

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



ESTUDO SOBRE SELEÇÃO AUTOMÁTICA DE CONTINGÊNCIAS
EM TEMPO REAL PARA SISTEMAS DE POTÊNCIA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

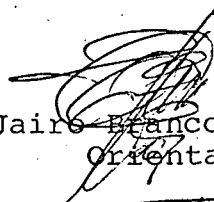
JORGE MARIO CAMPAGNOLO

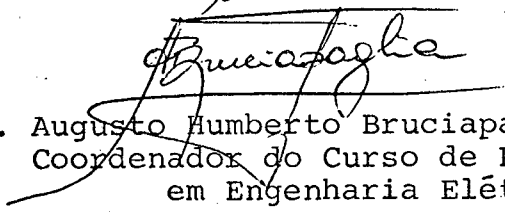
FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO 1984

ESTUDO SOBRE SELEÇÃO AUTOMÁTICA DE CONTINGÊNCIAS EM TEMPO
REAL PARA SISTEMAS DE POTÊNCIA

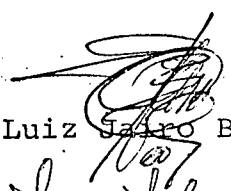
JORGE MARIO CAMPAGNOLO


ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM ENGENHARIA - ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA E APROVADA EM
SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO.

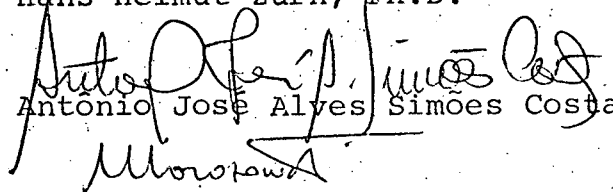

Prof. Luiz Jairo Branco Machado, Dr.Ing.
Orientador

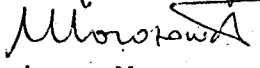

Prof. Augusto Humberto Bruciapaglia, Dr.Ing.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

APRESENTADA PERANTE A BANCA EXAMINADORA, COMPOSTA DOS PROFESSORES:


Prof. Luiz Jairo Branco Machado, Dr.Ing.


Prof. Hans Helmut Zörn, Ph.D.


Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.


Prof. Marciano Morozowsky Filho, M.Sc.


Prof. Carlos Raul Borenstein, M.Sc.

À minha esposa, sem cujo
incentivo teria sido impossível

A meus filhos, objetivo de
uma vida.

A meus pais e irmãos como
gratidão por tudo que fizeram
por mim.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Luiz Jairo Branco Machado, pela inestimável amizade e orientação.

A todos os professores e colegas da Pós-Graduação que de uma forma ou outra contribuíram para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina, a CNEN, CNPq e ao FINEP, pelo apoio financeiro.

RESUMO

CTC
304

Neste trabalho apresenta-se a seleção automática de contingências, situando-a dentro da operação em tempo real de um sistema elétrico de potência.

Trata-se da seleção automática de contingências baseada em índices de desempenho que avaliam a severidade de cada contingência frente a violações na capacidade operativa do sistema. Os principais algoritmos são apresentados, de uma forma tanto quanto possível didática, juntamente com uma maneira para implementá-los em computadores.

Estes algoritmos são aplicados a um exemplo de sistema elétrico de potência e avaliados quanto à precisão numérica a partir de resultados obtidos por um algoritmo que utiliza um fluxo de carga completo.

Em seguida, estes mesmos algoritmos são aplicados a um sistema de potência real e os resultados são apresentados. Várias análises comparativas são feitas e conclusões são obtidas.

A B S T R A C T

In this work the automatic contingency selection is presented in the context of real time operation of an electrical power system.

The work is concerned with the automatic contingency selection based on performance indices that evaluate the severity of each contingency with respect to system operating violation. The main algorithms are presented in a didactical form as much as possible, in addition to a manner of implementing them on digital computers.

These algorithms are applied to a test power system and their results are evaluated in terms of numerical accuracy by comparing them with results obtained by an algorithm using a non-linear power flow.

Afterwards the same algorithms are applied to a real power system, and their results are presented. Several comparative analyses are made and conclusions are drawn.

S U M Á R I O

CAPÍTULO I	- INTRODUÇÃO	1
1.1	- Introdução	1
1.2	- Revisão Bibliográfica	2
1.3	- Objetivos do Trabalho	3
1.4	- Organização do Trabalho	3
CAPÍTULO II	- SELEÇÃO AUTOMÁTICA DE CONTINGÊNCIAS: APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	6
2.1	- Introdução	6
2.2	- Operação em Tempo Real	7
2.3	- Restrições do Sistema	9
2.3.1	- Restrições de Carga	9
2.3.2	- Restrições de Operação	9
2.3.3	- Restrições de Segurança	10
2.4	- Estados Operativos do Sistema	10
2.4.1	- Estado Normal Seguro	10
2.4.2	- Estado Normal Inseguro ou (Alerta)	11
2.4.3	- Estado de Emergência	11
2.4.4	- Estado Restaurativo	11
2.5	- Visualização dos Estados Operativos	11
2.5.1	- Estado Normal Seguro	12
2.5.2	- Estado Normal Inseguro ou (Alerta)	12

2.5.3 - Estado de Emergência	12
2.5.4 - Estado Restaurativo	13
2.6 - Funções de Segurança em Tempo Real	13
2.6.1 - Aquisição de Dados	13
2.6.2 - Estimação de Estado	13
2.6.3 - Monitoração de Segurança	14
2.6.4 - Controle de Emergência	14
2.6.5 - Controle Restaurativo	15
2.6.6 - Análise de Segurança	15
2.6.6.1 - Análise de Contingências	15
2.6.6.2 - Controle Preventivo	16
2.7 - Seleção de Contingências	18
2.8 - Resumo do Capítulo	19

CAPÍTULO III - SELEÇÃO DE CONTINGÊNCIAS POR VIOLAÇÕES DE FLU XO DE POTÊNCIA ATIVA	20
3.1 - Introdução	20
3.2 - Estimativa do Índice de Desempenho pela Série de Taylor	22
3.2.1 - Cálculo da Derivada de Primeira Ordem	24
3.2.2 - Cálculo da Derivada de Segunda Ordem	28
3.2.3 - Cálculo da Derivada de Ordem n	29
3.3 - Estimativa do Índice de Desempenho pelo Fluxo de Potên cia Linearizado	31
3.4 - Resumo do Capítulo	34

CAPÍTULO IV - IMPLEMENTAÇÃO DOS ALGORITMOS PARA SELEÇÃO DE CONTINGÊNCIAS PELO FLUXO MÁXIMO DE POTÊNCIA ATIVA E RESULTADOS OBTIDOS	35
4.1 - Algoritmo Utilizando o Modelo de Fluxo de Potência Linearizado	35
4.1.1. - Formação da Matriz Suscetância do Caso Básico	37
4.1.2 - Fluxo de Potência para o caso Básico	37
4.1.3 - Fatoração da Matriz Suscetância B do Caso Básico e Formação da Matriz Suscetância \hat{B} da Rede Adjunta	37
4.1.4 - Novos Ângulos de Fase das Tensões de Barra da Rede	38
4.1.5 - Cálculo do Índice de Desempenho para cada Contingência	39
4.2 - Algoritmo Utilizando a Série de Taylor	41
4.3 - Resultados Obtidos	41
4.3.1 - Algoritmo Utilizando o Modelo Linearizado	47
4.3.2 - Algoritmo Utilizando Série de Taylor	55
4.4 - Resumo do Capítulo	56
 CAPÍTULO V - SELEÇÃO AUTOMÁTICA DE CONTINGÊNCIAS CONSIDERANDO TENSÃO E POTÊNCIA ATIVA E REATIVA.....	 62
5.1 - Introdução	62
5.2 - Índices de Desempenho	63
5.3 - Implementação do Algoritmo	66
5.3.1 - Alteração das Matrizes B' e B''	68
5.3.2 - Alteração dos Resíduos de Potência	69

5.4	- Resultados Obtidos	71
5.5	- Resumo do Capítulo	73
CAPÍTULO VI - OUTRA TÉCNICA DE SELEÇÃO DE CONTINGÊNCIAS UTILIZANDO CRITÉRIOS DE TENSÃO		79
6.1	- Introdução	79
6.2	- Índice de Desempenho	79
6.3	- Implementação do Algoritmo	83
6.4	- Resultados	84
6.5	- Resumo do Capítulo	86
CAPÍTULO VII - APLICAÇÃO DOS ALGORITMOS A UM SISTEMA REAL .		87
7.1	- Introdução	87
7.2	- Sistema Exemplo	87
7.3	- Resultados Obtidos	94
7.4	- Atribuição de Pesos	100
7.5	- Conclusão sobre a Aplicação dos Algoritmos a um Sistema Real	101
CAPÍTULO VIII - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS		103
8.1	- Introdução	103
8.2	- Conclusões	103
8.3	- Sugestões para Futuros Trabalhos	105

ANEXO A - FORMAÇÃO DA MATRIZ SUSCETÂNCIA B	107
ANEXO B - FLUXO DE CARGA LINEARIZADO	109
ANEXO C - LEMA DA MATRIZ INVERSA	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

C A P Í T U L O I

INTRODUÇÃO

1.1. Introdução

O sistema elétrico de potência é constituído com o objetivo de atender aos consumidores dentro de padrões que definem uma boa qualidade de serviço, ou seja, não deve haver interrupções de fornecimento da energia, e tanto a tensão como a frequência devem estar dentro de limites aceitáveis. Além disso os equipamentos de geração e transmissão não devem normalmente trabalhar acima de suas capacidades nominais, e o custo da energia produzida deve ser o menor possível.

Para alcançar estes objetivos, conta-se com modernos centros de controle que incorporam atualmente meios que permitem a avaliação da segurança do sistema em tempo real. Dentre as funções da análise de segurança destaca-se a análise de contingências que estuda os possíveis efeitos da ocorrência de uma contingência, a qual faz parte de uma lista de contingências pré-selecionadas, sobre o estado operativo do sistema. Esta lista deve ser limitada e confiável, pois o tempo de processamento disponível é reduzido, e é necessário que as contingências que causam os mais sérios problemas ao sistema, pelo menos, façam parte da lista. Algoritmos de seleção automática de contingências têm sido utilizados para esta

finalidade. Estes algoritmos ordenam as contingências a partir do cálculo de índices de desempenho que indicam a severidade de cada contingência com base nas violações de limites operativos do sistema, tratando em geral somente contingências simples do tipo saída de linha ou transformador.

1.2. Revisão Bibliográfica

Um dos primeiros trabalhos, do qual se tem conhecimento, tratando da seleção automática de contingências a partir de índices de desempenho é atribuído a Wollenberg e Ejebe [7] datando de 1979. Em seguida foram publicados vários trabalhos baseando-se no primeiro, onde procurou-se novas maneiras de estimar os índices de desempenho para cada contingência. Destacam-se os trabalhos de Sasson, Irisarri e Levner [8] datando de 1979, de Wollenberg e Mikolinas [9] e de Irisarri e Sasson [10], estes dois últimos datando de 1981. Albuyeh em 1980 [21] propõe a utilização da matriz sensibilidade na seleção automática de contingências. Ainda em 1980, Van Horne [22] utiliza o conceito de "Capacidade de Suprimento de Carga" para listar as contingências mais críticas, dentro do contexto do planejamento da transmissão onde também se utiliza dos algoritmos de seleção automática de contingências para diminuir o número de alternativas possíveis a serem examinadas em cada variante de expansão da transmissão. Em 1982 Albuyeh, Bose e Heath [11] alteram os índices propostos por Wollenberg e propõem uma nova maneira para a estimativa dos índices de desempenho utilizando a primeira iteração do método de Newton Desaco

plado-Rápido [4]. No trabalho de Midicherla e Rastogi [17], também em 1982, é proposto um novo índice de desempenho para seleção automática de contingências. Este índice é calculado a partir das variações do módulo da tensão de barra que ocorrem para cada contingência em relação ao caso básico. Mais recentemente, em 1983, Vemuri e Usher [23] propõem uma nova maneira de seleção automática de contingências utilizando os fatores de distribuição. No artigo os autores propõem a inclusão de contingências secundárias decorrentes de uma certa contingência e que aumentam o grau de severidade da mesma.

1.3. Objetivos do Trabalho

O objetivo deste trabalho é estudar os principais algoritmos de seleção automática de contingências para a análise de contingências em tempo real. O trabalho se propõe a apresentar, de uma forma didática, os diversos algoritmos existentes [7], [10], [11] [17], bem como uma maneira de implementá-los em computadores.

Resultados são obtidos e comparações entre as diversas ordenações de contingências são apresentadas com as conclusões correspondentes.

1.4. Organização do Trabalho

No Capítulo 2, apresentam-se noções sobre operação em tempo real de um sistema elétrico de potência. A seleção automática de contingências é situada dentro do contexto da operação

em tempo real.

No Capítulo 3 faz-se o estudo de dois algoritmos de seleção automática de contingências baseados num índice de desempenho que leva em conta violações nos limites máximos de fluxo de potência ativa nas linhas. O primeiro faz a estimativa do índice de desempenho para cada contingência a partir da expansão em série de Taylor em torno do caso básico. O segundo utiliza a solução do fluxo de potência linearizado no cálculo do índice de desempenho para cada contingência. No Capítulo 4 implementam-se os algoritmos acima. Os resultados obtidos com esses programas são apresentados ao final do mesmo.

No Capítulo 5 apresenta-se um índice de desempenho que leva em conta as tensões de barra e as injeções de potência reativa nas barras de geração. Implementa-se também um algoritmo para seleção automática de contingências utilizando a primeira iteração do método de Newton Desacoplado-Rápido no cálculo do estado do sistema para cada contingência. Na alteração da matriz suscetância do referido método utiliza-se uma subrotina que faz as alterações diretamente na matriz fatorada, não havendo necessidade de uma nova fatoração.

