

Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica

Análise de Segurança Estática de Sistemas de Potência: Um  
Estudo Sobre Critérios de Seleção de Contingências no  
Subproblema Reativo

José Vicente Canto dos Santos 8/59

Ariovaldo V. Garcia  
Orientador

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica, UNICAMP, como  
parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Elétrica.

Campinas, dezembro de 1993.

Este exemplar corresponde à redação final da tese  
defendida por José Vicente Canto dos  
Santos e aprovada pela Comissão  
Julgadora em 16 / 12 / 93.

Orientador

À **Isabela**, mulher e companheira.

A meus pais, **Zosymo** e **Alcy**.

## Agradecimentos

- Ao Professor Ariovaldo V. Garcia pela amizade e pela orientação neste trabalho.
- Aos colegas do DSEE pela cooperação sempre presente nas horas difíceis.
- À Isabela pelo carinho e pela compreensão.

Este trabalho contou com o apoio financeiro do CNPq.

## Resumo

O principal objetivo da análise de segurança estática em sistemas de potência é a determinação do nível de gravidade das diferentes contingências que podem ocorrer em um sistema. Habitualmente, a análise de segurança estática é dividida em duas partes: seleção e análise de contingências. Neste trabalho, são estudados diversos critérios de seleção de contingências aplicáveis ao subproblema reativo e são apresentadas comparações entre os resultados fornecidos por diferentes critérios. Também são estudadas várias formas de avaliação do impacto causado por contingências sobre o perfil reativo de sistemas de potência.

# Conteúdo

|          |                                                                                                       |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>                                                                                     | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>O problema de seleção e análise de contingências em sistemas de potência</b>                       | <b>3</b>  |
| 2.1      | Introdução . . . . .                                                                                  | 3         |
| 2.2      | Classificação dos métodos aproximados . . . . .                                                       | 4         |
| 2.2.1    | Métodos explícitos . . . . .                                                                          | 5         |
| 2.2.2    | Métodos implícitos . . . . .                                                                          | 5         |
| 2.3      | Divisão do problema . . . . .                                                                         | 6         |
| 2.4      | Subproblema ativo . . . . .                                                                           | 7         |
| 2.4.1    | Introdução . . . . .                                                                                  | 7         |
| 2.4.2    | Métodos adequados à análise do subproblema ativo . . . . .                                            | 7         |
| 2.5      | Subproblema reativo . . . . .                                                                         | 10        |
| 2.5.1    | Introdução . . . . .                                                                                  | 10        |
| 2.5.2    | Métodos adequados à análise do subproblema reativo . . . . .                                          | 10        |
| 2.6      | Novas abordagens para análise de segurança em sistemas de potência . . . . .                          | 12        |
| <b>3</b> | <b>Métodos de solução do problema de seleção e análise de contingências</b>                           | <b>16</b> |
| 3.1      | Mecanismos básicos para seleção e análise de contingências . . . . .                                  | 16        |
| 3.1.1    | Verificação de ilhamentos . . . . .                                                                   | 16        |
| 3.1.2    | Técnicas de simulação de contingências . . . . .                                                      | 18        |
| 3.2      | Método “CA” para análise de segurança em sistemas de potência . . . . .                               | 22        |
| 3.3      | Método “1P-1Q” para análise de segurança em sistemas de potência . . . . .                            | 25        |
| 3.4      | Método proposto em [1] para análise de segurança em sistemas de potência . . . . .                    | 27        |
| <b>4</b> | <b>Resultados obtidos</b>                                                                             | <b>32</b> |
| 4.1      | Avaliação do impacto de contingências sobre o perfil reativo de redes elétricas de potência . . . . . | 32        |
| 4.2      | Índices de performance utilizados neste trabalho . . . . .                                            | 36        |
| 4.3      | Resultados obtidos com o método “CA” de análise de segurança . . . . .                                | 42        |
| 4.3.1    | Resultados obtidos para o sistema IEEE-30 . . . . .                                                   | 43        |
| 4.3.2    | Resultados obtidos para o sistema IEEE-118 . . . . .                                                  | 48        |

|          |                                                                                                      |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3.3    | Resultados obtidos para o sistema Sul-sudeste . . . . .                                              | 51        |
| 4.4      | Resultados obtidos com o método “1P-1Q” de análise de segurança . . . . .                            | 54        |
| 4.4.1    | Resultados obtidos para o sistema IEEE-30 . . . . .                                                  | 54        |
| 4.4.2    | Resultados obtidos para o sistema IEEE-118 . . . . .                                                 | 54        |
| 4.4.3    | Resultados obtidos para o sistema Sul-sudeste . . . . .                                              | 57        |
| 4.5      | Resultados obtidos com o método proposto em [1] para análise de segurança . . . . .                  | 57        |
| 4.6      | Comparação entre os resultados obtidos com os métodos “CA” e “1P-1Q” . . . . .                       | 59        |
| 4.6.1    | Resultados obtidos para o sistema IEEE-30 . . . . .                                                  | 60        |
| 4.6.2    | Resultados obtidos para o sistema IEEE-118 . . . . .                                                 | 61        |
| 4.6.3    | Resultados obtidos para o sistema Sul-sudeste . . . . .                                              | 61        |
| 4.7      | Comparação entre os resultados obtidos com o método “1P-1Q” e com o método proposto em [1] . . . . . | 63        |
| <b>5</b> | <b>Método “1P-1Q alternativo” para análise de segurança em sistemas de potência</b>                  | <b>65</b> |
| 5.1      | Introdução . . . . .                                                                                 | 65        |
| 5.2      | Descrição do método . . . . .                                                                        | 66        |
| 5.3      | Resultados obtidos . . . . .                                                                         | 68        |
| 5.3.1    | Resultados obtidos para o sistema IEEE-30 . . . . .                                                  | 69        |
| 5.3.2    | Resultados obtidos para o sistema IEEE-118 . . . . .                                                 | 70        |
| 5.3.3    | Resultados obtidos para o sistema Sul-sudeste . . . . .                                              | 70        |
| <b>6</b> | <b>Conclusões</b>                                                                                    | <b>73</b> |
| <b>A</b> | <b>Modelo de fluxo de carga corrente contínua (FCCC)</b>                                             | <b>77</b> |
| <b>B</b> | <b>Método de fluxo de carga desacoplado rápido (FCDR)</b>                                            | <b>79</b> |
| <b>C</b> | <b>Método de vetores esparsos</b>                                                                    | <b>83</b> |

# Lista de Figuras

|     |                                                                     |    |
|-----|---------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Análise de segurança em sistemas de potência . . . . .              | 4  |
| 2.2 | Processo de filtragem de contingências . . . . .                    | 8  |
| 2.3 | Divisão da rede em três subredes de interesse . . . . .             | 9  |
| 2.4 | Divisão da rede em duas áreas de corte . . . . .                    | 11 |
| 2.5 | Acréscimo de pré-filtro adaptativo à análise de segurança . . . . . | 12 |
| 2.6 | Algoritmo híbrido para análise de segurança . . . . .               | 14 |
| 3.1 | Situação de possível ilhamento . . . . .                            | 16 |
| 3.2 | Método “CA” de análise de segurança . . . . .                       | 23 |
| 3.3 | Método “1P-1Q” de análise de segurança . . . . .                    | 26 |
| 3.4 | Subdivisão da rede em duas subredes de interesse . . . . .          | 28 |
| 3.5 | Método proposto em [1] para análise de segurança . . . . .          | 30 |
| 4.1 | Quantificação do impacto de contingências . . . . .                 | 34 |
| 4.2 | Determinação de $w_v$ e $w_q$ . . . . .                             | 40 |
| 4.3 | Fatores de ponderação $w$ ( $w_v$ ou $w_q$ ) . . . . .              | 41 |
| 4.4 | Sistema IEEE-30 - Ordenação por $PI_v$ . . . . .                    | 45 |
| 4.5 | Sistema IEEE-30 - Ordenação por $PI_q$ . . . . .                    | 46 |
| 5.1 | Método “1P-1Q alternativo” . . . . .                                | 67 |

# Capítulo 1

## Introdução

Há algumas décadas, os sistemas elétricos de potência eram de pequeno porte e não havia interligações entre os mesmos. Nesta época, a verificação da segurança da operação dos sistemas era feita com base em regras heurísticas, oriundas da experiência dos operadores.

Com o crescimento dos sistemas de potência e com o surgimento de interligações entre os mesmos, tornou-se indispensável garantir a operação segura dos sistemas. O simples aproveitamento da experiência de algumas pessoas tornou-se insuficiente para cumprir este objetivo. Assim surgiram os métodos de análise de segurança, cuja aplicação prática só se tornou possível com o desenvolvimento dos computadores.

Atualmente, a análise de segurança de sistemas de potência divide-se em duas grandes partes: análise estática e análise dinâmica. Nesta área da análise de sistemas de potência define-se como uma “contingência” a saída de operação de um ou mais equipamentos que compõem um sistema. O principal objetivo da análise de segurança estática é determinar qual a contingência que causa o maior impacto à operação dos sistemas.

Neste trabalho estudamos critérios de seleção de contingências aplicados ao subproblema reativo da análise de segurança estática em sistemas de potência. Analisamos a ocorrência de contingências em ramos, a exemplo da maioria das publicações existentes nesta área. Enfocamos apenas contingências simples, quando é simulada a saída de operação de apenas um ramo do sistema de potência analisado.

No Capítulo 2, o problema de seleção e análise de contingências é definido com maior profundidade. Também neste capítulo apresentamos uma revisão bibliográfica sobre os subproblemas ativo e reativo da análise de segurança estática.

O Capítulo 3 é composto pela descrição da metodologia que implementamos neste trabalho para a solução dos problemas de seleção e análise de contingências.

Nas duas primeiras seções do Capítulo 4 abordamos as diferentes maneiras possíveis para avaliação do impacto que contingências causam ao perfil reativo de sistemas de potência. Nas seções finais deste capítulo apresentamos os resultados obtidos com os diferentes métodos descritos no Capítulo 3.

No Capítulo 5 é sugerida uma abordagem alternativa para análise de segurança estática

em sistemas de potência. A sugestão desta metodologia é uma tentativa de contribuir na pesquisa sobre alguns aspectos do subproblema reativo que, até onde sabemos, ainda não estão totalmente elucidados.

Finalmente, no Capítulo 6 apresentamos resumidamente as principais conclusões deste trabalho.

Em apêndices encontram-se o modelo de fluxo de carga corrente contínua (Apêndice A), o método de fluxo de carga desacoplado rápido (Apêndice B) e o método de vetores esparsos para a solução de sistemas de equações lineares (Apêndice C).

## Capítulo 2

# O problema de seleção e análise de contingências em sistemas de potência

### 2.1 Introdução

Na análise de sistemas elétricos de potência, denomina-se uma “contingência” a saída de operação prevista ou imprevista de um ou mais equipamentos (linhas, transformadores, geradores, bancos de reatores/capacitores). Normalmente os estudos de análise de contingência concentram-se mais em saídas de linhas e transformadores, sendo também o caso deste trabalho.

O problema da seleção de contingências consiste na necessidade de conhecer-se o nível de gravidade para o sistema de cada uma das possíveis contingências. Para tanto é necessário conhecer o ponto de operação, se existir, ao qual o sistema é levado pela ausência de um ramo e analisar os efeitos para a rede deste novo ponto de operação.

A tarefa de seleção de contingências é extremamente necessária em áreas como análise de confiabilidade, planejamento da expansão, planejamento da operação e controle em tempo real de sistemas de potência.

No contexto de planejamento da expansão de sistemas, a seleção de contingências visa garantir, por exemplo, a manutenção de um perfil operativo adequado e manutenção do padrão de qualidade no fornecimento de energia elétrica.

Na área de controle da operação de sistemas de potência, a execução da tarefa de seleção de contingências gera uma lista dos ramos do sistema, ordenada pelo nível de impacto causado ao sistema devido a cada contingência. Tal lista é então utilizada pela tarefa de análise de contingências, onde o sistema é analisado com maior detalhamento para as contingências de maior gravidade.

O desenvolvimento dos computadores nos últimos vinte anos permite que hoje os centros de controle de energia elétrica operem em tempo real. Nesta filosofia os sistemas são

constantemente monitorados e os eventos são tratados imediatamente após sua ocorrência. Isto aumenta a importância e a necessidade de rapidez/precisão dos métodos de seleção e de análise de contingências. Na figura 2.1 vê-se a parte do diagrama de fluxo de um centro de controle de energia elétrica que contém as tarefas aqui descritas e suas inter-relações. (A exemplo da figura 2.1, ao longo deste trabalho utilizaremos o termo “análise de segurança”. Suprimiremos a palavra “estática” por razões de clareza na redação.)

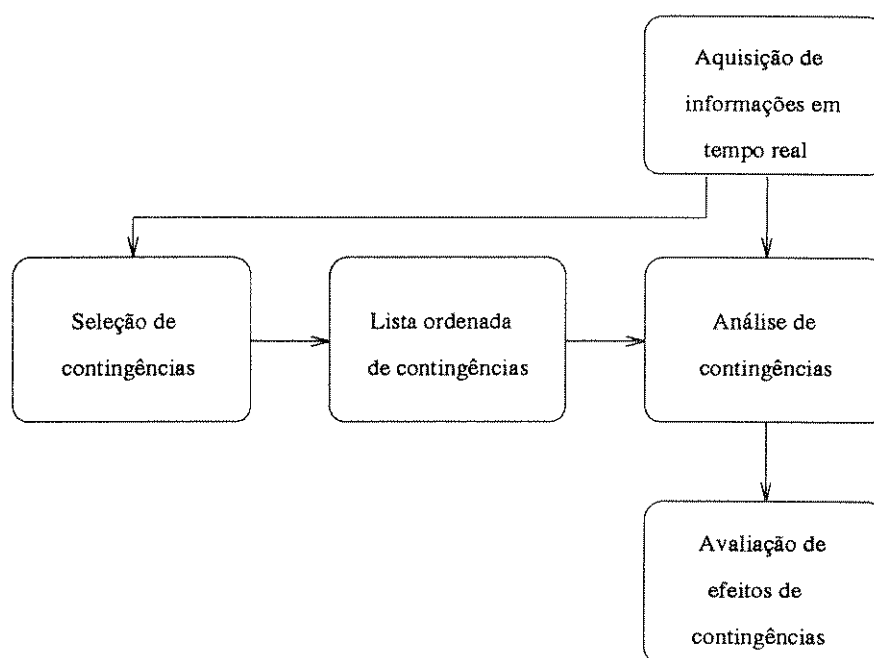


Figura 2.1: Análise de segurança em sistemas de potência

O método considerado “exato” para seleção de contingências consiste na solução de um fluxo de carga (fluxo de potência) para a rede sem o ramo cuja saída de operação se deseja simular. Entretanto, atualmente, a aplicação desse método é proibitiva devido às grandes dimensões dos sistemas de potência e às sérias restrições de tempo de execução das tarefas, impostas pelos centros de controle de operação em tempo real. Devido a esse fato surge a necessidade de obtenção de métodos aproximados, porém confiáveis e eficientes, para a solução do problema.

## 2.2 Classificação dos métodos aproximados

Já mencionamos a inviabilidade da aplicação do método que calcula o fluxo de carga para a solução do problema de seleção de contingências. A busca de métodos aproximados é facilitada pelo fato da regra geral para os sistemas elétricos de potência ser a grande

maioria das contingências não trazer grandes problemas para a segurança do sistema. Em outras palavras: é pequeno o número de contingências que causam violações de limites ou grandes variações em relação ao ponto de operação inicial.

As diferentes filosofias de abordagem desse problema geram diferentes classes de métodos aproximados. Antes da descrição dos principais métodos definiremos as principais classes de métodos já desenvolvidas.

Segundo V. Brandwajn [1] os métodos aproximados para a solução do problema de seleção de contingências podem ser divididos em métodos explícitos e implícitos.

### **2.2.1 Métodos explícitos**

São também conhecidos como métodos de “ranking” direto. Nesta metodologia, a gravidade de cada contingência analisada é quantificada através de um valor escalar, usualmente denominado de “índice de performance” (IP). Assim o produto final da aplicação desses métodos é uma lista de ramos do sistema, ordenada pelo IP associado a cada ramo. Tal ordenação é decrescente para que as primeiras posições da lista sejam ocupadas pelos ramos cujas saídas de operação causem mais estresse ao sistema.

Existem muitas possibilidades para a formulação de índices de performance, dependendo dos parâmetros do sistema que se deseja analisar. Nesta classe de métodos, a formulação dos índices de performance é feita de uma maneira tal que não é necessário o conhecimento das variáveis de estado do sistema na situação pós-contingência. É esta formulação “direta” dos índices de performance que torna esses métodos computacionalmente eficientes.

Além de um bom desempenho computacional, o segundo requisito de um método aproximado é a sua precisão. Isto é, os resultados obtidos com um método aproximado devem afastar-se o menos possível dos resultados obtidos com o método que calcula o fluxo de carga. Neste ponto os métodos explícitos falham, a ponto de já haverem sido praticamente abandonados. A principal deficiência desta classe de métodos é a existência dos chamados “erros de mascaramento”. O problema é que, devido às muitas hipóteses simplificadoras adotadas, os resultados finais podem ser “mascarados”, isto é: uma contingência que causa poucas violações severas pode ser classificada juntamente com outra que causa muitas violações leves, ou pior ainda, ser classificada juntamente com uma contingência que não causa violações.

### **2.2.2 Métodos implícitos**

Ainda segundo V. Brandwajn [1], para suprir as falhas dos métodos explícitos foi desenvolvida essa nova classe de métodos. Tal desenvolvimento só se tornou possível com o surgimento na década passada das técnicas de vetores esparsos[2] .

A idéia fundamental desta classe de métodos é a seleção da região desgastada da rede e a posterior solução dos subproblemas ativo e reativo, somente para esta região. O

ponto chave para o sucesso desta abordagem é a adoção de um critério adequado para a determinação de que pontos do sistema são realmente afetados por uma contingência. Esta classe de métodos pode ainda ser dividida nas duas subclasses a seguir descritas.

#### **- Métodos de solução local**

Aqui explora-se o fato de que a maioria das contingências têm seus efeitos manifestados nas barras e ramos eletricamente próximos ao elemento que sai de operação. Assim, adota-se como subrede de interesse apenas um número arbitrário de vizinhanças do elemento em foco. Posteriormente despreza-se o restante da rede e resolve-se, para cada contingência analisada, apenas a subrede de interesse.

#### **- Métodos de “bounding”**

A abordagem de solução local não é totalmente correta. Isto porque em muitas contingências, além de localmente, os efeitos (alterações no ponto de operação do sistema) manifestam-se também remotamente ao elemento que sai de operação.

O objetivo destes métodos consiste em determinar quais os pontos da rede realmente afetados pelas diferentes contingências possíveis. Tais pontos criteriosamente selecionados constituem a subrede de interesse que é resolvida.

Ao contrário dos métodos explícitos, os métodos implícitos utilizam valores aproximados das variáveis de estado do sistema na situação pós-contingência. Isto permite que se faça uma avaliação das violações de limites e das variações em relação ao estado original, determinadas pelas saídas de operação de cada ramo. Pode-se ainda, alternativamente, construir uma lista dos ramos do sistema ordenada pelo índice de performance desejado.

A mais importante diferença entre os métodos explícitos e os métodos implícitos é que estes últimos não estão sujeitos a problemas de mascaramento dos resultados. Isto acontece porque os erros introduzidos pela diminuição da rede são menores que aqueles introduzidos pelas aproximações utilizadas na formulação dos índices de performance dos métodos explícitos. Este é o principal motivo para que, embora mais dispendiosos em termos de esforço computacional, os métodos implícitos sejam os mais utilizados atualmente.

## **2.3 Divisão do problema**

A exemplo de outras áreas da análise de sistemas de energia elétrica, o problema de seleção de contingências também subdivide-se em dois subproblemas: subproblema ativo e subproblema reativo.

Segundo Elgerd [3] esta subdivisão origina-se dos seguintes fatos:

- “As variações estáticas nas potências ativas de barra, afetam, essencialmente, apenas as fases de tensão de barra (e, portanto o fluxo de potência ativa na linha), porém deixam os módulos de tensão de barra (e, portanto o fluxo de potência reativa na linha), praticamente inalterados.”

- “As variações estáticas nas potências reativas de barra, afetam, essencialmente, apenas os módulos de tensão de barra (e, portanto, o fluxo de potência reativa na li-

nha), porém deixam as fases de tensão (e, portanto, o fluxo de potência ativa na linha), praticamente inalterados.”

Segundo Monticelli [4], é possível efetuar um desacoplamento entre parte ativa e parte reativa de um sistema de potência. Isto porque as sensibilidades entre injeções ativas e ângulos de tensões ( $\partial P/\partial \theta$ ) e entre injeções reativas e módulos de tensões ( $\partial Q/\partial V$ ) são mais intensas que as sensibilidades entre injeções ativas e módulos de tensões ( $\partial P/\partial V$ ) e entre injeções reativas e ângulos de tensões ( $\partial Q/\partial \theta$ ). Este tipo de relação é válido, geralmente, para redes de transmissão em extra-alta tensão (tensões superiores a 230 KV) e ultra-alta tensão (tensões superiores a 750 KV).

No contexto de verificação de segurança existe uma grande diferença na análise dos subproblemas ativo e reativo. O subproblema ativo tem uma modelagem simples com um número pequeno de variáveis. Já o subproblema reativo exige uma modelagem mais complexa e um número maior de variáveis associadas, o que aumenta o esforço computacional necessário para analisá-lo. É por estes motivos que a busca de métodos aproximados confiáveis para análise do subproblema reativo é, atualmente, objeto de muitas pesquisas.

## 2.4 Subproblema ativo

### 2.4.1 Introdução

As linhas de transmissão de um sistema elétrico de potência possuem restrições operativas muito severas. A principal restrição é a capacidade ou limite de transmissão de potência elétrica ativa. Costuma-se denominar de subproblema ativo a parte da seleção de contingências que analisa as linhas de transmissão com relação a estes limites físicos de operação.

Segundo Monticelli[4]: “ O fluxo de potência ativa em uma linha de transmissão é aproximadamente proporcional à abertura angular na linha e se desloca no sentido dos ângulos maiores para os ângulos menores”. É este fato que permite a dedução de um modelo aproximado para cálculo de fluxo de carga, denominado fluxo de carga corrente contínua (FCCC). Este modelo é utilizado como base para muitos métodos aproximados de seleção de contingências. Sua descrição está no Apêndice A deste trabalho.

### 2.4.2 Métodos adequados à análise do subproblema ativo

A meta deste trabalho é estudar os métodos de solução do subproblema reativo do problema de seleção de contingências, pois para o subproblema ativo já existem métodos aproximados com velocidade e precisão satisfatórias. Portanto esta seção é apresentada apenas para uma melhor definição do problema de seleção de contingências, em seu aspecto global.

Em 1984, F.Galiana [5] apresenta um método aproximado de seleção de contingências, do tipo implícito, para o subproblema ativo. A importância deste método deve-se ao

fato de o mesmo apresentar resultados extremamente confiáveis e possuir um esforço computacional associado bastante reduzido.

O método baseado no modelo de FCCC parte do princípio que a análise de severidade de contingências pode ser concebida como um processo de filtragem. É proposta uma filtragem sistemática das possíveis contingências, através de um número arbitrário de testes numéricos (filtros), onde em cada etapa as contingências são classificadas como: seguras, inseguras e incertas.

As contingências consideradas seguras são eliminadas do processo de análise, as consideradas inseguras são retidas na lista de casos severos, finalmente os casos qualificados como contingências “incertas” são passados para o próximo filtro, de formulação mais complexa, que prossegue a análise. A figura 2.2 a seguir mostra esquematicamente esta metodologia.

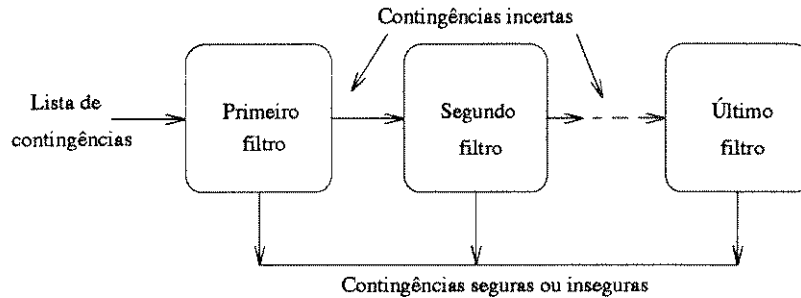


Figura 2.2: Processo de filtragem de contingências

O funcionamento dos testes numéricos (filtros) mostrados na figura 2.2 é baseado no uso de fatores de distribuição. Assim, para cada contingência analisada, em cada um dos filtros estima-se o valor dos fluxos de potência ativa nos ramos. O número de casos analisados pelo último filtro é muito menor que o total de contingências analisadas. Nesta última etapa do processo de filtragem é utilizado o modelo de FCCC. Posteriormente é feita a ordenação das contingências.

Em 1988, é publicada por V. Brandwajn [6] uma nova proposta para a solução do subproblema ativo do problema de seleção e análise de contingências.

A idéia chave do método é efetuar-se, em cada contingência analisada, a divisão da rede elétrica em três subredes adequadas. Logo, ele é do tipo implícito. Na figura 2.3 esta proposta está ilustrada.

A divisão da rede é feita da seguinte maneira:

- Subrede de interesse N1: é a subrede que contém o elemento que sai de operação (ramo  $k - m$  na figura 2.3) e mais um número fixo de vizinhanças desse elemento. É importante que esta subrede contenha todas as mudanças topológicas causadas pela contingência.

