. Como os montantes dos capacitores de B7, B12 e B14 já estão muito próximos de seus limites superiores de CR em relação à estabilidade de tensão (CRest2 da tabela 4.2), opta-se por realocar este montante em B4 que é a barra que mais influencia a B9.

Chaveando 13,2 Mvar em B4 (1,2 Mvar de B9) alcança-se a maior sobretensão na barra B3 de 2,10 pu. Entretanto, seu amortecimento rápido permite que esta se mantenha dentro dos limites. Isto comprova a necessidade de se verificarem as barras adjacentes, visto que em B4 a ST chega apenas a 1,71 pu. A SC atinge 7,55 pu, 6,32 pu, 21,35 pu, respectivamente, em B2, B7 e B4. As sobrecorrentes se reduzem significativamente até os 30 ms, tendo os seguintes valores: 2,05 pu, 2,23 pu, 3,78 pu, todos abaixo do máximo admitido (tabela 3.24). A figura 4.7 apresenta a tensão em B3 e a corrente em B4 devido à manobra do banco de **13,2 Mvar**.

Para confirmar que B7 é uma das barras não críticas, é simulada a energização de sua compensação reativa de 7,2 Mvar. Obtêm-se picos de sobrecorrente em B2, B4 e B7, respectivamente de 3,04 pu, 4,31 pu e 7,07 pu. Os dois primeiros valores já estão

adequados e o terceiro reduz para 2,43 pu em menos de 30 ms, tornando-se apropriado. As sobretensões não apresentam amplificações significativas.

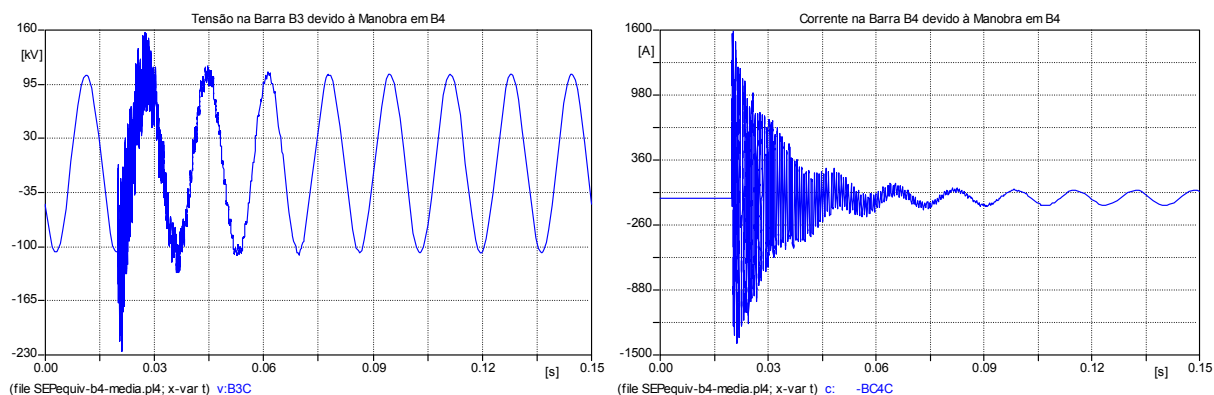


Figura 4.7. Transitórios causados, em B3 e em B4, pela manobra de 12 Mvar em B4 em carga média no ano 10.

Na carga pesada, é simulado o chaveamento de 21,6 Mvar da barra B14 em paralelo com dois capacitores que fornecem um total de potência reativa de 18,0 Mvar (6,0 e 12,0 Mvar). O pico de sobretensão é de 1,71 pu, não violando a restrição (tabela 3.24). A sobrecorrente é de 5,57 pu e, após 10 ms, mantém-se abaixo de 5,37 pu, chegando a 5,24 pu.

Com a manobra da compensação reativa de 3,6 Mvar em B9, tem-se uma ST de 1,81 pu e uma SC de 3,35 pu em B2 (adequada) e 10,78 pu em B9. Esta última sobrecorrente cai para 4,38 pu em 30 ms, conservando-se abaixo do limite (4,57 pu). A figura 4.8 apresenta os resultados das manobras realizadas nas barras B14 e B9.

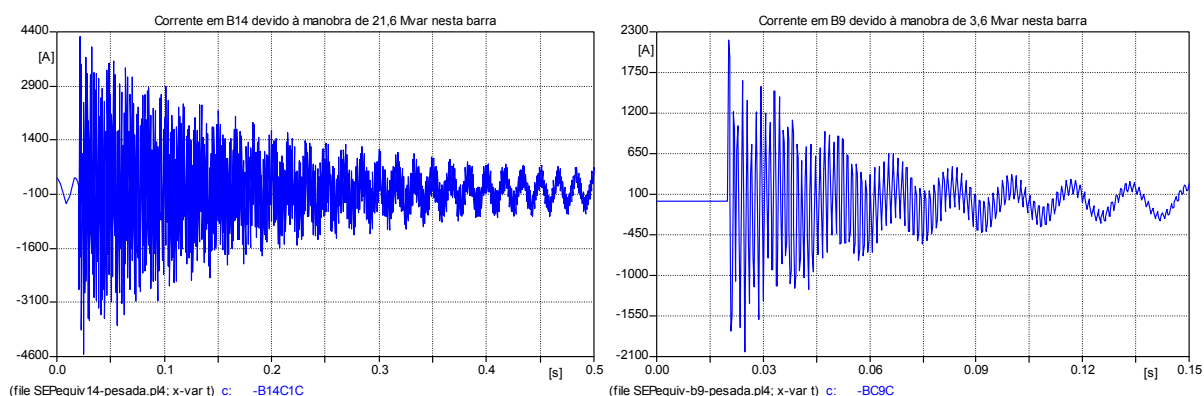


Figura 4.8. Transitórios causados, em B14 e em B9, pela manobra de capacitores nas respectivas barras em carga pesada no ano 10.

Devido à grande oscilação provocada em B4 com o paralelo entre 6,0 Mvar e 13,2 Mvar e para não ser necessária a instalação de um chaveamento controlado, opta-se

pela manobra de um único capacitor de **19,2 Mvar** o qual causa uma ST de 2,09 pu em B3, 1,67 pu na própria barra e 1,16 pu em B7. As maiores sobrecorrentes são de 4,56 pu em B2, 2,61 pu em B7 e 17,89 pu em B4, mas em 30 ms reduz para 3,12 pu, respeitando as restrições (tabela 3.24).

A tabela 4.4 indica as mudanças ocorridas na compensação reativa sugerida respeitando os limites CRest1 e CRest2 para a carga pesada. Como descrito no item 3.3.2, existem várias maneiras para se modificar o montante alocado. Neste capítulo não se adota o tipo que visa alterar o chaveamento porque este não traz diferenças na CR indicada. O objetivo deste texto é apresentar um novo conjunto de capacitores para exemplificar a situação em que há várias mudanças, o que dificulta a solução do problema ao se passar para a próxima avaliação. Isto é feito para demonstrar que a metodologia seqüencial consegue chegar a um resultado que é aprovado por todos os critérios da avaliação técnica.

Tabela 4.4. CR Modificada pela AVT que corresponde aos dados de entrada da AVH.

Barra	CR Leve (Mvar)	CR Média (Mvar)	CR Pesada (Mvar)
B4	-	-	1 de 19,2
B7	-	1 de 7,2	1 de 7,2 e 1 de 14,4
B9	-	-	1 de 3,6
B12	1 de 12,0	1 de 12,0 e 1 de 13,2	1 de 12,0, 1 de 13,2 e 1 de 24,0
B14	1 de 6,0	1 de 6,0 e 1 de 12,0	1 de 6,0, 1 de 12,0 e 1 de 21,6

Após a realização das simulações descritas nos parágrafos anteriores, observa-se que os montantes de compensação reativa especificados para cada barra na AVT (tabela 4.5) atingem sobretensões e sobrecorrentes bem próximas às máximas adotadas. Caso o capacitor selecionado tenha potência reativa menor do que a dos simulados anteriormente, tais limites podem ser violados. Para se evitar esta situação, na tabela 4.5 são indicados os valores mínimos (CRtran1) de compensação reativa.

Tabela 4.5. Dados de entrada da AVH.

Barra	CRest1 (Mvar)	CRtran1 (Mvar)	CRtran2 = CRest2 (Mvar)
B4	0,0	6,0	92,9
B7	9,4	7,2	21,75
B9	0,7	3,6	5,3
B12	36,7	12,0	49,8
B14	26,6	6,0	39,6

Para se chegar a um valor de CRtran2 exato, são necessárias várias simulações que devem ser feitas apenas em casos especiais cuja solução seja muito complexa. Tais

simulações não são justificáveis devido à grande incerteza inerente ao planejamento da expansão. Para o exemplo apresentado neste texto, o limite superior de transitórios eletromagnéticos (CRtran2) é considerado igual ao indicado em CRest2, sendo que este valor é a soma dos capacitores instalados na barra.

Na tabela 4.5, as restrições de estabilidade de tensão são repetidas da tabela 4.2. Nota-se que os valores de CRest1 das barras B7, B12 e B14 são maiores que os de CRtran1, porém ambos os limites são importantes porque o valor de CRtran1 não é do total de compensação reativa instalada na barra, é de um dos bancos alocados.

Em carga leve, para satisfazer aos critérios dos transitórios eletromagnéticos, sugere-se a alocação apenas nas barras B12 e B14. As demais necessitam de pouca compensação reativa que, se fosse instalada e manobrada, provocaria elevadas sobrecorrentes com carga leve. O mesmo acontece com B9 em carga média, sendo a única barra em que não se deve instalar nenhum capacitor devido a esta restrição. Em carga pesada, os limites são os exibidos na tabela 4.5 que correspondem aos menores montantes de cada banco sugerido para a barra.

Para B7 o mínimo é 7,2 Mvar e o máximo, 21,75 Mvar. Se na AVH em carga média for escolhido um valor superior de compensação reativa, os capacitores chaveados em carga pesada podem trocar montantes de potência reativa até chegar à ordem invertida dos equipamentos: 1 de 14,4 Mvar (média) e 1 de 7,2 Mvar (pesada). O segundo montante deve ser diminuído porque o máximo permitido é de 21,75 Mvar. Em harmônicos esta alteração é vista assim: 1 de 14,4 Mvar e outro de 21,6 Mvar.

### Resultado 2 – Passo ii – (c) Harmônicos

Para o exemplo apresentado neste capítulo são consideradas fontes harmônicas mais comuns na rede elétrica: 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> e 9<sup>a</sup> harmônicas e os dados de entrada da AVH são mostrados nas tabelas 4.4 e 4.5.

A figura 4.9 exhibe as impedâncias próprias ( $Z_p$ ) das barras B12 e B14, em carga leve, com as compensações reativas que provocam a maior ressonância nas frequências 300 e 420 Hz para B12 e 540 Hz para B14. Tais compensações reativas são, respectivamente, 10,8, 21,7 e 7,3 Mvar. A maior  $Z_p$  é alcançada com 7,3 Mvar instalados em B14. Percebe-se que destes montantes indesejados o de 10,8 Mvar e o de 7,3 Mvar estão próximos da CR sugerida para as barras B12 (12,0 Mvar) e B14 (6,0 Mvar). Pela figura 4.9, nota-se que os picos de impedância própria com a alocação da CR sugerida ocorrem em 396 Hz (para B12) e 588 Hz (para B14) e seus montantes são, respectivamente, iguais a 79% de  $Z_p$  com 10,8 Mvar alocados e 88% de  $Z_p$  com 7,3 Mvar.

Apesar de a impedância própria de B14 ser maior tanto em módulo quanto em porcentagem com relação à de B12, sua frequência de ressonância está a 48 Hz da 9ª harmônica enquanto a da barra B12 fica mais próxima da 7ª harmônica (24 Hz). Tal fato influencia no valor da distorção harmônica. Conforme verificado a seguir, apenas B12 viola os limites.

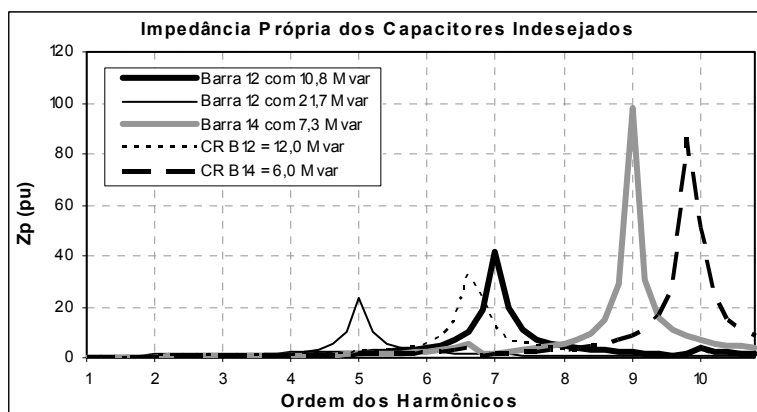


Figura 4.9. Impedância própria de B12 e de B14 com os capacitores indesejados e com a CR sugerida.

A tabela 4.6 expõe as distorções totais de cada barra e as  $DHI_V$  e  $DHT_V$  globais e seus limites. Constata-se que nenhuma restrição é desrespeitada e aquelas que mais se aproximam do máximo são a  $DHT_V$  da barra B12 (menos de 0,9% do limite) e a  $DHI_V$  global de 9ª harmônica (menos de 0,4%). As  $DHTI$  têm valores desprezíveis.

Tabela 4.6. Distorções totais de cada barra e  $DHI_V$  e  $DHT_V$  globais e seus limites.

Barras	$DHT_V$ (%)	$DHT_I$ (%)		$DHI_V$ Global (%)	Limites (%)
<b>B4</b>	0,511	1,83E-04	h = 3	0,547	5,0
<b>B7</b>	0,483	9,64E-05	h = 5	1,226	5,0
<b>B9</b>	0,382	3,63E-05	h = 7	2,704	5,0
<b>B12</b>	2,132	1,31E-03	h = 9	2,623	3,0
<b>B14</b>	1,089	2,19E-04	<b><math>DHT_V</math> Global</b>	<b>4,597</b>	<b>6,0</b>
<b>Limite</b>	<b>3,0</b>				

A figura 4.10 mostra as distorções harmônicas individuais de tensão das barras candidatas à compensação reativa. Verifica-se que somente B12 viola a restrição de 1,5% para harmônicas ímpares (apêndice D), atingindo 2,04% na 7ª harmônica. Deste modo, tal compensação requer alteração.

Como o capacitor mínimo para B12 é de 12,0 Mvar (tabela 4.4), a única alternativa é aumentar o montante alocado de potência reativa. O  $\alpha_{lim}$  e  $\gamma_{lim}$  para tal barra são, respectivamente, 1,36 e 1,384. A compensação reativa tem que ser de 12,5 Mvar para se

atingir 1,5% de distorção harmônica. Adotam-se 13,2 Mvar por ser o capacitor mais próximo encontrado no mercado. Com tal montante a DH reduz para 1,05% em B12 e sobe de 1,01% para 1,1% em B14, ambos os valores respeitam os máximos admitidos.

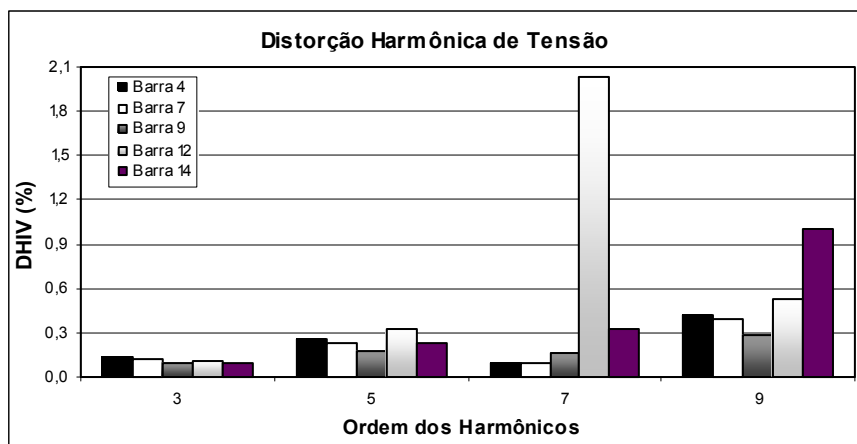


Figura 4.10. Distorção Harmônica Individual de Tensão das barras candidatas à CR antes da alteração.

Como em carga leve na barra B12 a CR muda para **13,2 Mvar**, em carga média, opta-se por chavear o capacitor de **12,0 Mvar** em paralelo com este outro.

Seguindo o mesmo procedimento para a carga média, a tabela 4.7 apresenta os capacitores indesejados (Cap Indesej 1 e Cap Indesej 2) para cada conjunto de compensação reativa sugerida: um único banco em funcionamento por barra e após o chaveamento do segundo capacitor em paralelo.

Tabela 4.7. Capacitores indesejados para cada conjunto de compensação reativa em carga média.

Barra	CR Média 1 (Mvar)	CR Média 2 (Mvar)	Cap Indesej 1 (Ordem)	Cap Indesej 2 (Ordem)
B7	7,2	7,2	6,6 (9ª) e 9,1 (7ª)	7,0 (9ª) e 11,8 (7ª)
B9	-	-	9,5 (9ª)	9,9 (9ª)
B12	13,2	25,2	11,3 (7ª) e 23,2 (5ª)	21,7 (5ª) e 64,5 (3ª)
B14	6,0	18,0	9,7 (9ª)	12,1 (7ª) e 29,9 (5ª)

Observa-se que, na configuração 1, destes capacitores indesejados o de 6,6 Mvar e o de 9,1 Mvar para B7 são aqueles que permitem a menor margem de variação da CR sugerida. Na configuração 2 para esta barra a restrição é mais acentuada em relação à 9ª harmônica. Em B12 a diferença entre os capacitores indesejados e a CR indicada é de 1,9 Mvar (7ª harmônica) e 3,5 Mvar (5ª harmônica) para respectivamente as situações 1 e 2. A barra B14 tem sua compensação reativa mais distante do ponto de ressonância: 3,7 Mvar no primeiro caso e 5,9 Mvar no segundo.

Na tabela 4.8, como na 4.6, são apresentadas as distorções harmônicas das barras para CR Média 1. As  $DHT_I$  são todas muito pequenas da ordem de  $10^{-2}$ . Por este motivo não são mostradas na tabela 4.8. Verificam-se violações de restrições na  $DHT_V$  da barra B7 (3,98%) e na  $DHI_V$  global de 9ª harmônica (6,86%). Além destas, também estão acima dos limites a  $DHI_V$  de 9ª harmônica em B7 (3,97%) e a  $DHIV$  de 7ª harmônica em B12 (1,62%), ambas deveriam ser menores que 1,5% (apêndice D). Estes resultados já eram esperados devido à proximidade do montante da CR Média 1 com os capacitores indesejados (6,6 e 11,3 Mvar).

Tabela 4.8. Distorções totais de cada barra e  $DHI_V$  e  $DHT_V$  globais e seus limites para CR Média 1.

Barras	$DHT_V$ (%)		$DHI_V$ Global (%)	Limites (%)
B4	0,735	h = 3	0,536	5,0
B7	<b>3,984</b>	h = 5	1,340	5,0
B9	0,439	h = 7	2,122	5,0
B12	1,763	h = 9	<b>6,864</b>	3,0
B14	1,285	<b><math>DHT_V</math> Global</b>	<b>8,206</b>	<b>6,0</b>
Limite	<b>3,0</b>			

Como a CR Média 1 já está no seu valor mínimo para B7 e B12 (tabela 4.4), a única alternativa é aumentar o montante alocado de potência reativa. Os  $\alpha_{lim}$  para estas barras são, respectivamente, 2,64 e 1,08 e seus  $\gamma_{lim}$  são 2,73 e 1,09. Para se atingir 1,5% de distorção harmônica, a compensação reativa tem que ser de 8,2 Mvar para B7 e 13,4 Mvar para B12. Escolhem-se 8,4 Mvar para B7 e 14,4 Mvar para B12 que são capacitores comerciais. Com tais modificações a  $DHI_V$  reduz para 1,35% em B7 (9ª harmônica) e 1,09% em B12 (7ª harmônica) e as  $DHT_V$  para 1,47% e 1,16% respectivamente. A  $DHI_V$  global da 9ª harmônica cai para 1,47% e a  $DHT_V$  global diminui para 3,5%. Todos os valores ficam dentro dos limites admitidos.

Com os resultados do parágrafo anterior, a CR Média 2 altera somente o montante de B7 para 8,4 Mvar que melhora a situação 2, afastando-se dos valores dos capacitores indesejados. A CR Pesada 2 para B7 fica, portanto, com um banco de **8,4 Mvar** e outro de **13,2 Mvar**. Na barra B12, não ocorre mudança na potência reativa total instalada, apenas os capacitores chaveados que se modificam: **14,4 Mvar e 10,8 Mvar**.

Para a CR Média 2, as  $DHT_I$  são todas muito pequenas menores que  $10^{-2}$  e as maiores  $DHT_V$  são 1,46% em B7 e 1,19% em B12, ambas abaixo do valor máximo permitido (3,0%). As  $DHI_V$  mais elevadas são 1,32% em B7 na 9ª harmônica e 1,17% em B12 na 5ª harmônica, também dentro dos limites (1,5%), portanto a CR Média 2 está adequada.

Utilizando-se o mesmo procedimento para a carga pesada, a tabela 4.9 expõe os capacitores indesejados (Cap Indesej 1 e 2) para cada conjunto de compensação reativa sugerida. Verifica-se que os montantes de potência reativa mais próximos dos inadequados são os da barra B7. Tais montantes estão 2,8 e 1,3 Mvar de diferença dos Cap Indesej 1 e 2, respectivamente, para a configuração 1 e 2. Em B12 e B14, tal diferença é de 2,9 e 6,8 Mvar para a configuração 1.

Tabela 4.9. Capacitores indesejados para cada conjunto de compensação reativa em carga pesada.

Barra	CR Pesada 1 (Mvar)	CR Pesada 2 (Mvar)	Cap Indesej 1 (Ordem)	Cap Indesej 2 (Ordem)
B4	19,2	19,2	47,8 (7ª)	42,2 (9ª)
B7	8,4	21,6	5,6 (9ª) e 11,4 (7ª)	10,7 (7ª) e 22,9 (5ª)
B9	3,6	3,6	8,0 (9ª)	7,3 (9ª)
B12	25,2	49,2	22,3 (5ª) e 68,6 (3ª)	24,1 (5ª) e 66,6 (3ª)
B14	18,0	39,6	11,2 (7ª) e 25,1 (5ª)	21,1 (5ª) e 62,6 (3ª)

Os capacitores que atingem o maior valor da impedância própria de B4 mais perto do montante da CR Pesada são de 47,8 e 42,2 Mvar com ressonâncias paralelas em 7ª e 9ª harmônica, respectivamente. O pico mais alto de  $Z_p$  da barra B4 com a compensação reativa de 19,2 Mvar é em 732 Hz e o segundo maior em 468 Hz. Como é constatado posteriormente, este montante não causa violações de distorções harmônicas nesta barra por estar afastado dos valores perigosos.

A figura 4.11 apresenta, para o caso de carga pesada na configuração 2, a impedância própria de B4 com e sem compensações reativas. O objetivo deste gráfico é mostrar as várias ressonâncias encontradas nesta barra com tal configuração. É observada uma ressonância série em 348 Hz que é representada por um vale na curva e três ressonâncias paralelas sendo que duas delas têm uma variação menor da localização de seu pico (próximos a 3ª e 5ª harmônicas). A outra ressonância paralela tem uma variação maior (harmônicas maiores que a 6ª) que são vistas ao se compensar a barra B4 com 42,2, 89,6 e 170 Mvar e seus valores máximos ocorrem nas frequências 540, 420 e 372 Hz, respectivamente.