No Capítulo 6 implementa-se um algoritmo para seleção automática de contingências baseando-se num índice que leva em conta as variações de tensão que ocorrem relativamente ao caso básico. Para o cálculo do estado do sistema para cada contingência utiliza-se, como no Capítulo 5, a primeira iteração do método de Newton Desacoplado-Rápido.

No Capítulo 7 estes algoritmos são aplicados sobre

um conjunto de dados correspondendo a um sistema real (SISTEMA-SUL reduzido)|24|.

Finalmente no Capítulo 8, apresentam-se as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

C A P Í T U L O I I

SELEÇÃO AUTOMÁTICA DE CONTINGÊNCIAS:

APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

2.1. Introdução

A condução de um sistema elétrico de potência é realizada cada vez mais por modernos centros de controle que reúnem elementos para tratamento e apresentação dos dados adquiridos pelo sistema de medição e canais de comunicação para transferência de dados e comandos às diferentes partes da rede. Esses centros são dotados de computadores para tratamento deste dados em diferentes níveis lógicos e visando resolver diversos problemas de interesse da operação através de uma cadeia informática coerente de programas previamente desenvolvidos. Apresentam também interfaces entre o homem e a máquina que permitem que o diálogo entre os meios de cálculo e os operadores se realize em modo conversacional. A meta destes centros de controle é zelar para que se cumpram, da maneira mais adequada possível, os objetivos de um sistema elétrico de potência (ver item 1.1).

Para atingir tais objetivos dispõe-se em geral de três tipos de funções nestes centros de controle:

- 1^a) Controle de Geração - que é realizado pelo controle automático de geração (CAG), controlando a frequência, os flu

xos de intercâmbio e a participação das unidades de produção, através do despacho econômico automático, no atendimento da demanda.

2^a) Sistema Supervisório - pela qual as informações sobre o estado atual do sistema são transferidas ao centro de controle para processamento e apresentação ao operador via canais de comunicação, que servem também para enviar ordens de comando que se transformarão em ações de controle remoto sobre órgãos da rede.

3^a) Operação em Tempo Real - que funciona como uma extensão do sistema supervisório e que permite a execução de um conjunto de funções que visam fornecer ao operador subsídios para a manutenção da segurança do sistema.

2.2. Operação em Tempo Real

O fluxograma da figura 2.1 sintetiza as funções da operação em tempo real de um sistema de potência |1| |2|. As funções de segurança em tempo real são resumidas no item 2.6. Para uma melhor compreensão do fluxograma novas definições são apresentadas a seguir.

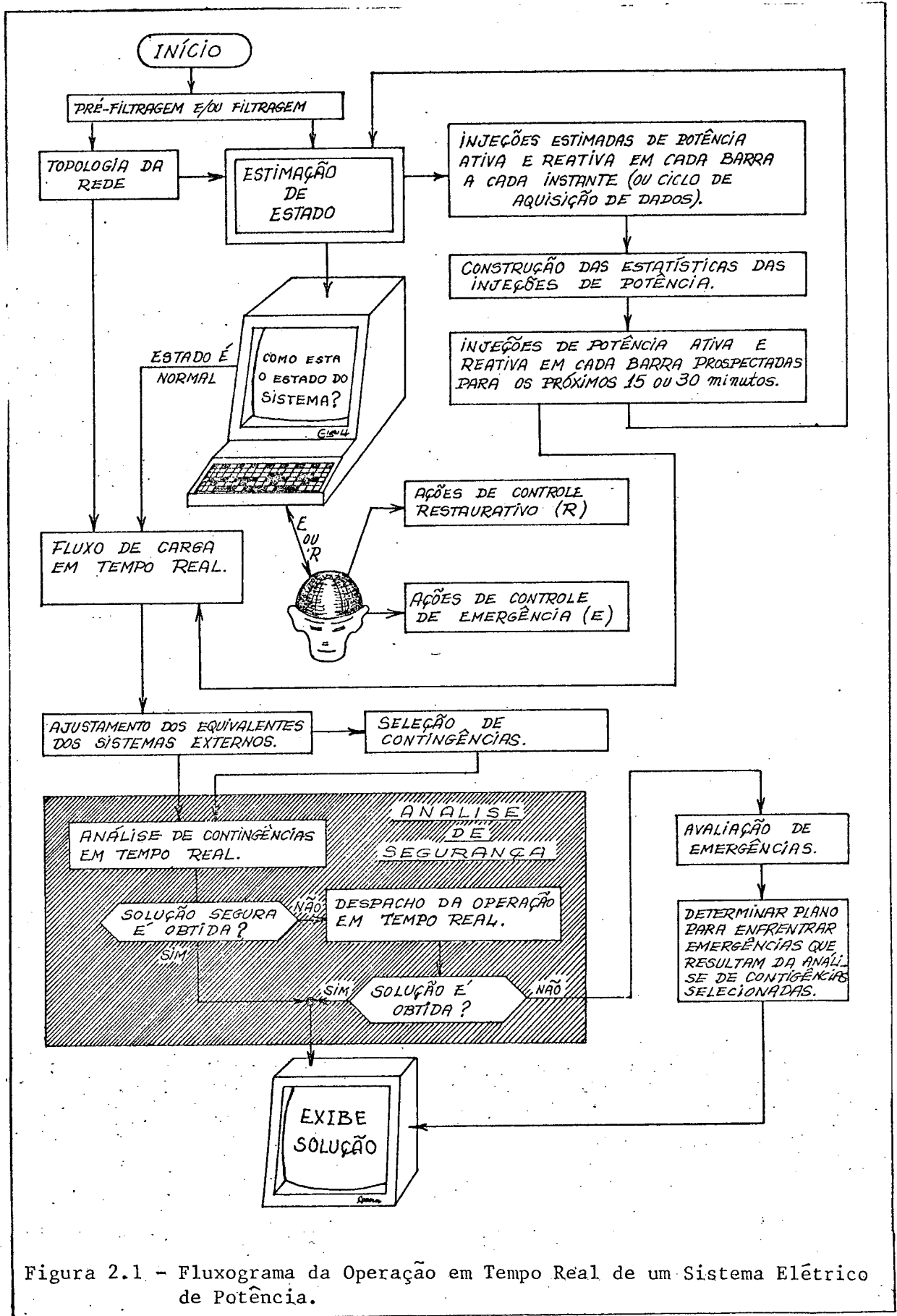


Figura 2.1 - Fluxograma da Operação em Tempo Real de um Sistema Elétrico de Potência.

2.3. Restrições do Sistema

Os objetivos de um sistema de potência, podem ser, formulados em termos de restrições matemáticas como segue. |1|, |2|, |3|, |4|.

2.3.1. Restrições de Carga

Basicamente as restrições de carga podem ser descritas por uma equação física que garanta, que as cargas sejam supridas pela geração do sistema. Em termos matemáticos, tem-se:

$$G(x,u,T) = 0 \quad (2.1)$$

onde,

x = variáveis dependentes ou de estado;

u = variáveis independentes ou de controle;

T = topologia do sistema, variável funcional que representa a relação de dependência das variáveis de estado em relação as variáveis de controle.

2.3.2. Restrições de Operação

As restrições de operação impõem limites aos módulos

de tensão nas barras de carga, às injeções de potência reativa nas barras de geração e aos fluxos de potência aparente em linhas e transformadores.

Matematicamente podem ser expressos da seguinte forma:

$$H(x,u,T) \leq 0 \quad (2.2)$$

onde, x,u,T foram definidos acima.

2.3.3. Restrições de Segurança

As restrições de segurança exigem, que todas as restrições de carga e operação sejam obedecidas, mesmo após a ocorrência de cada uma das contingências de uma lista previamente selecionada. Podem ser expressas por inequações do tipo:

$$S(x,u,T) \leq 0 \quad (2.3)$$

onde, x,u,T foram definidos anteriormente.

2.4. Estados Operativos do Sistema |1|, |2|, |3|, |4|

2.4.1. Estado Normal Seguro

São obedecidos os três conjuntos de restrições: de

carga, de operação e de segurança.

2.4.2. Estado Normal Inseguro (ou Alerta)

São obedecidas as restrições de carga e de operação, mas nem todas as restrições de segurança são obedecidas.

2.4.3. Estado de Emergência

Quando pelo menos uma das restrições de operação deixa de ser obedecida.

2.4.4. Estado Restaurativo

As restrições de operação são obedecidas, mas pelo menos uma das restrições de carga não é obedecida.

2.5. Visualização dos Estados Operativos

Para melhor entendimento, pode-se representar os estados operativos de sistema por figuras. Representa-se as restrições por um politopo, que é uma superfície n-dimensional limitada pelas restrições do sistema. Assim tem-se:

2.5.1. Estado Normal Seguro

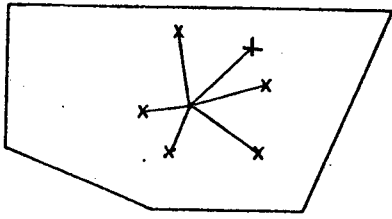


Figura 2.2. Estado Normal Seguro.

O ponto de operação do sistema está situado no interior do politopo, para todas as contingências mais graves que possam ocorrer. Em outras palavras, para cada contingência analisada o sistema está satisfazendo todas as restrições.

2.5.2. Estado Normal Inseguro (ou de Alerta)

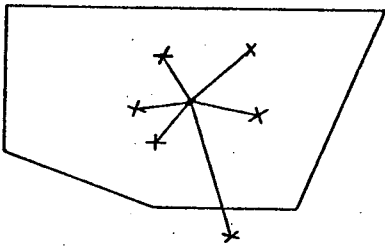


Figura 2.3. Estado de Alerta.

Quando em pelo menos uma contingência, o ponto de operação situa-se fora dos limites do politopo.

2.5.3. Estado de Emergência

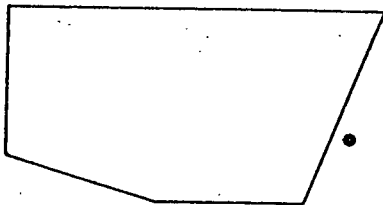
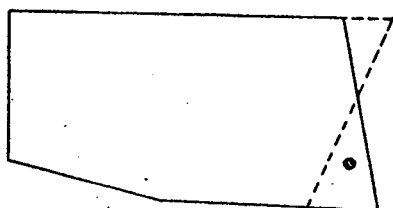


Figura 2.4. Estado de Emergência.

O ponto de operação do sistema está situado fora dos limites do politopo.

2.5.4. Estado Restaurativo



O ponto de operação, situa-se no interior do politopo, mas é um politopo modificado, pois alguma carga não está sendo atendida.

Figura 2.5. Estado Restaurativo.

2.6. Funções de Segurança em Tempo Real

2.6.1. Aquisição de Dados

Medidas dos módulos e ângulos das tensões de barra, fluxos de potência de linhas, bem como dados referentes à topologia do sistema, são continuamente recebidos pelo centro de controle. Esses dados são recebidos em tempo real, desde medições apropriadamente distribuídas, sobre a rede e através do sistema de telemidições. Essas medidas passam por uma pré-filtragem, onde os valores com erros acima de 30σ são eliminados [20], onde σ é o desvio padrão da medida.

2.6.2. Estimação de Estado

O objetivo do estimador de estado é determinar os módulos e fases das tensões de barra do sistema de modo confiável. Os dados do sistema pré-filtrados ainda não estão isentos de

erros, por isso se tem interesse em submetê-los a um tratamento que elimine erros grosseiros (10σ a 20σ) e permita completar com pseudomedidas a observação de estado da rede. Este tratamento usa as técnicas dos mínimos quadrados e para realizá-lo necessita-se de uma certa redundância de medidas. Testes sobre a topologia da rede e a observabilidade de sistema devem ser previamente realizados. A estimação de estado é completada através de testes de hipótese sobre as variâncias dos valores do módulo e ângulo das tensões de barra. Ao final destes testes, têm-se as melhores estimativas para os componentes de vetor de estado, dentro dos limites de confiança adotados.

2.6.3. Monitoração de Segurança

Com as informações vindas da estimação de estado faz-se o processamento dos dados pelo computador e, através de terminais ou outros meios de interação homem-máquina, apresentam-se os resultados ao operador, que será informado sobre o estado operativo atual do sistema da forma mais completa possível.

2.6.4. Controle de Emergência

Este controle é acionado quando o sistema está em estado de emergência. Pode-se dividir o controle de emergência em dois modos, o modo corretivo e o modo de crise. No primeiro caso,

uma violação de limites pode ser eliminada por ações de controle, envolvendo por exemplo remanejamento da geração, variação de tensões controladas ou taps de transformador. Neste modo de atuação do controle de emergência o atendimento da demanda não é sacrificado. No caso do modo de crise, há necessidade de desligamentos de cargas, levando o sistema para o estado restaurativo.

2.6.5. Controle Restaurativo

Tem como função religar as cargas e os circuitos desligados durante uma emergência. Ações deste tipo podem levar a problemas de estabilidade transitória. Para evitar problemas deste tipo, costuma-se testar, em modelos, as ações de controle antes de executá-las.

2.6.6. Análise de Segurança

A análise de segurança compreende duas etapas, análise de contingências e controle preventivo.

2.6.6.1. Análise de Contingências

O objetivo desta análise, é avaliar se o estado normal é seguro ou inseguro. Esta função pode ser executada para as

condições atuais ou previstas do sistema, automaticamente ou por solicitação do operador.