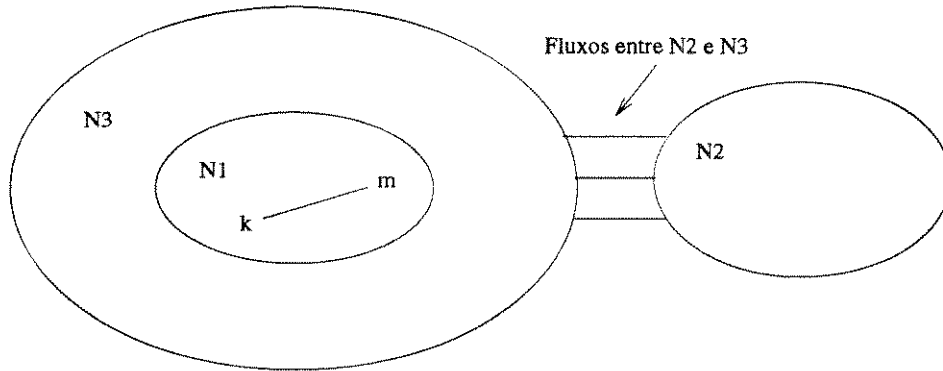


Figura 2.3: Divisão da rede em três subredes de interesse

- Subrede de interesse N3: selecionada a subrede de interesse N1, pertencem a subrede N3 as barras que separam a subrede N1 do restante da rede.

- Subrede de interesse N2: esta subrede é constituída pela rede inteira, exceto as subredes de interesse N1 e N3.

O algoritmo de análise para cada contingência pode ser resumido nos seguintes passos conceituais:

- 1) Determinadas as três subredes de interesse, calcula-se o máximo espalhamento angular incremental ( $\Delta\theta^{max} = \max | \Delta\theta_k - \Delta\theta_m |$ ), onde  $k$  e  $m$  são as extremidades de todos os ramos pertencentes à subrede N3.

- 2) Verifica-se na subrede N2 quais os ramos cujo espalhamento angular excede o espalhamento angular máximo calculado. Nesses ramos (aqui designados como “perigosos”), poderão ocorrer violações de limites de transmissão de potência elétrica ativa.

- 3) Calcula-se, através do FCCC, os fluxos de potência ativa nos ramos pertencentes a N1 e nos ramos qualificados como “perigosos” da subrede N2. Finalmente verifica-se, somente para esses ramos, se os limites de transmissão de potência ativa foram respeitados.

A eficiência computacional deste método pode ser considerada satisfatória devido a dois fatores:

- o uso do critério de divisão da rede diminui drasticamente o número de ramos que têm seus limites verificados;
- o uso de técnicas de exploração da esparsidade de vetores e matrizes em todos os cálculos necessários.

Muito recentemente, J. Carpentier e outros [7] divulgaram uma nova proposta para a solução do subproblema ativo. O novo método, também do tipo implícito, consiste no método proposto por V. Brandwajn [6], com alterações que aumentam sua eficiência computacional.

Os autores afirmam que o método descrito em [6] é exato e fornece soluções bastante rápidas. Entretanto, denotam uma deficiência. Quando um ou vários ramos do

sistema analisado estão próximos de violar seus limites de transmissão, na situação pré-contingência, o método proposto em [6] permanece exato mas torna-se excessivamente lento.

O método proposto em [6] é alterado visando a superação da deficiência acima descrita, através do uso de propriedades de reciprocidade. É deduzida em [7] a relação de reciprocidade existente entre espalhamento angular e injeções de compensação.

Na abordagem original [6], em cada ramo analisado, verifica-se o efeito da saída de operação deste ramo nos demais ramos da rede. Com o uso da reciprocidade [7], além desse resultado, simultaneamente conhece-se o efeito das saídas de operação de todos os outros ramos da rede sobre o ramo analisado. Esta é a chave para o aumento da eficiência computacional do método.

## 2.5 Subproblema reativo

### 2.5.1 Introdução

O principal objetivo da solução do subproblema reativo é a determinação dos efeitos de cada contingência nos módulos das tensões das barras de carga e nas injeções de potência reativa nas barras de geração do sistema analisado.

A exemplo do subproblema ativo, as diferentes abordagens geram várias propostas de métodos aproximados. Descrever as principais metodologias aplicáveis ao subproblema reativo é a finalidade desta seção.

### 2.5.2 Métodos adequados à análise do subproblema reativo

Existem muitos métodos aproximados para o subproblema reativo que adotam a primeira iteração (completa) do modelo de fluxo de carga desacoplado rápido (FCDR) [9] usando toda a rede [17], [19], [20]. A descrição deste modelo constitui o Apêndice B deste trabalho, e o método nele baseado será apresentado no próximo capítulo.

Em 1989 V. Brandwajn e M. Lauby [1] publicam um método para a seleção de contingências, que pela primeira vez aplica a filosofia de “bounding” para a solução do subproblema reativo. Apresentaremos a descrição do método proposto em [1] no próximo capítulo, já que sua implementação computacional faz parte desse trabalho.

O desenvolvimento de métodos aproximados aplicáveis ao subproblema reativo prossegue com a proposta referenciada em [10]. O método baseia-se na proposta feita em [1] e objetiva melhorar o seu desempenho, especificamente para a parte reativa. A exemplo do método que o originou, este método é do tipo implícito e utiliza o modelo de FCDR. Para a melhoria do desempenho computacional do método, é apresentado um novo modelo de solução para o problema  $B''\Delta V = \Delta Q/V$  (ver apêndice B).

Inicialmente o sistema de potência é dividido em duas áreas principais de corte, conforme ilustra a figura 2.4.

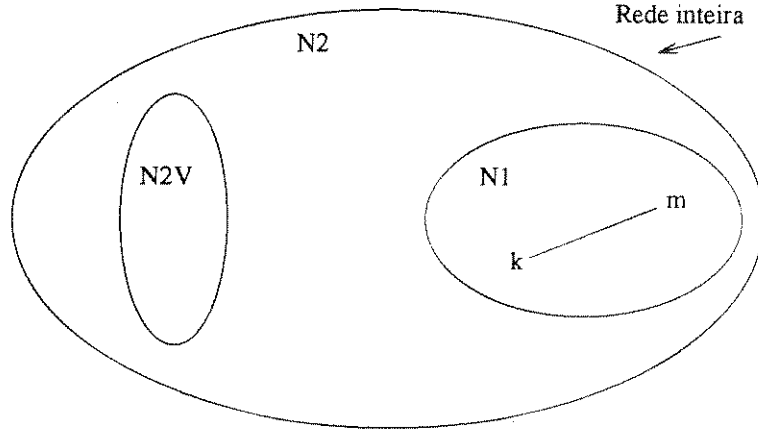


Figura 2.4: Divisão da rede em duas áreas de corte

Esta divisão da rede visa localizar os efeitos primários (mais intensos) de cada contingência na subrede N1 e os efeitos secundários na subrede N2.

Para a seleção da subrede N1 é determinado um caminho alternativo para alimentar as barras terminais do ramo contingenciado. Considera-se N1 a subrede envolvida por esse caminho. Seleccionada N1, o restante da rede forma a subrede N2.

Posteriormente através do critério de distância elétrica [11] selecciona-se de N2 o subgrupo de barras denominado N2V. Este subgrupo contém as barras onde espera-se que existam variações significativas nos módulos das tensões.

A aceleração da solução do problema  $B''\Delta\underline{V} = \Delta\underline{Q}/V$  é obtida da forma descrita a seguir.

- O vetor  $\Delta\underline{Q}$  é calculado exatamente para as barras pertencentes a N1 através da expressão:

$$\Delta Q_i = Q_i^{esp} - \sum_j V_i^0 V_j^0 (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2.1)$$

Onde:

$\Delta Q_i$  - componente  $i$  do vetor de desvios de potência reativa

$Q_i^{esp}$  - injeção de potência reativa especificada para a barra  $i$

$V_i^0$  e  $V_j^0$  - tensões nas barras  $i$  e  $j$  no caso base do sistema

$g_{ij}$  - condutância do ramo  $i - j$

$\theta_{ij}$  - diferença angular no ramo  $i - j$

$b_{ij}$  - susceptância do ramo  $i - j$ .

- Para as barras pertencentes a subrede N2, o vetor  $\Delta\underline{Q}$  é calculado pela seguinte expressão simplificada:

$$\Delta Q_i = - \sum_j [V_i^0 V_j^0 (g_{ij} \cos \theta_{ij}^0 + b_{ij} \sin \theta_{ij}^0)] \Delta \theta_{ij} \quad (2.2)$$

onde o índice “o” novamente denota valores do caso base da rede.

- O vetor  $\Delta \underline{V}$  só é calculado para as barras pertencentes a subrede N1 e ao subgrupo de barras N2V.

Estas alterações tornam o problema  $B''\Delta \underline{V} = \Delta \underline{Q}/V$  adequado para a solução por técnicas de vetores esparsos[2].

## 2.6 Novas abordagens para análise de segurança em sistemas de potência

Na referência [12] é proposta uma nova abordagem para a parte reativa da análise de segurança em sistemas de potência. Conforme já vimos, este problema é habitualmente tratado em duas etapas: seleção e análise de contingências. Em [12] é proposto o uso de um “pré-filtro adaptativo” antes da execução da seleção de contingências. A figura 2.5 mostra esquematicamente a proposta.

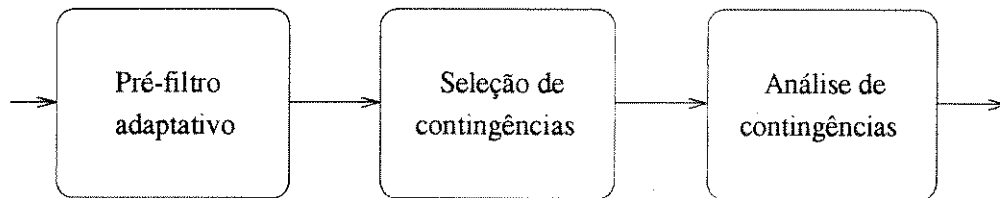


Figura 2.5: Acréscimo de pré-filtro adaptativo à análise de segurança

Nos centros de controle de energia atuais a análise de segurança é executada com periodicidade constante. Habitualmente, em cada análise não são consideradas informações obtidas em ciclos anteriores. A inclusão do pré-filtro adaptativo visa o aproveitamento destas informações desde que ainda sejam corretas. O objetivo é aumentar a eficiência computacional da análise de segurança.

Em [12] apenas se apresenta a idéia do uso do pré-filtro adaptativo. Para as etapas de seleção e de análise de contingências são aceitas quaisquer metodologias.

Na referência [13] é proposto que a análise de segurança seja feita através do uso conjunto de pré-filtragem [12] e de redução adaptativa de redes [14].

No cálculo de fluxo de carga o problema de convergência da solução é de natureza local, isto é: existem regiões da rede onde a solução é obtida antes do que nas demais regiões. É neste fato que se baseia a técnica de redução adaptativa de redes.

O conceito de modelos reduzidos adaptativamente determina uma divisão da rede analisada em duas partes: rede interna e rede externa. Constituem a rede interna as barras cujos desvios de injeções ( $\Delta \underline{P}$  e  $\Delta \underline{Q}$ ) são maiores que uma tolerância pré-especificada.

A rede externa, formada pelas demais barras, é posteriormente reduzida a um circuito equivalente.

A confiabilidade da utilização de modelos reduzidos na análise de segurança da parte reativa dos sistemas deve-se à concentração dos efeitos da maioria das contingências e à confiabilidade dos métodos de obtenção de equivalentes externos.

O algoritmo de verificação de segurança proposto em [13] é composto por três etapas. Na primeira etapa o pré-filtro, baseado em informações de ciclos anteriores, elimina da lista de contingências os casos com nível de gravidade desprezível. Os demais são passados para a tarefa de seleção de contingências.

Este processo de filtragem de contingências é composto por duas partes:

- Atualização: onde é verificada a validade dos resultados oriundos do ciclo anterior. Se ocorreram mudanças significativas no sistema, os parâmetros são atualizados.
- Filtragem: onde os casos são classificados através de comparações das tensões estimadas para o estado pós-contingência com os limites de segurança do sistema.

Na segunda etapa, a seleção de contingências é feita através da primeira iteração do FCDR, acelerada pelo uso de modelos reduzidos [14]. Os casos de contingências testados são classificados em três categorias: triviais, médios e graves. Os casos triviais são descartados. Os casos qualificados como médios são ordenados de acordo com seu nível de gravidade e posteriormente analisados em detalhe pela próxima tarefa. Finalmente os casos graves são imediatamente processados pela tarefa de análise de contingências.

A terceira etapa do algoritmo proposto constitui-se na análise de contingências, através do cálculo de fluxo de carga, também acelerado através de técnicas de redução adaptativa [14]. A figura 2.6 mostra o algoritmo acima descrito.

A filosofia de pré-triagem de contingências também é proposta em [15], porém de uma maneira diferente do que em [13]. Em [15] é proposto que a verificação do nível de gravidade de cada contingência seja feita pela aplicação de uma série de algoritmos de complexidade crescente.

É acrescentada ao processo de análise de segurança uma etapa de pré-triagem, visando reduzir o número de casos que serão analisados por algoritmos que consomem mais tempo computacional. Isto é feito porque, mesmo com a utilização dos métodos tipo “bounding”, o problema da limitação de tempo computacional permanece sério.

A etapa de pré-triagem de contingências proposta consiste na aplicação do método de relaxação concêntrica descrito em [16], porém melhorado. Pelo algoritmo de relaxação concêntrica, determina-se a rede de interesse pelo acréscimo sucessivo de vizinhanças ao elemento contingenciado enquanto são sensíveis os efeitos da contingência. O restante da rede é desconsiderado da análise. A melhoria existente em [15] consiste em uma técnica para a verificação de problemas de segurança em barras externas à rede de interesse e na substituição do modelo de Gauss-Seidel pelo modelo desacoplado rápido para os cálculos de fluxo de carga.

Os dois métodos [13] e [15] que descrevemos anteriormente utilizam o conceito de redução adaptativa juntamente com outras técnicas. Na referência [18] propõe-se o uso

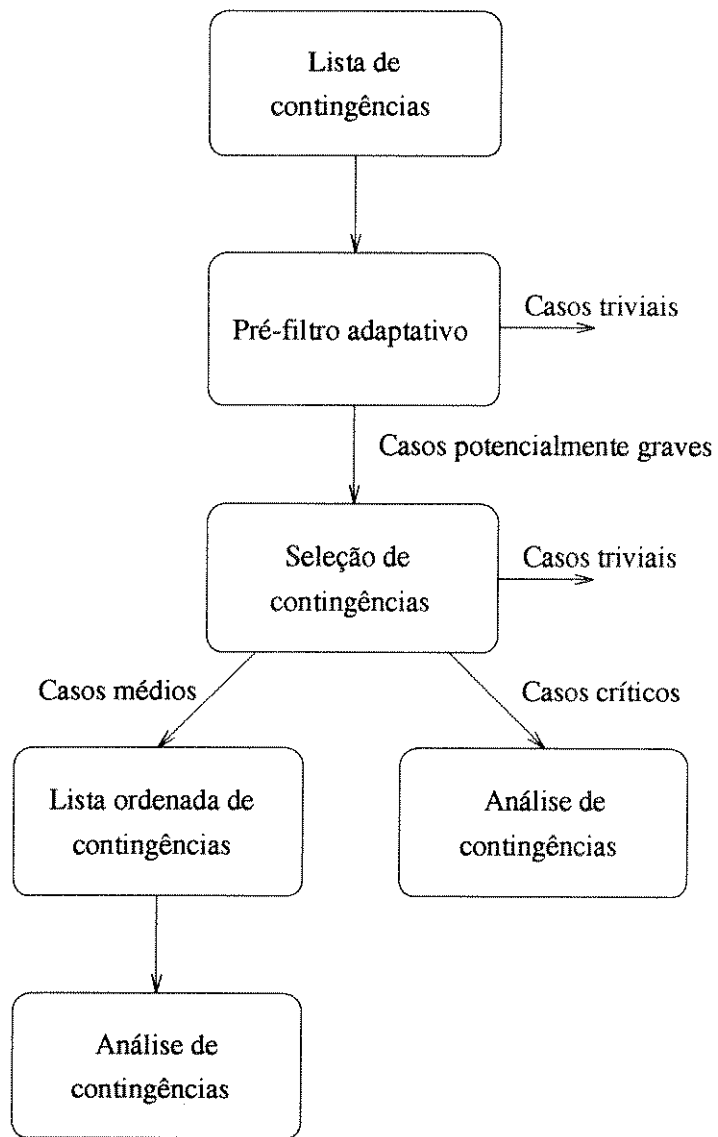


Figura 2.6: Algoritmo híbrido para análise de segurança

exclusivo de redução adaptativa para análise de segurança. Como não existem restrições topológicas para a redução da rede analisada, este método [18] difere dos métodos de solução local e dos métodos de “bounding”. A exemplo de [13] e [15], a proposta apresentada em [18] aumenta a eficiência computacional da análise de segurança sem comprometer a precisão dos resultados.

Nos últimos anos, paralelamente ao desenvolvimento dos computadores, desenvolveram-se também as técnicas de programação dos mesmos. Entre estas novas técnicas está o uso de lógica nebulosa. Esta técnica é aplicada ao problema de seleção de contingências em [17]. Devemos destacar que o ponto fundamental do método é a utilização de regras heurísticas advindas da experiência de operadores de sistemas de potência para o estabelecimento do nível de gravidade de cada contingência. É interessante notar que este procedimento heurístico é exatamente o que era adotado no passado, quando os sistemas de potência eram menores e praticamente não existiam interligações entre os mesmos.

## Capítulo 3

# Métodos de solução do problema de seleção e análise de contingências

### 3.1 Mecanismos básicos para seleção e análise de contingências

#### 3.1.1 Verificação de ilhamentos

Segundo Elgerd [3], se adequadamente projetado e operado, um sistema de potência deve fornecer energia elétrica em todos os locais exigidos pelos consumidores. Além disso, um dos fatores através dos quais pode-se medir a “qualidade” do fornecimento de energia elétrica é a sua confiabilidade.

Os primeiros sistemas elétricos de potência eram do tipo radial, isto é, praticamente não existiam malhas nas redes. Atualmente, além das ligações entre diferentes sistemas existem dentro de um mesmo sistema muitas malhas elétricas. Porém, existem também muitos locais atendidos por uma única linha de transmissão, ou seja, com características radiais. A figura 3.1 ilustra esta situação, onde a carga localizada em  $m$  é suprida exclusivamente pela linha de transmissão  $k - m$ .

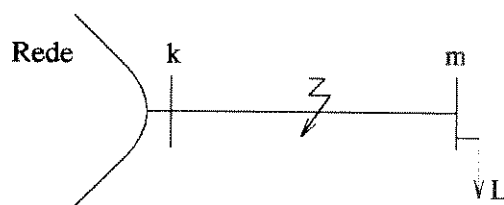


Figura 3.1: Situação de possível ilhamento

Ainda na figura 3.1, verifica-se que uma contingência na linha de transmissão  $k - m$

obviamente implicará no desligamento da carga  $L$ . Esta é a situação qualificada como ilhamento em  $m$ .

No contexto de análise de segurança dos sistemas, especificamente na parte de seleção de contingências, deve ser associado o máximo nível de gravidade a ramos cuja ausência determine ilhamento. Isto devido às graves consequências dos ilhamentos para a confiabilidade dos sistemas. Na figura 3.1 a situação de ilhamento é explicada para uma linha de transmissão. Considerações análogas podem ser feitas para outros elementos dos sistemas, como transformadores por exemplo.

A discussão precedente estabelece a importância de efetuar-se a verificação de quais ramos do sistema podem determinar ilhamentos. O método ideal para tal verificação é determinar, através de buscas topológicas, se existem caminhos alternativos para o fornecimento de potência elétrica aos diferentes pontos de carga do sistema. A existência de no mínimo um caminho alternativo diminui o risco de ilhamento. Logicamente este procedimento teria de ser adotado para todas as contingências analisadas. Entretanto esta metodologia ideal não tem aplicação viável, pois o esforço computacional a ela associado é muito elevado. Deve-se lembrar, ainda, que a topologia de um sistema elétrico de potência não é constante em função do tempo: ela muda freqüentemente devido às manobras (chaveamentos) efetuadas na operação.

Em Monticelli [4] é deduzida, a partir do teorema de Norton, a expressão que fornece a impedância equivalente entre dois nós quaisquer de uma rede elétrica modelada pela equação:

$$\underline{I} = \underline{Y} \underline{E} \quad (3.1)$$

Onde:

$\underline{I}$  - vetor das injeções de corrente

$\underline{Y}$  - matriz de admitância nodal

$\underline{E}$  - vetor das tensões nodais.

A impedância equivalente entre dois nós quaisquer  $k$  e  $m$  de uma rede elétrica é dada por:

$$Z_{km}^{eq} = Z_{kk} + Z_{mm} - 2Z_{km} \quad (3.2)$$

onde  $Z_{kk}$ ,  $Z_{mm}$  e  $Z_{km}$  são respectivamente os elementos  $kk$ ,  $mm$  e  $km$  da matriz de impedâncias  $Z_{bus}$ , obtida pela inversão da matriz de admitância nodal  $Y_{bus}$ .

Em nosso trabalho, a verificação da ocorrência de ilhamentos é efetuada antes da verificação dos efeitos da contingência. Isto é feito para todos os ramos analisados e se é detectada a ocorrência de ilhamento o ramo é separado em uma lista específica. As contingências pertencentes a esta lista são consideradas de gravidade máxima para o sistema.

A verificação de ilhamentos é feita da seguinte maneira:

- Para cada ramo analisado calcula-se pela expressão 3.2 a impedância equivalente entre

suas barras terminais ( $Z_{km}^{eq}$ ).

- Compara-se a impedância  $Z_{km}^{eq}$  obtida com a impedância própria (ou primitiva)  $Z_{km}$  do ramo cuja contingência está sendo simulada.
- Se  $Z_{km}^{eq}$  e  $Z_{km}$  forem iguais, a saída de operação do ramo  $k - m$  determina ilhamento, caso contrário não determina.

Na aplicação deste critério de verificação de ilhamentos, se as impedâncias  $Z_{km}^{eq}$  e  $Z_{km}$  são iguais, quando substituímos a rede externa (rede exceto o ramo contingenciado) por  $Z_{km}^{eq}$  e simulamos a contingência no ramo de impedância  $Z_{km}$ , a impedância resultante é igual a zero. Isto é: temos um circuito aberto entre os nós  $k$  e  $m$  da rede. Assim, se esse critério de igualdade é satisfeito, não existe caminho alternativo para fornecer potência elétrica a carga situada em  $m$ .

Neste trabalho, o modelo de fluxo de carga adotado é o FCDR. A impedância equivalente  $Z_{km}^{eq}$  é obtida através da fatoração da matriz  $B'$  do FCDR. A verificação de igualdade entre  $Z_{km}^{eq}$  e  $Z_{km}$  é feita pela comparação da diferença ( $Z_{km}^{eq} - Z_{km}$ ) com uma constante de tolerância. Após muitos testes atribuímos a esta tolerância o valor de  $1 \times 10^{-5}$ .

### 3.1.2 Técnicas de simulação de contingências

Sem dúvida alguma, uma das partes mais importantes de qualquer algoritmo de verificação de segurança é a simulação da saída de operação dos elementos analisados.

O método mais simples seria, na leitura do banco de dados do sistema, ignorar o ramo analisado. Assim, seria simulada a sua saída de operação na montagem das matrizes do sistema e em todos os cálculos posteriores. Tal método tem eficiência computacional extremamente pequena e, portanto, é inviável.

Quando analisamos uma contingência simples são poucas as posições alteradas nas matrizes dos sistemas. Isto é, a representação da nova topologia do sistema pode ser feita apenas pela atualização das matrizes do caso base da rede, não sendo necessária a sua reconstrução. A idéia de atualização de matrizes é usada em muitos métodos de análise de segurança para sistemas de potência. Como exemplo citamos as referências [21], [22], [23] e [24]. Embora existam métodos eficientes, como é o caso da refatoração parcial de matrizes [25], a adoção dessa filosofia implica em cálculos adicionais que dificultam a aplicação desses métodos.

A simulação da saída de operação de equipamentos também pode ser feita através de fatores de distribuição [5]. O custo computacional é pequeno, porém até onde sabemos esta metodologia não oferece bons resultados quando usada na análise do subproblema reativo. Assim, seu uso é limitado. Existem ainda outras maneiras de simular contingências, como o método da matriz  $Z_{bus}$  esparsa [26], por exemplo.

A metodologia mais eficiente e mais usada para a simulação de contingências em redes elétricas de potência é a técnica de injeções de compensação. Esta é a técnica que utilizamos nos diversos métodos de análise de segurança que implementamos neste trabalho. São muitos os métodos que também adotam esta técnica, sendo alguns exemplos as

referências [6], [7],[10],[1] e [15].

A grande vantagem do uso da técnica de injeções de compensação é que podemos obter as variações no estado de um sistema devidas a uma ou mais contingências, usando apenas informações do caso base do sistema. Assim podem ser simuladas contingências sem necessidade de atualização (e conseqüente nova inversão ou fatoração) das matrizes que representam o sistema.

Apresentaremos resumidamente a técnica de injeções de compensação. Consideramos desnecessário apresentar a dedução das expressões uma vez que esta técnica é bastante conhecida.

Em Monticelli [4], são deduzidas algebricamente expressões para obter variações provocadas no estado de uma rede modelada pela equação linear  $\underline{I} = Y\underline{E}$  devidas à alterações em suas admitâncias. Se a alteração acontece em apenas um ramo da rede (ramo  $k - m$ ), as alterações no estado são dadas por:

$$\Delta \underline{E} = -\frac{\Delta y_{km} E_{km}^0}{1 + \frac{\Delta y_{km}}{y_{km}^{eq}}} \underline{w}_{km} \quad (3.3)$$

com:

$$\underline{w}_{km} = Z^0 \underline{e}_{km} \quad (3.4)$$

Onde:

$\Delta \underline{E}$  - vetor de alterações no estado da rede

$\Delta y_{km}$  - alteração na admitância do ramo  $k - m$  da rede

$E_{km}^0$  - diferença entre as tensões dos nós  $k$  e  $m$  no caso base da rede

$y_{km}^{eq}$  - admitância equivalente entre os nós  $k$  e  $m$  da rede

$\underline{w}_{km}$  - vetor dado pelo produto entre  $Z^0$  e  $\underline{e}_{km}$

$Z^0$  - matriz de impedâncias do caso base da rede

$\underline{e}_{km}$  - vetor composto de zeros, exceto nas posições  $k$  e  $m$  onde vale respectivamente +1 e -1.