Na figura 4.12, encontram-se vários conjuntos de ressonância paralela (picos) e série (vales) o que traz uma característica peculiar à curva de impedância própria. O comportamento normal dos picos da  $Z_p$  é observado apenas entre os vales. Tal comportamento é o seguinte: quanto maior o montante do capacitor, menor a frequência em que é obtido um pico na impedância própria da barra (por exemplo, na figura 4.9, barra B12). A característica peculiar é que, dependendo da região observada do gráfico, quanto maior o montante da compensação reativa, mais elevada é a frequência. Por exemplo, na

faixa entre 7ª e 10ª harmônica, a CR de 58,9 Mvar tem seu maior valor em 600 Hz e a de 45,2 Mvar em 420 Hz. A situação comum acontece entre as ressonâncias série que estão presentes em 300, 360 e 540 Hz, logo se observam quatro conjuntos de ressonâncias paralelas: de 60 Hz a 300 Hz, entre a 5ª e 6ª harmônica, da sexta à nona e para frequências maiores que 540 Hz.

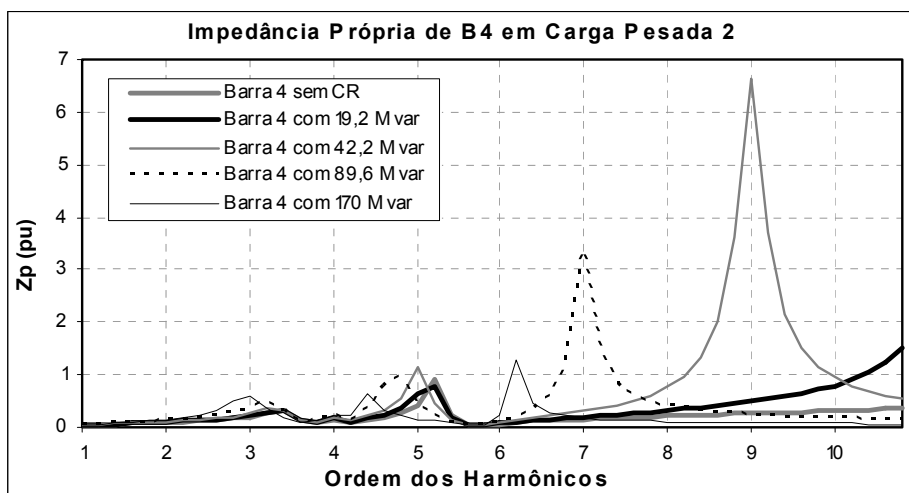


Figura 4.11. Impedância própria de B4 em carga pesada na configuração 2 para várias CR alocadas.

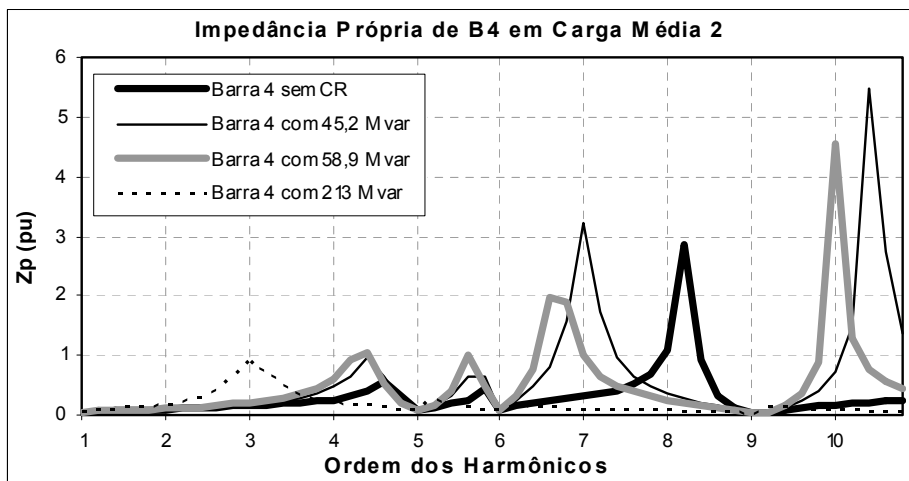


Figura 4.12. Impedância própria de B4 em carga média na configuração 2 para várias CR alocadas.

As figuras 4.11 e 4.12 comprovam que, na faixa de frequência até 600 Hz, capacitores de até 19,2 Mvar não provocam distorções harmônicas prejudiciais ao sistema. Isto ocorre principalmente pela presença das ressonâncias séries. No caso da carga pesada 2 (figura 4.11), os picos atingidos nesta faixa (próximos a 3ª e 5ª harmônica) por esta compensação reativa são pequenos, não trazendo problemas.

Novamente as  $DHT_I$  são todas pequenas, menores que 0,1. Não há violações de restrições nas  $DHT_V$  individuais nem nas  $DHI_V$  globais. A  $DHT_V$  global fica próxima ao limite (6,0%), atingindo 5,05%. A única restrição desrespeitada ocorre na barra B12 na 5ª harmônica (1,55%), violação de apenas 0,05%. Em B7 chega-se perto do limite na 9ª harmônica: 1,34%.

Como o segundo capacitor chaveado em B12 já foi reduzido para 10,8 Mvar na alteração da CR Média 1, sendo que originalmente eram 13,2 Mvar, o ideal é aumentar este montante nesta próxima alteração para a CR Pesada 1. O  $\alpha_{lim}$  e  $\gamma_{lim}$  para B12 são 1,03 e 1,06. Para se ter uma distorção harmônica de 1,5%, a compensação reativa precisa ser de 25,4 Mvar. Opta-se por um montante de 26,4 Mvar por critério comercial, portanto ficam um capacitor de **14,4 Mvar** e outro de **12,0 Mvar** em carga média e um de **22,8 Mvar** em pesada. Na configuração carga pesada 1, a  $DHI_V$  diminui para 1,23% em B12 na 5ª harmônica e, em carga média 2, cai de 1,17% para 0,92%.

Com relação aos resultados para a CR Pesada 2, as  $DHT_I$  ficam abaixo de 0,01. Também para esta compensação reativa não há violações de restrições nas  $DHT_V$  individuais nem nas  $DHI_V$  globais. A  $DHT_V$  global não fica tão próxima do limite (4,56%) quanto anteriormente. Desta vez a restrição desrespeitada é na barra B7 na 5ª harmônica (2,12%). Em B7, chega-se perto do limite na 9ª harmônica: 1,34%. A  $DHI_V$  global de 5ª harmônica está a 1,23% do máximo permitido pelo ONS (5,0%). A  $DHT_V$  de B7 fica ainda mais perto do limite: 0,82%.

Desta vez é necessário diminuir o valor do capacitor, porque 21,75 Mvar é o máximo para as restrições de estabilidade de tensão e transitórios eletromagnéticos (CRest2 e CRtran2 – tabela 4.5). O  $\alpha_{lim}$  e  $\gamma_{lim}$  para B7 são 1,41 e 1,56. Para se manter a  $DHI_V$  de B7 abaixo de 1,5%, a compensação reativa precisa ser de 20,9 Mvar. Opta-se por um montante de 20,4 Mvar por critério comercial, sendo que o capacitor chaveado em carga pesada é de **12,0 Mvar**.

Na simulação da CR Média 1, foi necessário o acréscimo de 1,2 Mvar na manobra em carga média e a diminuição de 1,2 Mvar em carga pesada em B7, obtendo-se dois capacitores em paralelo de 8,4 Mvar e 13,2 Mvar. No entanto, a CR Pesada 2 restringe o segundo banco a 12,0 Mvar conforme visto no parágrafo anterior. Este valor de 1,2 Mvar a menos pode ser transferido para a barra que está com as restrições menos rígidas como a B4. Além disso, esta é a barra candidata que mais influencia a B7, sendo a ideal para receber esta potência reativa adicional.

Na tabela 4.10, são exibidas as restrições CRharm1 e CRharm2 para carga pesada as quais são baseadas nos capacitores indesejados da tabela 4.9. São escolhidas como

restrições as compensações reativas que alcançam a distorção harmônica individual limite (1,5%) para a frequência em que é indicado o capacitor mais próximo aos sugeridos no plano de expansão.

Tabela 4.10. Restrições de mínimo (CRharm1) e máximo (CRharm2) de compensação reativa (em Mvar) da AVH.

Barra	CRharm1	CRharm2
B4	-	Não 42,2 (9ª)
B7	8,2 (9ª)	20,9 (5ª)
B9	-	6,2 (9ª)
B12	26,4 (5ª)	Não 66,6 (3ª)
B14	Não 21,1 (5ª)	Não 62,6 (3ª)

A palavra “não” antes do valor mostrado na tabela 4.10 significa que a compensação reativa sugerida tem o montante muito maior ou menor que o indesejado, ou que a distorção harmônica não atinge o limite quando o capacitor inapropriado é alocado, devendo apenas evitá-lo. Os demais valores apontados na tabela 4.10 correspondem ao montante mínimo (CRharm1) ou máximo (CRharm2) com o qual se alcança o limite permitido pelo ONS de distorção harmônica individual (1,5%). Por exemplo, 8,2 e 20,9 Mvar são montantes que obtêm uma DH de 1,5% em B7 para a 9ª e 5ª harmônicas, respectivamente.

### Resultado 2 – Passo iii – Fluxo de Potência

Nesta etapa, é verificado se as alterações realizadas estão adequadas. A tabela 4.11 apresenta o resultado final do passo ii. Após a avaliação técnica de estabilidade de tensão e determinação dos capacitores comerciais a serem utilizados para cumprir o plano de expansão, as mudanças em relação a CR Total, denominada na tabela 4.1 por “CR B4 e Tap Modificada”, são o deslocamento de 1,2 Mvar de B9 para B4 na etapa de transitórios e o mesmo montante de B7 para B4 na etapa de harmônicos. Destaca-se que a CR Total é o valor que interessa para o fluxo de potência.

Tabela 4.11. CR do passo ii para níveis de carga para o ano 10.

Barra	CR Leve (Mvar)	CR Média (Mvar)	CR Pesada (Mvar)	CR Total (Mvar)
B4	-	-	1 de 20,4	<b>20,4</b>
B7	-	1 de 8,4	1 de 8,4 e 1 de 12,0	<b>20,4</b>
B9	-	-	1 de 3,6	<b>3,6</b>
B12	1 de 14,4	1 de 14,4 e 1 de 12,0	1 de 14,4, 1 de 12,0 e 1 de 22,8	<b>49,2</b>
B14	1 de 6,0	1 de 6,0 e 1 de 12,0	1 de 6,0, 1 de 12,0 e 1 de 21,6	<b>39,6</b>

A tabela 4.12 apresenta o montante da compensação reativa total para cada avaliação técnica do passo ii, os capacitores iniciais (CR Original) e aqueles relativos à análise de estabilidade de tensão sem considerar os valores comerciais dos equipamentos. Observa-se que a potência reativa total fornecida ao sistema em estudo para as avaliações técnicas não se modifica, sendo iguais a 133,2 Mvar, apenas 0,4 Mvar a menos que a CR Original.

Tabela 4.12. Compensações reativas sugeridas para cada avaliação técnica do passo ii para o ano 10.

Barra	CR Original	CR B4 e Tap	CR Estabilidade	CR Transitórios	CR Harmônicos
B4	-	17,7	18,0	19,2	20,4
B7	22,2	21,7	21,6	21,6	20,4
B9	5,8	5,4	4,8	3,6	3,6
B12	60,0	49,8	49,2	49,2	49,2
B14	45,6	39,0	39,6	39,6	39,6
<b>Total</b>	<b>133,6</b>	<b>133,6</b>	<b>133,2</b>	<b>133,2</b>	<b>133,2</b>

A tabela 4.13 mostra as perdas elétricas e o carregamento das principais linhas deste sistema elétrico para as seguintes situações: sem compensação reativa (Sem Shunt), com aquela sugerida originalmente (CR Original), com a modificação da AVE sem adotar montantes de capacitores comerciais (CR B4 e Tap) e adotando-os na avaliação técnica de estabilidade de tensão (CR Estabilidade) e nas demais (CR Transitórios e CR Harmônicos).

Tabela 4.13. Perdas elétricas e carregamento de linhas para as CR sugeridas após as avaliações técnicas.

Ano 10	Perdas		Carregamento de Linhas		
	MW	Mvar	B1-B2 (%)	B2-B3 (%)	B2-B10 (%)
<b>Sem Shunt</b>	14,7	53,6	108,4	106,9	143,1
<b>CR Original</b>	7,7	25,3	76,8	94,3	79,6
<b>CR B4 e Tap</b>	7,5	24,9	76,8	88,5	78,3
<b>CR Estabilidade</b>	7,5	25,0	76,6	88,5	78,4
<b>CR Transitórios</b>	7,5	24,9	76,9	88,2	78,4
<b>CR Harmônicos</b>	7,5	24,9	76,9	88,2	78,4

Pela tabela 4.13, verifica-se que a CR aprovada pelas avaliações técnicas diminuem as perdas elétricas e aumentam a disponibilidade de transmissão de potência pelas linhas quando comparadas à CR Original. Tais melhoras se devem à alocação de compensação reativa em B4. Nota-se que as perdas elétricas se alteram muito pouco (0,1 Mvar) nas análises de transitórios e harmônicos (CR Transitórios e CR Harmônicos), sendo comparadas com os resultados obtidos na CR Estabilidade. Em relação à “CR B4 e Tap”, o carregamento da linha B1-B2 é o único a diminuir (0,2%) na AVE. Nas AVT e AVH, este

carregamento aumenta 0,1% e na linha B2-B3 reduz 0,3%. Além disso, o nível de tensão se mantém adequado.

Conclui-se que as mudanças sugeridas estão aprovadas, pois o objetivo principal do procedimento continua sendo atendido (compensação da potência reativa e controle da tensão).

#### Resultado 2 – Passo iv – Todos os Critérios Atendidos?

Analisando este novo conjunto de capacitores em relação à estabilidade de tensão verifica-se que o máximo carregamento fica em 227,15 MW (0,15 MW a menos que a CR B4 e Tap) e a TPC é igual a 0,871 pu (0,004 pu menor que a da CR B4 e Tap). A margem de estabilidade de tensão se torna 8,22%, quase igual à da CR B4 e Tap que era de 8,29%. A margem de potência reativa diminui de 11,04 Mvar para 10,76 Mvar. Como tais medidas não violam os limites, os novos capacitores estão aprovados no aspecto de estabilidade de tensão.

Foram realizadas simulações de transitórios eletromagnéticos para confirmar que os novos capacitores chaveados não provocam sobretensões e sobrecorrentes acima do permitido. Esta etapa não seria necessária, mas, neste texto, é apresentada para confirmar o bom desempenho do procedimento. Os resultados de ST e SC alcançados são favoráveis a esta nova compensação reativa sugerida. Além disso, os critérios de harmônicos são totalmente atendidos conforme constatado no passo ii (c).

Após a execução dos passos apresentados, chega-se à Compensação Reativa Final para o Plano de Expansão que é apontada na tabela 4.11. Os resultados e análises exibidos neste texto confirmam que o procedimento proposto é válido e muito importante para auxílio à tomada de decisão por parte das equipes de planejamento da expansão, facilitando a avaliação técnica necessária para evitar desligamentos no sistema elétrico e para melhorar a qualidade da energia entregue ao consumidor final.

#### **4.4. Procedimento Otimizado Expandido**

Neste item é mostrada uma proposta para inclusão de uma avaliação técnica prévia em etapa anterior à definição da compensação reativa e do controle de tensão realizada pelo procedimento otimizado apresentado em [Chaves 01 e 02]. A idéia é representada pela figura 4.13 cujos passos são explicados no item 2.1.1.1 (figura 2.1). A avaliação técnica tem como saída de dados as restrições relacionadas à estabilidade de tensão, transitórios eletromagnéticos e harmônicos as quais são introduzidas no processo otimizado do passo de definição da CR/CT. Tais restrições se apresentam em forma de máximos e mínimos de

montante de compensação reativa que podem ser alocados nas barras, ou seja, os CRest, CRtran e CRharm apontados no item 4.3 nas tabelas 4.5 e 4.10.

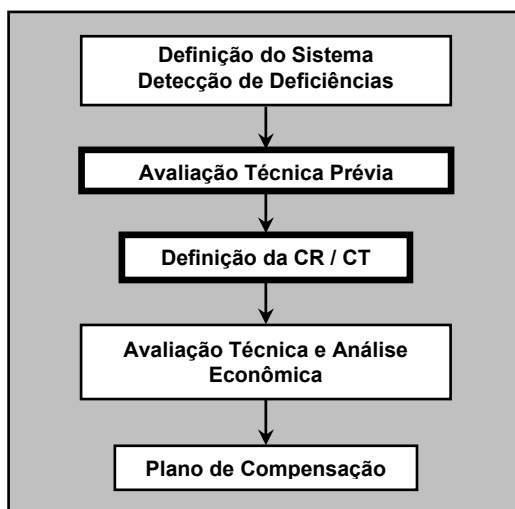


Figura 4.13. Passos básicos do Procedimento Otimizado Expandido.

As restrições de transitórios eletromagnéticos não possuem um máximo, porque este valor é obtido após diversas simulações, fato que elevaria sobremaneira o tempo gasto na etapa do planejamento. O ideal é que, depois de selecionado o capacitor, seja feita a análise de sua manobra, tendo assim um estudo mais direcionado para o equipamento desejado. Para a estabilidade de tensão e os harmônicos estes limites são mais fáceis de serem encontrados, exigindo poucas simulações e menor tempo.

Para se realizar a avaliação técnica prévia (figura 4.13) utiliza-se como entrada de dados a compensação reativa não otimizada já instalada no SEP. Caso ainda não haja nenhum equipamento alocado no subsistema em estudo, adota-se uma condição inicial para a otimização que é aquela analisada pela avaliação técnica. Considera-se, então, uma compensação reativa que atinja o fator de potência mínimo de 0,95 indutivo para todas as barras de carga (excluindo-se as dos grandes consumidores) do sistema elétrico escolhido para o plano de expansão.

O passo seguinte é a execução de uma ferramenta de otimização. No presente trabalho, foi utilizado o programa PSS/E da PTI que adota o método de pontos interiores. Os detalhes de tal implementação compõem a dissertação de mestrado do autor [Chaves 01].

As funções objetivo escolhidas para a otimização minimizam o montante da compensação reativa alocada, as perdas elétricas ativas e reativas, mantendo as tensões e fatores de potência dentro dos limites admitidos pelo ONS (apêndice D). Tal função objetivo também é limitada pelos máximos e mínimos apontados pela avaliação técnica prévia

(CRest, CRtran, CRharm). As restrições de fatores de potência [Chaves 01] e da avaliação técnica são inseridas no programa em forma de montante de máximos e mínimos de compensação reativa a ser alocado nas barras candidatas.

Após a otimização é necessário realizar novamente a avaliação técnica, pois a alocação da nova compensação reativa modifica o estado da rede elétrica, podendo alterar as restrições a serem atendidas. Tal revisão corresponde a um estudo simples, pois as chances de que todos os critérios sejam aprovados é grande. A AVT é a que tem a maior possibilidade de trazer novos limites ao plano sugerido devido a alguma exigência de chaveamento em carga leve ou média. A estabilidade de tensão tem o processo mais robusto, necessitando de menos alterações. Para os transitórios eletromagnéticos e harmônicos, caso não seja interessante mudar a compensação reativa do ponto de vista do resultado ótimo encontrado, tem-se a alternativa de instalação de chaveamentos controlados e filtros como é descrito neste texto. É nesta etapa também que é realizada a análise econômica da proposta.

A tabela 4.14 expõe as restrições relacionadas à estabilidade de tensão, transitórios eletromagnéticos e harmônicos e o máximo e mínimo de compensação reativa resultante destes valores para a carga pesada do ano 10. O mínimo para uma determinada barra é o maior valor entre CRest1, CRtran1 e CRharm1 e o máximo é o menor valor entre CRest2, CRtran2 e CRharm2. Por exemplo, para a barra B9, o mínimo corresponde a CRtran1 e o máximo a CRest2.

Tabela 4.14. Restrições de máximo e mínimo de compensação reativa (em Mvar) para cada avaliação técnica e para os limites resultantes.

Barra	CRest1	CRest2	CRtran1	CRtran2	CRharm1	CRharm2	CR Mínimo	CR Máximo
B4	0,0	<b>92,9</b>	<b>6,0</b>	-	-	Não 42,2	<b>6,0</b>	<b>92,9</b>
B7	<b>9,4</b>	21,75	7,2	-	8,2	<b>20,9</b>	<b>9,4</b>	<b>20,9</b>
B9	0,7	<b>5,3</b>	<b>3,6</b>	-	-	6,2	<b>3,6</b>	<b>5,3</b>
B12	36,7	<b>49,8</b>	12,0	-	26,4	66,6	<b>36,7</b>	<b>49,8</b>
B14	26,6	<b>39,6</b>	6,0	-	Não 21,1	62,6	<b>26,6</b>	<b>39,6</b>

Além das restrições da tabela 4.14 são impostos limites de tensão na ferramenta de otimização que tem o objetivo de atingir uma melhor margem de estabilidade de tensão. Tais limites são apresentados na tabela 4.15. No apêndice D, os limites de tensão impostos pelo setor elétrico estão indicados em detalhes. Observa-se que somente a barra B12 tem seu máximo menor que 1,05 pu. Tal valor (0,988 pu) tem por objetivo para limitar a tensão no ponto de colapso (ver tabela 3.10). Os Vmin iguais a 1,0 pu visam aumentar a MET.

Tabela 4.15. Restrições de tensão máxima e mínima para cada barra.

Barra	Vmin (pu)	Vmax (pu)
B4	0,95	1,05
B7	1,00	1,05
B9	1,00	1,05
B12	0,95	0,988
B14	1,00	1,05

Com as restrições inseridas no procedimento otimizado, selecionam-se as funções objetivo de minimizar perdas elétricas ativas e reativas e o montante de compensação reativa a ser instalado. Para o caso simulado não é utilizada a mudança de *tap* inicial como foi feito no item 3.2.3. O controle de tensão é realizado apenas pela compensação reativa *shunt* capacitiva alocada no sistema elétrico. Adota-se como condição inicial da avaliação técnica prévia CR Original mostrada na tabela 4.1.

A tabela 4.16 apresenta a compensação reativa otimizada (CR OTM), os capacitores comerciais mais próximos a este resultado (CR OTM Final) e a tensão em cada barra com estes equipamentos. Verifica-se que as tensões estão dentro dos limites estipulados. Apenas em B7 há uma violação desprezível de 0,0001 pu. É mostrada também a CR Total que é a indicada na tabela 4.11 e corresponde aos capacitores que foram aprovados em todas as avaliações técnicas. A CR Total é equivalente a CR Harmônicos.

Tabela 4.16. Tensão e compensação reativa das barras após a otimização.