No caso de situações previstas, tem-se um sistema com a topologia atual e injeções de potência projetados, para 15 a 30 minutos, com base nas últimas tendências. Este sistema, chamado caso básico, é solucionado através de um modelo de fluxo de potência, proporcionando uma solução inicial e condições para o ajuste dos equivalentes externos.

De posse de todos esses dados faz-se uma análise para cada contingência da lista, permitindo a classificação do estado operativo do sistema submetido à contingência.

2.6.6.2. Controle Preventivo

O controle preventivo é realizado quando o sistema está no estado normal inseguro. A maneira de executar este controle é pela alteração do ponto de operação, por ações do tipo mudança de geração, mudança na topologia de sistema, alteração em taps de transformadores e etc., fazendo com que para todas as contingências o sistema fique normal.

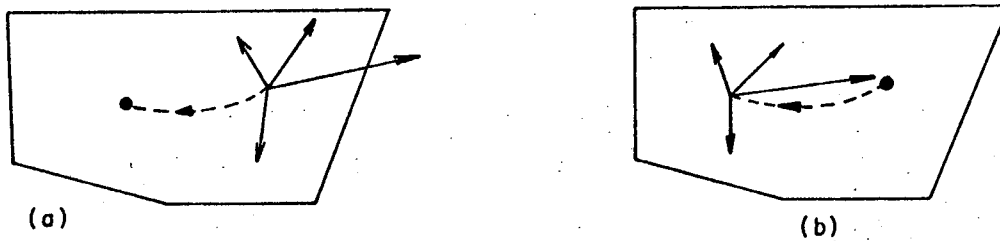


Figura 2.6 - Visualização do Controle Preventivo

- a) Sistema antes do controle preventivo
- b) Sistema após o controle preventivo.

Em determinadas circunstâncias, pode não ser possível levar o sistema para um estado normal seguro, através das ações programadas para mudar o ponto de operação como citado acima. Ocorrendo isso, o controle preventivo deve admitir um plano de emergência em que cortes de cargas são previstos.

O controle preventivo deve apresentar soluções ao operador, com uma boa margem de tempo. No caso da ocorrência de alguma contingência que deixa o sistema em estado de emergência o operador já deverá saber que tipo de ação tomar para tirar o sistema desse estado.

2.7. Seleção de Contingências

Na análise de contingências é praticamente impossível estudar todos os eventos possíveis de ocorrer. Essa limitação é proporcionada não só pelo tempo disponível ser muito reduzido para realizar este estudo, mas também pelos enormes custos computacionais que adviriam ao adotar-se a prática de um exame exaustivo de todas contingências possíveis. Em vista deste fato, deve-se constituir uma lista limitada de contingências a serem analisadas. Um grande número de contingências possíveis de ocorrer não afetam a segurança do sistema, não havendo necessidade de figurar na lista de contingências. Uma forma ainda hoje utilizada para seleção de contingências é recorrer à intuição do operador que vai escolhê-las, baseando-se no conhecimento que adquiriu do comportamento do sistema frente a situações que têm, pela sua intuição, boas chances de ocorrer. Intuitivamente mesmo, há de se convir que este tipo de seleção não é confiável. É bastante possível que alguma contingência importante fique fora da lista.

Neste trabalho, apresenta-se um estudo dos principais métodos para seleção automática de contingências simples. O trabalho se limitou ao estudo da seleção de contingências do tipo saída de linha ou transformador. A seleção de contingências do tipo saída de geração não é tratada neste trabalho.

O ponto de partida deste estudo foi a avaliação das contingências, através de índices de desempenho que possibilitem uma avaliação da severidade relativa entre diversas contingências. Os índices aqui estudados valem para o regime permanente e levam

em conta fluxos nas linhas e transformadores, tensões nas barras e geração de reativos. Estes índices permitem ordenar e selecionar as contingências mais significativas no sentido de submetê-las posteriormente a um estudo mais detalhado e completo de análise de contingências a um número menor de casos.

2.8. Resumo do Capítulo

Neste capítulo foram apresentadas diversas definições de interesse para o estudo e procurou-se situar a seleção automática de contingências, que é o objetivo maior do trabalho aqui desenvolvido, dentro do contexto da operação em tempo real de um sistema de potência.

C A P Í T U L O I I I

SELEÇÃO DE CONTINGÊNCIAS POR VIOLAÇÕES DE
LIMITES DE FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA3.1 - Introdução

Neste capítulo serão abordados dois métodos de seleção de contingências, que levam em conta violações de fluxo de potência ativa.

As linhas de transmissão e transformadores de um sistema estão sujeitos a limitações no fluxo de potência que passa pelos mesmos. Essas limitações podem ser devidas ao limite térmico da linha, quando a capacidade de corrente da linha é superada, ou a problemas de estabilidade, como no caso de linhas longas, em que a abertura angular máxima pode ser ultrapassada antes que seja superada a capacidade de corrente. Cálculos completos [4] [5], para verificação da ultrapassagem de um ou de outro destes limites, envolvem tempos de cálculo incompatíveis com os tempos disponíveis na operação em tempo real. Uma maneira simplificada de avaliar a severidade de cada contingência é medir, através de um índice apropriado, as violações de limites operativos e técnicos que ocorrem no sistema. Em [7] é definido um índice que leva em consideração os limites de trânsito sobre uma linha qualquer. O índice é definido como segue abaixo:

$$J(T) \triangleq \sum_{\ell=1}^{NL} \frac{\omega_{\ell}}{M} \left(\frac{|T_{\ell}|}{\bar{T}_{\ell}} \right)^M \quad (3.1)$$

T_{ℓ} = fluxo de potência ativa da linha ℓ

\bar{T}_{ℓ} = limite de fluxo de potência ativa da linha ℓ

NL = número de linhas do sistema

ω_{ℓ} = coeficiente de peso (real não-negativo) que pode ser usado para refletir a importância de determinadas linhas.

M = constante arbitrada.

Este índice, portanto, é calculado como a soma dos carregamentos relativos das linhas ℓ , elevados a uma potência M determinada, com as diversas parcelas ponderadas através de coeficientes de peso ω_{ℓ} convenientemente selecionados.

Analisando a forma de definição do índice (3.1), vê-se que é necessário determinar o fluxo de potência ativa em cada linha, após cada contingência. Estes resultados devem ser obtidos de um modo rápido e suficientemente preciso, de forma que se justifique a utilização do índice para seleção automática de contingências em tempo real.

A seguinte convenção foi utilizada no que segue:

NB = número de barras do sistema

P = vetor das injeções de potência ativa nas barras, excluída a barra de folga.

B = matriz suscetância, sem a barra de folga (Apêndice A)

B_{ij} = elemento da linha i e coluna j da matriz B

δ = vetor dos ângulos de fase das tensões de barra

θ_k = diferença angular da linha k

$$\theta_k = \delta_i - \delta_j \quad (3.2)$$

i - barra inicial da linha k

j - barra final da linha k

T_k = fluxo de potência ativa da linha k

b_k = suscetância da linha k

$$b_k = -B_{ij} \quad (3.3)$$

M_ℓ = vetor coluna de ordem $(NB-1) \times 1$, excluída a barra de folga, com valores nulos exceto para os elementos correspondentes à barra inicial da linha ℓ e à barra final da linha ℓ que valem $+1$ e -1 respectivamente.

3.2 - Estimativa do Índice de Desempenho pela Série de Taylor

Uma maneira de estimar o índice de desempenho, sem a necessidade de calcular um novo fluxo de carga a cada nova contingência, é a utilização da expansão em série de Taylor, em torno do caso básico, que permite calcular o índice a partir da cor

respondente variação na admitância de uma linha em contingência |7|, |8|, |9|, |10|.

Da equação (3.1) fazendo o coeficiente de peso unitário ($\omega_\ell = 1$) e adotando $M = 2$, tem-se:

$$J(T) = \sum_{j=1}^{NL} 1/2 \left(\frac{T_j}{\bar{T}_j} \right)^2 \quad (3.4)$$

O coeficiente de peso ω_ℓ que permite dar maior importância a determinadas linhas, comumente é determinado pelo operador, baseando-se no conhecimento do comportamento do sistema sob contingência. Neste trabalho considerou-se que todas as linhas têm a mesma importância e desta maneira adotou-se ω_ℓ unitário. No capítulo VII o coeficiente de peso ω_ℓ , entretanto, merecerá uma atenção particular.

Pela expansão em série de Taylor, chega-se a uma estimativa de índice de desempenho a partir do caso básico, para cada contingência, dada por:

$$J(T_\ell) = J(T_0) + \sum_{n=1}^N \frac{(\Delta b_\ell)^n}{n!} \frac{\partial^n [J(T)]}{(\partial b_\ell)^n} \quad (3.5)$$

$J(T_0)$ = índice de desempenho para o caso básico

$J(T_\ell)$ = estimativa do índice de desempenho após a alteração da suscetância da linha ℓ

Δb_ℓ = variação da suscetância da linha ℓ , correspondente à perda da linha ℓ , $\Delta b_\ell = -b_\ell$

$$\frac{\partial^n [J(T)]}{(\partial b_\ell)^n} = n\text{-ésima derivada do índice de desempenho em relação à suscetância da linha } \ell$$

N = indicação da derivada de maior ordem na série.

3.2.1 - Cálculo da Derivada de Primeira Ordem

$$\text{Tem-se: } \frac{\partial J(T)}{\partial b_\ell} = \sum_{j=1}^{NL} \frac{\partial J(T)}{\partial |T_j|} \frac{\partial |T_j|}{\partial b_\ell} \quad (3.6)$$

onde $\frac{\partial J(T)}{\partial |T_j|}$ é obtido diretamente de (3.4), resultando:

$$\frac{\partial J(T)}{\partial |T_j|} = \frac{|T_j|}{(\bar{T}_j)^2} \quad (3.7)$$

Do modelo de fluxo de potência linearizado (ANEXO

B), tem-se:

$$P = B \delta \quad (3.8)$$

$$\theta_\ell = M_\ell^T \delta \quad (3.9)$$

$$T_\ell = b_\ell \theta_\ell \quad (3.10)$$

onde $P, B, \delta, \theta_\ell, M_\ell, b_\ell$ e T_ℓ foram definidos no item 3.1.

A partir de (3.10) tem-se:

$$\frac{\partial |T_j|}{\partial b_\ell} = \begin{cases} \text{sinal}(T_j) b_j \frac{\partial \theta_j}{\partial b_\ell}, & \text{para } j \neq \ell \\ \text{sinal}(T_\ell) (\theta_\ell + b_\ell \frac{\partial \theta_\ell}{\partial b_\ell}), & \text{para } j = \ell \end{cases} \quad (3.11)$$

onde $\text{sinal}(T_k)$ é uma função que vale +1, se o argumento T_k é maior ou igual a zero, e -1 se o argumento T_k é menor que zero.

De (3.8) e (3.9) obtém-se:

$$\theta_j = M_j^T \delta \quad (3.12)$$

$$\delta = B^{-1} P \quad (3.13)$$

$$\theta_j = M_j^T B^{-1} P \quad (3.14)$$

A partir de (3.14):

$$\frac{\partial \theta_j}{\partial b_\ell} = M_j^T (B^{-1} \frac{\partial P}{\partial b_\ell} + \frac{\partial B^{-1}}{\partial b_\ell} P) \quad (3.15)$$

P é constante e não depende de b_ℓ , logo:

$$\frac{\partial P}{\partial b_\ell} = 0 \quad (3.16)$$

Então de (3.15) tem-se:

$$\frac{\partial \theta_j}{\partial b_\ell} = M_j^T \frac{\partial B^{-1}}{\partial b_\ell} P \quad (3.17)$$

Lembrando que:

$$B B^{-1} = I \quad (3.18)$$

tem-se:

$$\frac{\partial B}{\partial b_\ell} B^{-1} + B \frac{\partial B^{-1}}{\partial b_\ell} = 0 \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial B^{-1}}{\partial b_\ell} = -B^{-1} \frac{\partial B}{\partial b_\ell} B^{-1} \quad (3.20)$$

$$e \quad \frac{\partial B}{\partial b_\ell} = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_{11}}{\partial b_\ell} & \dots & \frac{\partial B_{1n}}{\partial b_\ell} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial B_{n1}}{\partial b_\ell} & \dots & \frac{\partial B_{nn}}{\partial b_\ell} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Pela análise da lei de formação da matriz B (ANEXO A), tem-se:

$$\frac{\partial B}{\partial b_\ell} = M_\ell M_\ell^T \quad (3.22)$$

substituindo (3.22) em (3.20) tem-se:

$$\frac{\partial B^{-1}}{\partial b_\ell} = -B^{-1} M_\ell M_\ell^T B^{-1} \quad (3.23)$$

Substituindo (3.23) em (3.17) obtem-se:

$$\frac{\partial \theta_j}{\partial b_\ell} = -M_j^T B^{-1} M_\ell M_\ell^T B^{-1} P \quad (3.24)$$

e a partir de (3.12) e (3.13) resulta:

$$\frac{\partial \theta_j}{\partial b_\ell} = -(M_j^T B^{-1} M_\ell) \theta_\ell \quad (3.25)$$

Substituindo (3.25) em (3.11) obtêm-se agora:

$$\frac{\partial |T_j|}{\partial b_\ell} = \begin{cases} -\text{sinal}(T_j) (M_j^T B^{-1} M_\ell) b_j \theta_\ell, & \text{para } j \neq \ell \\ \text{sinal}(T_\ell) [1 - b_\ell (M_\ell^T B^{-1} M_\ell)] \theta_\ell, & \text{para } j = \ell \end{cases} \quad (3.26)$$

Em seguida, substituindo: (3.26) em (3.6), finalmente tem-se:

$$\frac{\partial J(T)}{\partial b_\ell} = \text{sinal}(T_\ell) \frac{\partial J(T)}{\partial |T_\ell|} \theta_\ell - \theta_\ell \sum_{j=1}^{NL} \frac{\partial J(T)}{\partial |T_j|} \text{sinal}(T_j) (M_j^T B^{-1} M_\ell) b_j \quad (3.27)$$