Se ocorrem alterações simultâneas nas admitâncias de vários ramos de uma rede, as variações no estado desta rede podem ser obtidas por:

$$\Delta \underline{E} = -Z^0 M (\Delta Y^{-1} + M^t Z^0 M)^{-1} M^t \underline{E}^0 \quad (3.5)$$

Onde:

$\Delta \underline{E}$  - vetor de alterações no estado da rede

$Z^0$  - matriz de impedâncias do caso base da rede

$M$  - matriz cujas colunas são vetores do tipo  $\underline{e}_{km}$ , sendo uma coluna correspondente a cada ramo do sistema cuja admitância é alterada

$\Delta Y$  - matriz diagonal que contém as alterações nas admitâncias de diferentes ramos

$M^t$  - matriz  $M$  transposta

$\underline{E}^0$  - vetor de tensões do caso base da rede.

Ainda segundo Monticelli [4], as expressões 3.3 e 3.5 anteriores podem também ser obtidas utilizando-se a propriedade física de redes elétricas conhecida como teorema da compensação. Segundo este teorema: “A alteração na admitância de um ramo da rede tem o mesmo efeito que a ligação de uma fonte de corrente de intensidade conveniente entre os nós terminais da admitância”.

Neste trabalho efetuamos os cálculos de fluxo de carga através da versão BX do método de fluxo de carga desacoplado rápido (ver apêndice B) e assim adaptamos as expressões 3.3 e 3.5 a este modelo. A seguir descreveremos o procedimento utilizado para a simulação de contingências.

### - Iteração ativa

a) No cálculo das injeções de potência ativa é desconsiderado o elemento analisado. Isto é feito subtraindo-se das injeções o fluxo de potência ativa que percorreria o elemento se o mesmo estivesse em operação.

b) Na construção da matriz  $B'$  do modelo de FCDR não são considerados elementos tipo “shunt”. Assim a ocorrência de uma contingência no ramo  $k-m$  de um sistema altera igualmente as posições  $kk$ ,  $mm$ ,  $km$  e  $mk$  da matriz  $B'$ . Isto permite que na iteração ativa seja utilizada para compensação uma expressão análoga à expressão 3.3 anterior.

Os ângulos das tensões nodais na situação pré-contingência são conhecidos pela solução de  $B'\Delta\theta = \Delta P/V$  (ver apêndice B). Assim as variações nos ângulos das tensões devidas a uma contingência em um ramo  $k-m$  podem ser calculadas. Isto é feito pela expressão:

$$\Delta\theta^c = -\frac{\underline{w}_1 * \Delta\theta_{k,m}}{Z_{k,m}^{eq} - \Delta Y_{k,m}^{-1}} \quad (3.6)$$

Onde:

$\Delta\theta^c$  - vetor de incrementos nos ângulos das tensões nodais

$\underline{w}_1$  - vetor dado pelo produto  $B'^{-1}\underline{e}_{km}$ , sendo  $\underline{e}_{km}$  o mesmo definido na expressão 3.4

$\Delta\theta_{k,m}$  - diferença entre os incrementos de ângulos do estado pré-contingência dos nós  $k$  e  $m$

$Z_{k,m}^{eq}$  - impedância equivalente entre os nós  $k$  e  $m$ , obtida com elementos de  $B'^{-1}$

$\Delta Y_{k,m}$  - admitância do ramo  $k-m$ .

c) Em cada iteração do cálculo de fluxo de carga os ângulos das tensões nodais na situação pós-contingência são obtidos pela expressão:

$$\theta_i^{k+1} = \theta_i^k + \Delta\theta_i + \Delta\theta_i^c \quad (3.7)$$

Onde:

$\theta_i^{k+1}$  - ângulo da tensão na barra  $i$  na situação pós-contingência

$\theta_i^k$  - ângulo da tensão na barra  $i$  na iteração anterior

$\Delta\theta_i$  - incremento do ângulo da tensão nodal na barra  $i$  na situação pré-contingência

$\Delta\theta_i^c$  - incremento do ângulo da tensão nodal na barra  $i$  para representar os efeitos da contingência.

### - Iteração reativa

d) No cálculo das injeções de potência reativa é desconsiderado o elemento analisado. Isto é feito subtraindo-se das injeções o fluxo de potência reativa que percorreria o elemento se o mesmo estivesse em operação. Elementos tipo “shunt” ligados às barras terminais do ramo analisado também são desconsiderados do cálculo das injeções de potência reativa.

e) No modelo de FCDR, os elementos tipo “shunt” são incluídos na diagonal da matriz  $B''$ . Assim quando acontece uma contingência em um ramo  $k - m$ , as alterações que acontecem nas posições  $kk$  e  $mm$  da matriz  $B''$  são diferentes da alteração que ocorre nas posições  $km$  e  $mk$ . Após muitos testes, constatamos que a contingência em um ramo com elementos tipo “shunt” deveria ser simulada através de uma expressão análoga à expressão 3.5 anterior. Quando tentamos utilizar uma expressão que considera apenas a admitância serial do ramo analisado (semelhante a 3.3), os resultados finais da análise de segurança ficaram comprometidos.

Os módulos das tensões nodais na situação pré-contingência são conhecidos pela solução de  $B''\Delta V = \Delta Q/V$ . Assim as variações nos módulos das tensões devidas a uma contingência em um ramo  $k - m$  podem ser calculadas. Isto é feito pela expressão:

$$\Delta \underline{V}^c = -B''^{-1}M(\Delta Y^{-1} + M^t B''^{-1}M)^{-1}M^t \Delta \underline{V} \quad (3.8)$$

Onde:

$\Delta \underline{V}^c$  - vetor de incrementos nos módulos das tensões nodais

$B''$  - matriz  $B''$  do caso base do sistema

$M$  - matriz cujas colunas são vetores do tipo  $\underline{e}_{km}$ ,  $\underline{e}_k$  e  $\underline{e}_m$ , sendo uma coluna correspondente a cada admitância que é alterada

$\Delta Y$  - matriz diagonal que contém as alterações nas admitâncias

$M^t$  - matriz  $M$  transposta

$\Delta \underline{V}$  - vetor de incrementos de tensões da situação pré-contingência.

Nesta expressão a matriz  $M$  é formada por 3 vetores ( $\underline{e}_{km}$ ,  $\underline{e}_k$  e  $\underline{e}_m$ ), cada um de dimensão igual ao número de barras do sistema analisado. Os vetores  $\underline{e}_k$  e  $\underline{e}_m$  são particularizações do vetor  $\underline{e}_{km}$ : o vetor  $\underline{e}_k$  é composto de zeros exceto na posição  $k$  onde vale +1. Já o vetor  $\underline{e}_m$  é composto de zeros exceto na posição  $m$ , onde também vale +1. A matriz diagonal  $\Delta Y$  possui 3 elementos não nulos. Estes elementos são a admitância do ramo  $k - m$  e os elementos tipo “shunt” ligados às extremidades  $k$  e  $m$  do ramo analisado.

Em nossa implementação o cálculo da expressão 3.8 é realizado eficientemente. A matriz  $B''^{-1}M$  é previamente calculada usando-se a propriedade pela qual suas colunas são vetores do tipo  $\underline{w}_{km} = B''^{-1}\underline{e}_{km}$ . A matriz  $(\Delta Y^{-1} + M^t B''^{-1}M)$  é cheia, porém de dimensão  $3 \times 3$ , o que não dificulta a sua inversão.

Se não existem elementos tipo “shunt” conectados às barras terminais do ramo analisado, a simulação da contingência fica mais simples. Podemos particularizar a expressão 3.8 obtendo uma expressão análoga às expressões 3.3 e 3.6 anteriores. Assim o cálculo é feito da seguinte forma:

$$\Delta \underline{V}^c = - \frac{\underline{w}_2 * \Delta V_{k,m}}{Z_{k,m}^{eq} - \Delta Y_{k,m}^{-1}} \quad (3.9)$$

Onde:

$\Delta \underline{V}^c$  - vetor de incrementos nos módulos das tensões nodais

$\underline{w}_2$  - vetor dado pelo produto  $B''^{-1} \underline{e}_{km}$ , sendo  $\underline{e}_{km}$  o mesmo definido na expressão 3.4

$\Delta V_{k,m}$  - diferença entre os incrementos de módulos de tensão do estado pré-contingência dos nós  $k$  e  $m$

$Z_{k,m}^{eq}$  - impedância equivalente entre os nós  $k$  e  $m$ , obtida com elementos de  $B''^{-1}$

$\Delta Y_{k,m}$  - admitância do ramo  $k - m$ .

f) Em cada iteração do cálculo de fluxo de carga os módulos das tensões na situação pós-contingência são obtidos pela expressão:

$$V_i^{k+1} = V_i^k + \Delta V_i + \Delta V_i^c \quad (3.10)$$

Onde:

$V_i^{k+1}$  - módulo da tensão na barra  $i$  na situação pós-contingência

$V_i^k$  - módulo da tensão na barra  $i$  na iteração anterior

$\Delta V_i$  - incremento do módulo da tensão nodal na barra  $i$  na situação pré-contingência

$\Delta V_i^c$  - incremento do módulo da tensão nodal na barra  $i$  para representar os efeitos da contingência.

Neste trabalho, a inversão explícita das matrizes esparsas  $B'$  e  $B''$  é substituída pelo processo de bifatoração proposto em [27]. Quando os problemas são adequados à solução pelo método de vetores esparsos [2], o mesmo é utilizado. Isto possibilita a aplicação deste mecanismo de simulação de contingências para sistemas de potência de grande porte.

## 3.2 Método “CA” para análise de segurança em sistemas de potência

Neste trabalho denominamos de “CA” o método de análise de segurança onde, para cada contingência que não causa ilhamento, é calculado o fluxo de carga do sistema. Embora sua aplicação em centros de controle seja inviável, os resultados fornecidos por este método proporcionam um perfeito entendimento do problema estudado. Além disso, este método pode ser adotado como padrão para verificação da precisão dos resultados obtidos com alguns dos métodos aproximados que implementamos.

A figura 3.2 mostra o diagrama de blocos de nossa implementação do método “CA” de análise de segurança.

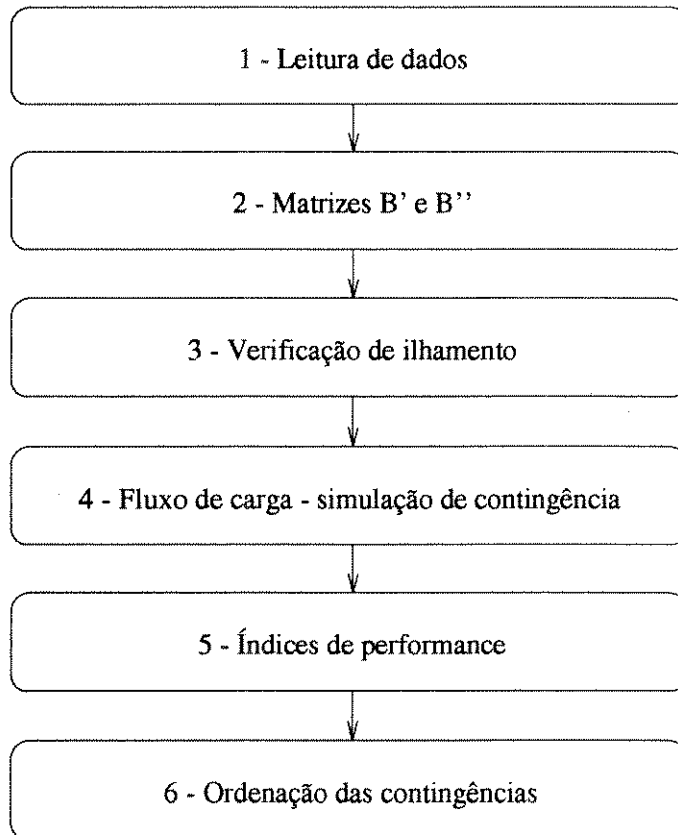


Figura 3.2: Método “CA” de análise de segurança

O diagrama de blocos mostrado na figura 3.2 descreve o método resumidamente, sendo necessário detalhar o mesmo.

As duas primeiras etapas do método implementado consistem na leitura dos dados dos sistemas e na montagem e fatoração das matrizes  $B'$  e  $B''$  do modelo de FCDR. As rotinas computacionais aqui usadas foram construídas de forma que sistemas de potência de grande porte possam ser analisados. Para isso são usados apenas vetores, não existindo estruturas de armazenamento com duas dimensões.

A esparsidade das matrizes  $B'$  e  $B''$  é aproveitada através do sistema de armazenamento compacto proposto em [27]. A inversão explícita das matrizes é substituída pelo processo de bifatoração também proposto em [27]. Com esta implementação os sistemas de equações  $B'\Delta\theta = \Delta P/V$  e  $B''\Delta V = \Delta Q/V$  são solucionados de forma bastante eficiente.

A adoção do modelo de FCDR permite que os blocos 1 e 2 do diagrama da figura 3.2 sejam executados uma única vez, o que torna o FCDR bastante atraente para esta aplicação.

A terceira etapa do método consiste na verificação de ilhamento. Esta verificação é feita para todos os ramos do sistema conforme descrevemos na seção 3.1 deste capítulo. Se a contingência analisada determina ilhamento, ela é apropriadamente listada e inicia-se a análise de outra contingência.

A quarta etapa do método é realizada para todas as contingências que não causam ilhamento. Esta é a fase mais complexa e objetiva determinar, caso exista, o ponto de operação ao qual o sistema é levado pela ausência de um ramo. A simulação da contingência é feita conforme descrevemos anteriormente e, se o cálculo de fluxo de carga converge, é conhecido o estado pós-contingência do sistema.

O funcionamento sob condições especificadas de muitos sistemas de potência depende da operação de determinados ramos (ramos “vitais”). Assim contingências nestes ramos são extremamente graves. Nestes casos não é possível determinar exatamente o estado pós-contingência do sistema. Esta situação é traduzida pela não convergência ou pela divergência da solução de fluxo de carga. Quando uma destas duas situações acontece o ramo é adequadamente listado e a contingência nesse ramo é considerada de gravidade máxima para o sistema. Ou seja, estes ramos são tratados da mesma forma que aqueles que determinam ilhamento na rede.

Na quinta etapa do método são quantificados os efeitos sobre o sistema das contingências analisadas através do cálculo de índices de performance. Este cálculo é feito para todas as contingências cujo fluxo de carga converge. A discussão sobre como quantificar os efeitos de contingências é longa e será retomada neste trabalho.

Na última fase do método as contingências são ordenadas através de seus índices de performance. Tal ordenação é decrescente para que no topo da lista de contingências estejam aquelas de maior gravidade. Os resultados obtidos são então agrupados em 4 diferentes listas:

- 1) lista de contingências que determinam ilhamento no sistema;
- 2) lista de contingências que determinam não convergência no cálculo de fluxo de carga;
- 3) lista de contingências que determinam divergência no cálculo de fluxo de carga;
- 4) lista das demais contingências, ordenadas de acordo com o impacto que as mesmas causam ao sistema.

Como neste método é calculado o fluxo de carga, conhecemos na íntegra o estado pós-contingência do sistema. Se, por exemplo, os limites de segurança são violados o método pode informar o valor dessas violações e as barras onde ocorreram.

Procuramos aumentar a eficiência computacional da implementação. Para isso além do método da bifurcação [27], o método de vetores esparsos [2] é usado no cálculo das variações no estado do sistema provocadas pelas diferentes contingências.

Os resultados que obtivemos com este método serão apresentados e comentados na seção 4.3 desse trabalho.

### 3.3 Método “1P-1Q” para análise de segurança em sistemas de potência

O segundo método de análise de segurança que implementamos neste trabalho foi o método habitualmente denominado “1P-1Q”. A idéia básica deste método é obter eficiência computacional substituindo o cálculo de fluxo de carga pelo cálculo da primeira iteração (completa) do método de fluxo de carga desacoplado rápido. Esta proposta é bastante comum na literatura, sendo alguns exemplos as referências [17],[19] e [20].

Os passos conceituais deste método são bastante semelhantes aos do método “CA”. As duas principais diferenças são:

- para o cálculo da primeira iteração do FCDR os módulos e ângulos das tensões nodais são inicializados com os valores do caso base da rede, considerado conhecido;
- o processo de cálculo é não iterativo, sendo abolida a exigência de convergência da solução.

A figura 3.3 mostra o diagrama de blocos da implementação realizada do método “1P-1Q” de análise de segurança.

Na primeira etapa do método, são lidos do banco de dados os parâmetros do sistema e também os valores do caso base da rede. Em nossa implementação, o caso base é previamente determinado e o programa de cálculo de fluxo de carga inclui o controle de tensão em barras tipo PV por injeção de reativos.

As etapas de construção e fatoração de matrizes e de verificação de ilhamento são idênticas às realizadas no método “CA”, já descritas na seção anterior.

Na quarta e principal etapa do método, é calculada a primeira iteração do FCDR simulando a contingência no ramo analisado. Esta etapa é efetuada para todas as contingências que não causam ilhamento no sistema e a simulação de contingência é feita conforme descrito em 3.1.

A quinta parte do método consiste na quantificação dos efeitos das contingências. Como não existem casos de divergência ou de não convergência de fluxo de carga, são calculados índices de performance para todas as contingências que não causam ilhamento.

Finalmente, os índices de performance são ordenados e os resultados obtidos são reunidos em duas listas:

- 1) lista de contingências que determinam ilhamento no sistema;
- 2) lista das demais contingências ordenadas de acordo com o impacto que as mesmas causam ao sistema.

Este método apresenta duas vantagens sobre o método “CA” descrito na seção anterior. A primeira delas é que, devido ao menor número de cálculos necessários, a eficiência computacional do método “1P-1Q” é muito superior à do método “CA”. A segunda vantagem é que o método “1P-1Q” associa índices de performance a contingências cujo cálculo de fluxo de carga diverge ou não converge no método “CA”. De uma maneira geral esta é a vantagem dos métodos não iterativos sobre os métodos que usam fluxo de carga, na análise de segurança de sistemas elétricos.

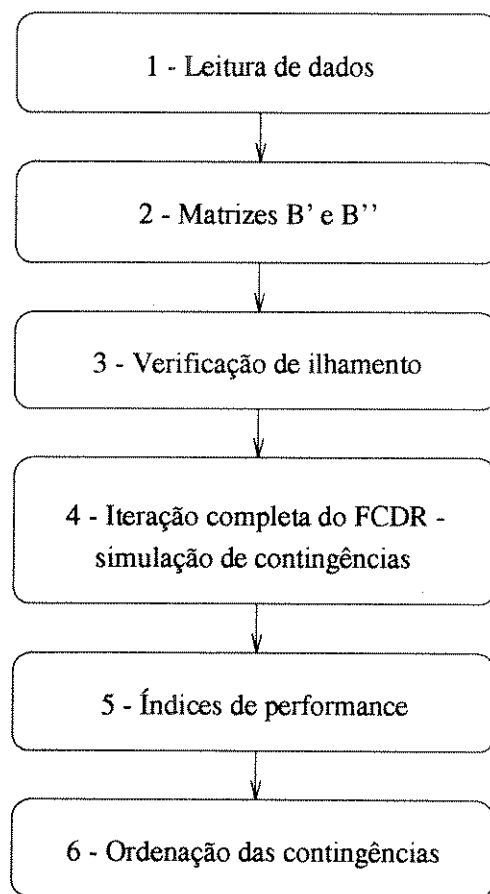


Figura 3.3: Método “1P-1Q” de análise de segurança

Os resultados que obtivemos com este método serão apresentados e comentados na seção 4.4 deste trabalho.

### 3.4 Método proposto em [1] para análise de segurança em sistemas de potência

Nesta seção descreveremos o terceiro método de análise de segurança em sistemas de potência implementado neste trabalho.

O método proposto em [1] é do tipo implícito. Ele utiliza o modelo de FCDR e, até onde sabemos, foi o primeiro a utilizar a filosofia de “bounding” para o subproblema reativo da análise de segurança. Implementamos o critério de “bounding” [1] em um método que realiza apenas a primeira iteração (completa) do método de fluxo de carga desacoplado rápido. Este critério também poderia ser utilizado em um método que calcula o fluxo de carga do sistema analisado.

O método [1] que estamos descrevendo consiste no método proposto em [6] (discutido no capítulo anterior) expandido para enfocar também a parte reativa da análise de segurança. Devemos frisar que a implementação realizada foi seletiva: devido ao objetivo deste trabalho, implementamos somente a parte do método referente ao subproblema reativo. O subproblema ativo é resolvido normalmente através do modelo de FCDR.

A idéia básica da parte do método referente ao subproblema reativo é obter eficiência computacional através da redução dos cálculos realizados. O vetor de desvios de potência reativa ( $\Delta Q$ ) tem seu grau de esparsidade artificialmente aumentado. A componente  $i$  do vetor  $\Delta Q$  só é calculada se a barra  $i$  pertencer a uma das subredes de interesse da figura 3.4.

A subdivisão da rede é feita conforme descrito a seguir.

#### - Subrede N1

A seleção da subrede N1 baseia-se no princípio de que, na maioria das contingências, os efeitos mais sensíveis concentram-se nas proximidades topológicas do elemento que sai de operação. Assim, para cada contingência analisada, forma-se N1 com as barras das primeiras vizinhanças do ramo em foco. Em nossa implementação, utilizamos as quatro primeiras vizinhanças.

Devemos notar que a subrede N1 pode mudar para cada contingência analisada. Entretanto, ela é determinada apenas pela topologia do sistema. Isto permite que as subredes N1 associadas a cada contingência sejam previamente conhecidas e armazenadas em um banco de dados.

#### - Subrede N2

Diferentemente da subrede de interesse N1 a subrede N2 é determinada por parâmetros elétricos.

O objetivo da seleção de N2 é determinar de antemão quais as barras do sistema que, frente a uma contingência, terão desvios de potência reativa ( $\Delta Q_i = Q_i^{esp} - Q_i^{calc}$ )

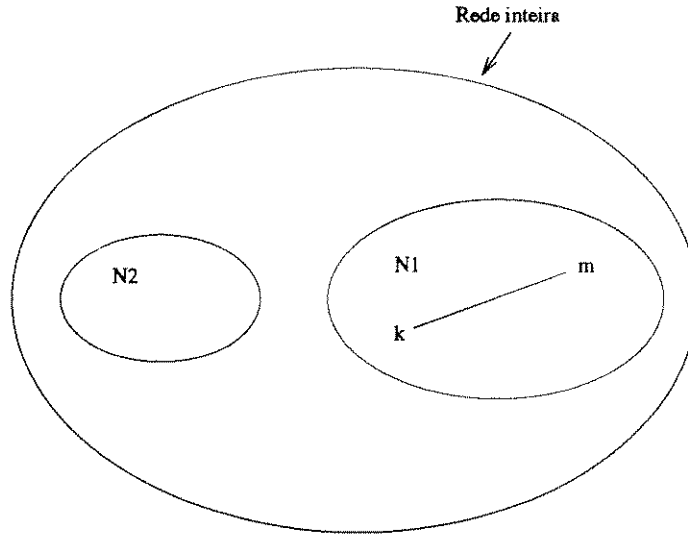


Figura 3.4: Subdivisão da rede em duas subredes de interesse

provavelmente não desprezíveis. Pertencem a N2 as barras externas a N1 que satisfazem dois critérios de seleção.

**- Primeiro critério**

Quando ocorre uma contingência, os valores dos desvios de potência reativa ( $\Delta Q_i$ ) nas barras são influenciados pelas mudanças nas aberturas angulares dos ramos a elas conectados. Nas barras terminais do elemento contingenciado, os valores destes desvios refletem também a mudança na topologia do sistema e a alteração na distribuição do fluxo de potência reativa.

O método [1] considera que a contribuição de cada ramo para o desvio de potência reativa ( $\Delta Q_i$ ) nas suas barras terminais pode ser aproximado pela primeira derivada (sensibilidade) do fluxo de potência reativa através do ramo:

$$\partial Q_i / \partial \theta_{ij} = G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (3.11)$$

Prosseguindo, é determinada uma constante “K”, que determina para uma barra a sensibilidade de seu desvio de potência reativa em relação à abertura angular dos ramos a ela conectados. Esta constante é definida como o somatório dos módulos das sensibilidades calculadas pela expressão anterior:

$$K_i = \sum_{\epsilon} | \partial Q_i / \partial \theta_{ij} | \quad (3.12)$$

Onde:  $\epsilon$  - grupo de ramos conectados à barra  $i$ .

A última parte deste critério consiste no cálculo da maior abertura angular possível nos ramos externos a N1. Este cálculo, conforme proposto em [6], é feito pela expressão:

$$\Delta\theta^{max} = \max | \Delta\theta_k - \Delta\theta_m | \quad (3.13)$$

Finalmente, satisfazem este primeiro critério as barras com valores de “K” superiores a um parâmetro “L” dado por:

$$L = Cte/\Delta\theta^{max} \quad (3.14)$$

Onde: Cte - tolerância pré-determinada para desvios de potência reativa.

### - Segundo critério

O primeiro critério de seleção é bastante eficiente, mas a subrede resultante é ainda muito grande. Faz-se necessária, portanto, a aplicação de um segundo critério de seleção.

O segundo critério proposto em [1] considera como candidatas a pertencer a N2 as barras que estejam ligadas a ramos com perdas reativas incrementais ( $\Delta Q_{ij}^{loss}$ ) maiores que uma tolerância pré-determinada. As perdas reativas incrementais são calculadas pela expressão:

$$\Delta Q_{ij}^{loss} = \Delta I_{ij}^2 X_{ij} \approx 2P_{ij}^0 X_{ij} \approx 2P_{ij}^0 \Delta\theta_{ij} \quad (3.15)$$

Podemos dizer que o método propõe um subproblema reativo simplificado ( $B''\Delta\underline{V} = \Delta\underline{Q}^*/V$ ), onde  $\Delta\underline{Q}^*$  é o novo vetor  $\Delta\underline{Q}$  cuja componente  $i$  só existe se a barra  $i$  pertencer a uma das subredes de interesse. Este problema reativo simplificado é bastante adequado à solução pelo método de vetores esparsos, descrito no apêndice C deste trabalho. Devemos notar que as alterações se deram apenas no vetor  $\Delta\underline{Q}$ . Como o vetor  $\Delta\underline{V}$  não é alterado, a solução do problema é feita por uma substituição “fast forward” e por uma substituição “full backward”. Com outras palavras, o vetor solução é conhecido para toda a rede e não apenas para as subredes de interesse N1 e N2.