Barra	CR Total (Mvar)	CR OTM (Mvar)	CR OTM Final (Mvar)	Tensão (pu)
B4	20,4	67,7	67,2	1,0364
B7	20,4	20,6	20,4	0,9999
B9	3,6	4,5	4,8	1,0021
B12	49,2	40,8	40,8	0,9597
B14	39,6	34,6	34,8	1,0003
<b>Total</b>	<b>133,2</b>	<b>168,2</b>	<b>168,0</b>	-

A tabela 4.17 permite que sejam comparados os valores das perdas elétricas e do carregamento das principais linhas do subsistema em estudo, os quais são obtidos ao serem instaladas as compensações reativas sugeridas no texto desta tese. Observa-se que, com a alocação da compensação reativa obtida pelo procedimento otimizado (CR OTM Final), tem-se perdas 0,7 MW e 1,7 Mvar menores que quando se realiza a avaliação técnica depois da otimização. No entanto, são necessários 34,8 Mvar para tal diminuição, 49,7 Mvar por MW reduzido. Além disso, o carregamento das linhas B1-B2 e B2-B3 diminui respectivamente 4% e 9,7% em relação à CR Total e o da linha B2-B10 é maior em 1,7%.

Isto ocorre porque são alocados 13,2 Mvar a menos nas barras B12 e B14 e 46,8 Mvar a mais em B4 (tabela 4.16). Este direcionamento para a instalação de um maior montante em B4 está relacionado com o objetivo escolhido para a otimização de minimizar as perdas elétricas que são mais elevadas na área crítica do subsistema (barras B3 a B7).

Tabela 4.17. Comparação das perdas elétricas e carregamento de linhas para as CR sugeridas neste texto.

Ano 10	Perdas		Carregamento de Linhas		
	MW	Mvar	B1-B2 (%)	B2-B3 (%)	B2-B10 (%)
<b>Sem Shunt</b>	14,7	53,6	108,4	106,9	143,1
<b>CR Original</b>	7,7	25,3	76,8	94,3	79,6
<b>CR B4 e Tap</b>	7,5	24,9	76,8	88,5	78,3
<b>CR Total (Harmônicos)</b>	7,5	24,9	76,9	88,2	78,4
<b>CR OTM Final</b>	6,8	23,2	72,9	78,5	80,1

A etapa seguinte é a confirmação se a compensação reativa otimizada (CR OTM Final) alcança ou não um resultado favorável em relação às avaliações técnicas citadas anteriormente. Constata-se que, apenas com respeito à estabilidade de tensão, não há necessidade de se modificar a CR OTM Final. O máximo carregamento sobe para 235,4 MW, a margem de estabilidade de tensão aumenta 8,1 MW (3,8%) e a tensão no ponto de colapso cai para 0,745 pu por ter uma tensão inicial de operação mais baixa (0,96 pu). A margem de potência reativa aumenta 3,0 Mvar em relação à CR B4 e Tap.

Ao se fazer a avaliação técnica de harmônicos, verifica-se a violação da  $DHl_V$  de 5ª harmônica de B7 (3,18%) e a  $DHT_V$  e  $DHl_V$  global de 5ª harmônica (7,33% e 6,58%). Alterando-se a compensação reativa da barra B7 para 18,0 Mvar estas restrições não são mais desrespeitadas.

Os resultados obtidos pela avaliação técnica em relação aos transitórios eletromagnéticos mostram que, com a diminuição da compensação reativa alocada em B7, a sobrecorrente sobe para 8,68 pu e em 100 ms para 4,51 pu, ficando a 0,01 pu do limite apresentado na tabela 3.24. A tabela 4.18 apresenta o resultado final para o procedimento proposto neste item.

Tabela 4.18. CR OTM Final para níveis de carga para o ano 10.

Barra	CR Leve (Mvar)	CR Média (Mvar)	CR Pesada (Mvar)	CR OTM Final (Mvar)
B4	-	1 de 30,0	1 de 30,0 e 1 de 37,2	<b>67,2</b>
B7	-	1 de 8,4	1 de 8,4 e 1 de 9,6	<b>18,0</b>
B9	-	-	1 de 4,8	<b>4,8</b>
B12	1 de 14,4	1 de 14,4 e 1 de 12,0	1 de 14,4, 1 de 12,0 e 1 de 14,4	<b>40,8</b>
B14	1 de 6,0	1 de 6,0 e 1 de 12,0	1 de 6,0, 1 de 12,0 e 1 de 16,8	<b>34,8</b>

## 4.5. Considerações Finais

Pelos resultados expostos neste capítulo e no anterior, verifica-se que a avaliação técnica pode ser incluída no procedimento otimizado da figura 2.1 de três maneiras: procedimentos individuais, global e otimizado expandido.

A vantagem dos procedimentos individuais é possibilitar a visão específica cada questão envolvida. As avaliações técnicas podem ser feitas independentemente e sem a necessidade de uma ordem preestabelecida. Entretanto, tem a desvantagem de ser um processo menos robusto, mais sujeito a ocorrência de soluções divergentes.

O procedimento global apresenta uma seqüência para se realizar as análises indicadas pelo processo individual – estabilidade de tensão, transitórios eletromagnéticos e harmônicos. Tal ordem tem como objetivo direcionar a solução para que atenda a todos estes critérios, além das restrições de tensão e fator de potência. Em situações de soluções mais complexas, pode haver a necessidade de se efetuar os passos da avaliação técnica por mais de uma vez.

O procedimento otimizado expandido corresponde a um aprimoramento do método global. A maior diferença deste procedimento em relação aos outros é a inclusão de uma avaliação técnica prévia antes de se definir a compensação reativa do plano de expansão. Tal avaliação é realizada seguindo a ordem das análises sugeridas na metodologia global.

No procedimento individual e global, a CR Final é alcançada utilizando-se primeiramente a ferramenta de otimização e depois se ajustando o resultado com relação às análises de estabilidade de tensão, transitórios eletromagnéticos e harmônicos. No procedimento otimizado expandido é feito o contrário, obtém-se uma CR Inicial com base nas avaliações técnicas e, a partir desta compensação, aplica-se a otimização e encontram-se os capacitores sugeridos. Os resultados desta última metodologia, normalmente, atingem valores mais adequados com relação às funções objetivo escolhidas e os critérios citados.

A desvantagem do procedimento otimizado expandido é requerer, em casos de soluções complexas, a realização da avaliação técnica por duas vezes, antes e após o processo de otimização.

Concluindo, todas as metodologias propostas podem ser utilizadas para se encontrar a compensação reativa para o plano de expansão, entretanto a do procedimento otimizado expandido é recomendada por apresentar resultados mais próximo do ótimo para as restrições de tensão, fator de potência, estabilidade de tensão, transitórios eletromagnéticos e harmônicos.

## 5

# Conclusões e Propostas de Continuidade

Os resultados obtidos confirmam a importância da avaliação técnica. Caso ela não fosse realizada, haveria a possibilidade da compensação reativa sugerida trazer para o sistema elétrico problemas de estabilidade de tensão, de transitórios eletromagnéticos e de harmônicos. Tais problemas poderiam causar interrupções ou até *blackout*, elevação das perdas elétricas, danos, sobreaquecimento e diminuição da vida útil de equipamentos, entre várias outras conseqüências.

No trabalho são introduzidas novas abordagens e etapa de avaliação técnica de CR na expansão. Aponta-se uma nova proposta para tratar a questão da tensão no ponto de colapso para a análise da estabilidade de tensão. É apresentada a determinação de barras críticas com relação aos transitórios eletromagnéticos com base nas ondas de refração e reflexão. Utiliza-se uma metodologia original para a determinação do montante dos capacitores os quais não permitem violação dos limites de distorção harmônica.

Para que a compensação reativa esteja adequada, respeitando os limites relativos à estabilidade de tensão, transitórios eletromagnéticos e harmônicos, indicam-se os passos para a alteração do plano de expansão os quais se constituem fundamentalmente da modificação do montante e da localização da CR ou da instalação de dispositivos mitigadores. A metodologia apresentada para este fim se mostra eficiente, como confirmado pelos exemplos expostos.

Os procedimentos propostos oferecem ao planejador uma seqüência de passos para se fazer a avaliação técnica, o que facilita significativamente seu trabalho. Inicialmente, são detalhados os *Procedimentos Individuais* e o *Procedimento Global*. Como evolução da pesquisa, é proposto o *Procedimento Otimizado Expandido* que sugere a realização de uma *Avaliação Técnica Prévia* antes da otimização da compensação reativa. A aplicação deste último obtém uma solução que, além de indicar a localização ótima dos capacitores a serem instalados, identifica o montante de compensação reativa que não viola as restrições de tensão, fator de potência, estabilidade de tensão, transitórios eletromagnéticos e harmônicos. O Procedimento Otimizado Expandido atinge melhores resultados que os do Procedimento Global. Ambos se mostram adequados aos objetivos do planejamento de

expansão – compensar a potência reativa do sistema em estudo e manter suas tensões dentro dos limites – minimizando as perdas elétricas e maximizando a disponibilidade de fluxo de potência pelas linhas.

Na pesquisa aqui apresentada, ênfase foi dada à avaliação técnica da compensação reativa associada à otimização do montante e da localização dos capacitores alocados, tendo em vista os aspectos de melhor utilização dos recursos do SEP, respeitando todos os limites impostos pela legislação do setor elétrico brasileiro. Como continuidade dos estudos relacionados a este tema, prevê-se a investigação mais aprofundada das análises econômicas envolvidas nesta escolha, completando a evolução do Procedimento Otimizado Expandido. Espera-se quantificar em valores monetários os benefícios trazidos pela compensação reativa – ganhos de atendimento adicional de mercado, redução de perdas e de energia não suprida, adiamento de obras planejadas – e seus custos – de instalação, manutenção, operação e do equipamento em si. Sugere-se a investigação de pesos para serem empregados na função objetivo do passo da otimização.

Ainda com respeito às propostas de continuidade do trabalho, recomenda-se que as avaliações técnicas propostas sejam incluídas na ferramenta computacional PlanEx, desenvolvida para o planejamento da expansão e já em uso pela empresa de energia elétrica CEMIG [P&D 04a]. A implementação facilitaria as análises dos planejadores, sendo muito proveitosa para o setor elétrico.

Outras pesquisas que viriam a contribuir significativamente para a evolução dos procedimentos de avaliação técnica são: investigação de um cálculo mais direto da tensão no ponto de colapso; aperfeiçoamento da entrada de dados no programa de transitórios para facilitar seu uso para os planejadores, estruturando modelos padrões de parâmetros do SEP; listagem de limites de sobretensões e sobrecorrentes para diversos equipamentos do sistema elétrico; pesquisa de novas formas de chaveamento (envolvendo o uso de semicondutores, por exemplo); aprofundamento dos estudos da estimação dos montantes dos capacitores quando são envolvidas várias fontes harmônicas e realocação da compensação reativa de outras barras.

Concluindo, espera-se que esta tese de doutorado contribua de forma significativa para futuros desenvolvimentos acadêmicos na área e para o setor elétrico, considerando os benefícios de uma compensação reativa adequada.

## Referências Bibliográficas

- [Abdel-Galil 01] Abdel-Galil, T.K., El-Saadany, E.F., Salama, M.M.A., *Implementation of Different Mitigation Techniques for Reducing Harmonic Distortion in Medium Voltage Industrial Distribution System*, IEEE, 2001.
- [Abed 99] Abed, A.M., *WSCC Voltage Stability Criteria, Undervoltage Load Shedding Strategy, and Reactive Power Reserve Monitoring Methodology*, IEEE, 1999.
- [Adams 98] Adams, R.A., Middlekauff, S.W., Camm, E.H., McGee, J.A., *Solving Customer Power Quality Problems Due to Voltage Magnification*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 13, No. 4, Outubro 1998.
- [Ajarapu 94] Ajarapu, V., Lau, P.L., Battula, S., *An Optimal Reactive Power Planning Strategy Against Voltage Collapse*, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 9, No. 2, Maio 1994.
- [Ajarapu 98] Ajarapu, V., Lee, B., *Bibliography on Voltage Stability*, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 13, No. 1, Fevereiro 1998.
- [Alegria 02] Alegria, M.I.C., Pires, F.A.C., *Análise de um Sistema Elétrico com Distorção Harmônica sob Condições de Falta*, XIV CBA, Natal – RN, 2002.
- [Alves 99] Alves, F.R., Fonseca, L.C.A., Freire, A.R.F., *Uso de Manobra Síncrona para Eliminação do Risco de Danificação de Transformadores Devido a Energização de Bancos de Capacitores 230kV*, XV SNPTEE, Foz do Iguaçu – PR, 1999.
- [Arentz 03] Arentz, D.S., Farias, A.L., *Influência de Pequenas Cargas Geradoras de Harmônicos Presentes no Sistema de Distribuição sobre a Rede de Transmissão*, X ERLAC, Puerto Iguazú – Argentina, 2003.
- [Aromataris 01] Aromataris, L., Arnera, P., Riubrugent, J., *Estudio Dinamico de Estabilidad de Tension Comparando Modelos de Carga Estatica y Carga Dinamica*, IX ERLAC, 2001.
- [Atkinson-Hope 04] Atkinson-Hope, G., Folly, K.A., *Decision Theory Process for Making a Mitigation Decision on Harmonic Resonance*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol.19, No.3, Julho 2004.
- [ATPDraw 03] ATPDraw, *Programa que calcula transitórios eletromagnéticos*, Copyright © SINTEF Energy Research, Norway, Versão Windows 3.9, 1998-2003.
- [Barbosa 05] Barbosa, M.A., *Explosões de Disjuntores em um Grande Consumidor Industrial : Investigações das Causas e Influências do Acoplamento com a Concessionária*, XVIII SNPTEE, Curitiba – PR, Outubro 2005.
- [Begovic 95] Begovic, M., Fulton, D., Gonzalez, M.R., Goossens, J., Guro, E.A., Haas, R.W., et al, *Summary of "System Protection and Voltage Stability"*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 10, No. 2, p631-638, Abril 1995.
- [Bhargava 93] Bhargava, B., Khan, A.H., Imece, A.F., Di Pietro, J., *Effectiveness Of Pre-Insertion Inductors For Mitigating Remote Overvoltages Due To Shunt Capacitor Energization*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 8, No. 3, Julho 1993.
- [Blooming 05] Blooming, P.E.T.M., *Capacitor Failure Analysis: A Troubleshooting Case Study*, IEEE, 2005.

## Referências Bibliográficas

- [Boonseng 01] Boonseng, C., Chompoo-inwai, C., Kinnares, V., Nakawiwat, K., Apiratikul, P., *Failure Analysis of Dielectric of Low Voltage Power Capacitors Due to Related Harmonic Resonance Effects*, IEEE, 2001.
- [Cardoso 99] Cardoso, R. M., *Ferramentas Computacionais Aplicadas ao Controle de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência*, CPDEE/UFMG, Belo Horizonte, 175p, 1999 (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica).
- [Carvalho 95] Carvalho, A.C.C., Puente, A.P., Fuchs, A., Portela, C.M., et al, *Disjuntores e Chaves – Aplicação em Sistemas de Potência*, Editora da Universidade Federal Fluminense (EDUFF), 1995.
- [Castro Jr. 03] Castro Júnior, F., Duarte, L.H.S., Novais, M.S., *Investigação Comparativa de Tecnologias Aplicáveis à Manobra de Bancos de Capacitores de Alta Tensão*, XVII SNPTEE, Uberlândia – MG, 2003.
- [CCPE 02] Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos (CCPE), *Crítérios e Procedimentos para o Planejamento da Expansão dos Sistemas de Transmissão*, Volume II, 144p, Novembro 2002.
- [Chang 00] Chang, C.S., Jiang, W.Q., Elangovan, *Worst-Case Performance Assessment Of Switching Overvoltage And Mitigation For Mass Rapid Transit System Using Genetic Algorithm*, IEEE, 2000.
- [Charles 03] Charles, P.C., Teixeira, J.S., *Influência da Representação de Cargas nos Estudos de Sobretensões Temporárias, Envolvendo Distorções Harmônicas – Uma Análise Crítica das Representações até Então Adotadas*, XVII SNPTEE, Uberlândia – MG, 2003.
- [Chaves 01] Chaves, F.S., *Proposta de Procedimento para Compensação Reativa e Controle de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência*, CPDEE/UFMG, Belo Horizonte, 107p, 2001 (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica).
- [Chaves 02] Chaves, F.S., Vale, M.H.M., *Controle de Tensão e Compensação Reativa – Procedimento Aplicado à Expansão de Sistemas Elétricos*, IX CBA – Congresso Brasileiro de Automática, Natal, Setembro 2002.
- [Chaves 03] Chaves, F.S., *Projeto de Tese II – Proposta Preliminar de “Crítérios para Avaliação Técnica dos Procedimentos de Expansão” Considerando a Influência da CR/CT nos Sistemas Elétricos*, CPDEE/UFMG, 2003, 47p.
- [Chaves 04] Chaves, F.S., *Relatório de Estudos de Estabilidade de Tensão, Transitórios Eletromagnéticos e Harmônicos*, CPDEE/UFMG, 130p, 2004.
- [Chaves 05a] Chaves, F.S., Vale, M.H.M., Valadares, J.R., Cortez, A.N., *Avaliação Técnica de Planos de Expansão de Compensação Reativa e Controle de Tensão*, SPGEE'05, UFMG, Setembro, 2005.
- [Chaves 05b] Chaves, F.S., Vale, M.H.M., *Avaliação Técnica de Transitórios Eletromagnéticos para Planos de Expansão de Compensação Reativa e Controle de Tensão*, XVIII SNPTEE, Curitiba, Outubro, 2005.
- [Coker 99] Coker, M.L., Kgasoane, H., *Load Modeling*, IEEE, p663-668, 1999.
- [Comitê IEEE 96] Surge Protective Devices Committee, *Impact of Shunt Capacitor Banks on Substation Surge Environment and Surge Arrester Applications*, Report by Working Group 3.4.17 of the IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 11, No. 4, p1798-1809, 1996.
- [Corasaniti 03] Corasaniti, F., Grosso, O., Rifaldi, A., *Análisis de Distribución de la Compensación en una Red Eléctrica con Cargas No-Lineales*, X ERLAC, Puerto Iguazú – Argentina, 2003.

## Referências Bibliográficas

- [Cortez 00] Cortez, A.N., Dornellas, C.R.R., Aguiar, L.B., Soto, J.R.O., et al, *Crêterios e Procedimentos de Estabilidade de Tensão para Planejamento do Sistema Elétrico Brasileiro*, VII SEPOPE, 2000.
- [Cortez 01a] Cortez, A.N., *Crêterios e Procedimentos para Avalia o de Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência*, CPDEE/UFMG, Belo Horizonte, 212p, 2001 (Disserta o de Mestrado em Engenharia Elétrica).
- [Cortez 01b] Cortez, A.N., Vale, M.H.M., *Influência da Resposta Dinâmica dos Geradores na Determina o da Margem de Estabilidade de Tensão – Proposta de Metodologia*, IX ERLAC, 2001.
- [Cortez 01c] Cortez, A.N., Vale, M.H.M., *Metodologia Alternativa para a Determina o da Margem de Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência – Impactos Técnicos e Econ micos*, IX ERLAC, 2001.
- [Coury 02] Coury, D.V., Santos, C.J., Tavares, M.C., Oleskovicz, M., *Transitórios Devido ao Chaveamento de Bancos de Capacitores em um Sistema de Distribui o da CPFL*, XIV CBA, Natal – RN, 2002.
- [Coury 98] Coury, D.V., Santos, C.J., Tavares, M.C., *Transient Analysis Resulting from Shunt Capacitor Switching in an Actual Electrical Distribution System*, Conference on Harmonics and Quality of Power ICHQP '98, 1998.
- [Crow 94] Crow, M.L., Lesieutre, B.C., *Voltage Collapse – An Engineering Challenge*, IEEE Potentials, pp-18-21, Abril 1994.
- [D'Ajuz 85] D'Ajuz, A., Nunes, I.G., Pereira, M.P., Resende, F.M., Amon Filho, J., Kastrup Filho, O., et al, *Equipamentos Elétricos – Especifica o e aplica o em subesta es de alta tensão*, Furnas Centrais Elétricas, 1985.
- [D'Ajuz 87] D'Ajuz, A., Fonseca, C.S., Carvalho, F.M.S., Amon Filho, J., Dias, L.E.N., Pereira, M.P., et al, *Transitórios Elétricos e Coordena o de Isolamento – Aplica o em Sistemas de Potência de Alta Tensão*, Furnas Centrais Elétricas, 1987.
- [Das 92] Das, J.C., *Effects Of Medium Voltage Capacitor Bank Switching Surges In An Industrial Distribution System*, IEEE, 1992.
- [Das 05] Das, J.C., *Analysis and Control of Large-Shunt-Capacitor-Bank Switching Transients* IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 41, No. 6, Dezembro 2005.
- [Dugan 03] Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Santoso, S., Beaty, H.W., *Electrical Power Systems Quality*, 2  Edi o, McGraw-Hill, 2003.
- [Dullni 06] Dullni, E., Shang, W., Gentsch, D., Kleberg, I., Niavesh, K., *Switching of Capacitive Currents and the Correlation of Restrike and Pre-ignition Behavior*, IEEE Transactions On Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 13, No. 1; Fevereiro 2006.
- [Dunsmore 92] Dunsmore, D.M., Taylor, E.R., Wirtz, B.F., Yanchula, T.L., *Magnification of Transient Voltages in Multi-voltage-level, Shunt-capacitor-compensated, Circuits*, IEEE Transactions On Power Delivery, 1992.
- [Efthymiadis 96] Efthymiadis, A.E., Guo, Y.-H., *Generator Reactive Power Limits and Voltage Stability*, IEE Power System Control and Management, Conference Publication No. 421, p196-199, Abril 1996.
- [Eletrobrás 85] *Curso de Sobretensões e Coordena o de Isolamentos em Sistemas de Alta Tensão de Corrente Alternada e Corrente Contínua*, Eletrobrás/UFRRJ, 1985.