3.2.2. Cálculo da derivada de Segunda Ordem

A derivada de segunda ordem é obtida a partir de (3.6) pela regra da cadeia de derivação [18].

$$\frac{\partial^2 J(\mathbf{T})}{\partial b_\ell^2} = \sum_{j=1}^{NL} \left[\frac{\partial J(\mathbf{T})}{\partial |\mathbf{T}_j|} \frac{\partial^2 |\mathbf{T}_j|}{\partial b_\ell^2} + \frac{\partial^2 J(\mathbf{T})}{\partial |\mathbf{T}_j|^2} \left(\frac{\partial |\mathbf{T}_j|}{\partial b_\ell} \right)^2 \right] \quad (3.28)$$

Partindo de (3.26) resulta:

$$\frac{\partial^2 |\mathbf{T}_j|}{\partial b_\ell^2} = \begin{cases} -\text{sinal}(\mathbf{T}_j) (M_j^T \frac{\partial B^{-1}}{\partial b_\ell} M_\ell) b_j \theta_\ell - \text{sinal}(\mathbf{T}_j) (M_j^T B^{-1} M_\ell) \frac{\partial \theta_\ell}{\partial b_\ell} b_j, & \text{para } j \neq \ell \\ \text{sinal}(\mathbf{T}_\ell) \left[\frac{\partial \theta_\ell}{\partial \theta_\ell} - (M_\ell^T \frac{\partial B^{-1}}{\partial b_\ell} M_\ell) b_\ell \theta_\ell + M_\ell^T B^{-1} M_\ell \theta_\ell + M_\ell^T B^{-1} M_\ell b_\ell \frac{\partial \theta_\ell}{\partial b_\ell} \right], & \text{para } j = \ell \end{cases} \quad (3.29)$$

substituindo (3.23) e (3.25) em (3.29) o resultado é o seguinte:

$$\frac{\partial^2 |\mathbf{T}_j|}{\partial b_\ell^2} = \begin{cases} 2 \text{sinal}(\mathbf{T}_j) (M_\ell^T B^{-1} M_\ell) (M_\ell^T B^{-1} M_j) b_j \theta_\ell, & \text{para } j \neq \ell \\ -2 \text{sinal}(\mathbf{T}_\ell) M_\ell^T B^{-1} M_\ell \left[1 - (M_\ell^T B^{-1} M_\ell) b_\ell \right] \theta_\ell, & \text{para } j = \ell \end{cases} \quad (3.30)$$

substituindo (3.30) em (3.28), então:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 J(\mathbf{T})}{\partial b_\ell^2} &= 2 (M_\ell^T B^{-1} M_\ell) \theta_\ell \left[\sum_{j=1}^{NL} \frac{\partial J(\mathbf{T})}{\partial |T_j|} \operatorname{sinal}(T_j) (M_\ell^T B^{-1} M_j) b_j \right] - \\
&- 2 \operatorname{sinal}(T_\ell) \frac{J(\mathbf{T})}{\partial |T_\ell|} M_\ell^T B^{-1} M_\ell \theta_\ell + \theta_\ell^2 \left[\sum_{j=1}^{NL} \frac{\partial^2 J(\mathbf{T})}{\partial |T_j|^2} \operatorname{sinal}^2(T_j) (M_j^T B^{-1} M_\ell)^2 b_j^2 \right] + \\
&+ \operatorname{sinal}^2(T_\ell) \theta_\ell^2 \frac{\partial^2 J(\mathbf{T})}{\partial |T_\ell|^2} [1 - 2b_\ell (M_\ell^T B^{-1} M_\ell)] \quad (3.31)
\end{aligned}$$

3.2.3. Cálculo da derivada de ordem η

Por indução matemática, a partir de (3.11) e (3.26), chega-se a:

$$\frac{\partial^\eta |T_j|}{\partial b_\ell^\eta} = \begin{cases} (-1)^\eta \eta! \operatorname{sinal}(T_j) (M_\ell^T B^{-1} M_\ell)^{\eta-1} (M_\ell^T B^{-1} M_j) b_j \theta_\ell & \text{para } j \neq \ell \\ (-1)^{\eta-1} \eta! \operatorname{sinal}(T_\ell) (M_\ell^T B^{-1} M_\ell) \left[1 - (M_\ell^T B^{-1} M_\ell) b_\ell \right] \theta_\ell & \text{para } j = \ell \end{cases} \quad (3.32)$$

Pelo mesmo procedimento visto anteriormente, utilizando (3.32), chega-se às derivadas de terceira ordem, quarta ordem e assim sucessivamente, do índice (3.4) em relação a suscetância da linha em contingência. Uma lei de formação é obtida e expressa por:

$$\frac{\partial^n J(T)}{\partial b_\ell^n} = (-1)^{\eta-1} \eta! (M_\ell^T B^{-1} M_\ell)^{\eta-2} \theta_\ell \{ (M_\ell^T B^{-1} M_\ell) \left[\text{sign}(|T_\ell|) \frac{\partial J(T)}{\partial |T_\ell|} - \hat{\theta}_\ell \right] \right. \\ \left. - \left(\frac{\eta-1}{2} \right) \theta_\ell \left[\frac{\partial^2 J(T)}{\partial |T_\ell|^2} (1 - 2 M_\ell^T B^{-1} M_\ell b_\ell) + M_\ell^T B^{-1} \hat{B} B^{-1} M_\ell \right] \right\} \quad (3.33)$$

Na expressão acima, foram usadas novas grandezas com o intuito de simplificar a equação matemática (3.33). Estas grandezas são apresentadas a seguir, mas antes de defini-las será importante definir o que se entende por rede adjunta neste trabalho.

Definição: Rede Adjunta

Uma rede qualquer \hat{T} é denominada adjunta de uma outra, T , se tiver a mesma topologia daquela, não importando os valores de impedância, nem os valores de injeções de potência.

Define-se então as grandezas auxiliares:

$$\hat{B} \triangleq \sum_{j=1}^{NL} \left[\left(\frac{1}{T_j} \right)^2 b_{j,j}^2 M_j M_j^T \right] \quad (3.34)$$

$$\hat{P} \triangleq \sum_{j=1}^{NL} \left[\left(\frac{T_j}{T_j} \right) b_{j,j} M_j \right] \quad (3.35)$$

Analisando \hat{B} , chega-se a conclusão, que a rede \hat{T} que tem como matriz suscetância \hat{B} é adjunta da rede T do caso básico a qual tem como matriz suscetância B .

Observando-se a Eq. (3.35), conclui-se que \hat{P} é um vetor que representa os novos valores de injeção que permitem calcular $\hat{\delta}$ e $\hat{\theta}_\ell$, partindo de (3.12) e (3.13), através das seguintes expressões:

$$B \hat{\delta} = \hat{P} \quad (3.36)$$

$$\hat{\theta}_\ell = M_\ell^T \hat{\delta} \quad (3.37)$$

Substituindo (3.33) em (3.5), chega-se finalmente a uma estimativa de índice de desempenho, para cada contingência, utilizando-se a expansão em série de Taylor.

$$J(T_\ell) = J(T_0) - \sum_{\eta=1}^N b_\ell^\eta (M_\ell^T B^{-1} M_\ell)^\eta \theta_\ell \{ (M_\ell^T B^{-1} M_\ell) \left[\text{sign}(T_\ell) \frac{\partial J(T)}{\partial |T_\ell|} - \hat{\theta}_\ell \right] - \frac{(\eta-1)}{2} \theta_\ell \left[\frac{\partial^2 J(T)}{\partial |T_\ell|^2} (1 - 2M_\ell^T B^{-1} M_\ell b_\ell) + M_\ell^T B^{-1} \hat{B} B^{-1} M_\ell \right] \} \quad (3.38)$$

3.3 - Estimativa do Índice de Desempenho pelo Fluxo de Potência Linearizado

Parte-se do modelo de fluxo de potência linearizado (3.8) a (3.10). Na ocorrência de uma contingência em uma linha ℓ qualquer, tem-se uma alteração na matriz suscetância B do caso básico. A nova matriz que se representa por B_ℓ , pode ser expressa da seguinte forma:

$$B_\ell = B + M_\ell \Delta b_\ell M_\ell^T \quad (3.39)$$

Com isso, tem-se um novo vetor δ que se representa por δ_ℓ . A partir de (3.8):

$$\delta_\ell = (B + M_\ell \Delta b_\ell M_\ell^T)^{-1} P \quad (3.40)$$

onde P permanece constante.

Desde (3.39) e utilizando o Lema da Matriz Inversa (ANEXO C), obtêm-se:

$$B_\ell^{-1} = B^{-1} - B^{-1} M_\ell (M_\ell^T B^{-1} M_\ell + \Delta b_\ell^{-1})^{-1} M_\ell^T B^{-1} \quad (3.41)$$

Pós-multiplicando a equação (3.41) por P, tem-se:

$$B_\ell^{-1} P = B^{-1} P - B^{-1} M_\ell (M_\ell^T B^{-1} M_\ell + \Delta b_\ell^{-1})^{-1} M_\ell^T B^{-1} P \quad (3.42)$$

utilizando-se (3.8) em (3.42):

$$\delta_\ell = \delta - S_\ell B^{-1} M_\ell M_\ell^T \delta \quad (3.43)$$

onde:

$$S_\ell \triangleq (M_\ell^T B^{-1} M_\ell + \Delta b_\ell^{-1})^{-1} \quad (3.44)$$

substituindo (3.12) em (3.43), tem-se:

$$\delta_\ell = \delta - S_\ell B^{-1} M_\ell \theta_\ell \quad (3.45)$$

Com base em (3.10), pode-se calcular o fluxo de potência do sistema, após a ocorrência de uma contingência ℓ , provendo-se uma variação Δb_ℓ na suscetância do elemento ℓ , através de:

$$T_k^\ell = \begin{cases} b_k \theta_k^\ell, & \text{para } k \neq \ell \\ (b_\ell + \Delta b_\ell) \theta_\ell^\ell, & \text{para } k = \ell \end{cases} \quad (3.46)$$

Então de (3.43) e (3.9) tem-se:

$$\theta_k^\ell = M_k^T \delta_\ell = M_k^T \delta - M_k^T S_\ell B^{-1} M_\ell \theta_\ell \quad (3.47)$$

substituindo (3.47) em (3.46), chega-se:

$$T_k^\ell = \begin{cases} b_k M_k^T \delta - b_k M_k^T S_\ell B^{-1} M_\ell \theta_\ell, & \text{para } k \neq \ell \\ b_\ell \theta_\ell + \Delta b_\ell \theta_\ell - b_\ell M_\ell^T S_\ell B^{-1} M_\ell \theta_\ell - \Delta b_\ell M_\ell^T S_\ell B^{-1} M_\ell \theta_\ell, & \text{para } k = \ell \end{cases} \quad (3.48)$$

desde (3.9) e (3.10) e rearranjando (3.48):

$$\dot{T}_k^{\ell} = \begin{cases} T_k - S_{\ell} M_k^T B^{-1} M_{\ell} b_k \theta_{\ell}, & \text{para } k \neq \ell \\ (T_{\ell} + \Delta b_{\ell} \theta_{\ell}) (1 - S_{\ell} M_{\ell}^T B^{-1} M_{\ell}) & , \text{ para } k = \ell \end{cases} \quad (3.49)$$

Como visto anteriormente, no caso de saída de linha, tem-se $\Delta b_{\ell} = -b_{\ell}$. Substituindo (3.49) em (3.4), chega-se a um valor do índice para cada contingência, utilizando-se o fluxo de potência linearizado, dado por [10]:

$$J(T_{\ell}) = J(T_0) - S_{\ell} \theta_{\ell} \hat{\theta}_{\ell} + 1/2 S_{\ell}^2 \theta_{\ell}^2 (M_{\ell}^T B^{-1} \hat{B} B^{-1} M_{\ell}) - 1/2 (T_{\ell} / \bar{T}_{\ell}) [1 - S_{\ell} (M_{\ell}^T B^{-1} M_{\ell})]^2 \quad (3.50)$$

onde S_{ℓ} , $\hat{\theta}_{\ell}$ e \hat{B} foram definidos anteriormente.

3.4 - Resumo do Capítulo

Neste capítulo, desenvolveram-se passo a passo, dois métodos para calcular o índice de desempenho por violação nos fluxos de potência ativa. Um utilizando a expansão em série de Taylor em torno do caso básico e o outro utilizando o fluxo de potência linearizado. No capítulo seguinte, mostra-se como implementá-los e os resultados obtidos com um exemplo teste.

C A P Í T U L O . I V

IMPLEMENTAÇÃO DOS ALGORITMOS PARA SELEÇÃO
DE CONTINGÊNCIAS PELO FLUXO MÁXIMO DE
POTÊNCIA ATIVA E RESULTADOS OBTIDOS

4.1. Algoritmo utilizando o Modelo de Fluxo de Po-
tência Linearizado

Como visto no capítulo anterior, Eq. (3.50), o índice de desempenho para uma contingência l é dado por:

$$J(T_l) = J_0(T) - S_{l\theta} \hat{\theta}_l + 1/2 S_{l\theta}^2 (M_l^T B^{-1} \hat{B} B^{-1} M_l) - 1/2 \left(\frac{T_l}{\bar{T}_l} \right) [1 - S_{l\theta} (M_l^T B^{-1} M_l)]^2 \quad (4.1)$$

O fluxograma correspondente ao algoritmo implementado é apresentado na fig. 4.1 e sua descrição sucinta é apresentada neste item.