A figura 3.4 mostra o diagrama de blocos da implementação que realizamos do método proposto em [1].

Inicialmente, são lidos do banco de dados os parâmetros do sistema e os valores de seu caso base. A determinação do caso base é idêntica à descrita na seção anterior.

Na segunda etapa do método são calculadas as sensibilidades de barra e as perdas reativas incrementais de ramos através das expressões 3.12 e 3.15. Neste cálculo são utilizados os valores do caso base da rede.

As etapas referentes às matrizes de admitância  $B'$  e  $B''$  e a verificação de ilhamento são efetuadas conforme já descrevemos.

As 4 fases subsequentes são realizadas para todas as contingências que não causam ilhamento. Na quinta etapa são selecionadas, para cada contingência, as subredes de interesse N1 e N2.

No diagrama mostrado na figura 3.4 a fase principal do método é representada pelo bloco 6. Nesta etapa é calculada a primeira iteração (completa) do FCDR, simulando a contingência no ramo analisado. São resolvidos o subproblema ativo ( $B'\Delta\underline{\theta} = \Delta\underline{P}/V$ ) e o subproblema reativo simplificado  $B''\Delta\underline{V} = \Delta\underline{Q}^*/V$ .

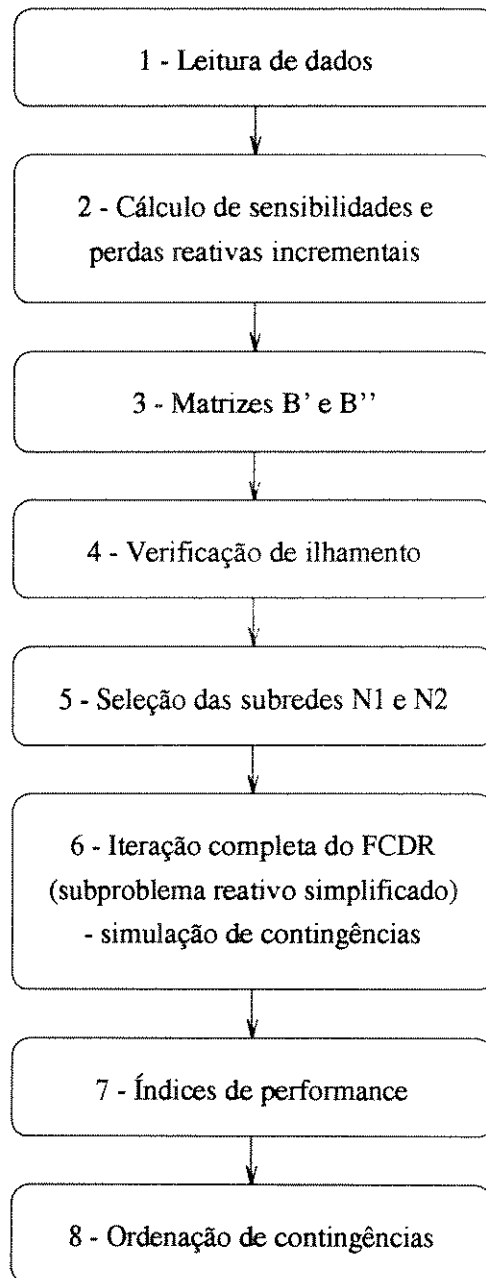


Figura 3.5: Método proposto em [1] para análise de segurança

A exemplo do que é proposto em [1], realizamos a simulação de contingências por técnicas de compensação. Nas duas últimas etapas, são calculados índices de performance e ordenadas as contingências. A exemplo do método “1P-1Q”, são associados índices de performance a todas as contingências que não causam ilhamento e os resultados são agrupados em duas listas:

- 1) lista de contingências que causam ilhamento no sistema:
- 2) lista de contingências ordenadas de acordo com o impacto que as mesmas causam ao sistema.

Em nossa implementação do método proposto em [1], é realizada apenas uma iteração de fluxo de carga. Assim, este método apresenta as mesmas vantagens que o método “1P-1Q” apresenta sobre o método “CA”.

Na seção 4.5 apresentaremos os resultados obtidos com o método proposto em [1] para análise de segurança.

# Capítulo 4

## Resultados obtidos

### 4.1 Avaliação do impacto de contingências sobre o perfil reativo de redes elétricas de potência

No Capítulo 2 deste trabalho descrevemos as diferenças existentes entre os subproblemas ativo e reativo da análise de segurança em sistemas elétricos de potência. A última etapa da verificação de segurança constitui-se na avaliação e na quantificação dos efeitos de cada contingência analisada. Nesta etapa também é mantida a separação entre as partes ativa e reativa do problema.

Na parte ativa da análise de segurança, quando verificamos principalmente violações nos limites de fluxo de potência ativa, os efeitos das contingências concentram-se na vizinhança do equipamento que saiu de operação. Além disso a intensidade dos efeitos é inversamente proporcional à distância do equipamento contingenciado. Este fato pode ser considerado como regra geral e é levado em consideração por alguns métodos aproximados de verificação de segurança, como por exemplo em [16].

Na parte reativa da análise de segurança, onde verificamos principalmente os módulos das tensões nas barras de carga e as injeções de potência reativa nas barras de geração, a localização dos efeitos das contingências é diferente daquela da parte ativa do problema.

Os distúrbios que uma contingência provoca no perfil reativo do sistema manifestam-se intensamente na vizinhança do elemento contingenciado. Mas também podem ocorrer distúrbios em barras distantes ao equipamento que saiu de operação. A dificuldade de expressar este acoplamento elétrico entre os diferentes pontos de um sistema (isto é, de prever onde devem manifestar-se os efeitos de uma contingência) é mais um complicante na análise do subproblema reativo.

Além de diferentes localizações de efeitos, o nível de impacto que uma contingência causa ao sistema é diferente para as partes ativa e reativa da análise de segurança. Uma contingência que causa violações de limites de transmissão de potência ativa pode não causar distúrbios importantes no perfil reativo do sistema. Com outras palavras: uma

contingência grave do ponto de vista da análise ativa pode ser insignificante na parte reativa da análise, e vice-versa. Este fato determina que os níveis de gravidade das contingências sejam quantificados separadamente nas duas partes da análise de segurança.

Já vimos ao longo deste trabalho que a quantificação dos efeitos de uma contingência costuma ser feita através do conceito de índice de performance.

Especificamente para o subproblema reativo, uma formulação típica de índice de performance é:

$$PI_{vq} = \sum_{\beta} w_v \frac{|V_i - V_i^{lim}|}{V_i^{lim}} + \sum_{\gamma} w_q \frac{|Q_i - Q_i^{lim}|}{Q_i^{lim}} \quad (4.1)$$

Onde:

$PI_{vq}$  - índice de performance para a parte reativa da análise de segurança

$V_i$  - módulo da tensão na barra  $i$  na situação pós-contingência

$V_i^{lim}$  - limite inferior ou superior para o módulo da tensão na barra  $i$

$w_v$  - fator de ponderação para tensão

$Q_i$  - injeção de potência reativa na barra  $i$

$Q_i^{lim}$  - limite inferior ou superior para injeção de potência reativa na barra  $i$

$w_q$  - fator de ponderação para potência reativa

$\beta$  - grupo de barras onde no estado pós-contingência existem violações de limites para módulo de tensão ( $V < V_{inf}^{lim}$  ou  $V > V_{sup}^{lim}$ )

$\gamma$  - grupo de barras onde no estado pós-contingência existem violações de limites para injeção de potência reativa ( $Q < Q_{inf}^{lim}$  ou  $Q > Q_{sup}^{lim}$ ).

Esta formulação é a proposta em [19] e consideramos a mesma representativa já que existem formulações semelhantes propostas, como por exemplo em [18].

Ainda em [19] é proposto que os fatores de ponderação  $w_v$  e  $w_q$  sejam “sintonizados heurísticamente”. Isto é, sugere-se que sejam atribuídos valores a  $w_v$  e a  $w_q$  de acordo com a experiência anterior, para aumentar o índice de performance de ramos cujas saídas de operação causem grandes impactos ao sistema.

Consideramos o uso de índices de performance semelhantes ao formulado na equação 4.1 extremamente arriscado. O principal problema de formulações deste tipo é a determinação dos grupos de barras  $\beta$  e  $\gamma$ . Com a determinação destes grupos, o índice de performance só é calculado para contingências que causem violações de limites de segurança, desprezando qualquer outro tipo de efeitos. Este problema é acentuado pelo uso de limites rígidos, ao passo que sabemos que na realidade muitos destes limites são flexíveis.

Consideramos importante exemplificar o problema acima descrito. Se uma contingência causa violação de limite de módulo de tensão em uma única barra, a expressão 4.1 atribui a este ramo um índice de performance não nulo (figura 4.1a). Por outro lado, uma outra contingência que determine um estado de operação onde muitas tensões estejam próximas a violar seus limites terá índice de performance nulo (figura 4.1b), ou seja, não será considerada grave para o sistema. A figura 4.1 ilustra esta situação, através de duas

possibilidades para pontos de operação pós-contingência.

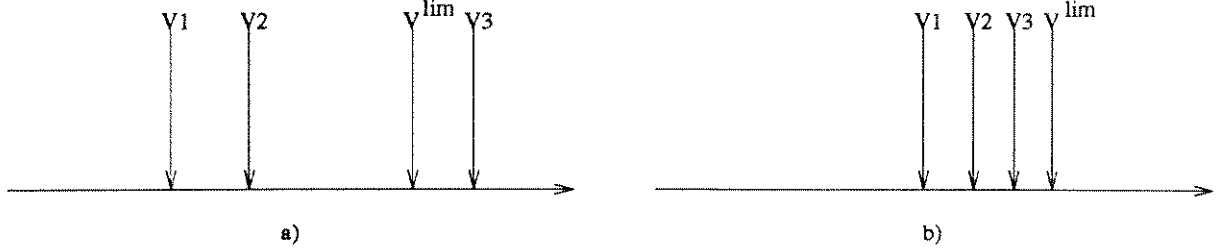


Figura 4.1: Quantificação do impacto de contingências

Explicamos o risco de quantificar apenas violações de limites para o caso de módulos de tensões. Devemos frisar que este problema é genérico, seja qual for o parâmetro do sistema quantificado pelo índice de performance: fluxos de potência ativa, injeções de potência reativa, etc.

A quantificação dos efeitos de uma contingência no perfil de tensões de um sistema também pode ser feita através do cálculo do índice de performance formulado na expressão 4.2 abaixo:

$$PI_v = \sum_{i=1}^{npq} \frac{w_i^v}{m} \left( \frac{V_i - V_i^{sp}}{\Delta V_i^{max}} \right)^m \quad (4.2)$$

Onde:

$npq$  - número de barras de carga do sistema

$w_i^v$  - fator de ponderação para tensões, real e não negativo

$m$  - ordem do índice de performance

$V_i$  - módulo da tensão na barra  $i$  no estado pós-contingência

$V_i^{sp}$  - valor especificado para o módulo da tensão na barra  $i$

$\Delta V_i^{max}$  - variação permitida para o módulo da tensão na barra  $i$ .

Esta formulação, muito comum na literatura, é a apresentada em [28] e formulações idênticas ou muito semelhantes são feitas por exemplo em [29] e [8].

O índice de performance da expressão 4.2 quantifica os distúrbios ocorridos em todas as barras de carga do sistema. Isto é uma vantagem sobre a formulação 4.1 onde são quantificadas apenas violações de limites de segurança. Uma outra vantagem é a medição do desvio entre o ponto de operação pós-contingência e o ponto de operação especificado para cada barra. Assim, é atribuído maior nível de gravidade para tensões próximas a violar seus limites e para módulos de tensões que estejam fora da tolerância permitida para cada barra.

A formulação 4.2 entretanto não é ideal. Ao contrário do índice de performance dado em 4.1, o índice de performance dado em 4.2 não indica diretamente a magnitude

das violações de limites de segurança que ocorrem devido a uma contingência. Outra informação importante que a expressão 4.2 não fornece é o número de violações de limites de segurança que ocorre em cada contingência analisada.

A preocupação que descrevemos sobre o risco de se avaliar apenas violações de limites de segurança já foi relatada em algumas publicações anteriores a este trabalho.

Segundo K. Nara e outros [26] a magnitude da maior violação de limite ocorrida devido a uma contingência é o parâmetro mais importante na quantificação de distúrbios no perfil de tensões de um sistema. Entretanto, ainda segundo o proposto em [26], outras verificações como a do número de violações que ocorrem e se existem tensões próximas a violar seus limites no estado pós-contingência são também muito importantes.

A metodologia para verificação da severidade de contingências proposta em [1] e [15] também analisa simultaneamente violações de limites de segurança e variações ocorridas em relação ao estado de operação pré-contingência. Em [1] propõe-se que, para cada parâmetro analisado (módulos de tensões, por exemplo), sejam construídas duas listas ordenadas de contingências. Para a construção da primeira lista analisam-se violações de limites, a exemplo da expressão 4.1 anterior. Já a segunda lista é ordenada através de um índice de performance que representa as variações no ponto de operação do sistema, devidas a cada contingência. Ainda em [1] e [15] é proposto que a determinação de quais contingências causam os maiores impactos ao sistema seja feita através da análise conjunta das duas listas acima mencionadas.

Também na literatura, existem propostas para que se avalie o impacto de contingências no perfil reativo dos sistemas apenas através da verificação da situação dos módulos de tensões, como em [28], [8] e [17]. Existem outras referências, como [29] e [1], onde se propõe a quantificação dos desvios e variações ocorridos nos módulos de tensões e também nas injeções de potência elétrica reativa.

Em nosso trabalho, constatamos que esta avaliação só é satisfatória se na formulação do índice de performance são considerados os dois parâmetros: módulos de tensão e injeções de potência reativa. Isto porque embora os módulos de tensões dependam principalmente dos fluxos e injeções de potência reativa, encontramos contingências que causam grandes desvios na geração de potência reativa e desvios menores no perfil de tensões do sistema. Esta questão depende diretamente da maneira como são tratadas as barras modeladas como tipo PV nos sistemas analisados. Sendo assim, um índice de performance que não quantifica desvios e variações na geração de potência reativa pode produzir resultados não confiáveis. Este assunto será retomado na apresentação dos resultados obtidos ao longo deste trabalho.

Após termos constatado a necessidade de analisarmos as situações no estado pós-contingência dos perfis de tensões e de injeções reativas observamos também outro fato importante. A quantificação da severidade de uma contingência deve ser feita através de dois índices de performance independentes: um referente aos módulos de tensões e outro referente às injeções de potência reativa. Ou melhor: os efeitos que uma contingência causa nos módulos de tensões e nas injeções reativas não devem ser somados em um único índice

de performance. Quando tentamos usar um único índice de performance observamos que existe uma grande possibilidade de um parâmetro analisado ser dominante na ordenação das contingências. Isto é, a ordenação final pode representar principalmente os distúrbios no perfil de injeções, desprezando por exemplo os efeitos nos módulos de tensões.

Uma tentativa para a redução do problema acima descrito é a utilização de fatores de ponderação para as tensões ( $w_v$ ) e para as injeções reativas ( $w_q$ ). Entretanto, esta metodologia é questionável pois, além da dificuldade de estimar estes parâmetros, os mesmos tendem a depender fortemente do sistema elétrico analisado.

As constatações que acabamos de relatar justificam a adoção de dois índices de performance independentes, um para tensões e outro para injeções reativas, a exemplo do que é proposto em [1] e [15].

## 4.2 Índices de performance utilizados neste trabalho

Na seção anterior analisamos diferentes maneiras de verificar o impacto que contingências causam ao perfil reativo de sistemas elétricos de potência. Desta análise verifica-se que um índice de performance adequadamente formulado é aquele que oferece a melhor informação sobre os efeitos de uma contingência para o sistema. A importância de uma formulação adequada para índices de performance é muito grande. Isto porque a confiabilidade dos resultados fornecidos pela tarefa de análise de segurança depende diretamente desta formulação. É necessário que tais resultados sejam confiáveis pois, numa ótica mais ampla, contingências consideradas graves são aquelas que podem alterar o estado de operação do sistema ou determinar a ocorrência de colapso de tensão.

A primeira formulação de índice de performance que utilizamos neste trabalho é bastante semelhante à existente na expressão 4.1 anterior. Devido à necessidade de dois índices independentes para as análises de tensões e de injeções reativas, para cada contingência analisada são calculados os seguintes índices de performance:

$$PI_v = \sum_{i \in K} \left( \frac{V_i^{lim} - V_i}{V_i^{lim}} \right)^n \quad (4.3)$$

Onde:

$PI_v$  - índice de performance para análise de tensão nas barras PQ

$K$  - grupo de barras PQ onde ocorrem violações de limites inferiores ou superiores de segurança para módulo de tensão

$V_i^{lim}$  - limite inferior ou superior de segurança para módulo de tensão na barra  $i$

$V_i$  - módulo da tensão na barra  $i$  na situação pós-contingência

$n$  - ordem do índice de performance.

$$PI_q = \sum_{i \in L} (Q_i^{lim} - Q_i)^n \quad (4.4)$$

Onde:

$PI_q$  - índice de performance para análise de injeções de potência reativa nas barras PV  
 $L$  - grupo de barras PV onde ocorrem violações de limites inferiores ou superiores de segurança para injeções de potência reativa

$Q_i^{lim}$  - limite inferior ou superior de segurança para injeção de potência reativa na barra  $i$

$Q_i$  - injeção de potência reativa na barra  $i$  na situação pós-contingência

$n$  - ordem do índice de performance.

As expressões 4.3 e 4.4 quantificam apenas as magnitudes das violações de limites que acontecem devido às diferentes contingências analisadas. Logo, elas atendem alguns dos requisitos necessários a um índice de performance, mas também apresentam as deficiências que relatamos na seção anterior quando analisamos a expressão 4.1.

Posteriormente à implementação dos índices de performance 4.3 e 4.4, iniciamos a busca por uma nova formulação que melhor atendesse os requisitos já descritos. Nesta fase do trabalho testamos muitas formulações de índices de performance. Como por exemplo:

$$PIP_v = \sum_{i=1}^{npq} \left( \frac{|V_i^{cb} - V_i|}{V_i^{cb}} \right)^n \quad (4.5)$$

Onde:

$PIP_v$  - índice de performance para análise de tensões nas barras PQ

$npq$  - número de barras PQ do sistema analisado

$V_i^{cb}$  - módulo da tensão na barra  $i$  no caso base do sistema

$V_i$  - módulo da tensão na barra  $i$  na situação pós-contingência

$n$  - ordem do índice de performance.

$$PIP_q = \sum_{i=1}^{npv} \left( \frac{|Q_i^{cb} - Q_i|}{Q_i^{cb}} \right)^n \quad (4.6)$$

Onde:

$PIP_q$  - índice de performance para análise de injeções reativas nas barras PV

$npv$  - número de barras PV do sistema analisado

$Q_i^{cb}$  - injeção de potência reativa na barra  $i$  no caso base do sistema

$Q_i$  - injeção de potência reativa na barra  $i$  na situação pós-contingência

$n$  - ordem do índice de performance.

Estas formulações têm como objetivo quantificar os efeitos das contingências usando como parâmetro o caso base do sistema. Quando dividimos o valor do desvio no ponto

de operação pelo ponto de operação inicial, obtemos um valor que informa (como em um cálculo de porcentagem) a variação que ocorre no ponto de operação do sistema de maneira padronizada. Ainda nas expressões 4.5 e 4.6, os índices  $PIP_v$  e  $PIP_q$  são calculados respectivamente para todas as barras PQ e PV do sistema. Isto é uma vantagem sobre as formulações de 4.3 e 4.4, onde são quantificadas apenas violações de limites de segurança.

Embora estejam isentas dos riscos de utilização de limites absolutos, as formulações 4.5 e 4.6 ainda têm sérias deficiências. Uma destas deficiências é nela não serem indicadas diretamente as magnitudes das violações de limites. Outra séria deficiência desta formulação (e de outras semelhantes) deve-se ao uso da expressão 4.6 para a análise do perfil de injeções reativas. Nesta expressão é utilizado como denominador o valor da injeção de potência reativa do caso base do sistema. Ocorre que, ao contrário dos módulos de tensões, os valores das injeções reativas podem ser próximos de zero, o que mascararia os resultados obtidos com o índice de performance dado em 4.6. O mesmo problema ocorreria se na expressão 4.4 fosse utilizado o valor de  $Q_i^{lim}$  como denominador, já que são possíveis valores nulos para limites líquidos de potência reativa. Deve-se notar que as formulações de índices de performance que utilizamos neste trabalho são isentas do problema acima descrito.

A última formulação que efetuamos para índice de performance específico para análise de módulos de tensões foi a seguinte:

$$PIC_v = \sum_{i=1}^{npq} (V_i^{cb} - V_i)^n + \sum_{i=1}^{npq} w_v (V_i^m - V_i)^n \quad (4.7)$$

Onde:

$PIC_v$  - índice de performance para análise de tensões

$npq$  - número de barras PQ do sistema

$V_i^{cb}$  - módulo da tensão na barra  $i$  no caso base do sistema

$V_i$  - módulo da tensão na barra  $i$  na situação pós-contingência

$w_v$  - fator de ponderação para tensões

$V_i^m$  - ponto médio da faixa de tolerância para tensões na barra  $i$

$n$  - ordem do índice de performance.

A idéia presente nesta formulação é a de quantificar o impacto de contingências através da soma de duas parcelas. A primeira representa os desvios entre o ponto de operação pós-contingência e o caso base da rede. Já a segunda parcela quantifica a situação do ponto de operação pós-contingência em relação aos limites de segurança.

É importante salientar que nos bancos de dados dos sistemas que utilizamos não existem informações sobre limites de segurança em barras PQ. Assim, tivemos que arbitrá-los. Na primeira atribuição de limites que fizemos, determinamos um único par de limites ( $V_{inf}$  e  $V_{sup}$ ) para todas as barras PQ de cada sistema analisado. Adotamos como limite inferior ( $V_{inf}$ ) a menor tensão em barra PQ do caso base subtraída de 0.1 pu. Analogamente, como limite superior ( $V_{sup}$ ) adotamos a maior tensão em barra PQ do caso base acrescida

de 0.1 pu.

Conhecidos os limites torna-se possível o cálculo da expressão 4.7. No decorrer do trabalho mudamos este critério, por considerarmos questionável o uso de limites únicos para todas as barras PQ de um sistema. Adotamos então um novo critério que determina limites específicos de tensão para cada barra PQ dos sistemas analisados. Neste critério, os novos limites inferiores e superiores são obtidos respectivamente pela subtração e adição de um valor constante às tensões do caso base.

Como os limites para módulo de tensão são determinados a partir do caso base da rede, a expressão 4.7 torna-se redundante pois o ponto médio  $V_i^m$  passa a ser a própria tensão do caso base. Logo, a expressão 4.7 assume a forma:

$$PIC_v = \sum_{i=1}^{npq} w_v (V_i^m - V_i)^n \quad (4.8)$$

Para a análise de injeções de potência reativa não precisamos arbitrar limites, já que os limites mínimos e máximos de geração de potência reativa geralmente estão nos bancos de dados dos sistemas. Assim, para esta análise, adotamos uma formulação análoga à expressão 4.7:

$$PIC_q = \sum_{i=1}^{npv+nv\theta} (Q_i^{cb} - Q_i)^n + \sum_{i=1}^{npv} w_q (Q_i^m - Q_i)^n \quad (4.9)$$

Onde:

$PIC_q$  - índice de performance para análise de injeções de potência reativa

$npv + nv\theta$  - número de barras tipo PV e  $V\theta$  do sistema

$npv$  - número de barras tipo PV do sistema

$Q_i^{cb}$  - injeção de potência reativa na barra  $i$  no caso base da rede

$Q_i$  - injeção de potência reativa na barra  $i$  na situação pós-contingência

$w_q$  - fator de ponderação para injeções reativas

$Q_i^m$  - ponto médio da faixa de tolerância para injeções reativas na barra  $i$

$n$  - ordem do índice de performance.

Os índices de performance das expressões 4.8 e 4.9 não são ideais, mas esta é a formulação mais completa das que utilizamos. Isto porque a mesma compara o ponto de operação pós-contingência com o ponto de operação inicial e, simultaneamente, verifica a situação deste novo ponto de operação em relação aos limites de segurança. Como todas as barras do sistema são analisadas não existe o risco de atribuir-se importância apenas às contingências que causam violações de limites. As violações de limites não são quantificadas diretamente, mas têm seus níveis de gravidade destacados conforme veremos a seguir.

Na formulação de índice de performance que estamos descrevendo os fatores de ponderação (ou de penalização)  $w_v$  e  $w_q$  possuem um papel muito importante. A figura 4.2, a

seguir, ilustra o processo de determinação do fator de ponderação usado em cada barra na quantificação dos efeitos de cada contingência analisada. Este processo é aplicado tanto no cálculo de  $PIC_v$  (4.8) como no cálculo de  $PIC_q$  (4.9).