Referências Bibliográficas

- [Fernandez 97] Fernandez, P.C., Zani, C.R., Carvalho, F.M.S., Esmeraldo, P.C.V., et al, *Estudo de Energização de Bancos de Capacitores de Grande Porte Realizado no Simulador Digital em Tempo Real (RTDS™) de Furnas Utilizando Disjuntores com Sincronizador*, XIV SNPTEE, Belém – PA, 1997.
- [Fernandez 04] Fernandez, P.C., Esmeraldo, P.C.V., Amom Filho, J., Zani, C.R., *Use Of Controlled Switching Systems In Powr System To Mitigate Switching Transients. Experience Trends And Benefits – Brazilian, Transmission & Distribution Conference & Exposition: Latin America*, IEEE, 2004.
- [Ferreira 99] Ferreira, L.C.A., Zambroni de Souza, A.C., Granville, S., *Medidas Operativas de Curto Prazo no Controle de Colapso de Tensão*, XV SNPTEE, Foz do Iguaçu – PR, 1999.
- [Ferreira 00] Ferreira, L.C.A., Zambroni de Souza, A.C., *Método Estático para Avaliação da Influência de Load Tap Changer na Estabilidade de Tensão*, VII SEPOPE, Curitiba – PR, 2000.
- [Ferreira 02] Ferreira, L.C.A., Souza, A.C.Z., Granville, S., Lima, J.W.M., *Interior Point Method Applied to Voltage Collapse Problems and System Losses-Reduction*, IEE Proc.-Gener. Transm. Dirtrib., Vol. 149, No. 2, Março 2002.
- [Filion 03] Filion, Y., Isbister, R., Coutu, A., *Experience with Controlled Switching Systems (CSS) used for Shunt Capacitor Banks: Planning, Studies and Testing Accordingly with CIGRE A3- 07 Working Group Guidelines*, IEEE, 2003.
- [Freire 99] Freire, A.R.F., Pontes, S.M.M., *Definição de Limites de Transmissão Considerando Restrições de Estabilidade de Tensão, Proteções e Qualidade da Energia*, XV SNPTEE, Foz do Iguaçu – PR, 1999.
- [Freire 01a] Freire, A.R.F., *A Operação de Bancos de Capacitores e Reatores Manobráveis e os Custos e Riscos Associados para as Empresas de Transmissão*, XVI SNPTEE, Campinas – SP, 2001.
- [Freire 01b] Freire, A.R.F., Barros, S.A., Pinto, S.O., Barbosa Filho, L., *Estudos de Transitórios Eletromagnéticos para a Energização de um Autotransformador de 550/230 kV – 600 MVA e Influência do Comportamento Transitório de Compensadores Estáticos e Sistemas de Proteção*, XVI SNPTEE, Campinas – SP, 2001.
- [Fugel 03] Fugel, T., Koenig, D., *Influence of Grading Capacitors on the Breaking Performance of a 24-kV Vacuum Breaker Series Design*, IEEE Transactions On Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 10, No. 4; Agosto 2003.
- [Gama 99] Gama, P.H., Oliveira, A., *Conservação da Energia e sua Relação com a Qualidade de Energia Elétrica*, XV SNPTEE, Foz do Iguaçu – PR, 1999.
- [Garcia 99] Garcia, A.V., Almeida, M.C., *Identificação de Ramos Críticos para Estabilidade Tensão Baseada na Análise Modal do Sistema*, XV SNPTEE, Foz do Iguaçu – PR, 1999.
- [Gonçalves 00] Gonçalves, R.A., Sereno, M.G., Nakazato, A., Ticon, S.D., *Investigation of Possible Harmonic Interaction Associated with the Installation of Reactive Power Compensation in the Rio Area*, VII SEPOPE, Curitiba – PR, 2000.
- [Grady 01] Grady, W.M., Santoso, S., *Understanding Power System Harmonics*, IEEE Power Engineering Review, Novembro, 2001.
- [Grebe 96] Grebe, T.E., *Application of Distribution System Capacitor Banks and Their Impact on Power Quality*, IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 32 No. 3, Maio, 1996.
- [Grebe 98] Grebe, T.E., Gunther, E.W., *Aplication of the EMTP for Analysis of Utility Capacitor Switching Mitigation Techniques*, 8ª International Conference on Harmonics and Quality of Power ICHQP'98 (IEEE), Atenas – Grécia, pp. 583-589, 1998.

Referências Bibliográficas

- [Greenwood 91] Greenwood, A., *Electrical Transients in Power Systems*, 2ª Edição, John Wiley & Sons, 1991.
- [Grijp 96] Grijp, M.HB., Hopkins, R.A., *Controlled Switching Of Shunt Capacitors*, IEEE, 1996.
- [Harmzw 02] Harmzw, *Programa para cálculo do comportamento harmônico de sistemas elétricos*, Copyright © CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Versão 3.0, 2002.
- [Huang 01] Huang, G., Zhang, H., *Dynamic Voltage Stability Reserve Studies For Deregulated Environment*, IEEE, 2001.
- [IEEE 81] IEEE *Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Power Converters*, IEEE Standard 519, Abril, 1981.
- [Izhar 03] Izhar, M., Hadzer, C.M., Masri, S., Idris, S., *A Study of Fundamental Principles to Power System Harmonic*, National Power and Energy Conference (PECon) 2003 Proceedings, Bangi – Malásia.
- [Jota 98] Jota, P.R.S., Islam, S.M., *Effect of realistic system modelling on low-voltage capacitor transient overvoltages*, IEE Proc-Gener. Transm. Distrib., Vol. 145, No. 6, Novembro 1998.
- [Keneschke 99] Keneschke, T.A., *Distortion And Power Factor Of Nonlinear Loads*, IEEE, 1999.
- [Kizilcay] Kizilcay, M., *Power Systems Transients and Their Computation*, University of Applied Sciences of Osnabrück, Germany.
- [Kopcak 02] Kopcak, I., Naturesa, J.S., Silva, L.C.P., Costa, V.F., *Uma Avaliação do Impacto da Carga na Estabilidade de Tensão de Sistemas de Energia via Fatores de Participação Modal*, XIV CBA, Natal – RN, 2002.
- [Kundur 94] Kundur, P., *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, 1994.
- [Lachs 00] Lachs, W.R., Sutanto, D., *Improving Voltage Stability Line Limits*, APSCOM 2000, p189-193, Hong Kong, 2000.
- [Leão 01] Leão, R.P.S., Albuquerque, I.C., *Simulação da Resposta ao Transitório de Chaveamento em Sistemas de Potência Usando PSPICE*, XVI SNPTEE, Campinas, 6p, 2001.
- [Lobato 98] Lobato, M.V.C., *Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica: Estudo do Fenômeno e de Métodos para Análise Estática*, CPDEE/UFMG, Belo Horizonte, 1998 (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica).
- [Lopes 02] Lopes, B.I.L., Ferreira, L.C.A., Albuquerque, V.O., Zambroni de Souza, A.C., *Bloqueio de LTC como Ação de Controle Para Evitar Colapso de Tensão*, XIV CBA, Natal – RN, 2002.
- [Maheshwarapu 98] Maheshwarapu, S., *New Static  $\alpha$ -Coefficients for Reactive Power Planning In Power Systems*, IEEE, 1998.
- [Manzoni 02] Manzoni, A., Taranto, G.N., Falcão, D.M., *Comparação entre o Fluxo de Potência, Simulação Rápida e Simulação Completa na Análise da Estabilidade de Tensão*, XIV CBA, Natal – RN, 2002.
- [Martinez 05a] Martinez, J.A., Gustavsen, B., Durbak, D., *Parameter Determination for Modeling System Transients—Part I: Overhead Lines*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 20, No. 3, Julho 2005.

## Referências Bibliográficas

- [Martinez 05b] Martinez, J.A., Mahseredjian, J., Khodabakhchian, B., *Parameter Determination for Modeling System Transients — Part V: Surge Arrester*, IEEE Transactions On Power Delivery, vol. 20, no. 3, Julho 2005.
- [Martinez 05c] Martinez, J.A., Mahseredjian, J., Khodabakhchian, B., *Parameter Determination for Modeling System Transients — Part VI: Circuit Breakers*, IEEE Transactions On Power Delivery, vol. 20, no. 3, Julho 2005.
- [Martins 00] Martins, A.C.B., Pinto, H.J., Brito, N.H., Vasconcelos, L.F., et al, *Criteria and Metodologies Established in the Ambit of GTAD/SCEL/GCOI Voltage Collapse Task Force for Studies on Voltage Stability in the Brazilian North/Northeast, South/Southeast e North/South Interconnected Systems*, IEEE, p531-536, 2000.
- [Martins 02] Martins, A.C.P., Bretas, N.G., *Simulação Estática do Colapso de Tensão por Meio de um Fluxo de Carga Continuado Considerando os Limites Operacionais dos Geradores*, XIV CBA, Natal – RN, 2002.
- [Matlab 01] Matlab, *Programa para cálculos matemáticos em geral*, Copyright © The Math Works, Inc., Versão 6.1.0.450 Release 12.1, Maio 2001.
- [McCoy 94] McCoy, C.E., Floryancic, B.L., *Characteristics And Measurement Of Capacitor Switching At Medium Voltage Distribution Level*, IEEE Transactions On Industry Applications, 1994.
- [McGranaghan 92] McGranaghan, M.F., Zavadil, R.M., Hensley, G., Singh, T., And Samotyj, M., *Impact Of Utility Switched Capacitors On Customer Systems - Magnification At Low Voltage Capacitors*, IEEE Transaction On Power Delivery, 1992.
- [Medeiros 03] Medeiros, A.D.R., Salgado, R., Zürn, H.H., *Congestion Due to Reactive Power: Cost Allocation*, IEEE Bologna PowerTech Conference, Bologna, Itália, Junho 2003.
- [Meister 05] Meister, A., Oliveira, M.A..G., *Comparação da Representação de Modelos de Varistores de Óxido de Zinco no Programa ATP Para Proteção Contra Sobretensões*, XVIII SNPTEE, Curitiba – PR, 2005.
- [Menezes 02a] Menezes, T., Affonso, C., Silva, L.P., Lima, F., Costa, V.F., Secundino Soares, *Pré-despacho da Operação de Sistemas de Energia com Otimização de Reativos para a Melhoria da Margem de Estabilidade de Tensão*, XIV CBA, Natal – RN, 2002.
- [Menezes 02b] Menezes, T., Silva, L.C.P., Affonso, C., Costa, V.F., Secundino, S., *MVAR Management on the Pre-dispatch Problem for Improving Voltage Stability Margin*, IEEE, p1690-1694, 2002.
- [Miller 82] Miller, T.J.E., *Reactive Power Control in Electric Systems*, John Wiley & Sons, New York, 381p, 1982.
- [MME 06] Ministério de Minas e Energia (MME) – Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, *Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica – 2006-2015*, Março 2006.
- [Mohagheghi 05] Mohagheghi, S., Stefopoulos, G.K., Parniani, M., *Reactive Compensation Techniques for Increasing Loadability of Long Primary Distribution Lines*, IEEE, 2005.
- [Momoh 98] Momoh, J.A., Zhu, J., *A New Approach to VAR Pricing and Control in the Competitive Environment*, IEEE, 1998.
- [Moor Neto 01] Moor Neto, J.A., Jesus, N.C., Piesanti, L.L., *Impacto da Otimização do Fluxo de Potência Reativa na Qualidade de Energia em um Sistema de Distribuição*, IX ERLAC, 2001.

## Referências Bibliográficas

- [Moura 02] Moura, C.C.M., Tostes, M.E.L., Santos, E.P., Oliveira, R.C.L., Branco, T.M.M., Bezerra, U.H., *Aplicação de Algoritmos Genéticos para Determinar os Parâmetros de um Filtro Harmônico Passivo Utilizado em Consumidores de Baixa Tensão*, XIV CBA, Natal – RN, 2002.
- [Moura 03] Moura, R.D., Prada, R.B., Bianco, A., Pilotto, L.A.S., *Seleção e Ordenação de Contingências para Avaliação das Condições de Estabilidade de Tensão*, X ERLAC, Puerto Iguazú – Argentina, 2003.
- [Murthy 98] Murthy, K.S., *Impact of Capacitor Installations on Networks and Systems*, Power Quality'98, p203-216, 14p, Índia, Junho 1998.
- [Musirin 02a] Musirin, I., Rahman, T.K.A., *On-Line Voltage Stability Based Contingency Ranking Using Fast Voltage Stability Index (FVSI)*, IEEE, 2002.
- [Musirin 02b] Musirin, I., Rahman, T.K.A., *Estimating Maximum Loadability for Weak Bus Identification Using FVSI*, IEEE Power Engineering Review, Novembro 2002.
- [Musirin 04] Musirin, I., Rahman, T.K.A., *Voltage Stability Based Weak Area Clustering Technique in Power System*, National Power & Energy Conference Proceedings, Kuala Lumpur, Malásia, 2004.
- [Naidu 85] Naidu, S.R., *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*, Editora Grafset, Campina Grande, Eletrobrás/UFPA, 1985.
- [Naturesa 02] Naturesa, J.S., Domingues, A.F., Silva, L.C.P., Costa, V.F., *Influência de Compensadores Estáticos de Reativos na Estabilidade de Tensão em Sistema de Energia Elétrica*, XIV CBA, Natal – RN, 2002.
- [ONS 04] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), *Procedimentos de Rede do ONS*, 2004.
- [Ortmeyer 96] Ortmeyer, T.H., Hiyama, T., *Distribution System Harmonic Filter Planning*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 11, No. 4, Outubro, 1996.
- [P&D 02] Vale, M.H.M., Chaves, F.S., Valadares, J.R., *Banco Digital de Referências – Projeto P&D CEMIG / ANEEL – Critérios e Procedimentos para Compensação Reativa e Controle de Tensão – UFMG -LRC*, Outubro 2002.
- [P&D 04a] Vale, M.H.M., Chaves, F.S., Silva, B.A.C., Mariano Jr., L. Valadares, J.R., *Projeto P&D CEMIG / ANEEL – Critérios e Procedimentos para Compensação Reativa e Controle de Tensão – UFMG -LRC*, Abril, 2002-2004.
- [P&D 04b] Vale, M.H.M., Chaves, F.S., Silva, B.A.C., Mariano Jr., L. Valadares, J.R., *Critérios e Procedimentos para Compensação Reativa e Controle de Tensão*, Artigo de Relatório Técnico, 2004.
- [Pamplona 02] Pamplona, F.P., Fernandes Jr., D., Souza, B.A., Neves, W.L.A., *Sobretensões Transitórias Decorrentes de Manobras de Bancos de Capacitores*, XIV CBA, Natal – RN, 2002.
- [Paul 93] Paul, D., Venugopalan, S.I., *Power Distribution System Equipment Overvoltage Protection*, IEEE, 1993.
- [Piantino 99] Piantino, E.A., Feitosa, J.M.S., *Projeto e Desenvolvimento de um Sincronizador para Manobra de Banco de Capacitores*, XV SNPTEE, Foz do Iguaçu – PR, 1999.
- [Pomilio 97] Pomilio, J.A., *Harmônicos e Fator de Potência: um Curso de Extensão*, FEEC, UNICAMP, 1997.
- [Pontes 01] Pontes, C.E.V., Nascimento A.R., Aires, J.C.O., *Esquemas de Emergência da Área Rio – Aspectos Econômicos e Estratégicos*, IX ERLAC, 2001.

Referências Bibliográficas

- [Poshtan 04] Poshtan, M., Rastgoufard, P., Singh, B., *Contingency Ranking for Voltage Stability Analysis of Large-Scale Power Systems*, IEEE, 2004.
- [Prada 06] Prada, R.B., Lafitte, J.L., *Avaliação das Condições de Segurança de Tensão na Presença de Motores de Indução e Capacitores Chaveáveis*, X SEPOPE, Florianópolis – Brasil, Maio 2006.
- [PSS/E 01] PSS/E, *Power System Simulator for Engineering*, Versão 28.0, Copyright © Power Technologies, Inc. (PTI), 1976-2001.
- [Quadros 01] Quadros, M.A., Kassick, E.V., *Uso de Filtros Passivos em Topologia Híbrida (Série e Paralela) para Sucessão de Harmônicas em Sistemas Elétricos*, XVI SNPTEE, Campinas – SP, 2001.
- [Rahman 95] Rahman, T.K.A., Jasmon, G.B., *A New Technique For Voltage Stability Analysis In A Power System and Improved Loadflow Algorithm For Distribution Network*, IEEE, 1995.
- [Rocha 97] Rocha, R., Carvalho, A.C., Távora, J.L., *Manobra Controlada: Modelagem da Suportabilidade Dielétrica do Disjuntor Durante a Operação de Fechamento*, XIV SNPTEE, Belém – PA, 1997.
- [Rocha 99] Rocha, C.A., *Análise da Compensação da Potência Reativa e Distorções Harmônicas em Redes Elétricas Industriais*, PPGEE/PUC-Minas, Belo Horizonte, 160p, 1999 (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica).
- [Rosehart 03] Rosehart, W.D., Cañizares, C.A., Quintana, V.H., *Multiobjective Optimal Power Flows to Evaluate Voltage Security Costs in Power Networks*, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 18, No. 2, Maio 2003.
- [Ross 97] Ross, R.P.D., Lima, A.G.G., Guarini, A.P., Pinto, R.J., Rangel, R.D., *Análise e Medição da Qualidade de Energia*, XIV SNPTEE, Belém – PA, 1997.
- [Sabot 93] Sabot, A., Morin, C., Guillaume, C., Pons, A., Pizzo, G.L., Mori, H.U., *A Unique Multipurpose Damping Circuit For Shunt Capacitor Bank Switching*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 8, No. 3, Julho 1993.
- [Saied 04a] Saied, M., *Analysis of the Amplitude and Frequencies of the Voltage Magnification Transients in Distribution Networks due to Capacitor Switching*, IEEEWPES Transmission CL Distribution Conference & Exposition: Latin America, 2004.
- [Saied 04b] Saied, M.M., *Capacitor Switching Transients: Analysis and Proposed Technique for Identifying Capacitor Size and Location*, IEEE Transactions On Power Delivery, vol. 19, no. 2, pp. 759-765, 2004.
- [Santos 02] Santos, C.J., Coury, D.V., Olescovicz, M., Arruda, E.F., *Transitórios Devidos ao Restabelecimento de Alimentadores num Sistema Elétrico de Distribuição na Presença de Bancos de Capacitores Fixos Instalados em Derivação*, XV SENDI, 7p, 2002.
- [Santoso 01] Santoso, S., Lamoree, J.D., McGranaghan, M.F., *Signature Analysis to Track Capacitor Switching Performance*, IEEE, pp. 259-263, 2001.
- [Santoso 05] Santoso, S., Maitra, A., *Empirical Estimation of System Parallel Resonant Frequencies Using Capacitor Switching Transient Data*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 20, No. 2, Abril, 2005.
- [Shwehdi 00] Shwehdi, M.H., Sultan, M.R., *Power Factor Correction Capacitors; Essentials and Cautions*, IEEE, 2000.
- [Silva 01] Silva, L.C.P., Costa, V.F., Xu, W., *Avaliação do Impacto dos Geradores na Capacidade de Transferência de Potência de Sistemas de Energia Elétrica via Fatores de Participação Modal*, XVI SNPTEE, Campinas – SP, 2001.

## Referências Bibliográficas

- [Silveira 99] Silveira, S.F., *Controle de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência: Estudo de Estratégias Globais*, CPDEE/UFMG, Belo Horizonte, 89p, 1999 (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica).
- [Soares 01] Soares, V.L.C., Duailibi, C.G., *Comparação de Técnicas de Análise de Estabilidade de Tensão*, XVI SNPTEE, Campinas – SP, 2001.
- [Souza 97] Souza, A.C.Z., Caiiizares, C.A., Quintana, V.H., *New Techniques to Speed Up Voltage Collapse Computations Using Tangent Vectors*, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 12, No. 3, Agosto 1997.
- [Souza 04] Souza, A.C.Z., Honório, L.M., Torres, G.L., Lambert-Torres, G., *Increasing the Loadability of Power Systems Through Optimal-Local-Control Actions*, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 19, No. 1, Fevereiro 2004.
- [Subjak 90] Subjak Jr., J.S., Mcquilkkin, J.S., *Harmonics - Causes, Effects, Measurements, and Analysis: An Update*, IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 26. No. 6., Novembro, 1990.
- [Takahata 00] Takahata, A.Y., Carijó, L.M.S., Martins, A.C.B., Cortez, A.N., et al, *Critérios e Procedimentos de Estabilidade de Tensão para Planejamento do Sistema Elétrico Brasileiro*, VII SEPOPE, 2000.
- [Taylor 94] Taylor, C.W., *Power System Voltage Stability*, McGraw-Hill, 273p, 1994.
- [Tinggren 99] Tinggren, R., Hu, Y., Tang, L., Mathews, H., Tyner, R., *Power Factor Controller – An Integrated Power Quality Device*, IEEE, 1999.
- [Valadares 01a] Valadares, J.R., *Proposta de Políticas, Critérios e Procedimentos para Compensação Reativa e Controle de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência*, CPDEE/UFMG, Belo Horizonte, 212p, 2001 (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica).
- [Valadares 01b] Valadares, J.R., Vale, M.H.M., *Políticas, Critérios e Procedimentos para Compensação Reativa e Controle de Tensão*, XVI SNPTEE, Campinas – SP, 6p, Outubro 2001.
- [Vale 00] Vale, M.I.M., Vale, M.H.M., Cardoso, R.M, Silveira, S.F., *Electric Power System Voltage Control*, VII SEPOPE, Curitiba, Paraná, Brasil, 7p, Maio 2000.
- [Vale 03] Vale, M.H.M., Chaves, F.S., Silva, B.A.C., Valadares, J.R., *Ferramenta Computacional Aplicada à Expansão – Compensação Reativa / Controle de Tensão*, X ERLAC, Puerto Iguazú – Argentina, 2003.
- [Vale 04] Vale, M.H.M., Chaves, F.S., Silva, B.A.C., Cortez, A.N., Valadares, J.R., Teixeira, J.C., *Avaliação Técnica de Alternativas de Expansão – Compensação Reativa e Estabilidade de Tensão*, IX SEPOPE, Rio de Janeiro – RJ, 2004.
- [Vale 05a] Vale, M.H.M., Chaves, F.S., Silva, B.A.C., Mariano Jr., L., Valadares, J.R., *Critérios e Procedimentos para Compensação Reativa e Controle de Tensão*, CITENEL, Florianópolis, Novembro, 2005.
- [Vale 05b] Vale, M.H.M., Chaves, F.S., *Compensação Reativa e Controle de Tensão – Avaliação Técnica de Alternativas de Expansão nos Aspectos de Estabilidade de Tensão*, XI ERIAC, Hernandieriaz – Paraguai, Maio, 2005.
- [Valle 01] Valle, A.C.M., Guimarães, G.C., Oliveira, J. C., Morais, A. J., *Using Tangent Vectors and Eigenvectors in Power System Voltage Collapse Analysis*, IEEE Porto Power Tech Conference, Porto – Portugal, Setembro 2001.
- [Venkatesh 02] Venkatesh, B., Ranjan, R., Gooi, H.B., *Effect of Minimizing Var Losses on Voltage Stability Margin in a Unified OPF Framework*, IEEE Power Engineering Review, p45-46, Novembro 2002.

## Referências Bibliográficas

- [WANAREDE 03] WANAREDE-GRF, *Programa de Planejamento e Operação Elétrica do CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – Empresa do Grupo Eletrobrás)*, Versão V08, Janeiro 2003.
- [Watanabe 02] Watanabe, E.H., Aredes, M., Akagi, H., *The p-q Theory for Active Filter Control: Some Problems and Solutions*, XIV CBA, Natal – RN, 2002.
- [Yehia 98] Yehia, M., Ramadan, R., El-Tawil, Z., Tarhini, K., *An Integrated Technico-Economic Methodology for Solving Reactive Power Compensation Problem*, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 13, No. 1, Fevereiro 1998.
- [Yousif 04] Yousif, S.N.A.L., Wanik, M.Z.C., Mohamed, A., *Implementation of Different Passive Filter Designs for Harmonic Mitigation*, National Power and Energy Conference (PECon) 2004 Proceedings, Kuala Lumpur – Malásia, 2004.
- [Zalucki 00] Zalucki, Z., *Restrike And Reignition Voltages Of A Short Contact Gap During Capacitance Switching Using Vacuum Circuit Breakers*, 19<sup>th</sup> Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, IEEE, 2000.

# Apêndice A

## Estabilidade de Tensão

### Definições de Interesse

Neste apêndice são apresentadas definições de interesse, no que concerne aos desenvolvimentos deste trabalho, relativas ao tema *Estabilidade de Tensão*. Tais definições foram retiradas da dissertação de mestrado [Cortez 01a], onde o autor registra de forma organizada e detalhada as diversas definições que se apresentam sobre o assunto. Adicionalmente, este texto inclui uma explicação sobre a Análise de Sensibilidade utilizada na avaliação técnica para selecionar as barras candidatas a receber compensação reativa, procedimento este proposto na dissertação de mestrado [Chaves 01]. Tais tópicos subsidiam a compreensão dos desenvolvimentos da tese.