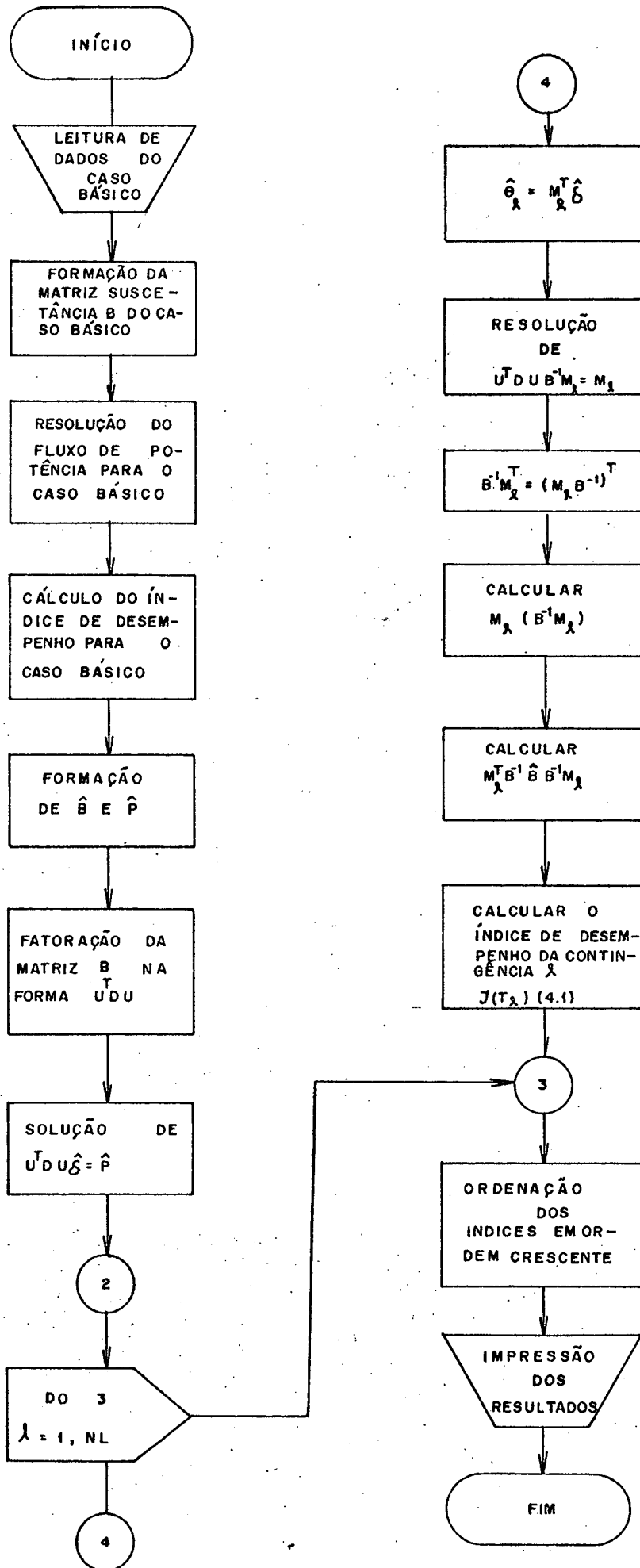


Figura 4.1 - Fluxograma para seleção automática de contingência pelo modelo de fluxo de potência linearizado.

4.1.1. Formação da Matriz Suscetância do Caso Básico

Sua formação é descrita no (ANEXO A) deste trabalho. Na implementação deste algoritmo, utilizou-se a forma (A-3) apresentada naquele anexo, onde é considerado apenas a reatância da linha.

4.1.2. Fluxo de Potência para o Caso Básico

Na implementação do algoritmo, é preciso adotar um modo para calcular o fluxo de potência ativa nas linhas para o caso básico. Neste trabalho calculam-se os fluxos ativos para o caso básico de duas formas. A primeira é pela resolução de um modelo de fluxo de potência completo, utilizando o método de Newton Desacoplado Rápido. A segunda forma é pela resolução do modelo de fluxo de potência linearizado, que é um modelo aproximado.

4.1.3. Fatoração da Matriz Suscetância B do Caso Básico e Formação da Matriz Suscetância \hat{B} da Rede Adjunta

A matriz suscetância B do caso básico é fatorada na forma $U^T D U$. A matriz B fatorada permanece constante durante o processo de resolução pelo algoritmo. A matriz B, na forma fatorada, é armazenada utilizando-se as técnicas de esparsidade, quando somente os elementos não nulos são levados em conta.

A matriz suscetância da rede adjunta, que se convencionou chamar de \hat{B} , é formada de acordo com a equação de definição (3.34), vista no capítulo anterior. Da mesma forma que a matriz suscetância do caso básico, a matriz suscetância da rede adjunta permanece constante durante todo o processo de resolução do algoritmo, a menos que B e/ou alguma das injeções de potência sejam alteradas, isto é, haja alteração do caso básico.

4.1.4. Novos Ângulos de Fase das Tensões de Barra da Rede

Como visto no capítulo anterior, para simplificação da equação (3.33), definiu-se um novo vetor para as injeções de potência, representado por \hat{P} , formado de acordo com a equação de definição (3.35), e a partir das equações do modelo de fluxo de potência linearizado, (3.8) e (3.9), calcula-se um novo vetor para os ângulos de fase das tensões de barra.

O vetor dos novos ângulos, representado por $\hat{\delta}$, é obtido pela solução do sistema de equações lineares (3.8) já previamente fatorado para o caso básico.

$$U^T D U \hat{\delta} = \hat{P} \quad (4.2)$$

O ângulo da barra de folga permanece com o mesmo valor especificado na solução do caso básico.

4.1.5. Cálculo do Índice de Desempenho para cada Contingência

Os valores calculados nos itens anteriores permanecem inalterados no cálculo do índice de desempenho para cada contingência. Com os valores do fluxo de potência ativa nas linhas, calcula-se o índice de desempenho para o caso básico.

No cálculo do índice de desempenho para cada falha simulada de linha ou transformador, parte-se sempre do mesmo caso base, com as novas grandezas associadas a cada contingência, calculadas como se descreve abaixo.

Inicialmente forma-se o vetor M_ℓ , do modo como foi definido no capítulo anterior. Obtido M_ℓ calculam-se as diferenças angulares para a contingência por:

$$\theta_\ell = M_\ell \delta \quad (4.3)$$

$$\hat{\theta}_\ell = M_\ell \hat{\delta} \quad (4.4)$$

Pela equação (4.1) observa-se que certos termos são comuns. É o caso do vetor $B^{-1}M_\ell$. Para obter esse vetor, parte-se da definição da matriz inversa:

$$B B^{-1} = I \quad (4.5)$$

Pós-multiplicando pelo vetor M_ℓ , tem-se:

$$B B^{-1} M_\ell = M_\ell \quad (4.6)$$

A matriz B , que é a matriz suscetância do caso básico, já está fatorada de modo que:

$$U^T D U (B^{-1} M_\ell) = M_\ell \quad (4.7)$$

O vetor $(B^{-1} M_\ell)$ é a solução do sistema (4.7), sendo obtido de forma bastante simples.

Com o vetor $(B^{-1} M_\ell)$ calculado, resta apenas efetuar alguns produtos matriciais para obtenção dos demais fatores necessários para o cálculo do índice através da expressão (4.1).

O vetor $(M_\ell^T B^{-1})$ é o vetor $(B^{-1} M_\ell)$ transposto, pois sendo B^{-1} simétrica, tem-se:

$$(B^{-1} M_\ell)^T = [M_\ell^T (B^{-1})^T] = M_\ell^T B^{-1} \quad (4.8)$$

Calculam-se os produtos $M_\ell^T B^{-1} M_\ell$ e $M_\ell^T B^{-1} \hat{B} B^{-1} M_\ell$, com o que têm-se calculados todos os termos necessários.

4.2. Algoritmo utilizando a Série de Taylor

Para o cálculo do índice de desempenho pela série de Taylor, como visto também no capítulo anterior, Eq. (3.38), tem-se:

$$J(T_\ell) = J_0(T) - \sum_{n=1}^N b_\ell^n (M_\ell^T B^{-1} M_\ell)^{n-2} \theta_\ell \{ (M_\ell^T B^{-1} M_\ell) [\text{sinal}(T_\ell) \frac{\partial J(T)}{\partial |T_\ell|} - \hat{\theta}_\ell] - \left(\frac{n-1}{2}\right) \theta_\ell \left[\frac{\partial^2 J(T)}{\partial |T_\ell|^2} (1 - M_\ell^T B^{-1} M_\ell b_\ell) + M_\ell^T B^{-1} \hat{B} B^{-1} M_\ell \right] \} \quad (4.9)$$

onde:

$$\frac{\partial J(T)}{\partial |T_\ell|} = \frac{|T_\ell|}{(\bar{T}_\ell)^2} \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial^2 J(T)}{\partial |T_\ell|^2} = \frac{1}{(\bar{T}_\ell)^2} \quad (4.11)$$

A implementação do algoritmo segue o mesmo fluxograma da figura 4.1, mudando apenas a parte referente ao cálculo do índice (entre 2 e 3 na figura 4.1), onde a expressão (4.1) é substituída pela (4.9).

4.3. Resultados Obtidos

Para testar os algoritmos, utilizou-se como sistema exemplo, o sistema teste da "American Electric Power (AEP)", com

30 barras e 41 linhas.

Os dados do sistema são apresentados a seguir:

SISTEMA TESTE AEP 30 BARRAS

DADOS DAS LINHAS

Nº Linha	Barra Inic.	Barra Final	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Suscet. Capacit. (p.u.)
1	1	2	0,0192	0,0575	0,0264
2	1	3	0,0452	0,1852	0,0204
3	2	4	0,0570	0,1737	0,0184
4	3	4	0,0132	0,0379	0,0042
5	2	5	0,0472	0,1983	0,0209
6	2	6	0,0581	0,1763	0,0187
7	4	6	0,0119	0,0414	0,0045
8	5	7	0,0460	0,1160	0,0102
9	6	7	0,0267	0,0820	0,0085
10	6	8	0,0120	0,0420	0,0045
11	6	9	0,0000	0,2080	0,0000
12	6	10	0,0000	0,5560	0,0000
13	9	11	0,0000	0,2080	0,0000
14	9	10	0,0000	0,1100	0,0000
15	4	12	0,0000	0,2560	0,0000
16	12	13	0,0000	0,1400	0,0000
17	12	14	0,1231	0,2559	0,0000
18	12	15	0,0662	0,1304	0,0000
19	12	16	0,0945	0,1987	0,0000
20	14	15	0,2210	0,1997	0,0000
21	16	17	0,0824	0,1923	0,0000
22	15	18	0,1073	0,2185	0,0000
23	18	19	0,0639	0,1292	0,0000
24	19	20	0,0340	0,0680	0,0000
25	10	20	0,0936	0,2090	0,0000
26	10	17	0,0324	0,0845	0,0000
27	10	21	0,0348	0,0749	0,0000
28	10	22	0,0727	0,1499	0,0000
29	21	22	0,0116	0,0236	0,0000
30	15	23	0,1000	0,2020	0,0000
31	22	24	0,1150	0,1790	0,0000
32	23	24	0,1320	0,2700	0,0000
33	24	25	0,1885	0,3292	0,0000
34	25	26	0,2544	0,3800	0,0000
35	25	27	0,1093	0,2087	0,0000
36	27	28	0,0000	0,3960	0,0000
37	27	29	0,2198	0,4153	0,0000
38	27	30	0,3202	0,6027	0,0000
39	29	30	0,2399	0,4533	0,0000
40	8	28	0,0636	0,2000	0,0214
41	6	28	0,0169	0,0599	0,0065

SISTEMA TESTE AEP 30 BARRAS

DADOS DE BARRA

Nº Barra	Módulo tensão		Geração		Carga	
	Inicial	Ângulo Inicial	MW	Mvar	MW	Mvar
*1	1,06	0	-	-	0,0	0,0
2	1,0	0	40	0	21,7	12,7
3	1,0	0	0	0	2,4	1,2
4	1,0	0	0	0	7,6	1,6
5	1,0	0	0	0	94,2	19,0
6	1,0	0	0	0	0,0	0,0
7	1,0	0	0	0	22,8	10,9
8	1,0	0	0	0	30,0	30,0
9	1,0	0	0	0	0,0	0,0
10	1,0	0	0	0	5,8	2,0
11	1,0	0	0	0	0,0	0,0
12	1,0	0	0	0	11,2	7,5
13	1,0	0	0	0	0,0	0,0
14	1,0	0	0	0	6,2	1,6
15	1,0	0	0	0	8,2	2,5
16	1,0	0	0	0	3,5	1,8
17	1,0	0	0	0	9,0	5,8
18	1,0	0	0	0	3,2	0,9
19	1,0	0	0	0	9,5	3,4
20	1,0	0	0	0	2,2	0,7
21	1,0	0	0	0	17,5	11,2
22	1,0	0	0	0	0,0	0,0
23	1,0	0	0	0	3,2	1,6
24	1,0	0	0	0	8,7	6,7
25	1,0	0	0	0	0,0	0,0
26	1,0	0	0	0	3,5	2,3
27	1,0	0	0	0	0,0	0,0
28	1,0	0	0	0	0,0	0,0
29	1,0	0	0	0	2,4	0,9
30	1,0	0	0	0	10,6	1,9

* Barra de folga.

BARRAS REGULADAS

Nº Barra	Módulo tensão (pu)	Min. MVAR	Máx. MVAR
2	1,045	- 40	50
5	1,01	- 40	40
8	1,01	- 10	40
11	1,082	- 6	24
13	1,071	- 6	24

DADOS DE TRANSFORMADORES

Designação	TAP
4 - 12	0,932
6 - 9	0,978
6 - 10	0,969
28 - 27	0,968

DADOS DE CAPACITORES ESTÁTICOS

Nº Barra	Suscetância (p.u)
10	0,19
24	0,043

Dados em p.u. na base de 100 MVA.