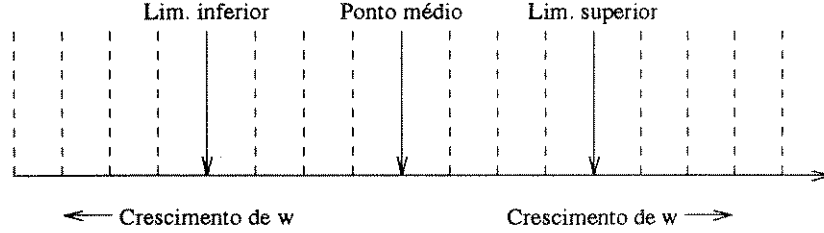


Figura 4.2: Determinação de  $w_v$  e  $w_q$

Explicaremos o processo para determinação do fator  $w_v$ , sendo que o processo para determinação de  $w_q$  é análogo. Para todas as contingências analisadas, em cada barra PQ do sistema determina-se o ponto médio da faixa de tolerância para módulo de tensão:

$$V_i^m = (V_i^{inf} + V_i^{sup})/2 \quad (4.10)$$

Após, é calculado o desvio entre o novo ponto de operação e o ponto médio  $V_i^m$  ( $V_i^m - V_i$ ). Conforme vemos na figura 4.2, o espaço de tensões foi dividido em um número finito de intervalos sendo que a cada um destes corresponde um valor para  $w_v$ . Finalmente é associado um valor de  $w_v$  ao ponto de operação pós-contingência, dependendo do intervalo onde o mesmo se encontra.

O valor de  $w_v$  associado a cada intervalo cresce nos sentidos “ponto médio - limite inferior” e “ponto médio - limite superior” e continua crescendo quando os limites são ultrapassados, conforme vemos na figura 4.2. Isto determina que quanto maior o desvio em relação ao ponto médio, maior seja o índice de performance associado. Pelo mesmo motivo grandes violações de limites de segurança são consideradas mais graves que violações pequenas.

É importante notarmos que, nesta formulação, o que é penalizado através dos fatores  $w$  ( $w_v$  ou  $w_q$ ) são os desvios entre o ponto de operação pós-contingência e o ponto médio da faixa de tolerância. Ou seja: os fatores de ponderação  $w$  são variáveis em função dos efeitos de cada contingência analisada. Esta é uma diferença em relação a muitas formulações anteriores ([29], [28] e [19] por exemplo), onde os fatores de penalização são constantes para cada ramo ou barra do sistema analisado.

A adoção de fatores  $w$  fixos para certos ramos ou barras de um sistema visa acentuar o nível de gravidade de contingências em equipamentos considerados importantes. Isto é feito através de regras heurísticas que representam a experiência anterior sobre as condições de operação de cada sistema analisado. Em nossa formulação (expressões 4.8 e 4.9),

a única heurística adotada é a atribuição de valores numéricos crescentes para os valores de  $w$  associados a cada um dos intervalos mostrados na figura 4.2. Neste procedimento todas as contingências analisadas são tratadas igualmente, não existindo equipamentos considerados *a priori* mais importantes.

Outra característica da formulação dos índices  $PIC_v$  e  $PIC_q$  é que a mesma permite no mínimo duas versões:

- A) atribuição do mesmo valor para os fatores  $w$  associados aos dois intervalos adjacentes a um limite de segurança;
- B) atribuição de valores diferentes ( $w_b > w_a$ ) para os fatores  $w$  associados aos dois intervalos adjacentes a um limite de segurança. A figura 4.3 mostra estas duas situações.

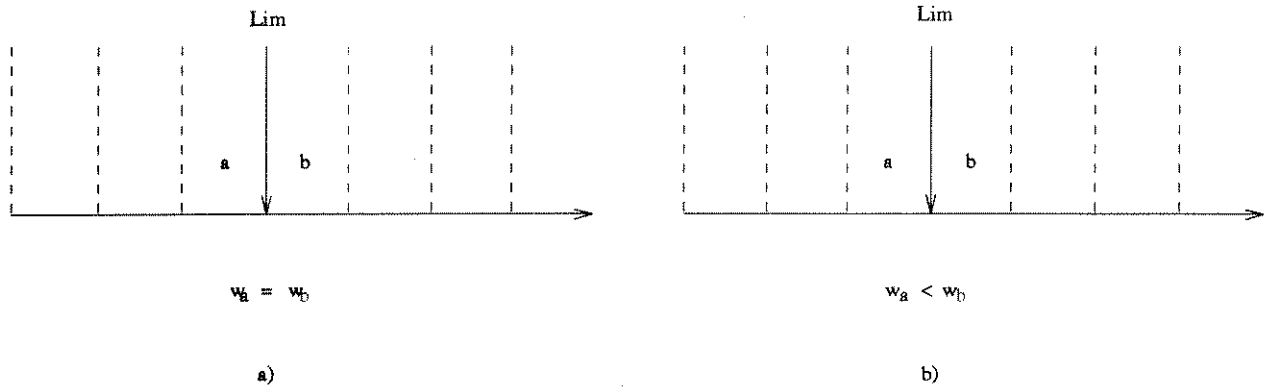


Figura 4.3: Fatores de ponderação  $w$  ( $w_v$  ou  $w_q$ )

Quando adotamos a versão A, estamos considerando que pequenas violações de limites de segurança geram um nível de gravidade semelhante ao determinado pela proximidade destas violações.

Se adotamos a versão B da formulação, associamos ao primeiro intervalo externo à faixa de segurança um fator  $w$  maior que o associado ao último intervalo interno. Isto equivale a considerar que pequenas violações de limites de segurança são mais graves para o sistema do que um ponto de operação onde estas violações estejam prestes a ocorrer.

Nas simulações que realizamos consideramos estas duas versões e verificamos os diferentes resultados obtidos. A adoção da versão B realmente destaca as contingências que causam violações de limites. É importante notar que a adoção da versão A é uma boa alternativa para enfrentar o problema do uso de limites absolutos, já descrito neste capítulo. É difícil afirmar que uma destas versões seja melhor do que a outra. A decisão depende de quais condições de operação são consideradas graves para o sistema, conforme já discutimos na seção 4.1 anterior.

Com exceção da expressão 4.1, todas as formulações de índices de performance que

apresentamos possuem um expoente  $n$  que faz com que as mesmas tenham ordem maior que 1. A finalidade principal do uso deste expoente é diminuir a contribuição de violações ou variações pequenas nos cálculos de índices de performance, evitando assim problemas de mascaramento dos resultados. Dependendo da formulação de índice de performance adotada o expoente deve ser par para garantir que todos os fatores que compõem o índice sejam positivos.

A preocupação com a utilização de expoentes nos índices de performance é bastante comum na literatura, como por exemplo em [1] e em [28]. A escolha dos valores dos expoentes depende muito do sistema analisado, de forma que normalmente os métodos propostos apenas exigem que tais expoentes sejam inteiros, pares e maiores que a unidade.

Em nosso trabalho, fizemos as seguintes constatações sobre o uso de diversos expoentes nos índices de performance:

- O problema de mascaramento fica praticamente eliminado, pois a potenciação torna desprezíveis as componentes dos índices de performance referentes a pequenas violações de limites ou variações nos pontos de operação.
- O aumento do expoente afeta a ordenação das contingências alterando a mesma.
- O aumento do expoente faz com que aumente também a diferença entre os valores dos índices de performance atribuídos às diferentes contingências. Esta característica é importante pois melhora a distinção entre contingências graves e não graves.

### **4.3 Resultados obtidos com o método “CA” de análise de segurança**

Nesta seção apresentaremos os resultados obtidos com o método “CA” de análise de segurança, descrito na seção 3.2. Todos os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos através da execução de programas computacionais escritos na linguagem FORTRAN. Para a execução dos programas foram utilizadas estações de trabalho.

Devemos frisar que nos cálculos de fluxo de carga realizados neste método, o único tipo de controle exercido sobre as variáveis foi o determinado pelo agrupamento das barras dos sistemas nos tipos  $V\theta$ , PV e PQ. Os demais controles possíveis, como o controle de magnitude de tensão nodal por injeção de reativos por exemplo, foram inibidos.

A decisão de não incluirmos dispositivos de controle no modelo de fluxo de carga utilizado se deveu aos seguintes motivos:

- Em nosso trabalho precisamos conhecer os efeitos de cada contingência analisada no perfil reativo dos sistemas, para verificar quais as contingências que determinam os maiores impactos na operação dos sistemas analisados. A atuação de dispositivos de controle poderia mascarar estes efeitos, reduzindo-os. Consideremos, por exemplo, uma contingência que causa violação de limite para injeção de reativos em uma barra PV. Se o controle de tensão em barras PV através de injeções de potência reativa estiver atuante, a ocorrência da violação não será detectada na análise de segurança do sistema.

- Quando o modelo de fluxo de carga utilizado considera dispositivos de controle, o estado pós-contingência informado pode ser questionável. Isto porque na realidade podem ocorrer situações em que, frente a uma contingência, não exista tempo suficiente para a atuação dos dispositivos de controle modelados.

- No decorrer deste trabalho, desenvolvemos uma versão do método descrito em 3.2 que inclui o controle de tensão em barras PV através de injeções de reativos. Nos resultados obtidos, para alguns dos sistemas analisados, observamos um aumento do número de casos em que o cálculo de fluxo de carga diverge.

A não representação destes controles é mais um motivo para que a verificação de segurança seja feita pela análise conjunta de resultados obtidos com dois índices de performance, um para módulos de tensão e outro para injeções de potência reativa.

Apresentaremos os resultados obtidos com os índices de performance formulados nas expressões 4.3, 4.4, 4.8 e 4.9. Consideramos que a análise de tais resultados informa detalhadamente os níveis de gravidade das diferentes contingências analisadas. A ordenação de contingências feita pelos índices de performance  $PI_v$  (4.3) e  $PI_q$  (4.4) será apresentada devido à importância das violações de limites de segurança. Os resultados obtidos com os índices de performance  $PIC_v$  (4.8) e  $PIC_q$  (4.9) serão também apresentados, uma vez que estas formulações quantificam os efeitos das contingências de uma forma mais completa.

Quando calculamos os índices de performance  $PIC_v$  e  $PIC_q$  utilizamos a versão A (seção 4.2) para determinação dos fatores de ponderação  $w_v$  e  $w_q$ . Logo, ponderamos igualmente os pontos de operação prestes a violar limites de segurança e as pequenas violações destes limites.

Os valores dos diferentes índices de performance serão apresentados de forma normalizada. Esta normalização foi feita, em cada lista ordenada de contingências, dividindo-se os valores dos índices pelo valor do maior índice de performance. Adotamos este procedimento para facilitar a comparação dos níveis de gravidade das contingências. Dependendo do índice de performance adotado e do sistema analisado as listas de contingências tornam-se muito longas. Assim muitas vezes apresentaremos apenas as partes iniciais destas listas.

### 4.3.1 Resultados obtidos para o sistema IEEE-30

O sistema de potência IEEE-30, de 30 barras e 41 ramos, cujo banco de dados está descrito em [30], representa o sistema de potência dos Estados Unidos em dezembro de 1961. Este sistema é bastante conhecido e pode ser considerado de pequeno porte.

Neste trabalho, utilizamos os limites de geração de potência reativa nas barras PV existentes no banco de dados descrito em [30]. Estes limites foram convertidos em limites líquidos para potência reativa através das expressões:

$$Q_i^{inf} = (Q_i^{min} - Q_i^c)/MVA_b \quad (4.11)$$

$$Q_i^{sup} = (Q_i^{max} - Q_i^c)/MVA_b \quad (4.12)$$

Onde:

$Q_i^{inf}$ ,  $Q_i^{sup}$  - limites inferior e superior para potência reativa na barra  $i$

$Q_i^{min}$ ,  $Q_i^{max}$  - limites mínimo e máximo para geração de potência reativa na barra  $i$

$Q_i^c$  - potência reativa consumida na barra  $i$

MVA<sub>b</sub> - potência de base adotada (geralmente 100 MVA).

Os limites de segurança para módulos de tensão em barras PQ não são informados em [30]. Assim, conforme o critério descrito na seção anterior, arbitramos estes limites através das expressões:

$$V_i^{inf} = V_i^{cb} - 0.05 \text{ pu} \quad (4.13)$$

$$V_i^{sup} = V_i^{cb} + 0.05 \text{ pu} \quad (4.14)$$

Onde:

$V_i^{inf}$ ,  $V_i^{sup}$  - limites inferior e superior para módulo de tensão na barra  $i$

$V_i^{cb}$  - módulo da tensão na barra  $i$  no caso base da rede.

O valor de 0.05 pu para a determinação dos limites foi adotado após simulações com muitos outros valores. O caso base do sistema foi determinado pela execução prévia de um programa de cálculo de fluxo de carga. Neste programa, existiu o controle de magnitude de tensão em barras PV através da injeção de reativos, a fim de que no caso base não acontecessem violações dos limites  $Q_i^{inf}$  e  $Q_i^{sup}$ .

Quando executamos para este sistema o método “CA” de análise de segurança não ocorreram casos de não convergência ou de divergência no cálculo de fluxo de carga.

A lista de contingências que determinam ilhamentos neste sistema foi composta por 3 casos: ramos 13, 16 e 34. Estes resultados comprovam a correção da verificação de ilhamentos descrita em 3.1.1, já que, analisando o diagrama unifilar do sistema, notamos que estas são as únicas contingências que causam ilhamentos.

Executamos o método “CA” com diversos valores para o expoente  $n$  dos índices de performance. Apresentaremos os resultados obtidos com o expoente  $n$  valendo 4, pois este valor para o expoente proporcionou um bom discernimento da diferença de gravidade das contingências. Além disto, quando testamos expoentes maiores não ocorreram mudanças significativas nos resultados obtidos.

A seguir apresentamos a lista ordenada de contingências obtida com o índice de performance  $PI_v$  (4.3), que quantifica violações de limites de segurança para módulos de tensão em barras PQ.

Na tabela 4.1 apresentamos os resultados com precisão de 4 casas decimais, este procedimento será adotado nas demais tabelas deste capítulo. Os resultados mostrados na

| Método "CA" |      |        |
|-------------|------|--------|
| Ordem       | Ramo | $PIv$  |
| 1           | 36   | 1,0000 |
| 2           | 37   | 0,0043 |
| 3           | 38   | 0,0022 |
| 4           | 1    | 0,0000 |

Tabela 4.1: Sistema IEEE-30 - Ordenação por  $PIv$

tabela 4.1 são representados graficamente na figura 4.4.

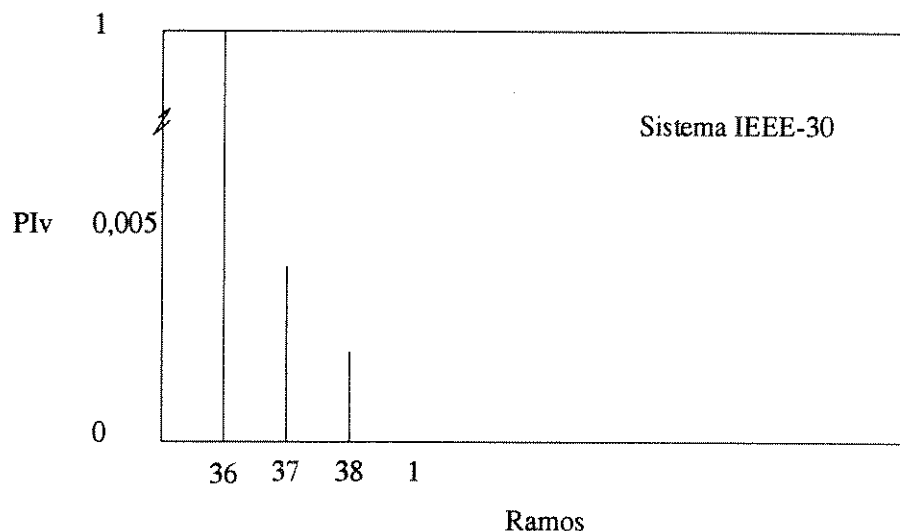


Figura 4.4: Sistema IEEE-30 - Ordenação por  $PIv$

A lista de contingências ordenada pelo índice de performance  $PIq$  (4.4) possuiu 38 casos. Como o índice de performance da maioria das contingências foi desprezível frente ao índice de performance da contingência mais grave, apresentaremos apenas os 10 primeiros ramos da lista.

Os resultados mostrados na tabela 4.2 são representados graficamente na figura 4.5 a seguir.

Analisando os resultados mostrados nas tabelas 4.1 e 4.2, vemos que as contingências que causam os maiores impactos ao perfil reativo do sistema são aquelas nos ramos 36, 10 e 5. A contingência no ramo 36 causa grandes violações de limites para módulos de tensão; já as saídas de operação dos ramos 10 e 5 determinam grandes violações de limites para potência reativa.

| Método "CA" |      |        |
|-------------|------|--------|
| Ordem       | Ramo | $PIq$  |
| 1           | 5    | 1,0000 |
| 2           | 10   | 0,1342 |
| 3           | 1    | 0,0428 |
| 4           | 2    | 0,0195 |
| 5           | 4    | 0,0170 |
| 6           | 8    | 0,0034 |
| 7           | 7    | 0,0007 |
| 8           | 9    | 0,0004 |
| 9           | 6    | 0,0001 |
| 10          | 15   | 0,0000 |

Tabela 4.2: Sistema IEEE-30 - Ordenação por  $PIq$

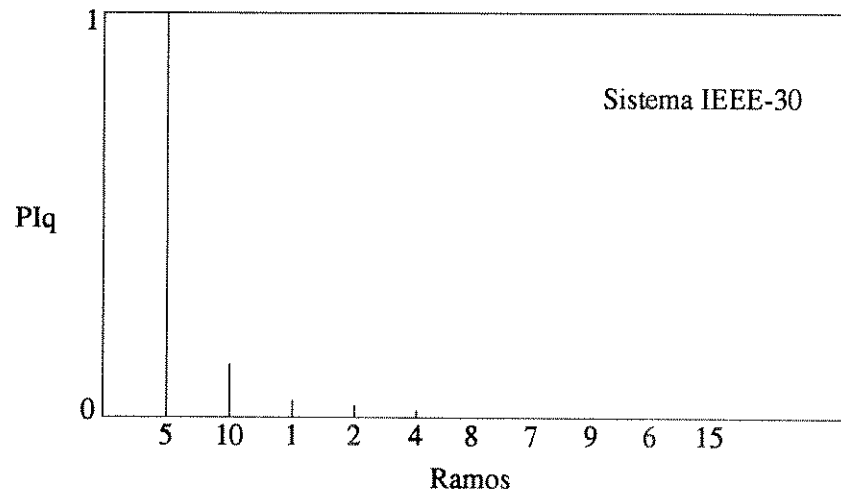


Figura 4.5: Sistema IEEE-30 - Ordenação por  $PIq$

Quando calculamos o índice de performance  $PIv$  (4.3), com os limites e a metodologia já descritos, verificamos que ocorreram violações de limites para tensão em apenas 6 das 24 barras PQ do sistema. O número de violações ocorridas nestas barras, para todas as contingências analisadas, é mostrado na tabela a seguir.

| Violações de limites para tensão |           |
|----------------------------------|-----------|
| Barra                            | violações |
| 3                                | 1         |
| 25                               | 1         |
| 26                               | 1         |
| 27                               | 1         |
| 29                               | 2         |
| 30                               | 2         |

Tabela 4.3: Sistema IEEE-30 - Violações de limites para módulo de tensão

Os resultados da tabela 4.3 mostram uma distribuição uniforme das violações de limites para tensão nas barras em que as mesmas ocorreram. Outra constatação feita foi a da natureza local dos efeitos das contingências, isto é, as violações de limites para tensão aconteceram sempre em barras PQ próximas aos equipamentos contingenciados.

A tabela 4.4 a seguir mostra a distribuição das violações de limites para potência reativa, ocorridas devido a todas as contingências analisadas.

| Violações de limites para injeções reativas |           |
|---------------------------------------------|-----------|
| Barra                                       | violações |
| 2                                           | 36        |
| 5                                           | 4         |
| 8                                           | 7         |
| 13                                          | 1         |

Tabela 4.4: Sistema IEEE-30 - Violações de limites para injeções reativas

Ao contrário das violações de limites para tensão, vemos na tabela 4.4 que existiu concentração das violações de limites para potência reativa. Observamos também que as violações de limites para potência reativa ocorreram, algumas vezes, em barras distantes aos equipamentos contingenciados.

As listas ordenadas de contingências obtidas com os índices de performance  $PICv$  e  $PICq$  tiveram cada uma 38 ramos. Apresentaremos apenas os 10 primeiros ramos de cada lista na tabela 4.5.

| Método “CA” |      |        |      |        |
|-------------|------|--------|------|--------|
| Ordem       | Ramo | $PICv$ | Ramo | $PICq$ |
| 1           | 36   | 1,0000 | 5    | 1,0000 |
| 2           | 37   | 0,0011 | 1    | 0,2281 |
| 3           | 38   | 0,0010 | 10   | 0,1538 |
| 4           | 33   | 0,0007 | 2    | 0,0216 |
| 5           | 1    | 0,0007 | 4    | 0,0211 |
| 6           | 25   | 0,0005 | 8    | 0,0046 |
| 7           | 4    | 0,0002 | 15   | 0,0011 |
| 8           | 18   | 0,0002 | 7    | 0,0007 |
| 9           | 30   | 0,0002 | 9    | 0,0005 |
| 10          | 14   | 0,0000 | 6    | 0,0003 |

Tabela 4.5: Sistema IEEE-30 - Ordenações por  $PICv$  e  $PICq$

Analisando a tabela 4.5, vemos que a ordenação das contingências obtida com os índices de performance  $PICv$  e  $PICq$  é diferente daquela obtida com os índices de performance  $PIv$  e  $PIq$ , devido ao maior número de parâmetros do sistema quantificados através das expressões 4.8 e 4.9. Quando a verificação de segurança foi feita apenas pela quantificação de violações de limites, foram consideradas graves as contingências nos ramos 36, 10 e 5. Com a verificação mais completa feita pelos índices de performance  $PICv$  e  $PICq$ , foram consideradas graves as contingências nos ramos 36, 1, 5, 10, 2 e 4. O aumento no número de contingências consideradas graves demonstra a superioridade das formulações de  $PICv$  (4.8) e  $PICq$  (4.9) sobre as formulações de  $PIv$  (4.3) e  $PIq$  (4.4).

### 4.3.2 Resultados obtidos para o sistema IEEE-118

O sistema de potência IEEE-118 é também bastante conhecido. Neste trabalho utilizamos o banco de dados existente em [31]. Este sistema possui 118 barras e 179 ramos e apresenta a peculiaridade de possuir um elevado número (53) de barras tipo PV.

O caso base do sistema foi determinado da mesma forma descrita na seção anterior, ou seja, foi efetuado o controle de tensão em barras PV através da injeção de reativos.

Em [31] são informados limites mínimos e máximos para geração de potência reativa para 44 barras tipo PV. Tais limites foram convertidos em limites líquidos através das expressões 4.11 e 4.12 anteriores.

O banco de dados do sistema [31] não contém limites para módulo de tensão em barras tipo PQ. Após diversas simulações adotamos os limites determinados pelas expressões 4.13 e 4.14, coincidentemente os mesmos usados para analisar o sistema IEEE-30.

Quando realizamos a análise de segurança com o método “CA” o cálculo de fluxo de carga convergiu para todas as contingências analisadas. Verificamos que as contingências que determinaram ilhamentos foram as que ocorreram nos ramos: 63, 82, 83, 123, 124, 125, 134, 136 e 179.

Para definir o expoente utilizado no cálculo dos índices de performance verificamos o efeito de diversos valores. Adotamos o valor 4 para este expoente por considerar que este valor atendeu aos objetivos desejados.

Na tabela 4.6 apresentamos a lista de contingências ordenadas pelo índice de performance  $PIv$ .

| Método “CA” |      |        |
|-------------|------|--------|
| Ordem       | Ramo | $PIv$  |
| 1           | 75   | 1,0000 |
| 2           | 6    | 0,1269 |
| 3           | 76   | 0,0317 |
| 4           | 27   | 0,0188 |
| 5           | 44   | 0,0043 |
| 6           | 143  | 0,0041 |
| 7           | 102  | 0,0000 |
| 8           | 94   | 0,0000 |

Tabela 4.6: Sistema IEEE-118 - Ordenação por  $PIv$

Na tabela 4.6 vemos que o número de contingências que causam violações de limites para o módulo de tensão é pequeno. Esta lista representa a quantificação de apenas 8 violações de limites que ocorreram em 7 barras tipo PQ do sistema, para todas as contingências analisadas. Este pequeno número de distúrbios no perfil de tensões do sistema deveu-se à presença de muitas barras tipo PV que, neste método, têm seu módulo de tensão constante.

Verificamos a existência de violação de limites para potência reativa nas 44 barras para as quais estes limites são conhecidos. A lista de contingências ordenadas pelo índice  $PIq$  possuiu 170 ramos. A parte inicial desta lista está na tabela 4.7 a seguir.

Analisando as tabelas 4.6 e 4.7 vemos que este método de análise de segurança destaca a gravidade das contingências nos ramos 75, 6 e 54.

As listas de contingências ordenadas pelos índices  $PICv$  e  $PICq$  possuíram, cada uma, 170 ramos. A tabela 4.8 mostra os topos destas duas listas.

A ordenação dos resultados mostrados na tabela 4.8 difere daquela das tabelas 4.6 e 4.7. A ordenação pelos índices de performance  $PICv$  e  $PICq$  também destaca a importância das contingências nos ramos 75 e 54 devido ao impacto que os mesmos causam ao perfil reativo do sistema.

| Método “CA” |      |        |
|-------------|------|--------|
| Ordem       | Ramo | $PIq$  |
| 1           | 54   | 1,0000 |
| 2           | 135  | 0,0047 |
| 3           | 5    | 0,0015 |
| 4           | 41   | 0,0010 |
| 5           | 6    | 0,0008 |
| 6           | 76   | 0,0004 |
| 7           | 77   | 0,0003 |
| 8           | 9    | 0,0002 |
| 9           | 148  | 0,0001 |
| 10          | 110  | 0,0001 |

Tabela 4.7: Sistema IEEE-118 - Ordenação por  $PIq$

| Método “CA” |      |        |      |        |
|-------------|------|--------|------|--------|
| Ordem       | Ramo | $PICv$ | Ramo | $PICq$ |
| 1           | 75   | 1,0000 | 54   | 1.0000 |
| 2           | 27   | 0,0030 | 135  | 0.0250 |
| 3           | 6    | 0,0005 | 41   | 0.0117 |
| 4           | 76   | 0,0003 | 60   | 0.0032 |
| 5           | 44   | 0,0002 | 5    | 0.0009 |
| 6           | 143  | 0,0002 | 76   | 0.0008 |
| 7           | 102  | 0,0002 | 6    | 0.0005 |
| 8           | 94   | 0,0001 | 77   | 0.0003 |
| 9           | 45   | 0,0001 | 139  | 0.0001 |
| 10          | 107  | 0,0001 | 148  | 0.0001 |

Tabela 4.8: Sistema IEEE-118 - Ordenações por  $PICV$  e  $PICq$

### 4.3.3 Resultados obtidos para o sistema Sul-sudeste

O sistema de potência que representa as regiões sul e sudeste do Brasil (Sul-sudeste) possui 810 barras e 1340 ramos. Assim, o mesmo pode ser considerado de grande porte e para sua análise utilizamos técnicas de exploração de esparsidade em matrizes e vetores ([27] e [2]).