#### A.1. Definições de Interesse

##### Estabilidade de Tensão

CIGRÉ: um sistema de potência em um dado ponto de operação e sujeito a uma determinada perturbação é estável, sob o ponto de vista da estabilidade de tensão, se as tensões nas cargas das regiões próximas são capazes de atingir novos valores de equilíbrio pós-perturbação.

IEEE: em um sistema estável, quando a admitância da carga cresce, a sua potência também aumenta; tanto a demanda quanto as tensões são controláveis.

##### Instabilidade de Tensão

IEEE: instabilidade de tensão é um estado de operação do sistema onde a tensão permanece decaindo de forma brusca ou lenta. A instabilidade de tensão pode ser provocada por uma perturbação, ou por um aumento de carga, ou devido à mudança do ponto de operação do sistema. O decaimento das tensões pode durar de poucos segundos a vários minutos. Caso este decaimento se mantenha, ocorrerá uma instabilidade angular ou mesmo um colapso de tensão.

CIGRÉ: o sistema poderá ter a sua estabilidade global retomada, se os controles que contribuem para a instabilidade atingirem os seus limites ou se alguma outra ação de controle for adotada (por exemplo, corte de carga).

### Margem de Estabilidade de Tensão

Entende-se por margem de estabilidade o acréscimo máximo de carga, a partir do caso base, que o sistema pode atender até atingir o limite de estabilidade de tensão definido pelo “nariz” da curva PV. Para a obtenção dessas margens utilizam-se os métodos de curvas PV. A curva é traçada através do cálculo de sucessivos fluxos de potência, resolvidos pelo método de Newton convencional. Segundo [Martins 00], podem-se definir três tipos de margens de estabilidade de tensão:

- Margem em MW:  
A margem pode ser um valor fixo para qualquer condição e deve ser atualizada sempre que houver expansão do sistema ou indisponibilidades por longos períodos de tempo. A margem pode ser um valor percentual da carga de uma área ou do fluxo para uma determinada região.
- Margem em Mvar:  
A margem medida em uma curva QV pode ser a medida entre a ponta do “nariz” e o eixo V. A margem pode, ainda, ser a medida até um determinado nível de tensão. A reserva de potência reativa efetiva de unidades geradoras representativas pode ser um parâmetro a ser utilizado.
- Dependência do Nível de Contingência:  
A margem dependerá do nível de contingência arbitrado: Simples; Dupla; Múltipla Provável.

### Metodologia de Análise Estática

A metodologia de análise estática é a mais conhecida e utilizada internacionalmente, principalmente pela simplicidade e rapidez nas simulações. Esta metodologia se baseia na utilização do fluxo de potência convencional, onde se altera o Jacobiano do sistema, para permitir que o ponto de colapso seja alcançado, sem que haja divergência por singularidade desta matriz. Avalia-se a margem de potência ativa ou reativa através de processamentos sucessivos de fluxos de potência ou calculando-se diretamente o ponto de colapso de tensão.

Neste tipo de metodologia são feitas análises de curvas PV e QV para a determinação das margens de estabilidade e os índices para colapso de tensão, tais como, reserva de potência reativa da geração, quedas de tensão, perdas ativas e reativas, variação da tensão com a potência reativa, variação da potência reativa com a potência ativa, entre outros.

Em [Lobato 98] são discutidas as principais ferramentas matemáticas para análise estática de estabilidade de tensão: Mínimo Valor Singular (MVS); Mínimo Autovalor (MAV); Método de Continuação; Método Direto (Ponto de Colapso) e Método da Bifurcação mais Próxima (MBMP).

Neste trabalho, adota-se o Método da Continuação como ferramenta de análise estática para se obter as curvas PV e QV e realizar uma análise de sensibilidade. O fluxo de potência não se torna divergente próximo ao ponto de colapso de tensão porque o método da continuação não permite que o Jacobiano fique singular neste ponto. Tal método utiliza o vetor tangente como ferramenta.

O vetor tangente é a razão entre a variação da tensão (ou do ângulo) e a variação da carga. O parâmetro usado para a análise é  $\lambda$ , que é o aumento da carga imposto em todas as barras exceto a barra *swing*. A barra crítica é aquela que tem o maior valor do sistema no vetor tangente o qual, segundo [Valle 01], é definido pela equação A.1 onde  $M'$  e  $L'$  representam as linhas inferiores da inversa da matriz jacobiana,  $V$  é a tensão,  $\lambda$  é o parâmetro relativo ao aumento da carga e  $P_k$  e  $Q_k$  são as potências ativa e reativa, respectivamente. O vetor tangente também pode ser representado pela equação A.2.

$$\frac{\Delta V}{\Delta \lambda} = [M' \quad L'] \begin{bmatrix} P_k \\ Q_k \end{bmatrix} \quad (A.1)$$

$$\frac{dx}{d\lambda} = \begin{bmatrix} \frac{d\theta_1}{d\lambda} \\ \frac{d\theta_2}{d\lambda} \\ \vdots \\ \frac{d\theta_{n-1}}{d\lambda} \\ \frac{d\theta_n}{d\lambda} \\ \frac{dV_1}{d\lambda} \\ \vdots \\ \frac{dV_m}{d\lambda} \\ \frac{d\lambda}{d\lambda} \end{bmatrix} \quad (A.2)$$

## A.2. Análise de Sensibilidade – Barras Candidatas

O objetivo de se apontar barras candidatas é a escolha daquelas que exercem maior ou menor influência sobre as demais, dependendo da situação desejada, a fim de que seja gasto menos montante de potência reativa para atender a uma determinada meta.

Para a seleção de barras candidatas existem diferentes análises de sensibilidades. A que se mostra mais adequada para o trabalho é aquela utilizada em [Chaves 01]. Esta é feita alocando-se 1 Mvar na barra que se deseja analisar e verificando-se as barras que mais são influenciadas por esta mudança (figura A.1(a)). O processo inverso também pode

ser feito, ou seja, aloca-se 1 Mvar (por vez) nas demais barras e verificam-se quais delas mais influenciam a barra sob análise (figura A.1(b)).

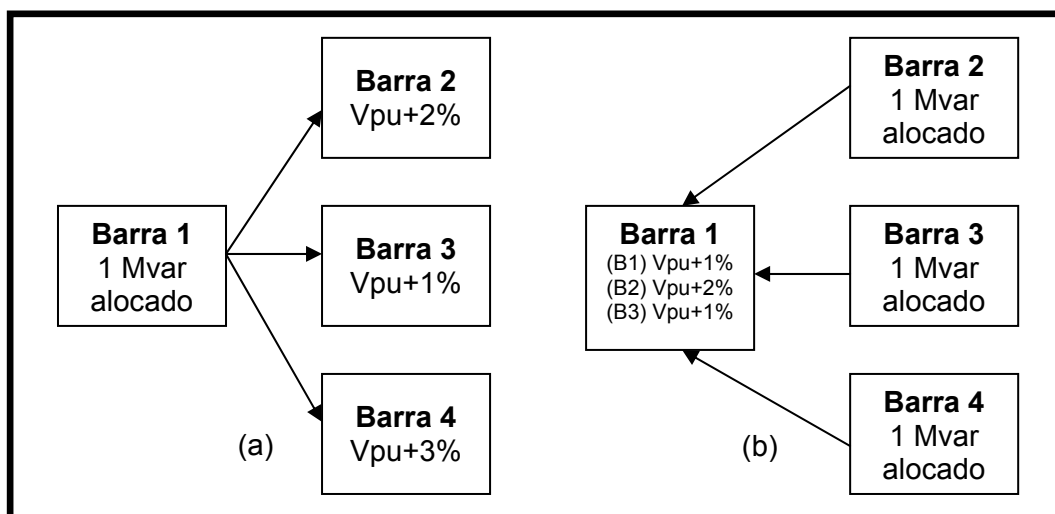


Figura A.1. Diagrama da análise de sensibilidade utilizada em [Chaves 01].

Para facilitar a apresentação do processo, opta-se por explicá-lo por meio de um exemplo simples, composto por um circuito de três linhas e três cargas. O objetivo da análise de sensibilidade deste exemplo é identificar qual é a barra candidata para compensar a potência reativa demandada pela barra 1. Os dois processos apresentados na figura A.1 são mostrados.

Os processos (a) e (b) da figura A.1 podem ser constatados pela tabela A.1. O processo (a) corresponde a uma única coluna, por exemplo, aloca-se x Mvar na Barra 1 e verifica-se qual é a influência dela nas demais barras e nela mesma. O processo (b) está relacionado com uma única linha, por exemplo, aloca-se x Mvar nas Barras 1, 2 e 3 e identifica-se qual delas mais influencia uma determinada barra.

Tabela A.1. Resultados do exemplo da análise de sensibilidade.

Barras	Barra 1 compensada		Barra 2 compensada		Barra 3 compensada	
	V (pu)	Varição (%)	V (pu)	Varição (%)	V (pu)	Varição (%)
<b>Barra 1</b>	0,9873	0,23	0,9865	0,15	0,9856	0,06
<b>Barra 2</b>	0,9623	0,24	0,9690	0,94	0,9606	0,06
<b>Barra 3</b>	0,9833	0,23	0,9820	0,10	0,9828	0,18

Como se pode notar, a compensação reativa na barra 1 influencia mais a barra 2. Com a compensação na barra 2, ela mesma é a mais influenciada, o mesmo ocorrendo com a barra 3. Já na análise de sensibilidade do processo (b), a barra 3 é mais sensível à

compensação na barra 1 e as outras duas barras são a elas mesmas. Normalmente, uma barra é mais sensível à sua própria compensação. Entretanto, se, no exemplo anterior, houver uma restrição de que não se pode alocar nenhum capacitor *shunt* na barra 1. A análise de sensibilidade é muito útil para indicar qual é a barra que mais a influencia. Para este caso a barra candidata é a 2, pois, para variar  $x$  pu na tensão da barra 1, seriam necessários cerca de 2,5 vezes menos Mvar na barra 2 do que na barra 3.

O processo inverso também pode ser de interesse, por exemplo, quando a barra 2 está com a tensão próxima aos limites superiores e a barra 3 carece de compensação reativa ou controle de tensão. Neste caso, a barra candidata é aquela que menos sensibiliza a tensão na barra 2 que, no caso, é a barra 3, com 0,06%. A barra 3 é a que menos a influencia (0,18%), quando se comparam as sensibilidades próprias (barra  $i$  em relação a  $i$ ), o que pode levar a um grande montante de potência reativa alocada para suprir a necessidade da própria barra. Em casos como este, devem-se analisar outras possibilidades para averiguar o que é mais vantajoso.

# Apêndice B

## Transitórios Eletromagnéticos

### Estudos Complementares

Neste apêndice, três questões relacionadas ao tema Transitórios Eletromagnéticos são tratadas: (i) definições de termos utilizados no texto – encontradas em várias referências [Eletrobrás 85, Das 92, Carvalho 95, Naidu 85, Greenwood 91]; (ii) detalhamento do processo de escolha de barras críticas – inédita na literatura e muito importante para o procedimento proposto no item 3.3.2; e (iii) simulações de chaveamento de capacitores – fundamentais para se confirmar a grande influência que a configuração do sistema e o montante e a localização da compensação reativa exercem sobre os transitórios eletromagnéticos.

#### B.1. Definições de Termos Utilizados no Texto

##### Current Chopping

Quando uma corrente relativamente pequena é interrompida por um disjuntor, a ação dos dispositivos de supressão de arco pode fazer com que a mesma seja levada a zero abrupta e prematuramente, antes do zero normal. Isto é chamado corte de corrente ou *current chopping*. Tal forma de supressão de corrente pode dar origem a uma sobretensão anormal em virtude da energia magnética que fica armazenada no circuito.

##### Prestrike ou Pré-ignição

Um *prestrike* pode ocorrer no fechamento do disjuntor, estabelecendo um fluxo de corrente antes que os contatos se liguem fisicamente. Este fenômeno não acontece freqüentemente devido à qualidade dos disjuntores atuais.

##### Corrente Inrush

É a corrente transitória de energização que percorre um circuito, ao se conectarem equipamentos elétricos que se comportam praticamente como um curto-circuito no instante do chaveamento.

##### Ligação Back-to-back

A ligação *back-to-back* se caracteriza pela energização de um capacitor em paralelo com outro já conectado ao sistema elétrico.

### Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT)

A Tensão de Restabelecimento Transitória é aquela que se estabelece após a separação elétrica dos contatos do disjuntor, quando a conexão elétrica se mantém através do arco elétrico que rompe concomitante ao início do afastamento.

### Reacendimento (ou *Restrike*) e Reignição

Após a extinção da corrente, o disjuntor deve suportar entre seus terminais a tensão que é imposta a ele pelo sistema. Se o arco reacender, a corrente tornará a fluir. Este fenômeno pode ser de origem térmica ou dielétrica. O **reacendimento térmico** se caracteriza pela incapacidade do disjuntor de resfriar o arco e obter sua conseqüente extinção. O meio é suficientemente aquecido para permitir a ionização térmica, ocasionando uma avalanche. O arco se reacende e a corrente torna a fluir. Se, por outro lado, o disjuntor é capaz de resfriar o arco adequadamente, porém não suporta a tensão de restabelecimento imposta pelo sistema, o **reacendimento é dielétrico**. Neste caso, o valor da TRT ultrapassa a suportabilidade dielétrica do meio entre contatos, causando uma descarga.

Por norma, a **reignição** é definida como um restabelecimento do arco elétrico ocorrido até ¼ de ciclo após o zero da corrente, independentemente da origem do mesmo ser térmica ou dielétrica. O restabelecimento do arco após um período superior a este é denominado **reacendimento ou *restrike***. Na interrupção de correntes capacitivas, os reacendimentos são fenômenos mais críticos que as reignições.

## **B.2. Barras Críticas de Transitórios Eletromagnéticos**

O objetivo de se acharem barras críticas para os transitórios eletromagnéticos é descobrir qual delas é a que sofre a maior sobretensão ou sobrecorrente na energização ou desenergização de um determinado capacitor.

Com relação aos transitórios eletromagnéticos, propõem-se índices que são baseados nos coeficientes de reflexão ( $R_{FL}$ ) e refração ( $R_{FR}$ ) de tensão descritos pelas equações B.1 e B.2 [Greenwood 91].  $Z_A$  é a impedância equivalente anterior ao local a serem analisadas a reflexão e a refração e  $Z_B$  é a impedância equivalente posterior.

$$R_{FL} = \frac{Z_B - Z_A}{Z_A + Z_B} \quad (B.1)$$

$$R_{FR} = \frac{2Z_B}{Z_A + Z_B} \quad (B.2)$$

Estes coeficientes são utilizados para relacionar as ondas de tensão refletidas ( $V_{FL}$ ) e refratadas ( $V_{FR}$ ) à onda de tensão ( $V_1$ ) que chega à barra em estudo. Esta relação se dá através das equações B.3 e B.4.

$$V_{FL} = R_{FL} \cdot V_1 \quad (B.3)$$

$$V_{FR} = R_{FR} \cdot V_1 \quad (B.4)$$

As correntes referentes a estas ondas são calculadas pela divisão dos valores de tensão por suas respectivas impedâncias (equação B.5), da qual deriva a equação B.6. Ressalta-se que a onda refletida de corrente tem sinal contrário à de tensão.

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_A}, \quad I_{FL} = -\frac{V_{FL}}{Z_A}, \quad I_{FR} = \frac{V_{FR}}{Z_B} \quad (B.5)$$

$$I_{FL} = -\frac{(Z_B - Z_A)}{Z_A + Z_B} I_1, \quad I_{FR} = \frac{2Z_A}{Z_A + Z_B} I_1 \quad (B.6)$$

É feita uma análise pontual considerando o sistema o mais simples possível a fim de que estes indicadores dêem uma noção de grandeza das sobretensões e sobrecorrentes provocadas pelos transitórios. Para o cálculo dos índices, é considerada uma fonte de tensão do tipo degrau, adotando-se curtos espaços de tempo.

Sabe-se que a terminação capacitiva, inicialmente, se comporta como um curto-circuito ( $Z_B = 0$ ). Conseqüentemente, seu coeficiente de reflexão de tensão é igual a -1 ( $V_{FL} = -V_1$ ) e o de refração igual a zero ( $V_{FR} = 0$ ), conforme equações B.1 a B.4. Pelas equações B.5 e B.6, percebe-se que a corrente refletida é idêntica à corrente  $I_1$  e a refratada tende a 2 ( $Z_B = 0$ ). Posteriormente, o capacitor tende a um circuito aberto ( $Z_B = \infty$ ). Por conseguinte, seu coeficiente de reflexão de tensão é igual a 1 ( $V_{FL} = V_1$ ) e o de refração igual a 2 ( $V_{FR} = 2V_1$ ). Observa-se que a corrente refletida é o negativo de  $I_1$  e a refratada é igual a zero.

Para a terminação capacitiva, os coeficientes de refração ( $C_{FR}$ ) e reflexão ( $C_{FL}$ ) de tensão são:

$$C_{FL} = \frac{\frac{1}{C_s} - Z_A}{\frac{1}{C_s} + Z_A} \quad (B.7)$$

$$C_{FR} = \frac{2/Cs}{1/Cs + Z_A} \quad (B.8)$$

Substituindo a equação B.7 na B.3 e rearranjando os termos, tem-se a equação B.9 que no domínio do tempo se torna a equação B.10 onde  $\alpha$  é a constante de tempo igual a  $\frac{1}{CZ_A}$ .

$$v_{FL}(s) = V_1 \left[ \frac{\alpha}{s(s + \alpha)} - \frac{\alpha}{(s + \alpha)} \right] \quad (B.9)$$

$$V_{FL} = V_1(1 - 2e^{-\alpha t}) \quad (B.10)$$

Através de método semelhante ao utilizado para se obter a equação B.10, também se encontra a expressão da onda de tensão refratada descrita pela equação B.11.

$$V_{FR} = V_1(2 - 2e^{-\alpha t}) \quad (B.11)$$

Para apresentar a idéia, é mostrado um circuito simples de 5 barras com 4 linhas mostrado na figura B.1. Opta-se por cargas resistivas por ser este o caso mais simples para a análise dos coeficientes de reflexão e refração e utiliza-se uma fonte de tensão do tipo degrau de 1,0 pu. Neste circuito, calculam-se os coeficientes para os nós  $N_0$ ,  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  e  $N_4$ .

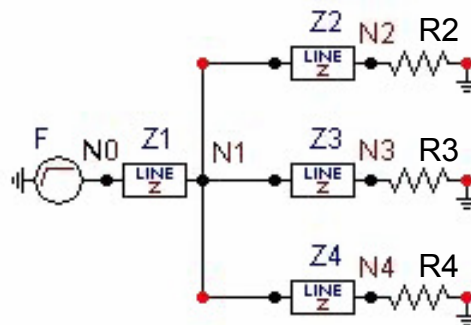


Figura B.1. Circuito simples analisado para o estudo dos coeficientes de reflexão e refração.

Para se fazerem as análises, montam-se duas matrizes de coeficientes (C e D) de dimensão 4x2. Nestas matrizes, os coeficientes da primeira coluna são os de refração e os da segunda são os de reflexão. A primeira linha das matrizes contém os coeficientes relativos à impedância da linha de transmissão que vem da fonte ( $Z_1$ ). As demais linhas são completadas com coeficientes das outras impedâncias,  $Z_2$ ,  $Z_3$  e  $Z_4$ .

Na matriz C, são colocados os coeficientes de refração e reflexão para os pontos de interseção das linhas de transmissão com as cargas –  $N_2$ ,  $N_3$  e  $N_4$  referentes a  $Z_2$ ,  $Z_3$  e  $Z_4$ , respectivamente – e com a fonte –  $N_0$  relativo a  $Z_1$ . Na matriz D, são depositados os coeficientes relacionados à interseção das quatro linhas (ponto  $N_1$ ) vistos através de cada impedância. Tais coeficientes são calculados por meio das equações B.12 a B.15. Observe-se que as equações referem-se a equivalentes de impedâncias vistos a partir de  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  e  $Z_4$ .

$$RFL_{Z_1} = \frac{(Z_2 // Z_3 // Z_4) - Z_1}{Z_1 + (Z_2 // Z_3 // Z_4)} \quad \text{e} \quad RFR_{Z_1} = \frac{2(Z_2 // Z_3 // Z_4)}{Z_1 + (Z_2 // Z_3 // Z_4)} \quad (\text{B.12})$$

$$RFL_{Z_2} = \frac{(Z_1 // Z_3 // Z_4) - Z_2}{Z_2 + (Z_1 // Z_3 // Z_4)} \quad \text{e} \quad RFR_{Z_2} = \frac{2(Z_1 // Z_3 // Z_4)}{Z_2 + (Z_1 // Z_3 // Z_4)} \quad (\text{B.13})$$

$$RFL_{Z_3} = \frac{(Z_1 // Z_2 // Z_4) - Z_3}{Z_3 + (Z_1 // Z_2 // Z_4)} \quad \text{e} \quad RFR_{Z_3} = \frac{2(Z_1 // Z_2 // Z_4)}{Z_3 + (Z_1 // Z_2 // Z_4)} \quad (\text{B.14})$$

$$RFL_{Z_4} = \frac{(Z_1 // Z_2 // Z_3) - Z_4}{Z_4 + (Z_1 // Z_2 // Z_3)} \quad \text{e} \quad RFR_{Z_4} = \frac{2(Z_1 // Z_2 // Z_3)}{Z_4 + (Z_1 // Z_2 // Z_3)} \quad (\text{B.15})$$

Nos testes, foram adotadas impedâncias  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  e  $Z_4$ , respectivamente, de 1,0, 2,0, 1,5 e 0,5  $\Omega$  – valores fictícios escolhidos para mostrar o impacto da impedância no índice. O tempo de propagação ( $\tau$ ) para todas as linhas é assumido igual a 5  $\mu\text{s}$ , o qual é calculado pela equação B.16, onde L e C são indutâncias e capacitâncias da linha e l é o comprimento da linha.

$$\tau = l\sqrt{LC} \quad (\text{B.16})$$

Com estes dados calculam-se os coeficientes de refração ( $R_{FR}$ ) e reflexão ( $R_{FL}$ ) para os nós de carga ( $N_2$ ,  $N_3$  e  $N_4$ ) e fonte ( $N_0$ ), colocados na matriz C, e para o nó  $N_1$  inserido na matriz D. Tais coeficientes são mostrados na tabela B.1. A fonte é considerada um curto-circuito, ou seja, a onda de tensão que chega nela é totalmente refletida e sua refração é zero.

A figura B.2 apresenta os resultados obtidos nas simulações feitas no ATPDraw [ATPDraw 03]. Pode-se observar que no ponto  $N_4$  é obtida a maior tensão inicial (0,64 pu em 10  $\mu\text{s}$ ), condição que se mantém até os 80  $\mu\text{s}$  simulados.

Tabela B.1. Coeficientes de reflexão e refração do circuito da figura B.1.