Para implementação do algoritmo, necessita-se de um dado adicional do sistema: o fluxo máximo de potência ativa que cada linha pode suportar. Com a finalidade de testar os algoritmos quanto ao desempenho numérico, adotou-se o fluxo máximo, como sendo, em torno de 30% superior ao fluxo do caso básico. Para este fim os valores adotados satisfizeram plenamente. Pelos resultados, entretanto, pode-se notar que na solução do fluxo de potência do caso básico existe linhas que estão com carga leve, com fluxo muito abaixo dos seus limites, tornando esse procedimento irreal. É o caso das linhas 13,16,20,29,33 e 40 da tabela 4.1.

TABELA 4.1

FLUXOS MÁXIMOS DE POTÊNCIA ATIVA

Nº Linha	Fluxo Máximo (Mw)	Nº Linha	Fluxo Máximo (Mw)	Nº Linha	Fluxo Máximo
1	200	15	0,1	31	7
2	100	17	10	32	3
3	55	18	22	33	2
4	100	19	10	34	5
5	100	20	2	35	6
6	75	21	5	36	22
7	85	22	8	37	8
8	18	23	4	38	9
9	45	24	8	39	5
10	35	25	11	40	1
12	20	26	7	41	23
13	0,1	27	20		
14	35	28	10		
15	55	29	2		
		30	6		

4.3.1. Algoritmo utilizando o Modelo Linearizado

Para comparar os resultados obtidos por algoritmos aproximados, calcula-se um fluxo de potência para cada contingência pelo método de Newton Desacoplado Rápido, que é tomado como referência, e o conseqüente índice de desempenho. Os resultados estão na tabela 4.4.

Com os valores dos índices supostos exatos, define-se um valor, denominado índice de captura, que permite uma avaliação dos algoritmos contra valores adotados como referência.

Definição: Índice de Captura

Sejam os diagramas da figura 4.3, onde (a) representa a lista de contingências, ordenadas por um índice calculado por um algoritmo aproximado e (b) a lista de contingências ordenadas por um índice supostamente exato.

Conta-se o número de contingências das primeiras η_A posições da fig. 4.3(a) que aparecem nas $\eta_E = \eta_A$ posições da lista da fig. 4.3(b). Seja η_A^E o número obtido.

Então a relação η_A^E / η_A é definida como sendo o índice de captura.

O algoritmo utilizando o modelo linearizado foi implementado de três maneiras, todas elas com variações na solução do caso básico:

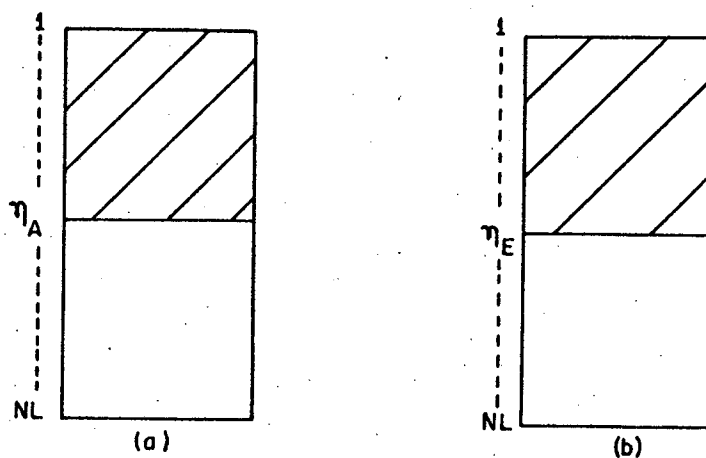


Figura 4.3 - (a) Lista de contingências ordenadas por um índice aproximado.

(b) Lista de contingências ordenadas por um índice supostamente exato.

Primeira alternativa - soluciona o caso básico pelo modelo de fluxo de potência linearizado. Os resultados estão na tabela 4.5.

Segunda alternativa - soluciona o caso básico por um modelo C.A. completo. Com os resultados obtidos através deste modelo, calcula-se o índice de desempenho para o caso básico, a matriz da rede adjunta \hat{B} e as novas injeções de potência \hat{P} . A solução do algoritmo através desta variante teve no exemplo teste um desempenho inferior ao das outras variantes, com base nos índices de captura calculados para as três variantes na tabela 4.2. Isto se confirma também para outros exemplos testados ,

mas que não são apresentados neste trabalho. A justificativa para este fato, aparentemente, pode ser atribuída à falta de coerência ao utilizarem-se valores calculados por um modelo de fluxo C.A. completo juntamente com valores calculados por um modelo aproximado como o linearizado. Os resultados desta variante estão na tabela 4.6.

Terceira alternativa - utiliza os resultados obtidos por um modelo de fluxo de potência C.A. apenas no cálculo do índice de desempenho para o caso básico. Para formação da matriz \hat{B} e do vetor \hat{P} utilizam-se os resultados do fluxo de potência linearizado, sem voltar a utilizar o modelo C.A. Os resultados obtidos estão na tabela (4.7).

Analisando os índices de captura calculados para as três variantes (tabela 4.2) e o tempo de C.P.U gasto para as mesmas, tabela 4.3, pode-se constatar que, para o nosso exemplo teste, a primeira variante tem um melhor desempenho.

TABELA 4.2

INDICES DE CAPTURA

η_A	VARIANTE 1	VARIANTE 2	VARIANTE 3
5	1,00	1,00	1,00
10	0,90	0,90	0,90
15	1,00	0,80	1,00
20	0,95	0,85	0,95
25	1,00	0,84	0,96
30	0,97	0,80	1,00

TABELA 4.3

TEMPO DE CPU GASTO NA EXECUÇÃO

VARIANTE 1	VARIANTE 2	VARIANTE 3
3,97 seg.	6,38 seg.	6,39 seg.

TABELA 4.4

Índice de desempenho do sistema exemplo calculado por um modelo de fluxo de potência "exato".

Nº Ordem	Nº Contingência	Valor
1	10	0,482604 E + 03
2	41	0,132058 E + 03
3	36	0,775837 E + 02
4	15	0,553090 E + 02
5	27	0,529991 E + 02
6	5	0,329913 E + 02
7	18	0,291195 E + 02
8	14	0,273741 E + 02
9	11	0,256321 E + 02
10	1	0,239922 E + 02
11	7	0,215881 E + 02
12	31	0,185278 E + 02
13	25	0,184433 E + 02
14	17	0,165663 E + 02
15	12	0,157792 E + 02
16	24	0,157271 E + 02
17	19	0,150199 E + 02
18	35	0,149486 E + 02
19	38	0,149388 E + 02
20	28	0,147244 E + 02
21	22	0,145154 E + 02
22	30	0,132956 E + 02
23	26	0,130647 E + 02
24	6	0,129203 E + 02

Tabela 4.3 (cont.)

25	21	0,128213	E + 02
26	2	0,124771	E + 02
27	23	0,124470	E + 02
28	4	0,124125	E + 02
29	37	0,122697	E + 02
30	9	0,119822	E + 02
31	40	0,118716	E + 02
32	39	0,118525	E + 02
33	32	0,118252	E + 02
34	20	0,116790	E + 02
35	33	0,116714	E + 02
36	3	0,115489	E + 02
37	29	0,114620	E + 02
38	8	0,113088	E + 02
39	*13	-	
40	*16	-	
41	*34	-	

*Contingências que deixam o sistema desconexo.

Índice de Desempenho para o caso básico = 0,119796E + 02.

TABELA 4.5

Índice de desempenho do sistema exemplo calculado pelo algoritmo linearizado com caso básico calculado pelo modelo de fluxo de potência linearizado.

Nº Ordem	Nº Contingência	Valor
1	10	0,462824 E + 03
2	41	0,138479 E + 03
3	36	0,680705 E + 03
4	15	0,562122 E + 02
5	27	0,529078 E + 02
6	5	0,301205 E + 02
7	18	0,286855 E + 02
8	14	0,277934 E + 02
9	11	0,277587 E + 02
10	7	0,202831 E + 02
11	1	0,188127 E + 02
12	31	0,184269 E + 02
13	25	0,183369 E + 02
14	12	0,170777 E + 02
15	17	0,169254 E + 02
16	24	0,157821 E + 02

Tabela 4.4 (cont.)

17	19	0,152324	E + 02
18	38	0,150025	E + 02
19	35	0,146471	E + 02
20	22	0,146320	E + 02
21	28	0,142570	E + 02
22	30	0,135127	E + 02
23	26	0,132028	E + 02
24	21	0,131044	E + 02
25	6	0,128784	E + 02
26	23	0,127407	E + 02
27	37	0,125933	E + 02
28	4	0,124082	E + 02
29	2	0,123939	E + 02
30	40	0,122299	E + 02
31	9	0,122028	E + 02
32	32	0,121982	E + 02
33	39	0,121735	E + 02
34	20	0,120344	E + 02
35	*16	0,120000	E + 02
36	3	0,118991	E + 02
37	8	0,115760	E + 02
38	29	0,115367	E + 02
39	33	0,114933	E + 02
40	*13	-0,160678	E + 69
41	*34	0,196608	E + 06

*Contingências que deixam o sistema desconexo.

Índice de Desempenho para o caso básico = 0,122880 E+ 02.

TABELA 4.6

Índice de desempenho do sistema exemplo calculado pelo algoritmo linearizado com caso básico calculado por um modelo exato.

Nº Ordem	Nº Contingência	Valor
1	10	0,495522 E + 03
2	41	0,126412 E + 03
3	36	0,662339 E + 02
4	15	0,495935 E + 02
5	27	0,302803 E + 02
6	5	0,291890 E + 02
7	11	0,254492 E + 02
8	14	0,236599 E + 02
9	7	0,218918 E + 02
10	18	0,206699 E + 02

Tabela 4.5 (cont.)

11	33	0,187520	E + 02
12	12	0,158205	E + 02
13	1	0,154010	E + 02
14	8	0,139721	E + 02
15	38	0,138929	E + 02
16	17	0,138073	E + 02
17	25	0,136708	E + 02
18	35	0,127016	E + 02
19	31	0,126716	E + 02
20	6	0,126292	E + 02
21	19	0,124777	E + 02
22	22	0,123872	E + 02
23	28	0,122733	E + 02
24	40	0,120442	E + 02
25	9	0,118918	E + 02
26	2	0,117325	E + 02
27	21	0,116732	E + 02
28	39	0,114962	E + 02
29	3	0,114523	E + 02
30	32	0,113062	E + 02
31	37	0,112038	E + 02
32	4	0,108987	E + 02
33	20	0,105126	E + 02
34	23	0,984386	E + 02
35	30	0,961366	E + 02
36	26	-0,177208	E + 02
37	24	-0,105014	E + 02
38	29	-0,109844	E + 02
39	*16	-0,101708	E + 07
40	*34	-0,801368	E + 12
41	*13	-0,861770	E + 69

*Contingências que deixam o sistema desconexo.

Índice de Desempenho para o caso básico = 0,119796 E + 02.

TABELA 4.7

Índice de desempenho do sistema exemplo calculado pelo algoritmo linearizado com apenas o índice de desempenho do caso básico calculado por um modelo exato.

Nº Ordem	Nº Contingência	Valor
1	10	0,462326 E + 03
2	41	0,144431 E + 03
3	36	0,673744 E + 02
4	15	0,569820 E + 02
5	27	0,526463 E + 02
6	5	0,296538 E + 02
7	14	0,289856 E + 02
8	11	0,289220 E + 02
9	18	0,277178 E + 02
10	7	0,185176 E + 02
11	25	0,182896 E + 02
12	31	0,181531 E + 02
13	12	0,171063 E + 02
14	17	0,167115 E + 02
15	1	0,162359 E + 02
16	24	0,156665 E + 02
17	19	0,147385 E + 02
18	38	0,146934 E + 02
19	22	0,141942 E + 02
20	35	0,138936 E + 02
21	28	0,137925 E + 02
22	30	0,131718 E + 02
23	26	0,129946 E + 02
24	21	0,126725 E + 02
25	23	0,123723 E + 02
26	6	0,123478 E + 02
27	37	0,122843 E + 02
28	4	0,122211 E + 02
29	2	0,121508 E + 02
30	*16	0,121250 E + 02
31	9	0,119800 E + 02
32	*13	0,119788 E + 02
33	40	0,119522 E + 02
34	32	0,119347 E + 02
35	39	0,118645 E + 02
36	20	0,117779 E + 02
37	3	0,116993 E + 02
38	8	0,113053 E + 02
39	29	0,111523 E + 02
40	33	0,107291 E + 02
41	*34	0,00000 E + 00

* Contingências que deixam o sistema desconexo.

Índice de Desempenho para o caso básico = 0,119796 E + 02.

4.3.2. Algoritmo utilizando Série de Taylor

Testou-se o algoritmo para diferentes truncamentos da série de Taylor. Convencionou-se chamar de NOD a ordem da derivada em que a série é truncada. Alguns dos resultados obtidos estão nas tabelas 4.10 a 4.13. Para realizar comparações, calculou-se o índice de captura para os diversos valores da derivada, tabela 4.8.

TABELA 4.8

ÍNDICE DE CAPTURA DO ALGORITMO UTILIZANDO SÉRIE DE TAYLOR

NÚMERO DE ORDEM MÁXIMA DA DERIVADA							
η_A	2	3	4	5	10	30	50
5	0,60	0,80	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10	0,80	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
15	0,80	0,87	0,93	0,93	1,00	1,00	1,00
20	0,75	0,85	0,90	0,90	0,90	0,95	0,95
25	0,80	0,88	0,92	0,92	0,92	1,00	1,00
30	0,93	0,87	0,87	0,90	0,90	0,97	0,97

Na implementação deste algoritmo utilizou-se para solução do caso base o modelo de fluxo de potência linearizado.