O sistema Sul-sudeste é um bom referencial para teste dos métodos de análise de segurança que implementamos, pois o mesmo possui características como:

- presença de linhas de transmissão equivalenciadas, ou modeladas com resistência negativa, ou ainda modeladas com reatância capacitiva;
- diferentes níveis de tensão nas diversas malhas existentes;
- heterogeneidade na relação “X/R” das linhas de transmissão;
- presença de vários transformadores de três enrolamentos;
- presença de “jumpers”.

O banco de dados do sistema Sul-sudeste não informa os limites de segurança para módulo de tensão em barras PQ. Após testarmos diversos limites, adotamos os determinados pelas expressões:

$$V_i^{inf} = V_i^{cb} - 0.10 \text{ pu} \quad (4.15)$$

$$V_i^{sup} = V_i^{cb} + 0.10 \text{ pu} \quad (4.16)$$

Onde:

$V_i^{inf}$ ,  $V_i^{sup}$  - limites inferior e superior para módulo de tensão na barra  $i$

$V_i^{cb}$  - módulo da tensão na barra  $i$  no caso base da rede.

O sistema Sul-sudeste possui 113 barras PV. Porém, no banco de dados, os limites para geração de potência reativa ( $Q_i^{min}$  e  $Q_i^{max}$ ) são informados apenas para 36 barras. Devido à natureza dos equipamentos modelados nestas barras PV, decidimos não arbitrar os limites quando os mesmos são desconhecidos. Os limites conhecidos são transformados em limites líquidos para potência reativa através das expressões 4.11 e 4.12 já descritas.

A lista de contingências que causaram ilhamentos neste sistema foi formada por 257 casos. Consideramos que é desnecessário apresentá-la. A presença no sistema de muitos transformadores de três enrolamentos foi um fator que contribuiu para elevar o número de casos de ilhamento.

A lista de contingências para as quais o cálculo de fluxo de carga não convergiu é formada pelo ramo 858. A lista de contingências para as quais o cálculo de fluxo de carga divergiu constitui o quadro 4.1 a seguir.

Quadro 4.1: Contingências que causaram divergência no fluxo de carga

| Método “CA”         |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| Sistema Sul-sudeste |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |
| Ramos               | 9   | 224 | 242 | 309 | 327 | 402 | 422 | 431 | 439  | 440  |
| Ramos               | 497 | 568 | 570 | 592 | 696 | 718 | 852 | 950 | 1003 | 1250 |

Apresentaremos os resultados obtidos com ordem 4 para os índices de performance. Por coincidência este é o mesmo valor adotado para o sistema IEEE-30 e o escolhemos devido aos mesmos motivos expostos em 4.4.1. Quando efetuamos a análise de segurança para este sistema através do índice de performance  $PIv$ , obtivemos uma lista ordenada com 50 contingências. Na tabela 4.9 apresentamos os 10 primeiros ramos desta lista.

| Método “CA” |      |        |
|-------------|------|--------|
| Ordem       | Ramo | $PIv$  |
| 1           | 488  | 1,0000 |
| 2           | 565  | 0,7349 |
| 3           | 248  | 0,5853 |
| 4           | 987  | 0,3650 |
| 5           | 605  | 0,1017 |
| 6           | 521  | 0,0933 |
| 7           | 135  | 0,0845 |
| 8           | 394  | 0,0686 |
| 9           | 794  | 0,0395 |
| 10          | 197  | 0,0382 |

Tabela 4.9: Sistema Sul-sudeste - Ordenação por  $PIv$

Analisando a tabela 4.9, vemos que os ramos 488, 565, 248, 987 e 605 são aqueles cujas saídas de operação causam as maiores violações de limites para módulos de tensão em barras PQ.

Para a formação da lista de contingências ordenadas pelo índice  $PIv$  foram quantificadas 250 violações de limites para módulo de tensão em 696 barras PQ. Não apresentaremos a tabela que localiza estas violações, mas é interessante notar que o maior número de violações ocorridas na mesma barra foi de 4, na barra 308. Assim, com os limites que utilizamos, não ocorreu concentração das violações de limites para módulo de tensão.

Os resultados obtidos com o método “CA” e com o índice de performance  $PIq$  (4.4) não serão apresentados devido às deficiências do banco de dados do sistema Sul-sudeste.

Consideramos arriscado utilizar este índice de performance que quantifica apenas violações de limites para potência reativa, uma vez que são conhecidos os limites para menos de um terço do total de barras PV do sistema.

Analisando o sistema Sul-sudeste com o índice de performance  $PICv$  (4.8), obtivemos uma lista ordenada com 1062 contingências. Este número corresponde ao total de ramos do sistema subtraído do número de casos de ilhamento e de não convergência / divergência do cálculo de fluxo de carga, já que a formulação de  $PICv$  não quantifica apenas violações de limites de segurança.

Para utilizarmos o índice de performance  $PICq$  (4.9) procedemos da seguinte maneira:

- a parcela do índice que quantifica os desvios em relação ao caso base foi calculada para todas as barras PV do sistema;

- a parcela do índice que quantifica a situação em relação aos limites de segurança foi calculada somente para as barras PV cujos limites para geração de reativos são conhecidos.

Assim, como a lista obtida através do índice  $PICv$ , a lista de contingências ordenada pelo índice  $PICq$  possuiu 1062 ramos. A tabela 4.10 mostra as 10 primeiras posições das listas de contingências, ordenadas pelos índices  $PICV$  e  $PICq$ .

| Método "CA" |      |        |      |        |
|-------------|------|--------|------|--------|
| Ordem       | Ramo | $PICv$ | Ramo | $PICq$ |
| 1           | 565  | 1,0000 | 1311 | 1,0000 |
| 2           | 488  | 0,7132 | 565  | 0,2611 |
| 3           | 987  | 0,3722 | 1270 | 0,0621 |
| 4           | 248  | 0,2871 | 805  | 0,0473 |
| 5           | 605  | 0,1503 | 807  | 0,0473 |
| 6           | 521  | 0,0941 | 809  | 0,0473 |
| 7           | 394  | 0,0936 | 923  | 0,0390 |
| 8           | 135  | 0,0744 | 1310 | 0,0389 |
| 9           | 969  | 0,0578 | 1312 | 0,0384 |
| 10          | 197  | 0,0435 | 1035 | 0,0366 |

Tabela 4.10: Sistema Sul-sudeste - Ordenações por  $PICV$  e  $PICq$

Os resultados mostrados nas tabelas 4.9 e 4.10 indicam ordenações diferentes para as contingências analisadas. Isto, a exemplo do que já mostramos para o sistema IEEE-30, é fruto da superioridade da formulação de  $PICv$  sobre a formulação de  $PIv$ .

As 5 contingências mais graves para o perfil de tensões do sistema são as que ocorrem nos ramos 565, 488, 987, 248 e 605, segundo a tabela 4.10. Na mesma tabela vemos que a saída de operação do ramo 1311 deve ser considerada grave, devido ao impacto que a mesma causa no perfil de injeções reativas do sistema.

## 4.4 Resultados obtidos com o método “1P-1Q” de análise de segurança

Nesta seção descreveremos os resultados obtidos com o método “1P-1Q” de análise de segurança, descrito no Capítulo 3 deste trabalho. Estes resultados foram obtidos executando o método “1P-1Q” com os mesmos limites de segurança utilizados na execução do método “CA”. Os índices de performance calculados, incluindo seus expoentes, também são os mesmos descritos na seção anterior. Não rerepresentaremos os resultados referentes ao teste de ilhamento. Estes resultados são os mesmos independentemente do método utilizado pois são determinados exclusivamente a partir da topologia dos sistemas.

### 4.4.1 Resultados obtidos para o sistema IEEE-30

A tabela 4.11 mostra a lista ordenada de contingências obtida com o índice de performance  $PIv$  (4.3).

| Método “1P-1Q” |      |        |
|----------------|------|--------|
| Ordem          | Ramo | $PIv$  |
| 1              | 36   | 1,0000 |
| 2              | 37   | 0,0018 |
| 3              | 38   | 0,0001 |

Tabela 4.11: Sistema IEEE-30 - Ordenação por  $PIv$

Os resultados referentes a violações de limites de segurança para injeções de potência reativa (ordenação por  $PIq$ ) formaram uma lista com 36 ramos. A tabela 4.12 mostra os 10 primeiros ramos desta lista.

Ordenando as contingências analisadas através dos índices de performance  $PICv$  e  $PICq$ , resultaram duas listas, cada uma com 38 contingências. As partes iniciais destas duas listas são mostradas na tabela 4.13 a seguir.

Os resultados mostrados nas tabelas 4.11 - 4.13 indicam que, segundo esta metodologia, os ramos 36, 1, 5, 2, 4 e 6 são aqueles cujas saídas de operação causam os maiores impactos ao perfil reativo do sistema analisado.

### 4.4.2 Resultados obtidos para o sistema IEEE-118

A tabela 4.14 mostra a ordenação de contingências feita através do índice de performance  $PIv$ .

| Método "1P-1Q" |      |        |
|----------------|------|--------|
| Ordem          | Ramo | $PIq$  |
| 1              | 2    | 1,0000 |
| 2              | 5    | 0,8841 |
| 3              | 1    | 0,8736 |
| 4              | 4    | 0,8465 |
| 5              | 9    | 0,0112 |
| 6              | 7    | 0,0102 |
| 7              | 6    | 0,0056 |
| 8              | 15   | 0,0053 |
| 9              | 3    | 0,0007 |
| 10             | 8    | 0,0003 |

Tabela 4.12: Sistema IEEE-30 - Ordenação por  $PIq$

| Método "1P-1Q" |      |        |      |        |
|----------------|------|--------|------|--------|
| Ordem          | Ramo | $PICv$ | Ramo | $PICq$ |
| 1              | 36   | 1,0000 | 5    | 1,0000 |
| 2              | 37   | 0,0128 | 2    | 0,1383 |
| 3              | 38   | 0,0103 | 1    | 0,1377 |
| 4              | 33   | 0,0087 | 4    | 0,1291 |
| 5              | 25   | 0,0079 | 9    | 0,0027 |
| 6              | 4    | 0,0041 | 15   | 0,0014 |
| 7              | 18   | 0,0031 | 6    | 0,0006 |
| 8              | 30   | 0,0027 | 7    | 0,0004 |
| 9              | 14   | 0,0004 | 8    | 0,0003 |
| 10             | 31   | 0,0002 | 11   | 0,0003 |

Tabela 4.13: Sistema IEEE-30 - Ordenações por  $PICV$  e  $PICq$

| Método "1P-1Q" |      |        |
|----------------|------|--------|
| Ordem          | Ramo | $PIv$  |
| 1              | 75   | 1,0000 |
| 2              | 6    | 0,4521 |
| 3              | 76   | 0,0936 |
| 4              | 27   | 0,0348 |
| 5              | 44   | 0,0220 |
| 6              | 143  | 0,0046 |
| 7              | 102  | 0,0000 |

Tabela 4.14: Sistema IEEE-118 - Ordenação por  $PIv$

A lista ordenada de contingências, referente a violações de limites para potências reativa nas barras tipo PV, possuiu 170 ramos. As 10 primeiras posições desta lista formam a tabela 4.15 a seguir.

| Método "1P-1Q" |      |        |
|----------------|------|--------|
| Ordem          | Ramo | $PIq$  |
| 1              | 6    | 1,0000 |
| 2              | 73   | 0,9462 |
| 3              | 30   | 0,0892 |
| 4              | 46   | 0,0827 |
| 5              | 74   | 0,0281 |
| 6              | 44   | 0,0204 |
| 7              | 48   | 0,0178 |
| 8              | 150  | 0,0115 |
| 9              | 148  | 0,0113 |
| 10             | 135  | 0,0051 |

Tabela 4.15: Sistema IEEE-118 - Ordenação por  $PIq$

Quando analisamos o sistema quantificando violações de limites e desvios em relação ao ponto de operação pré-contingência, obtivemos duas listas de contingências ordenadas pelos índices  $PICv$  e  $PICq$ . Cada uma das listas foi composta por 170 ramos e a tabela 4.16 mostra os topos das mesmas.

Observamos nas tabelas 4.14 - 4.16 que as contingências que causam os maiores impactos ao perfil de tensões são as que acontecem nos ramos 75 e 6. Os maiores impactos ao perfil de injeções reativas são causados pelas saídas de operação dos ramos 6, 73 e 46.

| Método "1P-1Q" |      |        |      |        |
|----------------|------|--------|------|--------|
| Ordem          | Ramo | $PICv$ | Ramo | $PICq$ |
| 1              | 75   | 1,0000 | 73   | 1,0000 |
| 2              | 27   | 0,0407 | 6    | 0,7649 |
| 3              | 6    | 0,0085 | 46   | 0,1056 |
| 4              | 76   | 0,0053 | 30   | 0,0794 |
| 5              | 44   | 0,0039 | 74   | 0,0763 |
| 6              | 143  | 0,0028 | 48   | 0,0355 |
| 7              | 102  | 0,0023 | 150  | 0,0290 |
| 8              | 94   | 0,0013 | 148  | 0,0288 |
| 9              | 107  | 0,0011 | 72   | 0,0245 |
| 10             | 45   | 0,0009 | 76   | 0,0236 |

Tabela 4.16: Sistema IEEE-118 - Ordenações por  $PICv$  e  $PICq$

#### 4.4.3 Resultados obtidos para o sistema Sul-sudeste

O elevado número de barras e de ramos do sistema Sul-sudeste sugere que pode ser vantajoso efetuar sua análise de segurança através de um método aproximado, como o método "1P-1Q".

A verificação de violações de limites para módulo de tensão resultou em uma lista com 54 contingências, ordenadas pelo índice  $PICv$ . A tabela 4.17 a seguir mostra o topo desta lista.

Devido às já citadas deficiências do banco de dados do sistema não apresentaremos a lista de contingências ordenada pelo índice  $PIq$ .

As listas de contingências ordenadas pelos índices de performance  $PICv$  e  $PICq$  tiveram, cada uma, 1083 ramos. Este é o número de ramos do sistema cujas saídas de operação não determinaram ilhamento. A tabela 4.18 mostra as partes principais das referidas listas.

Verificando os resultados apresentados, vemos que as contingências que possuem os maiores índices de performance são as que acontecem nos ramos 497, 696 e 1311.

### 4.5 Resultados obtidos com o método proposto em [1] para análise de segurança

Nesta seção apresentaremos os resultados obtidos com o método para análise de segurança proposto em [1] por V. Brandwajn e M. Lauby, descrito no Capítulo 3 deste trabalho. É importante lembrar que implementamos apenas a parte do método relacionada com o subproblema reativo ( $B''\Delta V = \Delta Q/V$ ).

| Método "1P-1Q" |      |        |
|----------------|------|--------|
| Ordem          | Ramo | $Piv$  |
| 1              | 497  | 1,0000 |
| 2              | 696  | 0,1403 |
| 3              | 9    | 0,0410 |
| 4              | 1003 | 0,0158 |
| 5              | 402  | 0,0058 |
| 6              | 431  | 0,0029 |
| 7              | 1250 | 0,0028 |
| 8              | 570  | 0,0015 |
| 9              | 950  | 0,0013 |
| 10             | 422  | 0,0007 |

Tabela 4.17: Sistema Sul-sudeste - Ordenação por  $Piv$

| Método "1P-1Q" |      |        |      |        |
|----------------|------|--------|------|--------|
| Ordem          | Ramo | $PICv$ | Ramo | $PICq$ |
| 1              | 497  | 1,0000 | 1311 | 1,0000 |
| 2              | 696  | 0,2197 | 1270 | 0,0429 |
| 3              | 9    | 0,0580 | 923  | 0,0405 |
| 4              | 1003 | 0,0255 | 570  | 0,0367 |
| 5              | 402  | 0,0142 | 805  | 0,0251 |
| 6              | 431  | 0,0081 | 807  | 0,0251 |
| 7              | 570  | 0,0079 | 809  | 0,0251 |
| 8              | 950  | 0,0059 | 422  | 0,0103 |
| 9              | 1250 | 0,0058 | 559  | 0,0102 |
| 10             | 422  | 0,0030 | 578  | 0,0099 |

Tabela 4.18: Sistema Sul-sudeste - Ordenações por  $PICV$  e  $PICq$

O método proposto em [1] é mais adequado para sistemas de potência de grande porte. Para redes pequenas a aplicação do método não é vantajosa. Assim apresentaremos somente os resultados obtidos para o sistema Sul-sudeste. Estes resultados foram obtidos com os mesmos índices de performance e mesmos limites de segurança descritos nas seções 4.3 e 4.4. Os expoentes dos índices de performance também não foram alterados. Os casos de ilhamento, é óbvio, são os mesmos detectados pelos métodos “CA” e “1P-1Q”.

A lista de contingências ordenada pelo índice de performance  $PIv$  (4.3) apresentou 53 casos. Na tabela 4.19 constam as primeiras posições desta lista.

| Método proposto em [1] |      |        |
|------------------------|------|--------|
| Ordem                  | Ramo | $PIv$  |
| 1                      | 497  | 1,0000 |
| 2                      | 696  | 0,1396 |
| 3                      | 9    | 0,0435 |
| 4                      | 1003 | 0,0157 |
| 5                      | 402  | 0,0058 |
| 6                      | 431  | 0,0029 |
| 7                      | 1250 | 0,0028 |
| 8                      | 570  | 0,0015 |
| 9                      | 950  | 0,0013 |
| 10                     | 422  | 0,0007 |

Tabela 4.19: Sistema Sul-sudeste - Ordenação por  $PIv$

Quando ordenamos as contingências pelos índices  $PICv$  (4.8) e  $PICq$  (4.9) obtivemos listas com 1083 ramos. A tabela 4.20 mostra os topos destas listas.

Estes resultados atribuem maior importância às contingências nos ramos 497, 696 e 1311.

A principal característica deste método é a redução do número de barras para as quais é calculado o desvio de potência reativa ( $\Delta Q$ ). Nos resultados que apresentamos, o número médio de barras com desvio de potência reativa calculado foi de 59. Estes resultados foram obtidos após um longo processo de seleção dos valores das constantes utilizadas na seleção da subrede N2 (seção 3.4).

## 4.6 Comparação entre os resultados obtidos com os métodos “CA” e “1P-1Q”

Os resultados apresentados nas seções 4.3 e 4.4 anteriores serão comparados nesta seção. Faremos as comparações apenas com os resultados obtidos através dos índices de perfor-

| Método proposto em [1] |      |        |      |        |
|------------------------|------|--------|------|--------|
| Ordem                  | Ramo | $PICv$ | Ramo | $PICq$ |
| 1                      | 497  | 1,0000 | 1311 | 1,0000 |
| 2                      | 696  | 0,2186 | 1270 | 0,0428 |
| 3                      | 9    | 0,0610 | 923  | 0,0406 |
| 4                      | 1003 | 0,0253 | 570  | 0,0370 |
| 5                      | 402  | 0,0141 | 805  | 0,0250 |
| 6                      | 431  | 0,0081 | 807  | 0,0250 |
| 7                      | 570  | 0,0079 | 809  | 0,0250 |
| 8                      | 950  | 0,0058 | 422  | 0,0103 |
| 9                      | 1250 | 0,0058 | 565  | 0,0100 |
| 10                     | 422  | 0,0030 | 559  | 0,0092 |

Tabela 4.20: Sistema Sul-sudeste - Ordenações por  $PICv$  e  $PICq$

mance  $PICv$  e  $PICq$ . Consideramos desnecessária a comparação das listas ordenadas pelos índices  $PIv$  e  $PIq$ , pois as violações de limites de segurança que são quantificadas nestes índices também são consideradas no cálculo de  $PICv$  e  $PICq$ .

#### 4.6.1 Resultados obtidos para o sistema IEEE-30

Na tabela 4.21 a seguir reunimos as 10 primeiras posições das listas ordenadas de contingências obtidas pelos métodos “CA” e “1P-1Q”, para o sistema IEEE-30.

Analisando os resultados mostrados na tabela 4.21 observamos que:

- Na ordenação por  $PICv$ , das 10 contingências consideradas mais graves pelo método “CA” apenas uma não está entre as 10 primeiras posições da lista obtida com o método “1P-1Q”. Este fato também acontece na ordenação pelo índice  $PICq$ .

- Nas ordenações por  $PICv$  e  $PICq$  as contingências com o maior índice de performance coincidem nos dois métodos comparados. Nas listas obtidas com o índice  $PICv$ , esta coincidência vai até a quarta posição.

- Os valores dos índices de performance obtidos com os dois métodos são diferentes. Porém estas diferenças afetam muito pouco a ordenação das contingências, que é o principal objetivo da análise de segurança.

Os fatos acima mostram que para este sistema é vantajosa a aplicação do método “1P-1Q” de análise de segurança, pois o mesmo oferece resultados com boa precisão e o esforço computacional é muito menor do que o necessário no método “CA”.

| Comparação entre os métodos “CA” e “1P-1Q” |             |        |      |        |                |        |      |        |
|--------------------------------------------|-------------|--------|------|--------|----------------|--------|------|--------|
| Ordem                                      | Método “CA” |        |      |        | Método “1P-1Q” |        |      |        |
|                                            | Ramo        | $PICv$ | Ramo | $PICq$ | Ramo           | $PICv$ | Ramo | $PICq$ |
| 1                                          | 36          | 1,0000 | 5    | 1,0000 | 36             | 1,0000 | 5    | 1,0000 |
| 2                                          | 37          | 0,0011 | 1    | 0,2281 | 37             | 0,0128 | 2    | 0,1383 |
| 3                                          | 38          | 0,0010 | 10   | 0,1538 | 38             | 0,0103 | 1    | 0,1377 |
| 4                                          | 33          | 0,0007 | 2    | 0,0216 | 33             | 0,0087 | 4    | 0,1290 |
| 5                                          | 1           | 0,0007 | 4    | 0,0211 | 25             | 0,0079 | 9    | 0,0027 |
| 6                                          | 25          | 0,0005 | 8    | 0,0046 | 4              | 0,0041 | 15   | 0,0014 |
| 7                                          | 4           | 0,0002 | 15   | 0,0011 | 18             | 0,0031 | 6    | 0,0006 |
| 8                                          | 18          | 0,0002 | 7    | 0,0007 | 30             | 0,0027 | 7    | 0,0004 |
| 9                                          | 30          | 0,0002 | 9    | 0,0005 | 14             | 0,0004 | 8    | 0,0003 |
| 10                                         | 14          | 0,0000 | 6    | 0,0003 | 31             | 0,0002 | 11   | 0,0003 |

Tabela 4.21: Sistema IEEE-30 - Comparação entre os métodos “CA” e “1P-1Q”

#### 4.6.2 Resultados obtidos para o sistema IEEE-118

Na tabela 4.22 estão reunidas as 10 primeiras posições das 4 listas ordenadas de contingências obtidas com os dois métodos que estamos comparando.

Analisando a tabela 4.22 observamos que:

- Os valores dos índices de performance são bastante diferentes. Isto é esperado devido às diferenças entre os métodos “CA” e “1P - 1Q”.
- As ordenações feitas pelo índice  $PICv$  praticamente coincidem. Existem diferenças apenas nas duas últimas posições mostradas na tabela 4.22.
- As ordenações feitas pelo índice  $PICq$  são bastante diferentes. Das 10 contingências consideradas mais importantes pelo método “CA”, apenas 3 aparecem no topo da lista obtida pelo método “1P - 1Q”.

Assim constatamos que, para este sistema, com os limites que utilizamos, o método “1P - 1Q” produz praticamente os mesmos resultados que o método “CA” para análise do perfil de tensões. Na análise do perfil de injeções reativas nas barras PV, os resultados são bastante diferentes. Obviamente, a economia de tempo computacional obtida com o método “1P - 1Q” é maior que a existente na análise do sistema IEEE-30.

#### 4.6.3 Resultados obtidos para o sistema Sul-sudeste

Quando analisamos o sistema Sul-sudeste pelo método “1P-1Q”, comprovamos uma grande vantagem deste método sobre o método “CA”. O método “1P- 1Q” atribuiu índices de performance para as contingências cujo cálculo de fluxo de carga não convergiu ou divergiu no método “CA”.

| Comparação entre os métodos “CA” e “1P-1Q” |             |         |      |         |                |         |      |         |
|--------------------------------------------|-------------|---------|------|---------|----------------|---------|------|---------|
| Ordem                                      | Método “CA” |         |      |         | Método “1P-1Q” |         |      |         |
|                                            | Ramo        | $PIC_v$ | Ramo | $PIC_q$ | Ramo           | $PIC_v$ | Ramo | $PIC_q$ |
| 1                                          | 75          | 1,0000  | 54   | 1,0000  | 75             | 1,0000  | 73   | 1,0000  |
| 2                                          | 27          | 0,0030  | 135  | 0,0250  | 27             | 0,0407  | 6    | 0,7649  |
| 3                                          | 6           | 0,0005  | 41   | 0,0117  | 6              | 0,0085  | 46   | 0,1056  |
| 4                                          | 76          | 0,0003  | 60   | 0,0032  | 76             | 0,0053  | 30   | 0,0794  |
| 5                                          | 44          | 0,0002  | 5    | 0,0009  | 44             | 0,0039  | 74   | 0,0763  |
| 6                                          | 143         | 0,0002  | 76   | 0,0008  | 143            | 0,0028  | 48   | 0,0355  |
| 7                                          | 102         | 0,0002  | 6    | 0,0005  | 102            | 0,0023  | 150  | 0,0290  |
| 8                                          | 94          | 0,0001  | 77   | 0,0003  | 94             | 0,0013  | 148  | 0,0288  |
| 9                                          | 45          | 0,0001  | 139  | 0,0001  | 107            | 0,0011  | 72   | 0,0245  |
| 10                                         | 107         | 0,0001  | 148  | 0,0001  | 45             | 0,0009  | 76   | 0,0236  |

Tabela 4.22: Sistema IEEE-118 - Comparação entre os métodos “CA” e “1P-1Q”

Como as contingências relatadas no quadro 4.1 não tiveram índice de performance associado e para evitar uma tabela muito extensa, apresentaremos a comparação entre os métodos “CA” e “1P-1Q” apenas para algumas contingências importantes.