Matriz C	1 (R <sub>FR</sub> )	2 (R <sub>FL</sub> )	Matriz D	1 (R <sub>FR</sub> )	2 (R <sub>FL</sub> )
<b>N0</b>	0	-1	<b>Z1</b>	0,48	-0,52
<b>N2</b>	0,667	-0,333	<b>Z2</b>	0,24	-0,76
<b>N3</b>	0,8	-0,2	<b>Z3</b>	0,32	-0,68
<b>N4</b>	1,333	0,333	<b>Z4</b>	0,96	-0,04

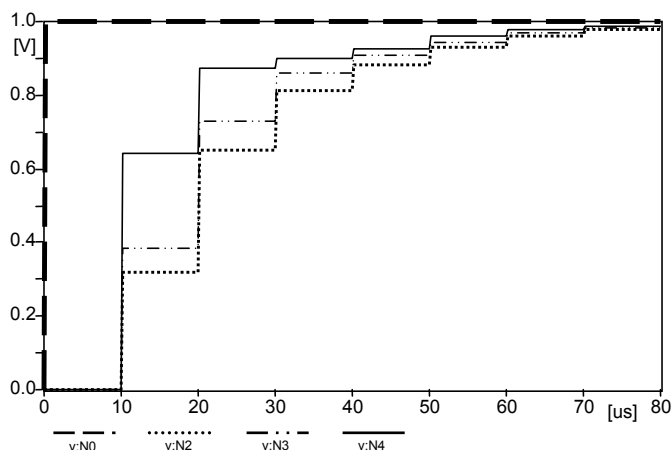


Figura B.2. Gráfico das tensões provocadas em cada ponto do circuito da figura B.1.

Para a figura B.3, altera-se o tempo de trânsito da linha 4 para 1 μs, o que leva a tensão do ponto N<sub>4</sub> para 0,87 pu em 17 μs (aumento de 0,23 pu).

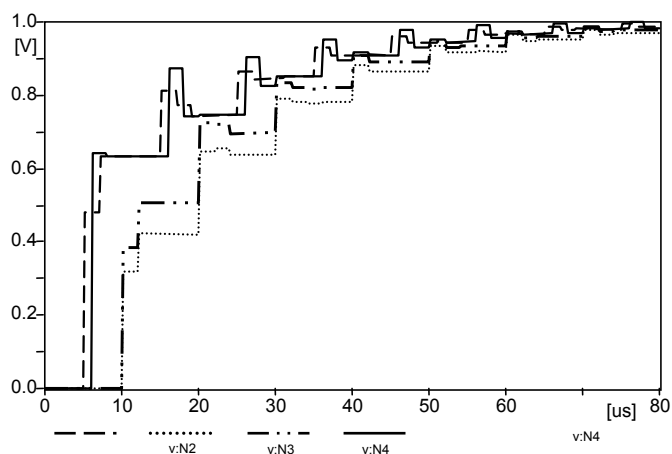


Figura B.3. Gráfico das tensões provocadas em cada ponto do circuito da figura B.1 para τ igual a 1 μs na linha 4.

Alterando-se o tempo de trânsito da linha 1 para 1 μs e deixando as outras linhas com os valores de 5 μs, verifica-se que ocorre uma sobretensão no ponto N<sub>4</sub> de 1,28 pu em

15  $\mu\text{s}$ , enquanto que, nos pontos  $N_2$  e  $N_3$ , neste instante alcançam-se apenas 0,64 e 0,77 pu, respectivamente. Estas sobretensões são ilustradas na figura B.4.

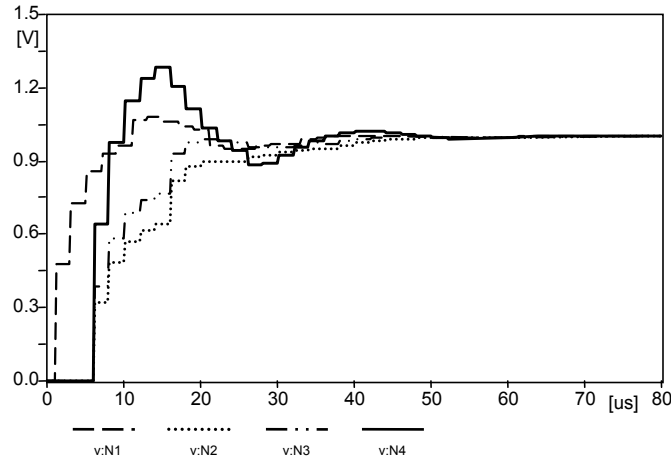


Figura B.4. Gráfico das tensões provocadas em cada ponto do circuito da figura B.1 para  $\tau$  igual a 1  $\mu\text{s}$  na linha 1.

Conclui-se, através destes resultados, que a sobretensão depende dos coeficientes de refração e reflexão e do tempo de propagação da onda. A não consideração do número de reflexões, na composição do índice, decorre do fato desta informação não alterar os valores dos índices, de forma significativa. Tal impacto reduzido se justifica pela presença do amortecimento do sistema. Adicionalmente, caso o número de reflexões em cada ponto fosse considerado, os cálculos se tornariam complexos equiparando-se àqueles das simulações de transitórios em todas as barras, o que seria desnecessário. Portanto, é recomendado um índice ( $C_{i \text{ total}}$ ) que é o somatório de quatro ondas: refratada na carga ( $FR_C$ ), refletida no ponto  $N_1$  ( $FL_{N1}$ ), refletida na fonte ( $FL_F$ ), refratada no ponto  $N_1$  vinda das cargas ( $FR_{N1}$ ).

$$C_{i \text{ total}} = FR_C + FL_{N1} + FL_F + FR_{N1} \quad (\text{B.17})$$

A  $FR_C$  é composta pela onda que vem da fonte, ultrapassa o ponto  $N_1$  ( $d_{11}$ ) e refrata na carga ( $c_{i1}$ ). A  $FL_{N1}$  é uma onda  $FR_C$  que reflete na carga ( $c_{i2}$ ) e depois no ponto  $N_1$  ( $d_{i2}$ ) e refrata na carga ( $c_{i1}$ ). A  $FL_F$  é a onda que não ultrapassa o ponto  $N_1$  ( $d_{i2}$ ), reflete na fonte ( $c_{i2}$ ) e, em seguida, vai além do ponto  $N_1$  ( $d_{11}$ ) e refrata na carga ( $c_{i1}$ ). A  $FR_{N1}$  é a onda que após refletir em outras cargas ( $c_{i2}$ ) ultrapassa o ponto  $N_1$  em direção a carga desejada ( $d_{j1}$ ) e refrata nesta ( $c_{i1}$ ). A equação B.18, que é um detalhamento da B.17, mostra o que é explicado neste parágrafo. Os valores  $i$  e  $j$  nos coeficientes das matrizes  $C$  e  $D$  são sempre

maiores que 1. Colocando em evidência alguns termos da equação B.18, tem-se a equação B.19.

$$C_{i \text{ total}} = d_{11} \cdot c_{i1} + d_{11} \cdot c_{i2} \cdot d_{i2} \cdot c_{i1} + d_{12} \cdot c_{12} \cdot d_{11} \cdot c_{i1} + d_{11} \cdot \left( \sum_{j \neq i}^n c_{j2} \cdot d_{j1} \right) \cdot c_{i1} \quad (\text{B.18})$$

$$C_{i \text{ total}} = \left[ 1 + c_{i2} \cdot d_{i2} + d_{12} \cdot c_{12} + \sum_{j \neq i}^n c_{j2} \cdot d_{j1} \right] \cdot d_{11} \cdot c_{i1} \quad (\text{B.19})$$

Os fatores FRs e FLs são mais bem explicados através da figura B.5 que exhibe a seqüência de refrações e reflexões que ocorrem com uma única onda (indicada pelo número 0) que parte da fonte de tensão em encontro do ponto  $N_1$  – instante (i). Ao chegar neste local (instante (ii)), a mesma se decompõe em quatro ondas cujas amplitudes dependem do valor das impedâncias da linha. Para facilitar a visualização, na figura B.5, assume-se que a onda 0 se divide em três ondas iguais (1) que vão em direção às cargas e uma diferente que é refletida para a fonte (onda 2). No instante (iii), uma onda 1 encontra a carga de  $N_2$  e parte dela é refletida (onda 3). A parte refratada, onda 1, compõe o índice  $FR_C$ . No instante (iv), a onda 3, proveniente da carga, atinge o ponto  $N_1$  e se divide em quatro partes: três que refratam para as linhas  $Z_1$ ,  $Z_3$  e  $Z_4$  e uma que reflete em direção da própria carga, denominada de onda 4. O índice  $FL_{N_1}$  é formado por esta onda 4 quando a mesma refrata na carga, e o  $FR_{N_1}$  é constituído pela onda 3. Finalmente, no instante (v), a onda 2, já refletida na fonte, divide-se em quatro e a parcela que refrata na carga baseia o cálculo de  $FL_F$ .

Vale ressaltar que existem várias ondas representadas na figura B.5 as quais são repetições das quatro que compõem os índices  $FR_C$ ,  $FL_F$ ,  $FR_{N_1}$  e  $FL_{N_1}$  relacionados, respectivamente, às ondas 1, 2, 3 e 4. Destaca-se que toda onda tem sua amplitude alterada a cada ponto de reflexão que ela encontra.

Conclui-se que o ponto que apresenta o **maior índice** é aquele onde se localiza a **barra crítica**. Para o exemplo citado, os índices ( $C_{itotal}$ ) para os pontos  $N_2$ ,  $N_3$  e  $N_4$  são, respectivamente, 0,64, 0,73 e 0,87; logo, a carga do ponto  $N_4$  é a mais crítica do circuito. Isto é confirmado pelos resultados apresentados pelas figuras B.2, B.3 e B.4 cuja tensão mais elevada sempre se manifesta no ponto  $N_4$ . Vale salientar que foram realizados outros testes com o índice  $C_{itotal}$  (capítulo 3) que corroboram seu uso para a indicação das barras críticas.

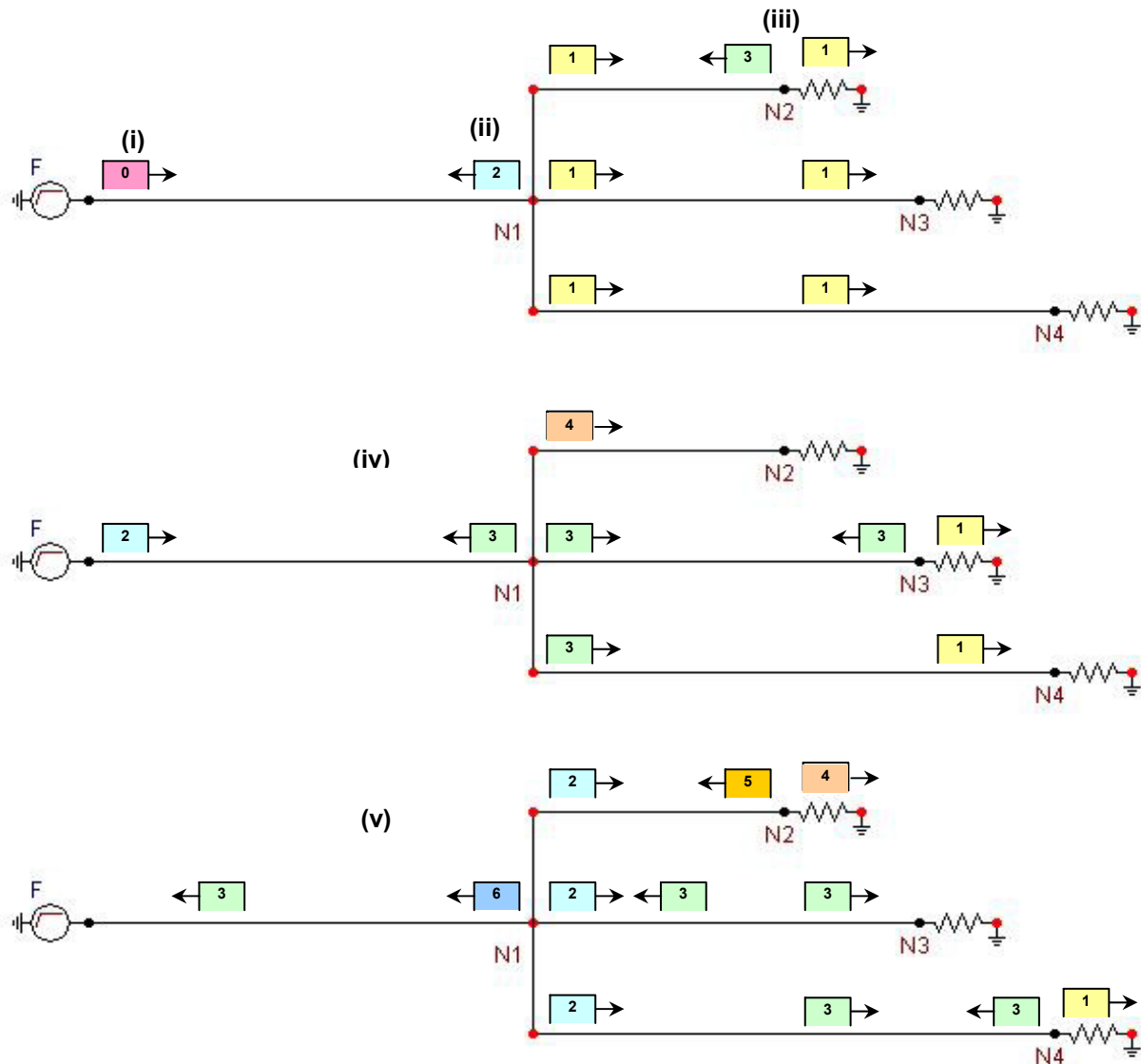


Figura B.5. Propagação de ondas através do circuito exemplo.

O procedimento citado neste item se insere no passo ii – Barras Críticas – da avaliação técnica de transitórios eletromagnéticos descrito no capítulo 3.

### B.3. Simulações de Chaveamento de Capacitores – Resultados Adicionais

Conforme já salientado no texto, os transitórios eletromagnéticos causam vários efeitos indesejáveis no sistema elétrico. Observa-se que, dependendo dos parâmetros da rede, estarão presentes maiores ou menores sobretensões e sobrecorrentes. Subsidiando

os desenvolvimentos, foram realizadas várias simulações que comprovam tal afirmativa. Neste item, são mostrados, de forma sucinta, resultados do sistema de 4 barras exibido na figura B.6 o qual contém:

- uma fonte equivalente de tensão de 138 kV ( $V_{60}$ );
- duas linhas de transmissão modeladas por parâmetros distribuídos trifásicos, representadas por  $Z_{12}$  e  $Z_{23}$ , foram consideradas transpostas e a resistividade do solo foi desprezada;
- uma carga na alta tensão (138 kV),  $S_{AT}$ ;
- um transformador 138 kV / 13,8 kV (B3-B4) alimentando uma carga de baixa tensão  $S_{BT}$ ;
- dois bancos de capacitores ligados à barra B2 em 138 kV ( $QC_{AT1}$  e  $QC_{AT2}$ ) através, respectivamente, das chaves CH1 e CH3;
- dois bancos de capacitores ligados à barra B4 em 13,8 kV ( $QC_{BT1}$  e  $QC_{BT2}$ ) através, respectivamente, das chaves CH2 e CH4.

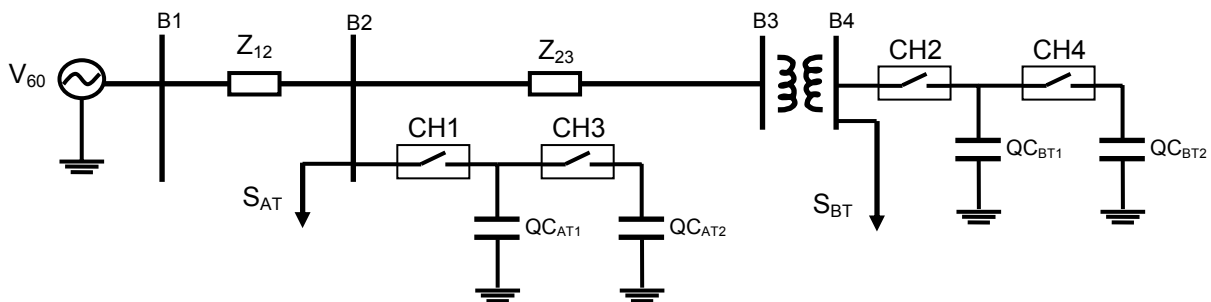


Figura B.6. Sistema elétrico exemplo para simulação de chaveamentos de bancos de capacitores.

Em regime permanente, inicialmente os componentes da rede possuem os seguintes parâmetros:

- linha de transmissão B1-B2 ( $LT_{12}$ ) de 100 km e linha B2-B3 ( $LT_{23}$ ) de 5 km;
- carga  $S_{AT}$  de 70 MVA e fator de potência de 0,8;
- carga  $S_{BT}$  de 14,95 MVA e fator de potência de 0,75;
- um banco de capacitor em cada nível de tensão: na alta,  $QC_{AT1}$  igual a 23,6 Mvar e, na baixa,  $QC_{BT1}$  igual a 6,2 Mvar;
- transformador de 0,15 pu de reatância com resistência desprezível.

As simulações efetuadas, caracterizadas por chaveamentos e cálculos em diversos locais, possuem as seguintes configurações:

- Simulação 1: Chaveamento do banco de capacitor na alta ( $QC_{AT1}$ ) e cálculo da sobretensão na baixa (barra B4).
- Simulação 2: Chaveamento do banco na alta ( $QC_{AT1}$ ) e cálculo da sobretensão no mesmo nível de tensão (barra B2).
- Simulação 3: Chaveamento do capacitor na baixa ( $QC_{BT1}$ ) e cálculo da sobretensão na alta (barra B2).
- Simulação 4: Chaveamento do banco de capacitor na baixa ( $QC_{BT1}$ ) e cálculo da sobretensão no mesmo nível de tensão (barra B4).
- Simulação 5: Chaveamento de um único banco existente na alta ( $QC_{AT1}$ ), CH2 na posição aberta, e cálculo da sobretensão na alta (barra B2).
- Simulação 6: Chaveamento de um único banco existente na baixa ( $QC_{BT1}$ ), CH1 na posição aberta, e cálculo da sobretensão na baixa (barra B4).
- Simulação 7: Chaveamento de capacitores na configuração *back-to-back* na alta ( $QC_{AT1}$  e  $QC_{AT2}$ ), CH1 fechado e CH2 aberto, e cálculo da sobrecorrente na alta (barra B2).
- Simulação 8: Chaveamento de capacitores na configuração *back-to-back* na baixa ( $QC_{BT1}$  e  $QC_{BT2}$ ), CH2 fechado e CH1 aberto, e cálculo da sobrecorrente na baixa (barra B4).

Os capacitores são energizados em 20 ms, 0,6 ms após o instante em que a tensão da fase C atinge seu pico negativo. Logo, as maiores sobretensões e sobrecorrentes estão na fase C.

Nas simulações 5 e 6, há a energização de um banco isolado e, nas simulações 7 e 8, o chaveamento de capacitores em paralelo, separados por uma impedância de  $(0,01 + j20) \Omega$ . Nas simulações de 1 a 4, observa-se que os capacitores  $QC_{AT1}$  e  $QC_{BT1}$  também estão em configuração *back-to-back*. Entretanto a indutância e a resistência que os separam são as da linha e do transformador, podendo ocorrer maiores sobretensões e sobrecorrentes, dependendo da ressonância do sistema.

Para investigar as sobretensões (ST) e sobrecorrentes (SC) em função dos parâmetros, cada um deles é modificado, seguindo a ordem: linha de transmissão B2-B3, módulo da carga de baixa tensão ( $S_{BT}$ ), fator de potência de  $S_{BT}$ , capacitor do nível de tensão que não está sendo chaveado (simulações de 1 a 4), linha B1-B2, módulo da carga de alta tensão ( $S_{AT}$ ), fator de potência de  $S_{AT}$ , e por último, para as simulações de 5 a 8,

capacitor em manobra. Para os bancos em configuração *back-to-back*, consideram-se valores idênticos para ambos os capacitores (por exemplo,  $QC_{BT1} = QC_{BT2}$ ). A tabela B.2 apresenta os resultados das simulações mostrando os parâmetros que atingem os maiores valores de ST e SC. Vale destacar que a ordem descrita não influencia as amplitudes máximas encontradas.

Tabela B.2. Parâmetros que atingem maiores valores de ST e SC.

Parâmetros	Simulações							
	1	2	3	4	5	6	7	8
LT <sub>12</sub> (km)	5	1	126	3	1	5	50	100
LT <sub>23</sub> (km)	41	1	25	1	1	1	5	1
S <sub>AT</sub> (MVA)	5	200	100	200	70	120	100	100
FP da S <sub>AT</sub>	0,5	0,8	0,79	0,85	0,8	0,65	0,5	0,5
S <sub>BT</sub> (MVA)	30	4	10	1	80	1	100	1
FP da S <sub>BT</sub>	0,5	0,8	0,5	0,5	0,88	0,5	0,5	0,5
QC <sub>AT</sub> (Mvar)	-	-	1,2	1,2	7,2	-	2x1,2	-
QC <sub>BT</sub> (Mvar)	1,2	7,2	-	-	-	6,2	-	2x1,2
Chave Manobrada	CH1	CH1	CH2	CH2	CH1	CH2	CH3	CH4
Local do Cálculo	B4	B2	B2	B4	B2	B4	B2	B4

Na tabela B.2, as lacunas não preenchidas são as dos parâmetros que não têm seus valores alterados e “2x1,2” significa 2 capacitores de 1,2 Mvar, cada um ligado por uma chave, por exemplo, CH1 e CH3.

Os resultados alcançados estão de acordo com o item 2.2.3, isto pode ser verificado nas afirmações a seguir.

Os picos de ST acontecem para diferentes comprimentos de linha – exemplo: 41 km na simulação 1, 25 km na simulação 3, 1 km na simulação 7. Isto confirma a expectativa, denotando a relação da ST com o tempo de trânsito da onda. Muitos destes máximos são obtidos em pequenas linhas que causam mais oscilações. As sobretensões estão diretamente relacionadas às ressonâncias do sistema. Todas as piores condições são atingidas com fatores de potências baixos cujo amortecimento da rede elétrica é reduzido.

Nota-se, pela tabela B.2, que há um padrão na escolha das cargas. Quando se procura a máxima sobretensão no nível de tensão oposto ao do capacitor chaveado (simulações 1 e 3), a carga da baixa tensão é maior e a da alta é menor que aquelas encontradas para o caso da máxima sobretensão na mesma barra da manobra (simulações 2 e 4).

Nas simulações 5 e 6 isto fica bem claro. Ao se fechar a chave CH1 (simulação 5), alcança-se sobretensão mais elevada para valores de carga menores (70 MVA) na barra

onde é manobrado o capacitor (B2) e maiores (80 MVA) para a barra adjacente (B4), comparada esta à simulação 6. Ao se energizar CH2, a sobretensão aumenta com a diminuição da carga (1 MVA) desta barra (B4) e com o crescimento da carga instalada (120 MVA) na vizinha (B2). Sendo assim, há uma reflexão mais alta na barra mais afastada ( $Z_{LT} > Z_{CARGA}$  de B2) e maior refração na do chaveamento ( $Z_{LT} < Z_{CARGA}$  de B4) fatos que geram grande pico de tensão.

Pela equação B.1, considerando que  $Z_{LT} > Z_{CARGA}$  (onde  $Z_A = Z_{LT}$  e  $Z_B = Z_{CARGA}$ ), quanto menor é a impedância da carga (potência elevada), maior é a reflexão nesta barra. Caso fosse um curto-circuito, seria obtido o valor máximo de  $R_{FL}$  que é -1. Pela equação B.2, constata-se que a refração máxima é atingida quando a impedância da carga se torna bem maior do que a da linha de transmissão. Se  $Z_{CARGA}$  fosse um circuito aberto,  $R_{FR}$  seria igual a 2.