Os tempo de CPU para execução do algoritmo estão na tabela 4.9.

TABELA 4.9

TEMPOS DE CPU GASTOS PELO ALGORITMO
UTILIZANDO SÉRIE DE TAYLOR

NÚMERO DE ORDEM MÁXIMA DA DERIVADA						
2	3	4	5	10	30	50
4,01	4,20	4,21	4,30 seg.	4,81 seg.	4,94 seg.	5,46 seg.

Considerando os resultados obtidos e os tempos de execução, a utilização do algoritmo com modelo de fluxo linearizado apresenta-se, neste caso, muito mais vantajoso que o algoritmo que utiliza a série de Taylor.

4.4. Resumo do Capítulo

Neste capítulo mostra-se como foram implementados dois algoritmos de seleção automática de contingências por violações de fluxo de potência:

- 1º) utilizando o modelo de fluxo linearizado;
- 2º) pela expansão em série de Taylor em torno do caso básico.

Uma série de resultados e conclusões foram apresentados, que mostram certas vantagens na utilização do algoritmo pa

ra seleção de contingências pelo fluxo máximo de potência, quando implementado usando o modelo linearizado, pelo menos para os testes realizados.

TABELA 4.10

Índice de desempenho do sistema exemplo calculado pela série de Taylor com truncamento na derivada de segunda ordem.

Nº Ordem	Nº Contingência	Valor
1	10	0,236170 E + 02
2	27	0,213313 E + 02
3	15	0,189600 E + 02
4	5	0,182765 E + 02
5	11	0,173450 E + 02
6	12	0,160554 E + 02
7	41	0,156633 E + 02
8	18	0,154959 E + 02
9	14	0,148329 E + 02
10	31	0,138980 E + 02
11	38	0,132657 E + 02
12	1	0,130720 E + 02
13	19	0,129370 E + 02
14	25	0,125580 E + 02
15	21	0,125267 E + 02
16	22	0,124955 E + 02
17	23	0,123138 E + 02
18	*16	0,122878 E + 02
19	*13	0,122878 E + 02
20	*34	0,122878 E + 02
21	24	0,122825 E + 02
22	6	0,122180 E + 02
23	40	0,122058 E + 02
24	32	0,121962 E + 02
25	4	0,120907 E + 02
26	26	0,120826 E + 02
27	30	0,120434 E + 02
28	20	0,120422 E + 02
29	39	0,120337 E + 02
30	29	0,120117 E + 02
31	37	0,119295 E + 02
32	7	0,119279 E + 02
33	17	0,118910 E + 02
34	8	0,118141 E + 02
35	2	0,117666 E + 02
36	3	0,116569 E + 02

Tabela 4.9 (cont.)

37	28	0,115068	E + 02
38	9	0,114595	E + 02
39	33	0,113997	E + 02
40	36	0,109845	E + 02
41	35	0,109707	E + 02

* Contingências que deixam o sistema desconexo.

Índice de Desempenho para o caso básico = 0,122880 E + 02.

TABELA 4.11

Índice de desempenho do sistema exemplo calculado pela série de Taylor com truncamento na derivada de terceira ordem.

Nº Ordem	Nº Contingência	Valor
1	10	0,355966 E + 02
2	27	0,274885 E + 02
3	15	0,268571 E + 02
4	41	0,253362 E + 02
5	5	0,214652 E + 02
6	11	0,199296 E + 02
7	36	0,182084 E + 02
8	18	0,180322 E + 02
9	12	0,167450 E + 02
10	14	0,162190 E + 02
11	31	0,146372 E + 02
12	38	0,137438 E + 02
13	1	0,135096 E + 02
14	19	0,133048 E + 02
15	17	0,131929 E + 02
16	25	0,130908 E + 02
17	28	0,128051 E + 02
18	22	0,127294 E + 02
19	21	0,126313 E + 02
20	6	0,125206 E + 02
21	23	0,123356 E + 02
22	24	0,123126 E + 02
23	7	0,122903 E + 02
24	*13	0,122878 E + 02
25	*16	0,122878 E + 02
26	*34	0,122878 E + 02
27	40	0,122169 E + 02
28	32	0,121815 E + 02
29	30	0,120995 E + 02

Tabela 4.10 (cont.)

30	26	0,120358	E + 02
31	4	0,120248	E + 02
32	39	0,120094	E + 02
33	20	0,120081	E + 02
34	2	0,119378	E + 02
35	37	0,119351	E + 02
36	29	0,119058	E + 02
37	3	0,117546	E + 02
38	8	0,116922	E + 02
39	9	0,112558	E + 02
40	33	0,112275	E + 02
41	35	0,107263	E + 02

*Contingências que deixam o sistema desconexo.

Índice de Desempenho para o caso básico = 0,122880 E + 02.

TABELA 4.12

Índice de desempenho do sistema exemplo calculado pela série de Taylor com truncamento na derivada de quarta ordem.

Nº Ordem	Nº Contingência	Valor
1	10	0,597484 E + 02
2	41	0,370770 E + 02
3	15	0,341542 E + 02
4	27	0,331101 E + 02
5	36	0,264667 E + 02
6	5	0,241214 E + 02
7	11	0,220587 E + 02
8	18	0,203891 E + 02
9	14	0,175737 E + 02
10	12	0,169772 E + 02
11	31	0,152949 E + 02
12	17	0,143551 E + 02
13	38	0,141216 E + 02
14	1	0,139521 E + 02
15	25	0,137076 E + 02
16	19	0,136476 E + 02
17	28	0,135650 E + 02
18	22	0,129830 E + 02
19	7	0,128348 E + 02
20	21	0,127217 E + 02
21	6	0,127025 E + 02
22	23	0,123605 E + 02

Tabela 4.11 (cont.)

23	24	0,123601	E + 02
24	*16	0,122878	E + 02
25	*13	0,122878	E + 02
26	*34	0,122878	E + 02
27	40	0,122240	E + 02
28	30	0,122093	E + 02
29	32	0,121762	E + 02
30	2	0,120972	E + 02
31	26	0,120163	E + 02
32	39	0,120134	E + 02
33	20	0,119973	E + 02
34	37	0,119905	E + 02
35	4	0,119761	E + 02
36	3	0,118252	E + 02
37	29	0,118173	E + 02
38	8	0,116155	E + 02
39	33	0,111507	E + 02
40	9	0,111442	E + 02
41	35	0,106610	E + 02

*Contingências que deixam o sistema desconexo.

Índice de Desempenho para o caso básico = 0,122880 E + 02.

TABELA 4.13

Índice de desempenho do sistema exemplo calculado pela série de Taylor com truncamento na derivada de trigésima ordem.

Nº Ordem	Nº Contingência	Valor
1	10	0,434955 E + 02
2	41	0,137928 E + 02
3	36	0,680562 E + 02
4	15	0,562115 E + 02
5	27	0,529057 E + 02
6	5	0,301202 E + 02
7	18	0,286848 E + 02
8	11	0,277586 E + 02
9	14	0,276919 E + 02
10	7	0,201698 E + 02
11	1	0,186392 E + 02
12	31	0,184218 E + 02
13	25	0,183217 E + 02
14	12	0,170778 E + 02
15	17	0,169254 E + 02

Tabela 4.12 (cont.)

16	19	0,152311	E + 02
17	38	0,150025	E + 02
18	24	0,146943	E + 02
19	22	0,146284	E + 02
20	35	0,144348	E + 02
21	28	0,142570	E + 02
22	30	0,135058	E + 02
23	21	0,131041	E + 02
24	26	0,130097	E + 02
25	6	0,128785	E + 02
26	23	0,127219	E + 02
27	37	0,125927	E + 02
28	2	0,123940	E + 02
29	*13	0,122878	E + 02
30	*16	0,122878	E + 02
31	*34	0,122878	E + 02
32	4	0,122512	E + 02
33	40	0,122300	E + 02
34	32	0,121982	E + 02
35	39	0,121735	E + 02
36	9	0,121426	E + 02
37	20	0,120344	E + 02
38	3	0,118991	E + 02
39	8	0,115752	E + 02
40	33	0,114917	E + 02
41	29	0,114873	E + 02

*Contingências que deixam o sistema desconexo.

Índice de Desempenho para o caso básico = 0,122880 E + 02.

C A P Í T U L O V

SELEÇÃO AUTOMÁTICA DE CONTINGÊNCIAS CONSIDERANDO
TENSÃO E POTÊNCIA ATIVA E REATIVA5.1. Introdução

Nos capítulos anteriores, foi apresentado um índice de desempenho para seleção automática de contingências que leva em conta apenas as violações nos fluxos máximos de potência ativa que cada linha pode suportar. Esse índice não leva em conta violações de limites das tensões de barra. Nem sempre as contingências que provocam as maiores violações, nos fluxos máximos de potência ativa, são as mesmas que provocam problemas de tensão no sistema, (ver tabelas 5.4 e 5.5). Portanto é interessante o estudo de algoritmos que também levem em conta o problema da tensão. O algoritmo proposto em [11] considera este tipo de violação. Nele são consideradas as ultrapassagens nos limites dos módulos das tensões de barra (em barras onde a tensão deve permanecer dentro de certos limites) e desvios das injeções de potência reativa (em barras de geração, onde esta é limitada pela curva de capacidade da máquina síncrona).

Na solução do algoritmo utiliza-se a primeira iteração do método de Newton Desacoplado Rápido, para os cálculos dos valores de tensões de barra e injeções de potência reativa nas

barras de geração para cada contingência.

5.2 - Índices de Desempenho

Dois índices são definidos para considerar o fraco acoplamento da potência ativa com a potência reativa. O índice de potência ativa é semelhante ao índice visto nos capítulos anteriores, a menos do fator 1/2 que multiplicava as parcelas do somatório e do fato de aqui não serem consideradas todas as linhas, mas apenas os elementos do grafo da rede que estão com sobrecarga, apresentando-se como:

$$PI_{MW} = \sum_{\alpha} W_p \left(\frac{T_j}{\bar{T}_j} \right)^2 \quad (5.1)$$

Onde:

W_p - fator de peso.

T_j - fluxo de potência ativa na linha j .

\bar{T}_j - limite de potência ativa na linha j .

α - conjunto de linhas com sobrecarga.

O fato de se utilizar, no somatório do índice, apenas as linhas com sobrecarga tem como objetivo evitar mascaramentos, como aquele que pode ocorrer no caso de uma contingência que, provocando um elevado carregamento num grande número de linhas, sem contudo provocar sobrecargas, acabe dando como resultado um índice

ce maior que o obtido para uma contingência que provoque sobrecarga em algumas poucas linhas.

Nota-se que este procedimento, utilizado aqui, não é possível de ser aplicado no cálculo do índice $J(T_\ell)$ dos capítulos anteriores, pois lá o índice é calculado diretamente.

Para levar em conta a tensão, define-se o índice como segue |11|:

$$PI_{VQ} = \sum_{\beta} W_V \left| \frac{V_j - V_j^{lim}}{V_j^{lim}} \right| + \sum_{\gamma} W_Q \left| \frac{Q_j - Q_j^{lim}}{Q_j^{lim}} \right| \quad (5.2)$$

Onde:

W_V - fator de peso para tensão.

V_j - módulo de tensão na barra j.

V_j^{lim} - limite de tensão violado na barra j.

W_Q - fator de peso para potência reativa.

Q_j - injeção de potência reativa na barra j.

Q_j^{lim} - limite de potência reativa violado na barra j.

β - conjunto de barras em que o módulo da tensão está fora dos limites fixados.

γ - conjunto de barras em que a injeção de potência reativa está fora dos limites fixados.

Por conveniência da programação, adota-se a fórmula proposta em [12] com os fatores de peso iguais a 1. Tem-se então:

$$PI_{VQ} = \sum_B \left| \frac{V_i - V_i^{NOM}}{V_i^{LIM}} \right| + \sum_Y \left| \frac{Q_i - Q_i^{NOM}}{Q_i^{LIM}} \right| \quad (5.3)$$

Onde:

$$V_i^{NOM} = \frac{V_i^{MAX} + V_i^{MIN}}{2} \quad (5.4)$$

$$V_i^{LIM} = \frac{V_i^{MAX} - V_i^{MIN}}{2} \quad (5.5)$$

$$Q_i^{NOM} = \frac{Q_i^{MAX} + Q_i^{MIN}}{2} \quad (5.6)$$

$$Q_i^{LIM} = \frac{Q_i^{MAX} - Q_i^{MIN}}{2} \quad (5.7)$$

V_i^{MAX} - limite máximo do módulo de tensão da barra i .

V_i^{MIN} - limite mínimo do módulo de tensão da barra i .

Q_i^{MAX} - limite máximo da injeção de potência reativa na barra i .

Q_i^{MIN} - limite mínimo da injeção de potência reativa na barra i .

A primeira parcela da expressão (5.3), corresponde a valores associados às barras do tipo PQ e a segunda parcela a valores associados às barras do tipo PV.

5.3 - Implementação do Algoritmo

A implementação foi realizada a partir do método de Newton Desacoplado Rápido, utilizando-se somente sua primeira iteração.