Na tabela 4.23 mostramos as contingências mais significativas. Analisando totalmente as listas de contingências obtidas observamos os fatos seguintes.

- A parte inicial (14 primeiras posições) da lista ordenada por  $PIC_v$  no método “1P-1Q” foi formada por contingências cujo cálculo de fluxo de carga divergiu no método “CA”.

- Das 20 contingências que levaram à divergência no método “CA”, apenas uma não esteve entre as 25 primeiras posições da lista ordenada por  $PIC_v$  no método “1P-1Q”.

- A contingência que levou à não convergência do fluxo de carga no método “CA” apareceu na 38ª posição da ordenação obtida com  $PIC_v$  no método “1P-1Q”.

- As contingências que tiveram gravidade destacada pelo método “CA” apareceram nas posições iniciais das listas obtidas com o método “1P-1Q”, mescladas a contingências mostradas no quadro 4.1 anterior.

- A exemplo do sistema IEEE-30, os valores dos índices de performance obtidos com os dois métodos foram diferentes, porém na comparação das ordenações, vimos que o método “1P-1Q” fornece resultados satisfatórios.

Em sistemas de potência de grande porte como este, notamos a grande economia de tempo computacional obtida com a utilização do método “1P-1Q”. Como a precisão dos resultados foi satisfatória, constatamos que obtém-se vantagens, para este sistema, com a utilização do método “1P-1Q” de análise de segurança.

| Comparação entre os métodos “CA” e “1P-1Q” |                  |                  |                  |                  |
|--------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Ramo                                       | Método “CA”      |                  | Método “1P-1Q”   |                  |
|                                            | Ordem ( $PICv$ ) | Ordem ( $PICq$ ) | Ordem ( $PICv$ ) | Ordem ( $PICq$ ) |
| 497                                        | Divergiu         |                  | 1                | 267              |
| 696                                        | Divergiu         |                  | 2                | 318              |
| 9                                          | Divergiu         |                  | 3                | 1083             |
| 1003                                       | Divergiu         |                  | 4                | 964              |
| 858                                        | Não convergiu    |                  | 38               | 39               |
| 565                                        | 1                | 2                | 27               | 11               |
| 488                                        | 2                | 1020             | 18               | 380              |
| 987                                        | 3                | 170              | 15               | 155              |
| 248                                        | 4                | 183              | 19               | 219              |
| 605                                        | 5                | 49               | 36               | 101              |
| 1311                                       | 400              | 1                | 414              | 1                |

Tabela 4.23: Sistema Sul-sudeste - Comparação entre os métodos “CA” e “1P-1Q”

## 4.7 Comparação entre os resultados obtidos com o método “1P-1Q” e com o método proposto em [1]

Nesta seção compararemos os resultados obtidos para o sistema Sul-sudeste, descritos nas seções 4.4 e 4.5 deste capítulo. A comparação será feita entre estes dois métodos porque implementamos o critério de “bounding” descrito em [1] em um método que realiza a primeira iteração do fluxo de carga desacoplado rápido. Este critério também poderia ser incluído em um método que calcula o fluxo de carga do sistema para cada contingência analisada.

Na tabela 4.24 representamos as 10 primeiras posições das listas ordenadas de contingências obtidas com os dois métodos. Novamente comparamos as ordenações através dos índices de performance  $PICv$  e  $PICq$ .

Na tabela 4.24 vemos que os resultados fornecidos pelos dois métodos são bastante próximos. Na ordenação por  $PICv$  as 10 primeiras posições das listas coincidem; na ordenação por  $PICq$  esta coincidência vai até a nona posição. Observamos também que nas duas ordenações os índices de performance têm valores bastante semelhantes.

A proximidade dos resultados que comparamos significa que o critério de “bounding” descrito em [1] foi eficiente na determinação de quais barras têm desvio de potência reativa não desprezível. Este fato justifica, para o sistema Sul-sudeste, a aplicação do método de análise de segurança proposto em [1].

| Comparação entre os métodos “1P-1Q” e proposto em [1] |                |         |      |         |                        |         |      |         |
|-------------------------------------------------------|----------------|---------|------|---------|------------------------|---------|------|---------|
| Ordem                                                 | Método “1P-1Q” |         |      |         | Método proposto em [1] |         |      |         |
|                                                       | Ramo           | $PIC_v$ | Ramo | $PIC_q$ | Ramo                   | $PIC_v$ | Ramo | $PIC_q$ |
| 1                                                     | 497            | 1,0000  | 1311 | 1,0000  | 497                    | 1,0000  | 1311 | 1,0000  |
| 2                                                     | 696            | 0,2197  | 1270 | 0,0429  | 696                    | 0,2186  | 1270 | 0,0428  |
| 3                                                     | 9              | 0,0580  | 923  | 0,0405  | 9                      | 0,0610  | 923  | 0,0406  |
| 4                                                     | 1003           | 0,0255  | 570  | 0,0367  | 1003                   | 0,0253  | 570  | 0,0370  |
| 5                                                     | 402            | 0,0142  | 805  | 0,0251  | 402                    | 0,0141  | 805  | 0,0250  |
| 6                                                     | 431            | 0,0081  | 807  | 0,0251  | 431                    | 0,0081  | 807  | 0,0250  |
| 7                                                     | 570            | 0,0079  | 809  | 0,0251  | 570                    | 0,0079  | 809  | 0,0250  |
| 8                                                     | 950            | 0,0059  | 422  | 0,0103  | 950                    | 0,0058  | 422  | 0,0103  |
| 9                                                     | 1250           | 0,0058  | 559  | 0,0102  | 1250                   | 0,0058  | 565  | 0,0100  |
| 10                                                    | 422            | 0,0030  | 578  | 0,0099  | 422                    | 0,0030  | 559  | 0,0092  |

Tabela 4.24: Sistema Sul-sudeste - Comparação entre os métodos “1P-1Q” e proposto em [1]

Na seção 4.5 relatamos que o número médio de barras com desvio de potência reativa calculado foi de 59. Assim, com a utilização do método de vetores esparsos [2] é possível uma grande economia no tempo computacional necessário para análise de segurança. Neste trabalho, observamos que esta economia só pode ser obtida se a determinação das subredes de interesse N1 e N2 (seção 3.4) é implementada de maneira eficiente.

## Capítulo 5

# Método “1P-1Q alternativo” para análise de segurança em sistemas de potência

### 5.1 Introdução

Neste capítulo apresentaremos a proposta de um método “1P-1Q alternativo” para análise de segurança em sistemas elétricos de potência. Como o próprio nome sugere, trata-se do método “1P-1Q” com algumas alterações.

No Capítulo 3 deste trabalho descrevemos três métodos diferentes para análise de segurança. No Capítulo 4 apresentamos e comparamos os resultados obtidos com os diferentes métodos. Todos os métodos que apresentamos até agora baseiam-se no modelo de fluxo de carga, onde as barras dos sistemas são classificadas nos tipos  $V\theta$ , PV e PQ. São as consequências da utilização desta classificação de barras na análise de segurança que nos levam a propor o método “1P- 1Q alternativo”.

Na seção 4.1 constatamos que a análise do perfil de injeções reativas nas barras PV e  $V\theta$  deve ser incluída na quantificação dos efeitos das contingências. Esta é uma primeira abordagem para considerar a presença de barras com tensão constante na análise de segurança. O método “1P-1Q alternativo” consiste numa segunda abordagem deste problema.

É importante frisar que na revisão bibliográfica que realizamos verificamos que existem poucas referências específicas sobre este tema e que o mesmo ainda é objeto de pesquisas. Em [1] comenta-se que esta questão pode ser dependente do sistema analisado e que ainda deve ser melhor estudada.

## 5.2 Descrição do método

Nos métodos de análise de segurança que já discutimos, as barras modeladas como tipo PV são assim consideradas de maneira constante, inclusive na simulação de contingências. A adoção desta hipótese implica em que o módulo da tensão nestas barras nunca seja alterado. Os equipamentos modelados como barras PV são habitualmente geradores e bancos de capacitores. Consideramos questionável a hipótese de que a tensão nestes equipamentos não sofra efeito de contingências nos sistemas. Isto é, questionamos a metodologia de simular contingências mantendo barras modeladas como tipo PV.

É possível permitir variações no módulo da tensão de barras originalmente consideradas como PV através da utilização de dispositivos de controle. Quando é usado o controle de módulo de tensão através da injeção de reativos, barras tipo PV podem ser alteradas para tipo PQ e conseqüentemente ter seu módulo de tensão calculado.

Conforme já vimos na seção 4.2, também consideramos inviável a utilização de dispositivos de controle na determinação de efeitos de contingências. Os principais motivos são:

- A atuação de dispositivos de controle pode mascarar os efeitos das contingências.
- Podem ocorrer situações em que não exista tempo suficiente para atuação dos dispositivos de controle, frente a contingências.
- Há dificuldade para incluir a modelagem de dispositivos de controle em métodos não iterativos. Geralmente a verificação de parâmetros controlados é feita após obtida convergência parcial do cálculo de fluxo de carga.

A abordagem que propomos neste capítulo para enfrentar o problema de modelagem de barras PV na análise de segurança é bastante simples. Conhecido o caso base da rede através do cálculo de fluxo de carga, as barras tipo PV são convertidas para tipo PQ. A injeção de potência ativa especificada não é alterada, e a injeção de potência reativa especificada para as novas barras PQ é a injeção de potência reativa do caso base da rede. Não são alterados os tipos das demais barras do sistema, permanecendo como tipo V $\theta$  ou tipo PQ. Após é executado o método “1P-1Q” de análise de segurança descrito no Capítulo 3 deste trabalho.

Aplicando este método para análise de segurança consideramos que os sistemas analisados só possuem barras tipo V $\theta$  e PQ. Assim a avaliação dos efeitos das contingências é feita exclusivamente no perfil de tensões com, por exemplo, os índices de performance  $PI_v$  e  $PIC_v$  formulados respectivamente em 4.3 e 4.8. Isto simplifica a análise dos resultados obtidos, pois estes formam apenas uma lista ordenada de contingências. Nos outros métodos analisados são necessárias duas listas.

A figura 5.1 mostra o diagrama de blocos do método “1P-1Q alternativo” para análise de segurança.

Na primeira etapa do método são lidos do banco de dados os parâmetros do sistema e os valores de seu caso base. O caso base é determinado conforme já descrevemos na seção 3.3 e será utilizado para inicialização da iteração completa de FCDR realizada

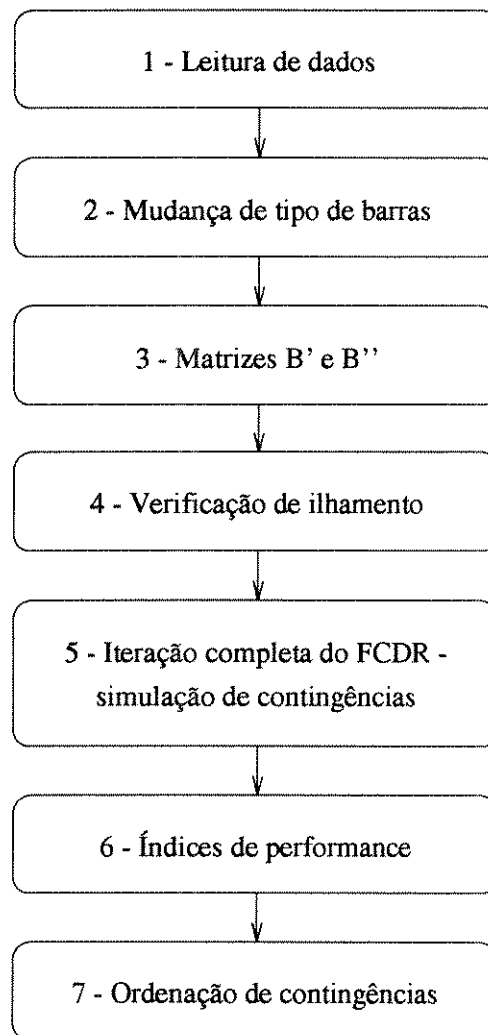


Figura 5.1: Método “1P-1Q alternativo”

posteriormente.

As mudanças de tipo de barras constituem a segunda etapa do método. Esta etapa encerra a primeira parte do método “1P-1Q alternativo”.

Os blocos 3 e 4 da figura 5.1 representam a construção e fatoração das matrizes  $B'$  e  $B''$  e a verificação de ilhamentos. Estas etapas são idênticas às realizadas nos três métodos que já descrevemos.

Neste método a quinta etapa é a principal. Nesta fase são simuladas as contingências através de técnicas de compensação e é realizada uma iteração completa do método de fluxo de carga desacoplado rápido. Este procedimento é feito para todas as contingências que não causam ilhamento e consideramos os sistemas analisados como só possuindo barras tipo  $V\theta$  ou PQ.

As duas últimas etapas deste método são idênticas às etapas correspondentes do método “1P-1Q”. Assim são associados índices de performance a todas as contingências que não causam ilhamento e os resultados são organizados em duas listas:

- 1) lista de contingências que determinam ilhamento no sistema;
- 2) lista das demais contingências ordenadas de acordo com o impacto que as mesmas causam ao sistema.

O método “1P-1Q alternativo” apresenta as mesmas vantagens do método “1P-1Q” original, assim:

- o esforço computacional é pequeno se comparado ao existente no método “CA”;
- são atribuídos índices de performance a contingências cujo cálculo de fluxo de carga diverge ou não converge no método “CA”.

O estado pós-contingência determinado neste método é aproximado, pois é feita apenas uma iteração de fluxo de carga e é adotada a hipótese de mudança de tipo de barra já explicada. O conhecimento do estado pós-contingência exato do sistema não é necessário na tarefa de seleção de contingências. O principal objetivo desta tarefa é a determinação de quais são as contingências mais graves para o sistema e consideramos que este objetivo é satisfeito pelo método “1P-1Q alternativo”.

## 5.3 Resultados obtidos

Nesta seção apresentaremos os resultados obtidos com o método “1P-1Q alternativo” para análise de segurança. Como nesta abordagem os sistemas analisados não possuem barras tipo PV, apresentaremos as ordenações de contingências realizadas pelos índices de performance  $PIv$  (4.3) e  $PICv$  (4.8), que quantificam os efeitos de contingências no perfil de tensões dos sistemas.

Executamos o método “1P-1Q alternativo” usando, para cada sistema analisado, os mesmos limites de segurança e os mesmos expoentes dos índices de performance já descritos nas seções anteriores. Para calcular o índice de performance  $PICv$  também usamos a versão  $A$  (seção 4.2) para atribuição de valores aos fatores de ponderação  $w_v$ . A exemplo

de seções anteriores apresentaremos os resultados de forma normalizada e não listaremos novamente os casos de ilhamento.

Nas seções 4.6 e 4.7 efetuamos comparações entre os resultados obtidos com os métodos “CA”, “1P-1Q” e com o método proposto em [1]. Tais comparações foram objetivas, adotando como padrão o método “CA”. Nesta seção compararemos os resultados fornecidos pelos métodos “CA” e “1P-1Q alternativo”. Os resultados fornecidos pelo método “1P-1Q alternativo” podem ser diferentes daqueles obtidos com os demais métodos devido à adoção da hipótese de mudança de tipo de barra.

### 5.3.1 Resultados obtidos para o sistema IEEE-30

A tabela 5.1 mostra a ordenação de contingências realizada através do índice  $PIv$ , que quantifica violações de limites de segurança para módulo de tensão.

| Método “1P-1Q alternativo” |      |                         |
|----------------------------|------|-------------------------|
| Ordem                      | Ramo | $PIv$                   |
| 1                          | 1    | 1,000                   |
| 2                          | 15   | $2,036 \times 10^{-3}$  |
| 3                          | 5    | $5,551 \times 10^{-4}$  |
| 4                          | 36   | $5,164 \times 10^{-5}$  |
| 5                          | 2    | $2,651 \times 10^{-5}$  |
| 6                          | 4    | $9,375 \times 10^{-6}$  |
| 7                          | 37   | $4,084 \times 10^{-8}$  |
| 8                          | 38   | $4,990 \times 10^{-9}$  |
| 9                          | 9    | $7,497 \times 10^{-11}$ |

Tabela 5.1: Sistema IEEE-30 - Ordenação por  $PIv$

Quando analisamos este sistema usando o índice de performance  $PICv$  obtivemos uma lista ordenada com 38 contingências. A parte inicial desta lista forma a tabela 5.2 a seguir.

Analisando as tabelas 5.1 e 5.2 vemos que com esta metodologia as primeiras posições das duas listas coincidem. Comparando estes resultados com os mostrados nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.5, vemos que as primeiras posições das listas obtidas com o método “1P-1Q alternativo” são ocupadas por contingências também consideradas importantes pelo método “CA”. A análise de segurança feita pelo método “1P-1Q alternativo” considera de maior gravidade a contingência no ramo 1, diferentemente do método “CA”.

| Método “1P-1Q alternativo” |      |                        |
|----------------------------|------|------------------------|
| Ordem                      | Ramo | $PICv$                 |
| 1                          | 1    | 1,000                  |
| 2                          | 15   | $9,105 \times 10^{-3}$ |
| 3                          | 5    | $1,819 \times 10^{-3}$ |
| 4                          | 36   | $9,548 \times 10^{-5}$ |
| 5                          | 2    | $2,894 \times 10^{-5}$ |
| 6                          | 4    | $1,549 \times 10^{-5}$ |
| 7                          | 37   | $8,456 \times 10^{-8}$ |
| 8                          | 38   | $6,988 \times 10^{-8}$ |
| 9                          | 9    | $5,876 \times 10^{-8}$ |
| 10                         | 14   | $9,007 \times 10^{-9}$ |

Tabela 5.2: Sistema IEEE-30 - Ordenação por  $PICv$

### 5.3.2 Resultados obtidos para o sistema IEEE-118

A grande quantidade de barras tipo PV deste sistema torna interessante a análise do mesmo pelo método “1P-1Q alternativo”. O cálculo do índice de performance  $PICv$  detectou 49 contingências que causaram violações de limites de segurança. Já a lista ordenada pelo índice  $PICv$  possuiu 170 ramos. Os topos das duas listas estão mostrados na tabela 5.3.

A tabela 5.3 mostra algumas contingências que também são consideradas importantes pelo método “CA” pois aparecem nas primeiras posições das tabelas 4.6 - 4.8 (ramos 76, 75, 60, 135, 6 e 110). As demais contingências presentes na tabela 5.3 (ramos 165, 89, 78, 48 e 61) não foram conideradas graves pelo método “CA”. Note-se que a contingência no ramo 165 é considerada a mais grave pelo método “1P-1Q alternativo”.

As diferenças nos resultados obtidos com os métodos “CA” e “1P-1Q alternativo” devem-se às diferentes abordagens para tratamento de barras tipo PV. No método “CA” os módulos das tensões nas barras tipo PV são fixos, não permitindo que nestas barras ocorram distúrbios de tensão. Quando no método “1P-1Q alternativo” são calculados os módulos das tensões para as barras tipo PQ e para as barras originalmente tipo PV, mudam as contigências consideradas importantes para este sistema.

### 5.3.3 Resultados obtidos para o sistema Sul-sudeste

As listas de contingências ordenadas pelos índices de performance  $PIv$  e  $PICv$  tiveram respectivamente 195 e 1083 ramos. A tabela 5.4, a seguir, mostra as 10 primeiras posições destas listas.

Das contingências mostradas na tabela 5.4, aquelas nos ramos 592, 422, 570, 696,

| Método "1P-1Q alternativo" |      |        |      |        |
|----------------------------|------|--------|------|--------|
| Ordem                      | Ramo | $PIv$  | Ramo | $PICv$ |
| 1                          | 165  | 1,0000 | 76   | 1,0000 |
| 2                          | 76   | 0,7318 | 75   | 0,9761 |
| 3                          | 75   | 0,7147 | 89   | 0,0122 |
| 4                          | 60   | 0,0407 | 78   | 0,0114 |
| 5                          | 89   | 0,0043 | 61   | 0,0039 |
| 6                          | 78   | 0,0038 | 165  | 0,0020 |
| 7                          | 48   | 0,0018 | 6    | 0,0006 |
| 8                          | 61   | 0,0017 | 135  | 0,0005 |
| 9                          | 135  | 0,0011 | 110  | 0,0001 |
| 10                         | 6    | 0,0001 | 60   | 0,0001 |

Tabela 5.3: Sistema IEEE-118 - Ordenações por  $PIv$  e  $PICv$

| Método "1P-1Q alternativo" |      |        |      |        |
|----------------------------|------|--------|------|--------|
| Ordem                      | Ramo | $PIv$  | Ramo | $PICv$ |
| 1                          | 592  | 1,0000 | 422  | 1,0000 |
| 2                          | 929  | 0,4161 | 570  | 0,0809 |
| 3                          | 422  | 0,2914 | 696  | 0,0702 |
| 4                          | 1300 | 0,0322 | 497  | 0,0497 |
| 5                          | 570  | 0,0157 | 980  | 0,0440 |
| 6                          | 696  | 0,0138 | 929  | 0,0314 |
| 7                          | 1272 | 0,0134 | 568  | 0,0115 |
| 8                          | 980  | 0,0114 | 596  | 0,0114 |
| 9                          | 497  | 0,0113 | 597  | 0,0114 |
| 10                         | 1312 | 0,0100 | 592  | 0,0090 |

Tabela 5.4: Sistema Sul-sudeste - Ordenações por  $PIv$  e  $PICv$

497 e 568 já foram listadas no quadro 4.1, pois pertencem ao grupo de contingências para as quais o cálculo de fluxo de carga divergem no método “CA”. Assim o método “1P-1Q alternativo” destacou estas contingências, como o método “1P-1Q”. As demais contingências presentes na tabela 5.4 (ramos 929, 1300, 1272, 980, 1312, 596 e 597) não constam nas tabelas 4.9 e 4.10, ou seja, não estão entre as contingências consideradas mais importantes pelo método “CA”.

Os resultados descritos nesta seção mostram que para este sistema, a exemplo do sistema IEEE-118, a forma de tratar as barras tipo PV influenciou nos resultados obtidos na análise de segurança.

# Capítulo 6

## Conclusões

O principal objetivo deste trabalho foi estudar o subproblema reativo da análise de segurança estática em sistemas de potência. A maior ênfase foi dada ao estudo de critérios de seleção de contingências e às diferentes maneiras de avaliar os efeitos de contingências sobre o perfil reativo de sistemas de potência.

Mostramos que a avaliação de efeitos de contingências no perfil reativo de sistemas de potência deve ser feita pela análise conjunta dos perfis de tensões e de injeções de potência reativa. Mostramos também que esta avaliação deve ser feita de uma forma ampla e não apenas através da quantificação de violações de limites de segurança.

Os métodos aproximados de seleção de contingências mostraram-se confiáveis para a determinação de quais são as contingências mais graves para os sistemas analisados. Esta confiabilidade provém de 3 fatores: precisão dos resultados, eficiência computacional e inexistência de casos de divergência ou de não convergência no cálculo de fluxo de carga.

Alguns aspectos do subproblema reativo do problema de seleção de contingências são ainda objeto de pesquisa, principalmente a modelagem de barras tipo PV e suas consequências para a avaliação de impactos de contingências. Procuramos contribuir nesta direção propondo, neste trabalho, o método “1P-1Q alternativo” para análise de segurança estática em sistemas de potência.

Alguns desenvolvimentos que pretendemos realizar futuramente são os descritos a seguir.

- Expansão do estudo aqui realizado para enfocar também contingências múltiplas.
- Estudar mais profundamente a localização de efeitos de contingências e a determinação de valores de expoentes e fatores de ponderação utilizados nos diferentes critérios de seleção de contingências.
- Aumentar a eficiência computacional dos métodos de análise de segurança estática implementados neste trabalho.
- Realizar, através de outros métodos, os cálculos de fluxo de carga necessários nos métodos de análise de segurança estática que implementamos.

# Bibliografia

- [1] BRANDWAJN, V., LAUBY, M. "Complete Bounding Method for AC Contingency Screening", IEEE Transactions on PWRs, vol 4, n 2, May 1989, pp. 724-729.
- [2] TINNEY, W.F., BRANDWAJN, V., CHAN, S.M. "Sparse Vector Methods", IEEE Transactions on PAS, vol 104, n 2, February 1985, pp. 295-301.
- [3] ELGERD, O.I. "Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica", editora McGraw Hill, São Paulo, 1977.
- [4] MONTICELLI, A.J. "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica", editora Edgard Blucher, São Paulo, 1983.
- [5] GALIANA, F. "Bound Estimates of the Severity of the Line Outages in Power System Contingency Analysis and Ranking", IEEE Transactions on PAS, vol 103, n 9, september 1984, pp. 2612-2622.
- [6] BRANDWAJN, V. "Efficient Bounding Method for Linear Contingency Analysis", IEEE Transactions on PWRs, vol 3, n 1, february 88, pp. 38-43.
- [7] CARPENTIER, J.L., DI BONO, P.J., TOURNEBISE, P.J. "Improved Efficient Bounding Method for DC Contingency Analysis Using Reciprocity Properties", Paper 93 WM 234-5 PWRs, IEEE/PES 1993 Winter Meeting, Columbus, january 1993.
- [8] CHEN, Y., BOSE, A. "Direct Ranking for Voltage Contingency Selection", Paper 89 WM 135-5 PWRs, IEEE/PES Winter Meeting 1989, New York, january 1989.
- [9] STOTT, B., ALSAC, O. "Fast Decoupled Load Flow", IEEE Transactions on PAS, vol 93, may/june 1974, pp. 859-869.
- [10] HADJSAID, N., BENAHMED, M., FANDINO, J., SABONNADIÈRE, J., NERIN, G. "Fast Contingency Screening for Voltage-Reactive Considerations in Security Analysis", Paper 92 WM 185-9 PWRs, IEEE/PES 1992 Winter Meeting, New York, january 1992.