*Como exemplo da influência da carga na amplificação das tensões pode-se citar o trabalho [Pamplona 02] onde são simuladas energizações de um banco de capacitores localizado numa barra de 138 kV e empregam-se três condições de carregamento do sistema: carga nula, carga média e carga máxima. Os valores máximos obtidos são: 1,52 pu para carga máxima, 1,66 pu para carga média e 1,87 pu para carga nula. Isto mostra como as condições de carregamento do sistema afetam as sobretensões transitórias resultantes.*

Como pode ser confirmado pela equação B.11 (onde  $\alpha = 1/CZ_A$ ), quanto menor a capacitância do equipamento manobrado (C), mais alta é a tensão refratada. Os valores de QC encontrados nas simulações 1 e 3 ratificam tal afirmação. Pela equação B.10, verifica-se que, quanto maior C, mais elevada é a tensão refletida. Os valores de QC achados nas simulações 2 e 6 corroboram tal declaração.

Apesar de estas considerações serem consistentes, determinar a carga, as linhas e os capacitores que provocam as maiores sobretensões não é uma tarefa simples, devido ao fato de estes elementos estarem em paralelo, requerendo um cálculo mais complexo, por exemplo, equação B.20. Além disso, é preciso considerar as ressonâncias da rede e os tempos de trânsito das ondas.

$$R_{FR} = \frac{2(Z_{CARGA} // X_C // Z_{LT12})}{Z_{LT23} + (Z_{CARGA} // X_C // Z_{LT12})} \quad (B.20)$$

A tabela B.3 apresenta as sobrecorrentes e sobretensões obtidas nas barras B2, B3 e B4 ao se realizarem as simulações descritas anteriormente. Nota-se que a maior sobretensão (4,32 pu) ocorre na barra de 13,8 kV (B4) ao se energizar um banco de

capacitor de 23,6 Mvar em 138 kV. Nesta simulação (1), B4 está a 41km do local da manobra e existe, nesta barra, 1,2 Mvar fazendo a compensação reativa de uma carga de 30 MVA e 0,5 de fator de potência. Tal compensação não é adequada, pois o FP melhora apenas para 0,52. Estes parâmetros só são selecionados para se achar a alta sobretensão indicada. Na prática, é pouco provável que tal amplitude seja alcançada, devido ao amortecimento presente na rede. Este estudo é válido para mostrar as configurações perigosas para as ST e SC e alertar sobre as piores condições possíveis.

Tabela B.3. Resultados das simulações descritas anteriormente.

Resultados	Simulações							
	1	2	3	4	5	6	7	8
ST B2	1,67	1,92	1,59	1,05	1,93	1,08	<b>1,70</b>	1,02
ST B3	3,35	<b>3,09</b>	1,55	1,06	<b>2,95</b>	1,09	1,51	1,02
ST B4	<b>4,32</b>	1,06	<b>1,65</b>	<b>1,95</b>	2,48	<b>1,95</b>	1,51	<b>1,72</b>
SC B2	15,61	<b>42,65</b>	<b>8,84</b>	4,2	<b>80,93</b>	1,01	<b>24,23</b>	1,0
SC B3	3,47	2,77	6,45	<b>11,22</b>	1,02	<b>11,21</b>	1,01	1,50
SC B4	<b>80,52</b>	2,39	5,63	9,02	1,02	8,81	1,02	<b>3,29</b>

Caso a carga tivesse um fator de potência de 0,9 e sua compensação reativa fosse de 4,8 Mvar, parâmetros mais prováveis de existir em sistemas reais, a sobretensão chegaria apenas a 1,52 pu e a sobrecorrente seria 9,30 pu.

É importante destacar que a tensão na barra B2, onde o capacitor é chaveado, só atinge 1,67 pu. Isto indica que uma sobretensão normalmente suportável por equipamentos na subestação da empresa de distribuição pode causar perigosas sobretensões nos consumidores de baixa tensão. Tal situação é observada na prática e deve ser prevista e evitada. O procedimento proposto permite esta detecção. A maior ST atingida em B2 é de 1,93 pu ao se energizar um banco nesta mesma barra sem nenhum outro em paralelo (simulação 5), sendo que em B4 alcança-se 2,48 pu. Isto confirma as afirmações do item 2.2.3.

A sobretensão 1,95 pu é obtida com a manobra do capacitor na barra B4 (baixa tensão) sem nenhum outro em paralelo. Na configuração *back-to-back*, atingem-se valores de ST de 1,70 pu e 1,72 pu e, de SC, 24,23 pu e 3,29 pu, respectivamente, em B2 (simulação 7) e B4 (simulação 8) onde se realizam os chaveamentos.

Vale destacar que as simulações mostradas neste apêndice incluem, propositalmente, estudos realizados com parâmetros, sobretensões e sobrecorrentes nem sempre encontrados na prática. O objetivo das investigações foi verificar a influência das

diferentes configurações nos valores máximos das ST e SC, enfatizando a necessidade de avaliação específica para cada caso particular.

Das análises realizadas e estudos expostos no item 2.2.3, conclui-se que a magnitude e o amortecimento das sobretensões e sobrecorrentes, na manobra de bancos de capacitores (BCs), dependem dos seguintes fatores:

- tensão pré-manobra na barra dos capacitores chaveados;
- carga residual armazenada nos capacitores no instante da manobra;
- características do sistema de transmissão, dos BCs previamente energizados e do chaveado;
- propriedades dos equipamentos de manobra tais como dispersão entre pólos e evolução da tensão suportável entre terminais;
- instante de fechamento ou abertura de cada pólo com relação à onda de tensão;
- recursos utilizados para controle das sobretensões e sobrecorrentes transitórias.

Estas afirmações comprovam a importância de se criar um procedimento para se estudar os transitórios eletromagnéticos introduzidos pela manobra dos capacitores sugeridos pelo plano de expansão. Tal procedimento deve diminuir o número de simulações efetuadas, através de uma classificação criteriosa das barras a serem modeladas (método citado no item B.2) e, além disso, indicar as grandezas e os locais onde serão feitos os cálculos.

## **B.4. Modelagem Utilizada na Simulação dos Transitórios**

A modelagem da rede considerada nesta tese de doutorado é aquela indicada pela literatura como sendo a mais adequada ao cálculo de transitórios decorrentes de manobras de capacitores [Carvalho 95, Castro Jr. 03, D’Ajuz 85 e 87, Eletrobrás 85, Grebe 98, Jota 98, Martinez 05a, 05b e 05c, Pamplona 02].

**Linha de transmissão** – Modelo trifásico, representação de parâmetros distribuídos e consideração de linha transposta. Entram-se com os parâmetros da linha de seqüência positiva e zero: resistência ( $R_L$ ), reatância ( $X_L$ ) e susceptância ( $B_L$ ) por comprimento da linha. A unidade utilizada é o ohms por km para  $R_L$  e  $X_L$  e  $\mu$ mho por km para  $B_L$ . As perdas no solo são desprezadas.

**Transformador** – Modelo trifásico, desprezando a saturação.

**Carga** – Modelo trifásico, representado por resistências e reatâncias.

**Disjuntores** – A manobra simulada considera que os chaveamentos das três fases são simultâneos e ocorrem no instante de 20 ms, próximo ao pico da fase C.

**Impedâncias Equivalentes** – Referem-se às impedâncias do equivalente de Thévenin que, neste trabalho, são calculadas por meio do programa PSS/E [PSS/E 01].

**Circuito Simplificado** – No circuito simplificado são adotados modelos de linhas e cargas monofásicas, utilizando impedâncias equivalentes conforme descrito anteriormente.

# Apêndice C

## Estudos Básicos sobre Harmônicos

Conforme já tratado, a distorção harmônica total é a relação entre as harmônicas e a corrente ou tensão fundamental (equação 2.28 e 3.13). Tal distorção é amplificada pela ressonância causada em determinada frequência por uma combinação de capacitâncias e indutâncias. Este acréscimo é função de um fator Q (equação 2.38), correspondente à razão entre a reatância capacitiva ou indutiva presente na rede e sua parte resistiva. Portanto, a amplificação da corrente ou da tensão, devido ao aumento da distorção harmônica, é maior nos sistemas de transmissão do que na distribuição [Santoso 05].

Com o objetivo de subsidiar os desenvolvimentos deste trabalho de tese, foram realizadas investigações cujos resultados estão apresentadas neste apêndice: influência da fonte harmônica e da impedância própria da barra ( $Z_P$ ) na distorção harmônica e influência dos parâmetros da rede na  $Z_P$  e na frequência de ressonância.

A seguir são lembrados alguns conceitos pertinentes e, posteriormente, são mostrados os resultados das análises realizadas em um sistema de 4 barras.

### Compensação Reativa na Frequência de Ressonância

O valor da compensação reativa ( $Q_C$ ) que entra em ressonância com o sistema é igual ao inverso de  $X_{C60}$  que é a reatância capacitiva em 60 Hz (equação C.1). Relembrando, na frequência de ressonância ( $f_r = 60$  h),  $X_C$  é igual a  $X_0$  que é a reatância do paralelo da impedância carga ( $Z_L$ ) com a do sistema ( $Z_{th}$ ), visto pela expressão C.2, ambas representadas na figura C.1. Para se calcular  $X_{C60}$  é necessário multiplicar  $X_0$  pela ordem do harmônico (h) em  $f_r$ , porque  $X_C$  é h vezes menor que  $X_{C60}$  na frequência de ressonância (equação C.3).

$$Q_C = \frac{1}{X_{C60}} \quad (C.1)$$

$$Z_0 = Z_{th} // Z_L \quad (C.2)$$

$$X_{C60} = hX_0 \quad (C.3)$$

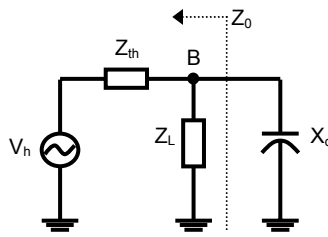


Figura C.1. Circuito simplificado que representa  $Z_0$ .

### **Impedância de Thévenin e Impedância Própria**

A impedância de Thévenin ( $Z_{th}$ ) representa o equivalente da rede visto por determinada barra. É obtida através da equação C.4, onde  $V_B$  é a tensão na barra B com a carga  $S_B$  conectada. A tensão de Thévenin ( $V_{th}$ ), para o ponto B do circuito da figura C.1, é o valor da tensão na barra B quando seu circuito está aberto. Tal valor é extraído do fluxo de potência que é calculado, neste trabalho, pelo programa PSS/E [PSS/E 01]. Todas estas grandezas são aquelas de regime permanente.

$$Z_{th} = \frac{S_B^*(V_{th} - V_B)}{V_B^*} \quad (C.4)$$

A impedância própria da barra ( $Z_P$ ) é calculada através da equação C.5 cujo valor de pico sucede na frequência de ressonância. Observa-se que o valor máximo da distorção harmônica ocorre em tal frequência.

$$Z_P = Z_{th} // Z_L // X_C \quad (C.5)$$

Se a fonte harmônica estiver na barra de referência, a impedância de Thévenin é a representada pela equação C.4. Caso contrário,  $Z_{th}$  é o valor que, em paralelo com a carga e o capacitor, é igual à  $Z_P$ , dada pela expressão C.6, onde  $Z_{LC}$  é igual ao paralelo entre  $Z_L$  e  $X_C$  ( $Z_{LC} = Z_L // X_C$ ). Neste trabalho, o valor da impedância própria é obtido por meio do software Harmzw [Harmzw 02] que é a ferramenta computacional utilizada para se obter os resultados relacionados a harmônicos.

$$Z_{th} = \frac{Z_{LC} Z_P}{Z_{LC} - Z_P} \quad (C.6)$$

Para as investigações apresentadas a seguir é utilizado o sistema elétrico de quatro barras de 138 kV (B1 a B4) da figura C.2. Este sistema tem duas cargas ( $S_3 = 0,1 + j0,05$  pu e  $S_4 = 0,15 + j0,1$  pu) ligadas a uma fonte harmônica ( $V_h$  ou  $I_h$ ) através das linhas  $Z_{12}$ ,  $Z_{23}$  e  $Z_{24}$ , com valores iguais de resistência ( $R_{12} = R_{23} = R_{24} = R = 0,2$  pu) e de reatância ( $X_{12} = X_{23} = X_{24} = X = 0,5$  pu). Existe instalado um capacitor na barra 4 de reatância  $X_C$  igual a 12,5 pu, que corresponde a 8 Mvar ( $Q_C$ ). A potência base adotada é 100 MVA.

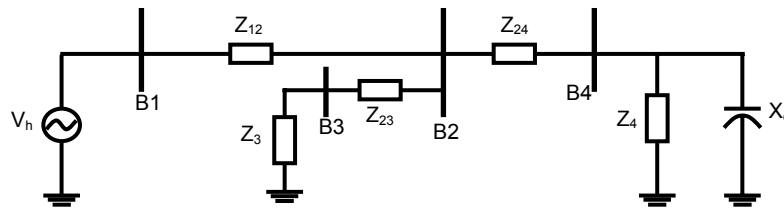


Figura C.2. Circuito exemplo de quatro barras.

### **Investigação 1: Influência da Fonte Harmônica na Distorção Harmônica**

**Questão 1:** Mostrar que as distorções de corrente e tensão ( $DH_i$  e  $DH_V$ ) são proporcionais às fontes harmônicas e que fontes distintas não influenciam nas distorções provocadas por cada uma delas.

**Motivação:** Salientar que, quando é adicionada uma fonte harmônica (FH) de ordem  $m$  em um dado sistema, não há a necessidade de se refazerem os cálculos da distorção harmônica individual (DHI) para verificar se a DHI de ordem harmônica  $n$ , que está próxima ao limite, violou a restrição. Se a fonte harmônica adicionada for de ordem  $n$  é muito provável que o limite seja violado, requerendo nova simulação.

Primeiramente, considera-se que está presente na barra B1 da rede uma única fonte harmônica de corrente de 1 pu em 300 Hz cuja DH medida em B4 é representada na figura C.3 pela coluna correspondente a C1. Ao se aumentar para 3 pu, verifica-se que a DH triplica seu valor (C2), mostrando que realmente a distorção é diretamente proporcional à fonte harmônica. Adicionando-se em B1 uma nova fonte de 1 pu em 180 Hz, observa-se que a distorção individual de 300 Hz não se altera (C3 em 300 Hz), demonstrando que a FH de 180 Hz não influencia a DHI de 300 Hz. No entanto, é importante destacar que a distorção harmônica total é modificada. Isto ocorre para fontes harmônicas de tensão e de corrente.

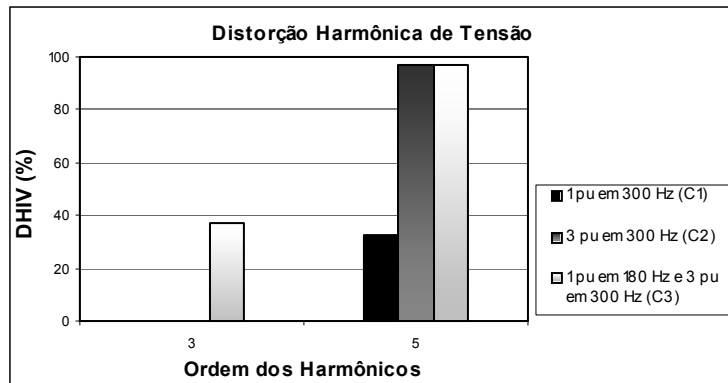


Figura C.3. Distorção harmônica de tensão em B4 para diferentes fontes harmônicas.

**Questão 2:** Provar que uma mesma fonte harmônica instalada em barras diferentes provoca distorções distintas.

**Motivação:** Confirmar que uma mesma fonte harmônica instalada em barras diferentes não provoca problemas de mesma magnitude, sendo necessária a simulação de ambos os casos.

Considerando-se a rede da figura C.2 com uma fonte harmônica de tensão (FHV) colocada na barra B1, tem-se, em B4, a distorção de tensão da coluna correspondente a C1 da figura C.4. Caso esta FHV esteja na barra 2, verifica-se pela figura C.4 que a DHV aumenta (C2). Ao se mudar a localização de uma fonte harmônica de corrente (FHI) da barra B1 (C3) para a B2 (C4) também é notado o crescimento da DHV. Estas diferenças se devem à mudança no valor da impedância de Thévenin porque, no cálculo de  $Z_{th}$ , FHV é representada por um curto-circuito e FHI, por um circuito aberto. Este comportamento também é constatado nas distorções de corrente. Estes resultados confirmam a importância de se saber a localização da fonte harmônica e se a mesma é de tensão ou de corrente.

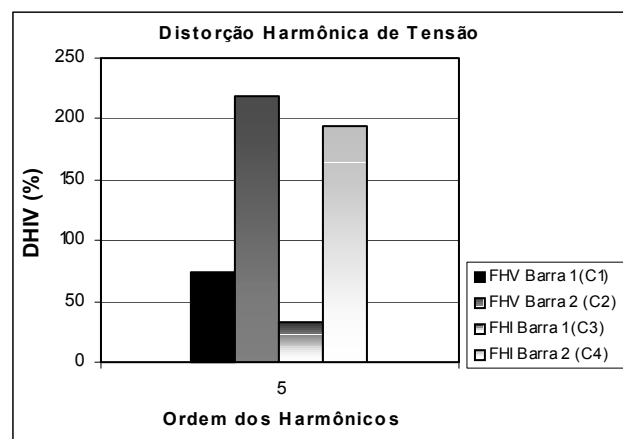


Figura C.4. Distorção harmônica individual de tensão em B4 para diferentes localizações das fontes harmônicas.

## **Investigação 2: Influência da Impedância Própria da Barra na Distorção Harmônica**

**Questão 1:** Ressaltar que a impedância própria da barra ( $Z_P$ ) varia com a alteração do montante do banco de capacitor ( $X_C$ ) alocado nesta barra (equação C.5) e que a frequência de ressonância é inversamente proporcional à potência reativa deste banco ( $Q_C$ ). O objetivo é apresentar a variação da impedância própria para provar sua ligação com a distorção harmônica na próxima questão.

**Motivação:** Comprovar que a  $Z_P$  varia com a alocação dos capacitores para evidenciar a seguir que tal variação é proporcional à distorção harmônica. Esta demonstração indica que, ao se fazer uma análise da impedância própria, tem-se uma sensibilidade da magnitude da DH.

Na figura C.5 é exibido o comportamento da impedância própria com a variação da frequência. Adotando-se o sistema exemplo da figura C.2, verifica-se que, ao se aumentar o valor do capacitor alocado ( $Q_C$ ), a frequência de ressonância diminui. São representadas duas situações: a alocação na barra 4 de 8 Mvar (curva escura) e de 16 Mvar (curva clara). Constata-se que a frequência de ressonância diminui de 228 Hz para 156 Hz. Estas frequências dependem também da rede elétrica ( $Z_{th}$  e  $Z_L$ ) em que estão inseridos os capacitores (equação C.5).

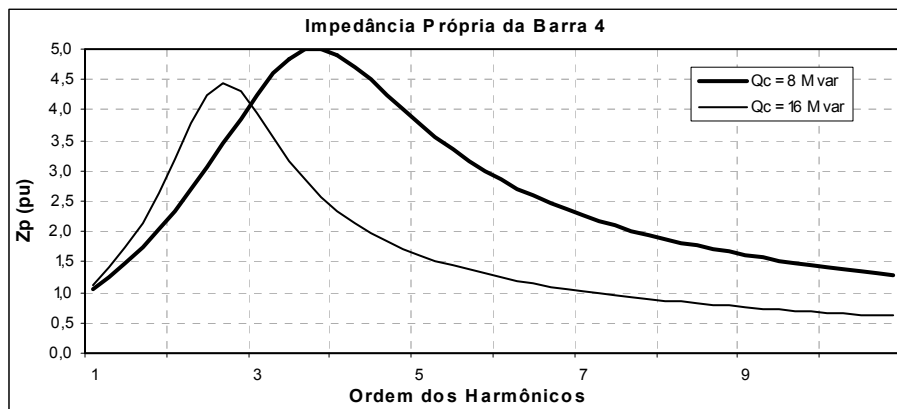


Figura C.5. Variação da impedância própria de B4 devido às alterações no capacitor alocado na barra.

**Questão 2:** Indicar que a impedância própria da barra ( $Z_P$ ) é proporcional à distorção harmônica de tensão e de corrente.

**Motivação:** Apresentar a importância de se conhecer a impedância própria das barras para se ter idéia de quais capacitores não devem ser alocados em determinados sistemas.

A figura C.6 apresenta as distorções harmônicas individuais introduzidas na barra 4 as quais são causadas por 36 fontes harmônicas de corrente de 72 Hz a 1116 Hz presentes na barra B1 (caso teórico). As colunas em preto indicam a situação em que existe um banco de capacitor de 8 Mvar alocado em B4 e aquelas em branco, um de 16 Mvar. Constata-se que as DHI de tensão e de corrente são proporcionais à impedância própria da barra B4 mostrada na figura C.5 cujo formato da curva se assemelha muito ao da figura C.6. Observa-se que os maiores valores de distorções ocorrem na frequência de ressonância que é indicada pelo pico de  $Z_p$ . Para o caso de alocação de 16 Mvar cujo pico é mais acentuado, as DH próximas à  $f_r$  são mais pronunciadas do que as demais. Já com o banco de 8 Mvar, as diferenças entre as distorções de várias frequências são menores, tornando seu formato mais plano igual ao da curva mais escura da figura C.5. Estes resultados validam a equação 2.37, apresentando que a distorção é proporcional a um fator de qualidade Q da rede.

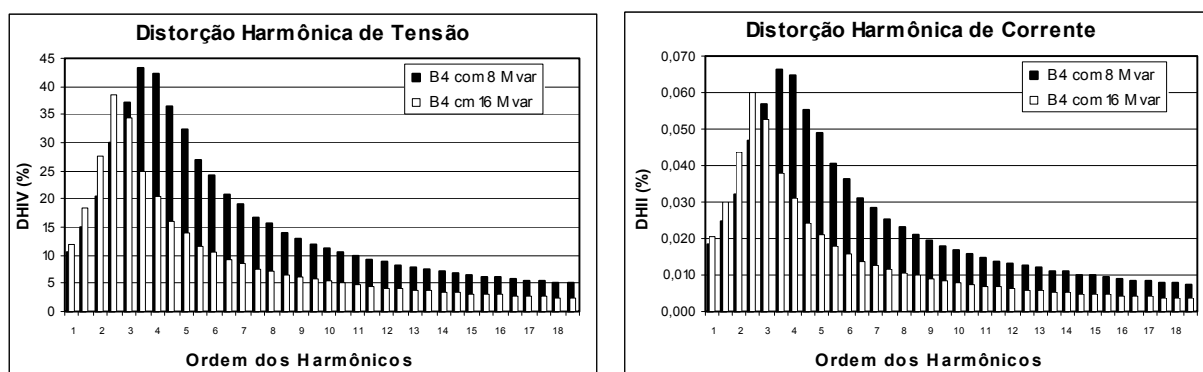


Figura C.6. Variação da distorção harmônica de tensão e de corrente em B4 para diferentes impedâncias próprias.

**Questão 3:** Ratificar que impedâncias próprias iguais em determinada frequência em sistemas elétricos diferentes provocam distorções harmônicas distintas.

**Motivação:** Evidenciar que a impedância própria não é o único parâmetro responsável pela variação da distorção harmônica.

A figura C.7(a) apresenta a impedância própria da barra B4 e sua distorção harmônica para dois casos teóricos provenientes de modificações feitas na configuração do sistema da figura C.2. No primeiro caso, curva mais escura, é instalado um capacitor de 1 Mvar em B4, e a resistência da linha entre as barras B3 e B4 é adotada igual a 0,01 pu. No segundo caso, curva mais clara, é alocada em B4 uma compensação reativa de 6 Mvar, e a resistência de tal linha é de 2,5 pu. Em 264 Hz, a impedância própria de ambas

configurações é equivalente a 3,7 pu, porém as distorções harmônicas de cada uma, nesta frequência, são distintas, como retratado na figura C.7(b). Isto é devido ao fato de a DH não depender somente de  $Z_p$  mas também de outros parâmetros do sistema os quais são diferentes nas duas configurações.