- [11] LAGONOTTE, P., SABONNADIÈRE, J.C., LEOST, J.Y., PAUL, J.P. "Structural Analysis of the Electrical System: Application to Secondary Voltage Control in France", IEEE Transactions on PWRs, vol 4, n 2, may 1989, pp. 479- 486.
- [12] CHEN, Y., BOSE, A. "An Adaptive Pre-filter for the Voltage Contingency Selection Function", IEEE Transactions on PWRs, vol 5, n 4, november 1990, pp. 1478-1486.
- [13] CHEN, Y., BOSE, A. "Security Analysis for Voltage Problems Using a Reduced Model", IEEE Transactions on PWRs, vol 5, n 3, august 1990, pp.933- 940.
- [14] BACHER, R., TINNEY, W.F. "Faster Local Power Flow Solutions: the Zero Mismatch Approach", Paper 89 WM 129-8, IEEE/PES Winter Meeting 1989, New York, january 1989.
- [15] BRANDWAIN, V., LIU, Y., LAUBY, M.G. "Pre-screening of Single Contingencies Causing Network Topology Changes", Paper 90 SM 487-9 PWRs, IEEE/PES 1990 Summer Meeting, Minneapolis, july 1990.
- [16] ZABORSKY, J., WHANG, K.W., PRASAD, K. "Fast Contingency Evaluation Using Concentric Relaxation", IEEE Transactions on PAS, vol 99, january/february 1980, pp. 28-36.
- [17] HSU, Y., KUO, H., "Fuzzy-set Based Contingency Ranking", IEEE Transactions on PWRs, vol 7, n 3, august 1992, pp. 1189-1196.
- [18] EJEBE, G., PALIZA, R., TINNEY, W., "An Adaptive Localization Method for Real Time Security Analysis", IEEE Transactions on PWRs, vol 7, n 2, may 1992, pp. 777-783.
- [19] ALBUYEH, F., BOSE, A. HEATH, B. "Reactive Power Considerations in Automatic Contingency Selection", IEEE Transactions on PAS, vol 101, n 1, january 1982, pp. 107 - 112.
- [20] LAUBY, M. G., MIKOLINNAS, T. A., REPPEN, N.D. "Contingency Selection of Branch Outages Causing Voltage Problems", IEEE Transactions on PAS, vol 102, n 12, december 1983, pp. 3899-3904.
- [21] IRISARRI, G., SASSON, A., "An Automatic Contingency Selection Method for On-line Security Analysis", IEEE Transactions on PAS, vol 100, n 4, april 1981, pp. 1838-1844.
- [22] KHU, K., LAUBY, M., BOWEN, D. "A Fast Linearization Method to Evaluate the Effects of Circuit Contingencies upon System Load-bus Voltages", IEEE Transactions on PAS, vol 101, n 10, october 1982, pp. 3926-3932.

- [23] MIKOLINNAS, T., WOLLENBERG, B. "An Advanced Contingency Selection Algorithm", IEEE Transactions on PAS, vol 100, n 2, february 1981, pp. 608-617.
- [24] WASLEY, R., DANESHDOOST, M. "Identification and Ranking of Critical Contingencies in Dependent Variable Space", IEEE Transactions on PAS, vol 102, n 4, april 1983, pp. 881-892.
- [25] CHAN, S., BRANDWAJN, V., "Partial Matrix Refactorization", IEEE Transactions on PWRS, vol 1, n 1, february 1986, pp. 193-200.
- [26] NARA, K. TANAKA, K., KODAMA, H., SHOULTS, R., CHEN, M., OLINDA, P., BERTAGNOLI, D. "On Line Contingency Selection Algorithm for Voltage Security Analysis", IEEE Transactions on PAS, vol 104, n 4, april 85, pp. 847-856.
- [27] ZOLLENKOPF, K. "Bi-factorization Basic Computational Algorithm and Programming Techniques". In REID, J.K. ed. "Large Sparse Sets of Linear Equations". London, Academic Press, 1971. pp. 75-96 (Conference of Institute of Mathematics and Its Applications, Oxford 5-8 April, 1970).
- [28] DABBAGHCHL, I., IRISARRI, G. "AEP Automatic Contingency Selector: Branch Outage Impacts on Load Bus Voltage Profile", IEEE Transactions on PWRS, vol 1, n 2, may 1986, pp. 37-45.
- [29] EJEBE, G., WOLLEMBERG, B. "Automatic Contingency Selection", IEEE Transactions on PAS, vol 98, n 1, january/february 1979, pp. 97-109.
- [30] FRERIS, L., SASSON, A. "Investigation of the Load Flow Problem", Proceedings of IEE, vol 115, n 10, october 1968, pp. 1459-1470.
- [31] LEBOW, W.M., ROUHANI, R., NADIRA, R., USORO, P. B., MEHRA, R. K. "Optimization of Reactive Volt-Ampere(VAR) Sources in System Planning - Volume 1: Solution Techniques Computing Methods, and Results", EL-3729, Volume 1, Final Report, November 1984.
- [32] VAN AMERONGEN, R. "A General-Purpose Version of the Fast Decoupled Load Flow", IEEE Transactions on PWRS, vol 4, n 2, may 1989, pp. 760-770.
- [33] MONTICELLI, A., GARCIA, A., SAAVEDRA, O. "Fast Decoupled Load Flow: Hypothesis, Derivations, and Testing", IEEE Transactions on PWRS, vol 5, n 4, november 1990, pp. 1425-1431.

## Apêndice A

### Modelo de fluxo de carga corrente contínua (FCCC)

A dedução do modelo de fluxo de carga CC, detalhada em [4], é apresentada a seguir de uma forma bastante sucinta.

O fluxo de potência elétrica ativa em uma linha de transmissão genérica de extremidades  $k$  e  $m$ , é dado por:

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km} \quad (\text{A.1})$$

e

$$P_{mk} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} + V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km} \quad (\text{A.2})$$

Se desprezarmos nas equações A.1 e A.2 precedentes os termos correspondentes às perdas de transmissão, e considerarmos válidas as seguintes hipóteses simplificadoras

$$V_k \cong V_m \cong 1,0 \text{ pu} \quad (\text{A.3})$$

$$\sin \theta_{k,m} \cong \theta_{k,m} \quad (\text{A.4})$$

$$B_{km} \cong -1/x_{km} \quad (\text{A.5})$$

O fluxo de potência ativa  $P_{km}$  pode então ser aproximado por

$$P_{km} = P_{mk} = x_{km}^{-1} \theta_{k,m} = (\theta_k - \theta_m)/x_{km} \quad (\text{A.6})$$

Para que o modelo de fluxo de carga CC, baseado na equação A.6 tenha aplicação prática, o mesmo deve ser matricialmente formulado.

Considerando um sistema elétrico de potência formado apenas por linhas de transmissão (isto é, não existem transformadores), os fluxos de potência ativa nos ramos da rede são dados por:

$$P_{km} = x_{km}^{-1} \theta_{k,m} \quad (\text{A.7})$$

A injeção de potência ativa em uma barra genérica  $k$  é determinada pelo somatório dos fluxos que saem da barra:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} x_{km}^{-1} \theta_{k,m} \quad (\text{A.8})$$

Onde:  $\Omega_k$  - conjunto de barras vizinhas da barra  $k$ .

Podemos colocar a expressão anterior na forma

$$P_k = \left( \sum_{m \in \Omega_k} x_{km}^{-1} \right) \theta_k + \sum_{m \in \Omega_k} (-x_{km}^{-1} \theta_m) \quad (\text{A.9})$$

A expressão A.9 pode ser matricialmente representada da seguinte maneira:

$$\underline{P} = B' \underline{\theta} \quad (\text{A.10})$$

Onde:

$\underline{\theta}$  - vetor dos ângulos das tensões nodais  $V_k$

$\underline{P}$  - vetor das injeções líquidas de potência ativa

$B'$  - matriz tipo admitância nodal, cujos elementos externos à diagonal principal são dados por  $B'_{km} = -x_{km}^{-1}$  e cujos elementos pertencentes à diagonal principal são dados por:  $B'_{kk} = \sum_{m \in \Omega_k} x_{km}^{-1}$ .

A inclusão de transformadores (em fase ou defasadores) no modelo de fluxo de carga corrente contínua é bastante simples. A regra de formação da matriz  $B'$  permanece a mesma, isto é: o tratamento dado aos transformadores é idêntico ao das linhas de transmissão. Já a formação do vetor de potências líquidas  $\underline{P}$  sofre uma única alteração: na existência de transformadores defasadores, deve-se considerar a existência de injeções equivalentes, utilizadas em sua representação.

Finalizando esta breve descrição do modelo de fluxo de carga CC, consideramos importante salientar as seguintes características:

- O modelo de FCCC, baseado na equação A.10, possui baixo custo computacional associado, principalmente se comparado com os métodos não lineares de cálculo de fluxo de carga. Esta propriedade traz vantagens para muitas aplicações do FCCC, como no planejamento da expansão de sistemas de transmissão, por exemplo.

- O uso do modelo de fluxo de carga CC é bastante limitado. Este modelo não leva em conta as magnitudes das tensões nodais, os “taps” dos transformadores e os fluxos e injeções de potência reativa. Além disso, as hipóteses simplificadoras precedentes A.3, A.4 e A.5 nem sempre são válidas. É por esses motivos que o modelo FCCC não pode substituir completamente os métodos não lineares de cálculo de fluxo de carga.

## Apêndice B

### Método de fluxo de carga desacoplado rápido (FCDR)

O método de fluxo de carga desacoplado rápido, proposto em [9], é hoje muito utilizado na análise de sistemas elétricos de potência. Este método possui várias versões sendo as principais a versão XB (originalmente proposta em [9]) e a versão BX apresentada em [32].

Existem na literatura muitos trabalhos sobre o FCDR, porém poucas são as publicações que se preocupam com as bases teóricas do FCDR. Na referência [33] Monticelli, Garcia e Saavedra apresentam um estudo matemático que culmina com a dedução das duas principais versões do FCDR. Uma breve descrição do estudo apresentado em [33] constitui este apêndice.

#### Formulação do problema

No método de Newton para cálculo de fluxo de carga em cada iteração é resolvido o seguinte sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{P} \\ \Delta \underline{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta} \\ \Delta \underline{V} \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

onde as incógnitas são os vetores de correção para ângulos e para módulos de tensões  $\Delta \underline{\theta}$  e  $\Delta \underline{V}$ .

Pré-multiplicando as equações para  $\Delta \underline{P}$  por  $-MH^{-1}$  e adicionando as equações resultantes nas equações para  $\Delta \underline{Q}$ , o sistema B.1 pode ser colocado na forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{P} \\ \Delta \underline{Q} - MH^{-1}\Delta \underline{P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ 0 & L - MH^{-1}N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta} \\ \Delta \underline{V} \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

De maneira similar pode ser obtido o sistema:

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{P} - NL^{-1} \Delta \underline{Q} \\ \Delta \underline{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H - NL^{-1}M & 0 \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta} \\ \Delta \underline{V} \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

que também fornece a mesma solução que os sistemas anteriores B.1 e B.2.

Combinando as operações realizadas para a obtenção dos sistemas B.2 e B.3 tem-se o sistema a seguir:

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{P} - NL^{-1} \Delta \underline{Q} \\ \Delta \underline{Q} - MH^{-1} \Delta \underline{P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H - NL^{-1}M & 0 \\ 0 & L - MH^{-1}N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta} \\ \Delta \underline{V} \end{bmatrix} \quad (\text{B.4})$$

onde adota-se a notação:

$$H_{eq} = H - NL^{-1}M \quad (\text{B.5})$$

$$L_{eq} = L - MH^{-1}N \quad (\text{B.6})$$

Os sistemas B.2, B.3 e B.4 são equivalentes ao sistema B.1, porém eles conduzem a um procedimento desacoplado de solução, onde os vetores  $\Delta \underline{\theta}$  e  $\Delta \underline{V}$  são calculados separadamente. Note-se ainda que os sistemas B.2 e B.3 são mais atraentes para solução do que o sistema B.4, isto porque para a solução de B.2 e B.3 são necessárias 2 fatorações e 4 fatorações para a solução de B.4.

## Propriedades básicas

Em [33] são apresentadas 4 propriedades bastante importantes relacionadas com os sistemas de equações B.2, B.3 e B.4. Neste apêndice as propriedades serão descritas brevemente, deve-se enfatizar que as mesmas são provadas em [33].

### Propriedade 1

Calcular  $\Delta \underline{Q} - MH^{-1} \Delta \underline{P}$  no ponto  $(\underline{V}, \underline{\theta})$  é aproximadamente equivalente a calcular  $\Delta \underline{Q}$  no ponto  $(\underline{V}, \underline{\theta} + H^{-1} \Delta \underline{P})$ . Consideração análoga pode ser feita para o cálculo de  $\Delta \underline{P} - NL^{-1} \Delta \underline{Q}$ . Esta propriedade advém da expansão em série de Taylor das funções  $\Delta \underline{P}$  e  $\Delta \underline{Q}$ .

### Propriedade 2

Os sistemas de equações B.2, B.3 e B.4 podem ser resolvidos de forma desacoplada sem aproximações adicionais.

Para a solução do sistema B.2 pode ser usado o seguinte algoritmo desacoplado:

$$i) \quad \Delta \underline{\theta}_H = H^{-1} \Delta \underline{P}(\underline{V}, \underline{\theta}) \quad (\text{B.7})$$

$$ii) \quad \Delta \underline{V} = L_{eq}^{-1} \Delta \underline{Q}(\underline{V}, \underline{\theta} + \Delta \underline{\theta}_H) \quad (\text{B.8})$$

$$iii) \quad \Delta \underline{\theta}_N = -H^{-1} N \Delta \underline{V} \quad (B.9)$$

A solução  $\Delta \underline{V}$  e  $\Delta \underline{\theta} = \underline{\theta}_H + \Delta \underline{\theta}_N$  é exata, exceto pela aproximação associada a propriedade 1.

Para a solução do sistema B.3 pode ser utilizado o seguinte algoritmo dual:

$$i) \quad \Delta \underline{V}_L = L^{-1} \Delta \underline{Q}(\underline{V}, \underline{\theta}) \quad (B.10)$$

$$ii) \quad \Delta \underline{\theta} = H_{eq}^{-1} \Delta \underline{P}(\underline{V} + \Delta \underline{V}_L, \underline{\theta}) \quad (B.11)$$

$$iii) \quad \Delta \underline{V}_M = -L^{-1} M \Delta \underline{\theta} \quad (B.12)$$

Onde:  $\Delta \underline{V} = \Delta \underline{V}_L + \Delta \underline{V}_M$

### Propriedade 3

Os valores aproximados dos vetores de correção  $\Delta \underline{\theta}$  e  $\Delta \underline{V}$  podem ser obtidos em um único estágio de cálculo. O equacionamento que demonstra esta propriedade também está descrito em [33].

### Propriedade 4

Esta propriedade, bastante importante, pode ser resumida nos dois enunciados a seguir.

- As matrizes  $L_{eq}$  e  $H_{eq}$  têm aproximadamente (as vezes exatamente) a mesma estrutura das matrizes  $L$  e  $H$  originais.

- O cálculo da matriz  $L_{eq}$  no ponto ( $V = 1,0$  pu,  $\theta = 0$ ) corresponde a substituição da susceptância  $b_{km}$  pelo inverso da reatância  $1/x_{km}$  na posição  $k - m$  da matriz.

Além de sua dedução, em [33] existem vários exemplos que ilustram esta propriedade.

## Algoritmos

### Algoritmo primal

A aplicação das propriedades 1-4 ao sistema de equações B.2 conduz a versão BX do método de fluxo de carga desacoplado rápido. A matriz  $B'$  é a matriz  $H$  calculada no ponto ( $V = 1,0$  pu,  $\theta = 0$ ); os elementos tipo “shunt” não são desprezados nesta matriz - eles não aparecem nas deduções. A matriz  $B''$  é a matriz  $L_{eq}$  no ponto ( $V = 1,0$  pu,  $\theta = 0$ ); elementos tipo “fill-in” são ignorados e  $b_{km}$  é substituído por  $1/x_{km}$ .

O algoritmo primal está descrito a seguir:

$$i) \quad \nu \leftarrow 0 \quad (B.13)$$

$$ii) \quad \Delta \underline{\theta}^\nu = B'^{-1} \Delta \underline{P}(\underline{V}^\nu, \underline{\theta}^\nu) \quad (B.14)$$

$$\begin{aligned} \underline{\theta}^\nu &\leftarrow \underline{\theta}^\nu + \Delta \underline{\theta}^\nu \\ iii) \quad \Delta \underline{V}^\nu &= B''^{-1} \Delta \underline{Q}(\underline{V}^\nu, \underline{\theta}^\nu) \end{aligned} \quad (B.15)$$

$$\underline{V}^\nu \leftarrow \underline{V}^\nu + \Delta \underline{V}^\nu$$

$\nu \leftarrow \nu + 1$  e voltar ao passo *ii*.

### Algoritmo dual

O algoritmo dual origina-se da aplicação das propriedades 1-4 ao sistema de equações B.3. Este algoritmo possui alguns pontos semelhantes a versão XB do FCDR, mas difere da mesma em alguns aspectos. A matriz  $B'$  é igual a matriz  $H_{eq}$  no ponto ( $V = 1,0$  pu,  $\theta = 0$ ); os elementos tipo “fill-in” são ignorados e  $b_{km}$  é substituído por  $1/x_{km}$ . A matriz  $B''$  é dada pela matriz  $L$  calculada no ponto ( $V = 1,0$  pu,  $\theta = 0$ ).

A descrição do algoritmo é a seguinte:

$$i) \quad \nu \leftarrow 0 \quad (B.16)$$

$$ii) \quad \Delta \underline{V}^\nu = B''^{-1} \Delta \underline{Q}(\underline{V}^\nu, \underline{\theta}^\nu) \quad (B.17)$$

$$\underline{V}^\nu \leftarrow \underline{V}^\nu + \Delta \underline{V}^\nu$$

$$iii) \quad \Delta \underline{\theta}^\nu = B'^{-1} \Delta \underline{P}(\underline{V}^\nu, \underline{\theta}^\nu) \quad (B.18)$$

$$\underline{\theta}^\nu \leftarrow \underline{\theta}^\nu + \Delta \underline{\theta}^\nu$$

$$\nu \leftarrow \nu + 1 \text{ e voltar ao passo } ii. \quad (B.19)$$

A versão XB do FCDR é obtida a partir do algoritmo dual se são desprezados os efeitos das barras tipo PV, dos elementos tipo “shunt” e dos taps dos transformadores.

### Vetores de desvios de potência

Em nosso trabalho utilizamos os vetores de desvios de potência ativa e reativa normalizados. Assim os subproblemas ativo e reativo são os definidos a seguir.

$$B' \Delta \underline{\theta} = \Delta \underline{P} / V \quad (B.20)$$

$$B'' \Delta \underline{V} = \Delta \underline{Q} / V \quad (B.21)$$

# Apêndice C

## Método de vetores esparsos

O método de vetores esparsos proposto em [2] é bastante eficiente para a solução de sistemas de equações lineares do tipo  $Ax = b$ . A principal idéia presente no método é o aproveitamento das seguintes situações:

- O vetor independente  $b$  é esparso;
- Necessita-se conhecer apenas parte do vetor incógnito  $x$ .

Em nosso trabalho, implementamos o método de vetores esparsos como uma extensão ao método da bifatoração proposto em [27]. Utilizamos o sistema de armazenagem de matrizes esparsas e determinamos os fatores  $L$ ,  $D$  e  $U$  das matrizes através da metodologia proposta em [27].

### Descrição do método

O método considera que são conhecidos os fatores  $L$ ,  $D$  e  $U$  da matriz de coeficientes  $A$  e que a mesma já se encontra compactamente armazenada.

Equacionando para a obtenção do vetor solução  $x$ , para um dado vetor  $b$ , temos:

$$y = D^{-1} * L^{-1} * b \quad (C.1)$$

$$x = U^{-1} * y \quad (C.2)$$

A equação C.1 define uma seqüência de operações de substituição “forward” (para a frente) em  $LD$ , já a equação C.2 define uma seqüência de operações “backward” (para trás) em  $U$ . Aqui é essencial que as soluções “forward” e “backward” sejam feitas por colunas e por linhas, respectivamente.

Para explorar-se a esparsidade do vetor  $b$ , transforma-se a solução “forward” de C.1 em uma solução “fast-forward” (“forward” rápida, abreviada como FF). Isto é possível porque se  $b$  é esparso, necessita-se apenas de um subconjunto de  $L$  para resolver a equação C.1.

Analogamente, para explorar o fato de desejar-se apenas parte do vetor solução, transforma-se a solução “backward” de C.2 em uma solução “fast-backward” (“backward” rápida, abreviada como FB). Este procedimento é possível porque nesta situação apenas uma parte das linhas de  $U$  é necessária para a solução “backward” de C.2. Note-se que há uma correspondência unívoca entre as colunas da substituição FF com os termos não nulos de  $y$  em C.1 e entre as linhas da substituição FB e o subconjunto desejado de  $x$ , em C.2. A tarefa essencial do método é a identificação eficiente das partes de  $L$  e de  $U$  necessárias para as substituições FF e FB.

## Caminhos de fatoração

Neste método, um caminho de fatoração (ou simplesmente caminho) é uma lista ordenada de colunas de  $L$  para a substituição FF ou de linhas de  $U$  para a substituição FB. Note-se que, devido à simetria estrutural da matriz  $A$ , a estrutura da matriz  $L$  é igual à estrutura da matriz  $U^t$ . Um caminho é percorrido na ordem direta para a substituição FF e na ordem inversa para a substituição FB. Dependendo da aplicação, podem ser usados para as substituições FF e FB dois caminhos diferentes ou um só caminho.

O método define como “singleton” um vetor com apenas um elemento não nulo. Assim, para um “singleton”, com o elemento não nulo na posição  $K$ , obtém-se o caminho de fatoração pela aplicação do seguinte algoritmo:

- 1) Iniciar a lista com a coluna  $K$  de  $L$ .
- 2) Tomar a primeira linha que possua elemento diferente de zero na coluna  $K$  de  $L$ , fazer  $K$  igual ao número da linha e incluir  $K$  na lista.
- 3) Se  $K$  é a última coluna de  $L$ , parar. Caso contrário voltar ao passo 2.

Para elucidação, considere-se o seguinte exemplo, onde a figura mostra a estrutura da matriz  $L$ , correspondente a uma rede de 7 nós.

$$L = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x & x & x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 \\ x & 0 & x & 0 & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & 0 & x & x & 0 \\ x & 0 & 0 & x & x & x & x \end{bmatrix}$$

Figura C.1: Estrutura da matriz  $L$  de uma rede de 7 nós

Obtendo através do algoritmo o caminho para o nó 3, por exemplo, temos:

$$\text{Lista} = 3 - 5 - 6 - 7$$

| Nó | Próximo |
|----|---------|
| 1  | 3       |
| 2  | 3       |
| 3  | 5       |
| 4  | 7       |
| 5  | 6       |
| 6  | 7       |
| 7  | 0       |

Tabela C.1: Caminhos de Fatoração

A implementação do método fica facilitada se é construída uma tabela do tipo “nó - próximo”, onde a coluna “próximo” associa a cada nó o elemento seguinte de seu caminho de fatoração. Ainda no exemplo da figura C.1, tem-se a tabela C.1.

Um valor nulo na coluna “próximo” significa que o nó correspondente a esta posição é o último no grafo dos caminhos de fatoração. Qualquer caminho de fatoração pode ser obtido diretamente da tabela, iniciando pela coluna “K” e prosseguindo usando como guia a coluna “próximo”. No exemplo, o caminho associado ao nó 2 é:

Lista = 2 - 3 - 5 - 6 - 7

Deve-se notar que dependendo da filosofia de ordenação dos nós adotada, a tabela de caminhos pode não ser construída explicitamente.

Um vetor esparso genérico é uma união de um ou mais “singletons”. Assim o seu caminho será a união dos caminhos de seus “singletons” componentes. Para qualquer sistema do tipo  $Ax = b$ , podem ser associados caminhos de fatoração aos vetores  $x$  e  $b$ . Note-se ainda que tais caminhos são uma descrição compacta da estrutura esparsa das matrizes.

Quando o vetor esparso geral é formado por mais de um elemento não nulo, o caminho de fatoração a ele associado é obtido através da aplicação do seguinte algoritmo:

- 1) Tomar o primeiro elemento não nulo do vetor e obter o caminho de fatoração associado ao “singleton” correspondente, da forma descrita anteriormente. Colocar este caminho na lista.
- 2) Tomar o próximo elemento não nulo do vetor que não esteja incluído no caminho de fatoração obtido anteriormente. Obter o caminho de fatoração associado, até que seja encontrado um elemento que já pertença ao caminho de fatoração.
- 3) Anexar este novo caminho obtido no topo da lista (acima da lista já existente).
- 4) Se todos os elementos do vetor já estão na lista, fim. Caso contrário voltar ao passo 2).

Exemplificando novamente com a rede da figura C.1, o caminho associado a um vetor com as posições 3 e 6 não nulas é:

Lista = 3 - 5 - 6 - 7

Pode-se provar que se é seguido o caminho de fatoração na ordem direta na substituição FF e na ordem inversa na substituição FB, obtém-se os mesmos resultados obtidos com outros métodos de solução ([27], por exemplo). Esta prova acha-se em [2], através do estabelecimento da chamada regra de precedência.