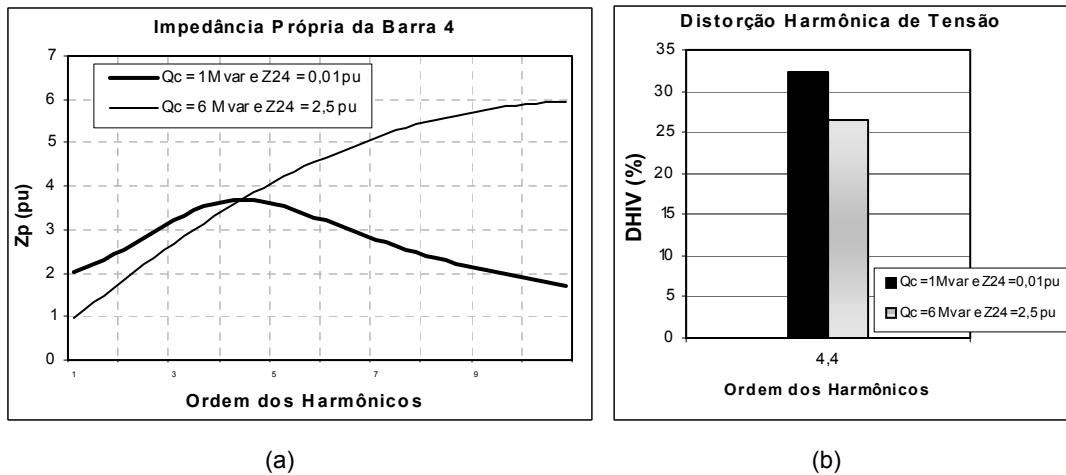


Figura C.7. (a) Impedância própria de B4 e (b) sua distorção harmônica de tensão para diferentes configurações.

### **Investigação 3: Influência dos Parâmetros da Rede na Impedância Própria da Barra e na Frequência de Ressonância**

**Questão 1:** Destacar que a impedância própria da barra é inversamente proporcional à resistência da linha e diretamente proporcional à indutância da linha (equação 2.37) e provar também que a frequência de ressonância não altera com a resistência, porém é inversamente proporcional à indutância. A proporção da variação depende da influência desta linha no equivalente do sistema ( $Z_{th}$ ), relacionada ao tamanho da rede.

**Motivação:** Demonstrar que uma rede elétrica tem distorções harmônicas maiores quando existem pequenas resistências nas linhas (sistema de transmissão) e que tais resistências obviamente não alteram a frequência de ressonância. Mostrar que, dependendo da dimensão do sistema em estudo, uma nova linha instalada pode alterar significativamente qual harmônico é amplificado.

Na figura C.8, a impedância própria da barra B4 do sistema elétrico da figura C.2 é representada pela situação original, quando os parâmetros das linhas são iguais a  $R + jX$ . Diminuindo-se a resistência das linhas para um décimo do valor original ( $R/10$ ), a impedância própria da barra B4 aumenta (situação 1), principalmente na frequência de

ressonância a qual não varia. Tal alteração em R torna o amortecimento do sistema menor, isto leva a uma maior distorção harmônica (equações 2.39 e 2.40) cujo valor depende do peso que R tem em  $Z_{th}$ . Reduzindo-se a indutância à metade do seu valor ( $X/2$ ), constata-se que a  $f_r$  aumenta de 216 Hz para 288 Hz (situação 2), e  $Z_p$  diminui em ambas as frequências. A consequência de tal modificação é que a DH se eleva significativamente em 288 Hz e reduz em 216 Hz cujos valores dependem do peso que X tem em  $Z_{th}$ .

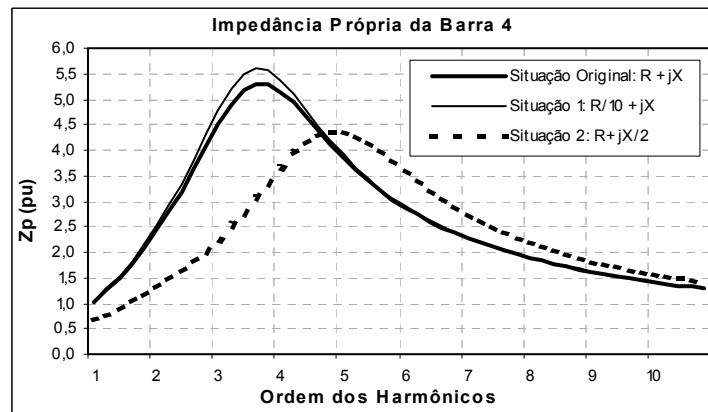


Figura C.8. Variação da impedância própria de B4 devido às alterações dos parâmetros das linhas (R e X).

**Questão 2:** Mostrar que a impedância própria da barra e a frequência de ressonância se alteram com o montante e a localização do capacitor, variação de  $X_c$  e  $Z_{th}$ , respectivamente.

**Motivação:** Provar que a frequência de ressonância da rede depende da localização e do montante da compensação reativa, amplificando diferentes distorções harmônicas para cada configuração. Com este conhecimento, confirma-se que a compensação reativa pode ser modificada, garantindo que o limite de DH não seja violado.

A figura C.9(a) apresenta a variação da impedância própria da barra B4 com a alteração do montante e da localização dos capacitores instalados no sistema da figura C.2. Na situação original, existe instalado em B4 um banco de capacitor de 8 Mvar (curva C1). São simuladas também a alocação de 4 Mvar nas barras B3 e B4, representada pela curva C2, e de 8 Mvar apenas em B3 (curva C3). Verifica-se pela figura C.9(a) que, ao se retirar potência reativa de B4, sua impedância própria se modifica, obtendo picos de valores diferentes e em frequências distintas. Para a situação original (C1), existe apenas uma frequência de ressonância em 228 Hz, enquanto que, em C2, observam-se picos em 240 Hz e 456 Hz e, em C3, há um em 192 Hz e outro próximo à 11ª harmônica.

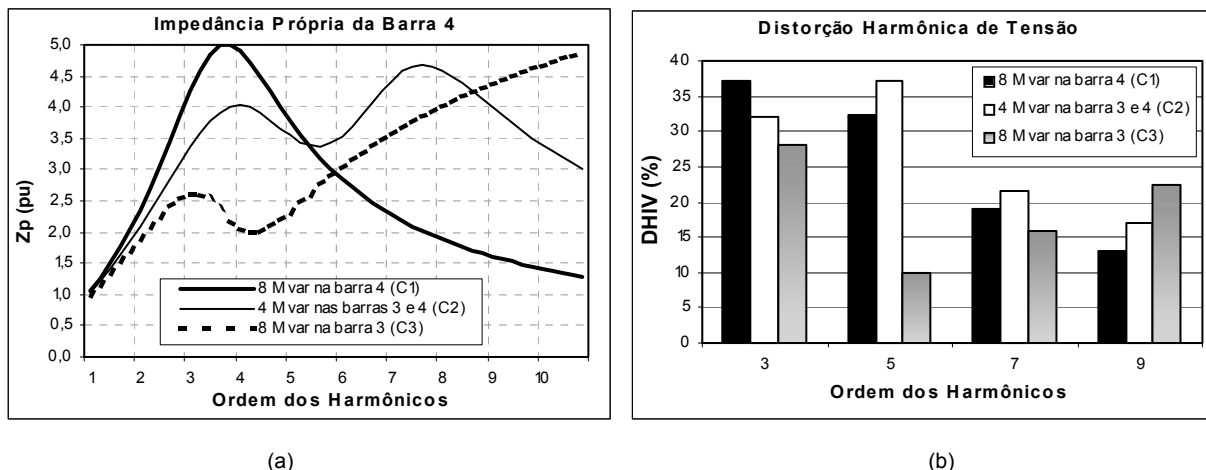


Figura C.9. (a) Variação do perfil da impedância própria e (b) da distorção harmônica de B4 devido à modificação do montante e da localização da compensação reativa.

Esta mudança do perfil de  $Z_p$  também é notada no comportamento da DH – figura C.9(b). Comprova-se que, com a presença de uma fonte harmônica de 3ª ordem, a alocação de 8 Mvar na barra B4 (C1) provoca maior distorção que nas outras configurações. Isto ocorre porque o pico da impedância própria é bem acentuado na frequência de 228 Hz, próximo ao 3º harmônico. Se a FH é de 5ª ou 7ª ordem, a instalação de 4 Mvar nas barras B3 e B4 produz uma distorção mais significativa que nas outras devido aos picos de  $Z_p$  próximos das frequências destes harmônicos. Entretanto, se a fonte for de 9ª ordem, o pior caso é quando se instala 8 Mvar em B3 (maior  $Z_p$  nesta frequência). Este comportamento é reflexo do formato da curva da impedância própria para cada configuração.

Conclui-se que, caso os limites de distorção harmônica estejam violados, alterando-se o montante e/ou a localização da compensação reativa de forma adequada, são obtidos valores menores de distorções devido à proporcionalidade da impedância própria.

**Questão 3:** Constatar que a impedância própria da barra e a frequência de ressonância se alteram com a variação da compensação reativa *shunt* capacitiva alocada na barra ( $X_c$ ). Confirmar que, para uma mesma rede, quanto menor o capacitor ( $Q_c$ ) maior o pico da impedância própria e mais plana é a curva. Além disso, quanto maior é a potência reativa instalada mais proeminente é o pico.

**Motivação:** Indicar como se comporta a impedância própria da barra com a variação da compensação reativa *shunt* capacitiva alocada, com o objetivo de saber como ser evitada a frequência de ressonância indesejada.

A figura C.10 apresenta as curvas para diferentes capacitores alocados em uma mesma barra. A menor frequência de ressonância ocorre com o banco de capacitor de 40 Mvar (96 Hz) e a maior com a compensação reativa de 1 Mvar (660 Hz). O maior pico ocorre com a injeção de 1 Mvar e o mais acentuado, porém menos elevado, com o banco de 40 Mvar.

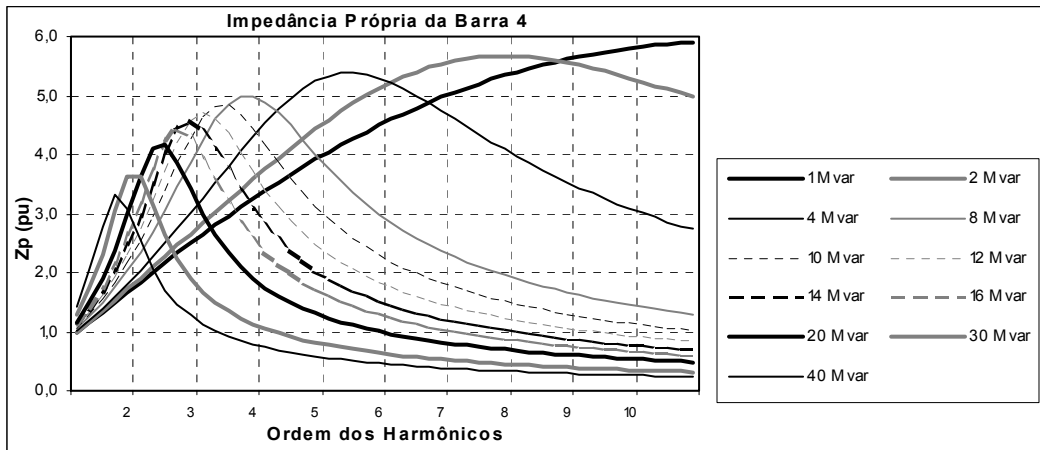


Figura C.10. Variação do perfil da impedância própria devido à modificação do montante da compensação reativa *shunt* capacitiva de B4.

A figura C.10 mostra a importância de se saber a ordem dos harmônicos inseridos no sistema para que não se instale um capacitor que provoque uma frequência de ressonância de tal ordem, amplificando os harmônicos.

Do exposto conclui-se que a fonte harmônica e a impedância própria da barra exercem influência na distorção harmônica e a  $Z_p$  e a frequência de ressonância estão diretamente relacionados com os parâmetros da rede.

# Apêndice D

## Restrições Impostas pelo Setor Elétrico

Neste apêndice são descritas algumas restrições impostas por resoluções da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e pelos seguintes procedimentos de rede do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) [ONS 04]:

- Módulo 2 – *Padrões de Desempenho da Rede Básica e Requisitos Mínimos para suas Instalações*;
- Submódulo 2.2 – *Padrões de Desempenho da Rede Básica*;
- Submódulo 2.8 – *Gerência dos Indicadores de Desempenho de Rede Básica*;
- Submódulo 3.8 – *Requisitos Mínimos para a Conexão à Rede Básica*.

De especial interesse para este trabalho são as restrições de tensão, fator de potência e distorção harmônica. Este apêndice inclui também considerações sobre a Norma IEEE 519 com respeito a limites impostos aos níveis de correntes harmônicas.

### D.1. Tensão em Regime Permanente

No que se refere aos valores de tensão em regime permanente, o padrão de desempenho da Rede Básica, nos pontos de conexão, deve atender aos requisitos que constam na resolução da ANEEL N° 505/2001. Segundo esta resolução, os valores das tensões nas barras devem estar entre aqueles indicados nas tabelas D.1, D.2 e D.3, respectivamente, para os níveis de tensão iguais ou superiores a 230 kV, entre 69 kV e 230 kV e entre 1 kV e 69 kV.

Tabela D.1. Limites para os valores de tensão de nível igual ou superior a 230 kV.

Classificação da Tensão	Faixa de Variação da Tensão (pu)
Adequada	$0,95 \leq V \leq 1,05$
Precária	$0,93 \leq V \leq 0,95$ e $1,05 \leq V \leq 1,07$
Crítica	$V < 0,93$ e $V > 1,07$

Tabela D.2. Limites para os valores de tensão de nível igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV.

Classificação da Tensão	Faixa de Variação da Tensão (pu)
Adequada	$0,95 \leq V \leq 1,03$
Precária	$0,90 \leq V \leq 0,95$ e $1,03 \leq V \leq 1,05$
Crítica	$V < 0,90$ e $V > 1,05$

Tabela D.3. Limites para os valores de tensão de nível igual ou superior a 1 kV e inferior a 69 kV.

Classificação da Tensão	Faixa de Variação da Tensão (pu)
Adequada	$0,93 \leq V \leq 1,05$
Precária	$0,90 \leq V \leq 0,93$
Crítica	$V < 0,90$ e $V > 1,05$

A tensão eficaz, em intervalos de 10 minutos, é monitorada continuamente, nos pontos de conexão com a Rede Básica, utilizando-se o sistema de medição de faturamento e da medição. Em qualquer condição de carga, nos barramentos que não atendam diretamente a consumidores e não sejam pontos de fronteira, os níveis de tensão podem ser inferiores ou superiores aos valores estabelecidos na resolução N° 505/2001, desde que respeitadas as limitações dos equipamentos.

## D.2. Fator de Potência

Nos pontos de conexão à Rede Básica, os Acessantes devem manter o fator de potência dentro das faixas especificadas na tabela D.4, retirada do submódulo 3.8 [ONS 04]. Por Fator de Potência Operacional entende-se a faixa de fator de potência para a qual os níveis de desempenho do sistema são garantidos, conforme o Módulo 2 dos Procedimentos de Rede.

Tabela D.4. Fator de Potência Operacional nos pontos de conexão.

Tensão Nominal do Ponto de Conexão	Faixa de Fator de Potência
$V_n \geq 345$ kV	0,98 indutivo a 1,0
$69$ kV $\leq V_n < 345$ kV	0,95 indutivo a 1,0
$V_n < 69$ kV	0,92 indutivo a 0,92 capacitivo

Nos pontos de conexão com tensão igual ou superior a 69 kV, admite-se fator de potência indutivo ou capacitivo inferior aos valores estabelecidos na tabela D.4 nas seguintes condições:

- não onere a Rede Básica por meio de reforços necessários à manutenção dos padrões de desempenho estabelecidos no Módulo 2 dos Procedimentos de Rede;
- não comprometa a segurança operativa da Rede Básica, quando da adoção de medidas operativas necessárias à manutenção dos padrões de desempenho estabelecidos no Módulo 2 dos Procedimentos de Rede;
- não comprometa a otimização eletro-energética do sistema interligado;
- não seja inferior a 0,92 nos três casos acima.

A operação dos bancos de capacitores instalados para correção de fator de potência não **deve provocar fenômenos transitórios ou ressonâncias que prejudiquem o desempenho do sistema** ou de Agentes conectados à Rede Básica. Desta forma, devem ser realizados estudos específicos complementares que avaliem o impacto destas manobras nos padrões de desempenho da Rede Básica.

### D.3. Distorção Harmônica

O indicador para avaliar o **desempenho global** quanto a harmônicos, em regime permanente, nos barramentos da Rede Básica, corresponde à distorção de tensão harmônica. Entende-se por *Distorção de Tensão Harmônica Total* (DTHT) a raiz quadrada do somatório quadrático das tensões harmônicas de ordens 2 a 50. Esse conceito procura quantificar o conteúdo harmônico total existente (equação D.1) em um determinado barramento da Rede Básica.

$$DTHT = \sqrt{\sum_{h=2}^{50} V_h^2} \quad (\text{em } \%) \quad (D.1)$$

Onde:  $V_h = 100 \frac{V_h}{V_1}$  é a tensão harmônica de ordem  $h$  em porcentagem da fundamental;

$v_h$  é a tensão harmônica de ordem  $h$  em volts;

$v_1$  é a tensão fundamental nominal em volts.

Os padrões globais de tensões harmônicas de ordens 2 a 50 são apresentados na tabela D.5 (retirada do submódulo 2.2 [ONS 04]), bem como o padrão para a DTHT.

O valor de cada indicador a ser comparado com o valor padrão é assim obtido:

- Determina-se o valor que é superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 1 dia (24 horas), ao longo de 7 (sete) dias consecutivos;
- O valor do indicador corresponde ao maior dentre os sete valores obtidos, anteriormente, em base diária.

Tabela D.5. Limites globais de tensão expressos em porcentagem da tensão fundamental.

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR (%)	ORDEM	VALOR (%)	ORDEM	VALOR (%)	ORDEM	VALOR (%)
3, 5, 7	5%	2, 4, 6	2%	3, 5, 7	2%	2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%	≥ 8	1%	9, 11, 13	1,5%	≥ 8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥ 27	1%			≥ 27	0,5%		
<b>DHT<sub>v</sub> = 6%</b>				<b>DHT<sub>v</sub> = 3%</b>			

Na definição destes limites, deve-se levar em consideração que, para cada ordem harmônica  $h$ , a tensão harmônica resultante em qualquer ponto do sistema é obtida da combinação dos efeitos provocados por diferentes Agentes. **Esses limites não devem ser aplicados a fenômenos transitórios** que resultem em injeção de correntes harmônicas, como ocorre na energização de transformadores.

Os Acessantes devem assegurar que a operação de seus equipamentos, bem como outros efeitos dentro de suas instalações, não causem distorções harmônicas, no respectivo **ponto de conexão** à Rede Básica, em níveis superiores aos **limites individuais** estabelecidos no item para os indicadores de *Distorção de Tensão Harmônica Individual e Total* definidos no Submódulo 2.2 [ONS 04].

Os limites individuais de tensões harmônicas de ordens 2 a 50, bem como o limite para a Distorção de Tensão Harmônica Total (DTHT), são apresentados na tabela D.6 (retirada do submódulo 3.8 de [ONS 04]).

Tabela D.6. Limites individuais expressos em porcentagem da tensão fundamental.

13,8 kV ≤ V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR (%)	ORDEM	VALOR (%)	ORDEM	VALOR (%)	ORDEM	VALOR (%)
3 a 25	1,5%	todos	0,6%	3 a 25	0,6%	todos	0,3%
≥ 27	0,7%			≥ 27	0,4%		
<b>DHT<sub>v</sub> = 3%</b>				<b>DHT<sub>v</sub> = 1,5%</b>			

DTHT = Distorção Harmônica Total de Tensão

No caso em que determinadas ordens de tensão harmônica e/ou a distorção harmônica total variem de forma intermitente e repetitiva, os limites especificados podem ser ultrapassados em até o dobro, desde que a duração cumulativa acima dos limites contínuos estabelecidos não ultrapasse 5% do período de monitoração.

Os limites da tabela D.6 não devem ser aplicados a fenômenos que resultem em injeção de correntes harmônicas transitórias, como ocorre na energização de transformadores.

Se os limites individuais apresentados na tabela D.6 forem superados por Agente Distribuidor, a ação corretiva deve se basear numa solução de mínimo custo global considerando a Rede Básica e a de distribuição.

O submódulo 2.8 do Módulo 2 dos Procedimentos de Rede [ONS 04] estabelece os procedimentos relacionados com a gestão do desempenho deste indicador na Rede Básica, incluindo os procedimentos de medição e análise.

## **D.4 Recomendação IEEE para Práticas e Requisitos para Controle de Harmônicas no Sistema Elétrico de Potência: IEEE-519**

Esta recomendação produzida pelo IEEE [IEEE 81] descreve os principais fenômenos causadores de distorção harmônica, indica métodos de medição e limites de distorção. Os limites estabelecidos referem-se aos valores medidos no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), e não, em cada equipamento individual. A filosofia é: Não interessa ao sistema o que ocorre dentro de uma instalação, mas sim o que ela reflete para o exterior, ou seja, para os outros consumidores conectados à mesma alimentação.

Os **limites diferem de acordo com o nível de tensão e com o nível de curto-circuito do PAC**. Quanto maior for a corrente de curto-circuito ( $I_{cc}$ ) em relação à corrente de carga, maiores são as distorções de corrente admissíveis, uma vez que elas distorcerão em menor intensidade a tensão no PAC. À medida que se eleva o nível de tensão, menores são os limites aceitáveis.

A grandeza TDD (*Total Demand Distortion*) é definida como a distorção harmônica da corrente, em porcentagem da máxima demanda da corrente de carga de 15 ou 30 minutos. Isto significa que a medição da TDD deve ser feita no pico de consumo. Harmônicas pares são limitadas a 25% dos valores das tabelas D.7, D.8 e D.9. Distorções de corrente que resultem em nível CC não são admissíveis.

Tabela D.7. Limites de distorção da corrente para sistemas de distribuição (120 V a 69 kV).

Máxima Corrente Harmônica em % da Corrente de Carga ( $I_o$ – Valor da Componente Fundamental)						
Harmônica Ímpares						
$I_{cc}/I_o$	<11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 < n$	TDD(%)
<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20<50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50<100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100<1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Tabela D.8. Limites de distorção da corrente para sistemas de sub-distribuição (69001 V a 161 kV).

Limites para Harmônicas de Corrente de Cargas Não-Lineares no PAC com Outras Cargas						
Harmônicas Ímpares						
$I_{cc}/I_o$	<11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 < n$	TDD(%)
<20	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
20<50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50<100	5	2,25	2	0,75	0,35	6
100<1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3	1,25	0,7	10

Tabela D.9. Limites de distorção de corrente para sistemas de alta tensão (>161kV) e sistemas de geração e co-geração isolados.

Harmônicas Ímpares						
$I_{cc}/I_o$	<11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 < n$	THD(%)
<50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
$\geq 50$	3	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75