Sabe-se que [4]:

$$\frac{\Delta P}{V} = B' \Delta \delta \quad (5.8)$$

$$\frac{\Delta Q}{V} = B'' \Delta V \quad (5.9)$$

$$\delta^{n+1} = \delta^n + \Delta \delta \quad (5.10)$$

$$V^{n+1} = V^n + \Delta V \quad (5.11)$$

As matrizes B' e B'' são constantes, entretanto suas dimensões são diferentes. Na solução do sistema (5.8) resolve-se $\Delta \delta$ para as barras do tipo PV e PQ, portanto B' tem dimensão (PV + PQ). Para o sistema (5.9) resolve-se ΔV para as barras de tipo PQ, com o que B'' tem dimensão PQ. Os elementos da matriz B' podem ser os mesmos utilizados na matriz suscetância do modelo de fluxo de potência linearizado. Neste trabalho utilizou-se a forma (A-3) (ANEXO A). Os elementos da matriz B'' são obtidos pela mesma forma (A-3) (ANEXO A), aplicadas apenas para as barras PQ.

Os resíduos de potência ativa e reativa são calculados do mesmo modo que no método de Newton [4].

$$\Delta P_k = P_k^{\text{esp.}} - P_k^{\text{calc.}} \quad (5.12)$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{\text{esp.}} - Q_k^{\text{calc.}} \quad (5.13)$$

Na implementação do algoritmo parte-se da solução do fluxo de potência para o caso básico. Neste trabalho a solução é conduzida pelo método de Newton Desacoplado Rápido, permitindo a utilização das matrizes B' e B'' , já previamente fatoradas para o caso básico, durante todos os cálculos seguintes a cada contingência, apenas alterando convenientemente as matrizes correntes de cálculo, de acordo com o procedimento proposto neste trabalho, e descrito no item 5.3.1 a seguir.

Os valores do módulo e fase da tensão de barra encontrados após a solução do caso básico são utilizados para a inicialização dos cálculos através do algoritmo, contingência por contingência. Isto se justifica, porque em falha do tipo saída de linha ou transformador se está supondo que as repercussões são limitadas a pequenos deslocamentos do ponto de operação do sistema em torno do ponto de operação do caso básico. Desta forma, partindo-se desta solução inicial, uma iteração de método de Newton Desacoplado Rápido é suficiente para o cálculo dos índices de desempenho (5.1) e (5.2) no que se refere a esta aplicação.

Na estratégia de utilização deste algoritmo para seleção de contingências, pode-se dar ao operador a liberdade de optar pelo cálculo dos dois índices (5.1) e (5.2) ou pelo cálculo de (5.1) somente.

No caso de operador ter a certeza de que não existe problema com a tensão, pode limitar o cálculo a apenas meia iteração do método de Newton Desacoplado Rápido, solucionando apenas (5.8) e calculando (5.1) para cada contingência.

5.3.1. Alteração das matrizes B' e B''

Na solução do caso básico, as matrizes B' e B'' foram fatoradas na forma $U^T D U$. O armazenamento destas matrizes foi realizado em quatro vetores, somente para os elementos não nulos. Um vetor R com os elementos $d(j)$ da matriz diagonal D, um vetor L com os elementos não nulos $u(j,k)$ da matriz triangular U e dois vetores auxiliares que indicam a posição e coluna dos elementos $u(j,k)$.

Para cada contingência, têm-se alterações nas matrizes B' e B'' do tipo:

$$B' = B + b_{\ell} M_{\ell} M_{\ell}^T \quad (5.14)$$

Se o elemento em contingência está conectado entre duas barras PV, tem-se alteração apenas na matriz B'.

Uma nova fatoração das matrizes B' e B'' implica num algoritmo muito lento e inadequado para utilização em tempo real. Neste trabalho, aproveitando a idéia sugerida pela subrotina apresentada em [10] onde é proposta como um procedimento a ser utilizado no caso de mudança de topologia, utiliza-se um processo

semelhante para realizar as alterações do tipo (5.14) para cada contingência. Estas alterações são realizadas só para os elementos não nulos. O tipo do armazenamento utilizado para as matrizes contribuiu certamente para melhorar o desempenho do algoritmo proposto em [11].

O fluxograma da figura 5.1, mostra o desenvolvimento da subrotina para a alteração das matrizes fatoradas.

5.3.2. Alteração dos Resíduos de Potência

Para cada contingência, apesar das injeções especificadas permanecerem constantes, os resíduos de potência ativa e reativa sofrem alterações. Para o caso dos resíduos de potência ativa, utiliza-se os valores da última iteração da solução do caso básico, alterando apenas os resíduos das barras em que a linha ou transformador em contingência está conectado. No caso do elemento apresentar conexão com a barra de folga, a alteração se dá apenas no valor do resíduo associado a outra barra. Feitas as alterações acima, calculam-se os novos ângulos de fase das tensões de barra, a partir de (5.8).

Os resíduos de potência reativa devem ser todos recalculados, para levar em conta as alterações dos ângulos δ . Resolve-se então com os novos $\Delta Q/V$ o sistema de equação (5.9): Os resultados dos módulos e fases das tensões de barra obtidos de (5.8) e (5.9) são usados então para calcular os índices de desempenho para cada contingência.

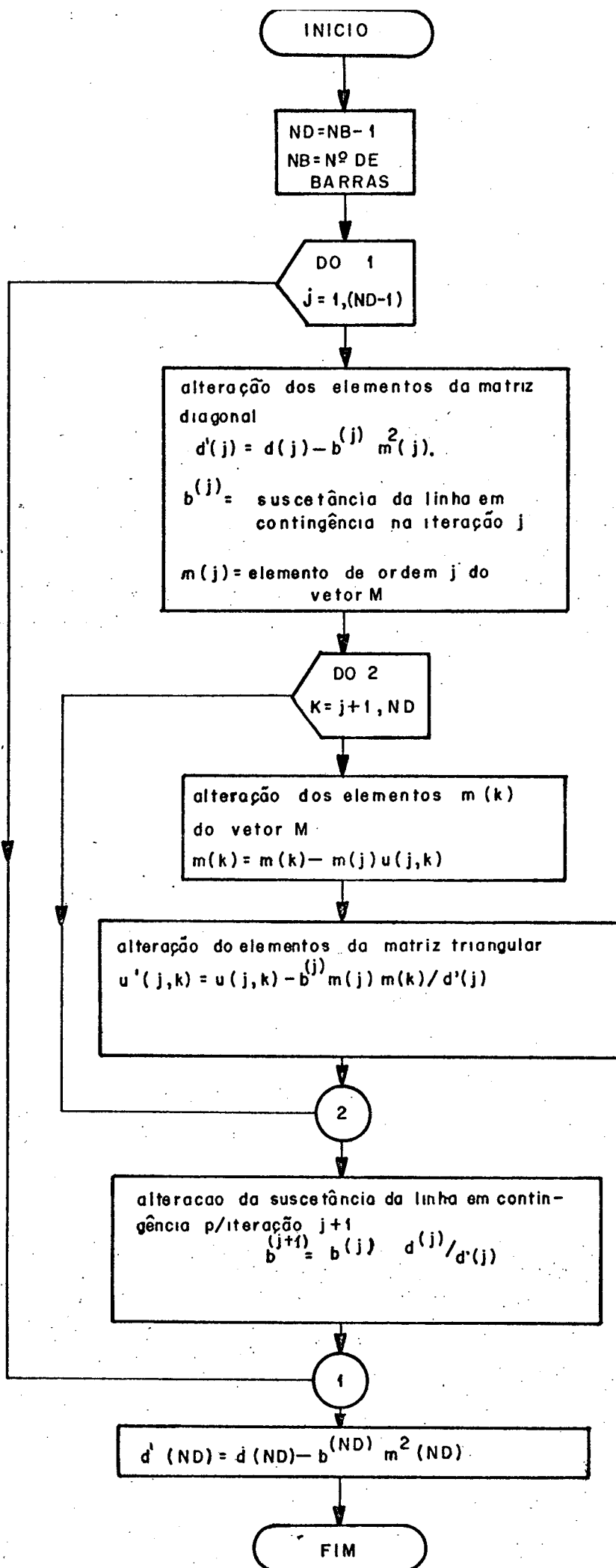


Figura 5.1 - Fluxograma de alteração da matriz suscetância fatorada.

5.4. Resultados Obtidos

Consideram-se inicialmente para efeito de comparação, no índice (5.1), todas as linhas e não apenas as linhas com sobrecarga. No índice (5.2) considerou-se β o conjunto de barras PQ e γ o conjunto de barras PV. Na tabela 5.3 tem-se o índice (5.2) calculado através de um modelo de fluxo de potência completo, tomado como referência, com as considerações acima, para o sistema exemplo adotado no Capítulo IV. A ordenação de contingências obtida através do índice (5.2), com as considerações acima, estão na tabela (5.4).

Para efeito de comparações calcula-se o índice de captura, definido no Capítulo IV, tomando como referência os resultados obtidos na tabela 5.3.

TABELA 5.1

RESULTADOS PARA A SELEÇÃO AUTOMÁTICA DE CONTINGÊNCIAS
USANDO O ÍNDICE 5.2 (PI_{VQ})

N	Índice de Captura
5	1,00
10	0,90
15	0,87
20	0,95
25	0,96
30	0,97

Na tabela 5.5 apresenta-se os resultados dos cálcu

los obtidos através do índice (5.1), com as alterações vistas acima. Com essas modificações, o referido índice, torna-se idêntico ao índice visto no Capítulo IV, tornando possível a utilização da tabela 4.1 (Capítulo IV) como referência no cálculo do índice de captura.

TABELA 5.2

RESULTADOS PARA A SELEÇÃO AUTOMÁTICA DE CONTINGÊNCIAS
USANDO O ÍNDICE 5.1 (PI_{MW})

N	Índice de Captura
5	0,80
10	0,90
15	0,93
20	0,95
25	0,96
30	1,00

O tempo gasto na execução, para o caso da primeira iteração completa do método de Newton Desacoplado Rápido, calculando os índices (5.1) e (5.2) simultaneamente, foi de 10,24 segundos. Para o caso de utilização de meia iteração do método, calculando-se apenas o índice 5.1, gastaram-se 7,71 segundos.

Comparando os resultados aqui obtidos, para o índice 5.1, com os obtidos no Capítulo IV, observando o índice de captura, pode-se notar que são inferiores. A razão que determinou a redução do índice de captura foi o fato da convergência pelo método de Newton Desacoplado Rápido não ser satisfatória, para uma só iteração, no caso da contingência 17. Em vista disso, os resulta

dos obtidos com a primeira iteração do método de Newton Desacoplado Rápido apresentam erros de ângulos muito grandes em relação ao método exato. Um sério problema encontrado por este método é a convergência do algoritmo desacoplado rápido em situações semelhantes, de baixa predominância diagonal, como é o caso da contingência 17.

Em seguida calcularam-se os índices (5.1) e (5.2) considerando apenas as linhas com sobrecarga e β e γ como definido no início do Capítulo. Os resultados estão nas tabelas 5.6 e 5.7 respectivamente. O tempo gasto na execução do algoritmo com o índice calculado da maneira acima foi de 9,99 segundos. A partir dos resultados, pareceu-nos mais confiável a utilização do índice com as alterações acima, principalmente quanto ao impacto das contingências selecionadas na segurança do sistema, já que as modificações diminuem possíveis erros de mascaramento na ordenação de contingências.

5.5. Resumo do Capítulo

Apresentou-se neste Capítulo um índice de desempenho que leva em conta violações no módulo da tensão de barra e nos limites de injeções de potência reativa nas barras de geração. Ao cálculo deste índice é associado um algoritmo para seleção automática de contingências que utiliza a primeira iteração do método de Newton Desacoplado Rápido, para obtenção do estado do sistema após cada contingência.

TABELA 5.3

Índice de desempenho levando em conta a potência reativa - cálculo "exato". Não levando em conta limites de potência reativa.

Nº de ordem	Contingência	Índice	
1	36	0,231339	E + 02
2	37	0,177224	E + 02
3	38	0,175198	E + 02
4	9	0,174483	E + 02
5	4	0,172190	E + 02
6	39	0,168037	E + 02
7	1	0,165901	E + 02
8	33	0,165885	E + 02
9	10	0,165079	E + 02
10	29	0,164061	E + 02
11	5	0,162588	E + 02
12	8	0,162552	E + 02
13	20	0,162442	E + 02
14	32	0,162344	E + 02
15	41	0,162192	E + 02
16	23	0,162067	E + 02
17	11	0,161519	E + 02
18	40	0,161327	E + 02
19	21	0,161190	E + 02
20	2	0,160554	E + 02
21	12	0,159174	E + 02
22	7	0,158819	E + 02
23	26	0,158798	E + 02
24	28	0,158658	E + 02
25	31	0,158406	E + 02
26	35	0,158382	E + 02
27	24	0,155992	E + 02
28	30	0,154275	E + 02
29	6	0,153624	E + 02
30	22	0,153452	E + 02
31	3	0,153177	E + 02
32	19	0,152826	E + 02
33	15	0,149680	E + 02
34	25	0,149258	E + 02
35	27	0,148671	E + 02
36	17	0,148175	E + 02
37	18	0,127498	E + 02
38	14	0,116657	E + 02
*39	13	-	
*40	16	-	
*41	34	-	

* Contingências que deixam o sistema desconexo.

Índice de Desempenho para o caso básico = 0,163094 E + 02.

TABELA 5.4

Índice de desempenho levando em conta tensão e potência reativa, calculado pela primeira iteração do método desacoplado rápido.

Nº de ordem	Contingência	Índice
*1	34	0,253544 E + 05
2	36	0,250124 E + 02
3	37	0,181361 E + 02
4	38	0,178654 E + 02
5	9	0,174924 E + 02
6	4	0,172573 E + 02
7	39	0,169574 E + 02
8	33	0,165557 E + 02
9	10	0,165319 E + 02
10	29	0,164327 E + 02
11	41	0,162951 E + 02
12	32	0,162751 E + 02
13	8	0,162599 E + 02
14	20	0,162391 E + 02
15	23	0,162370 E + 02
16	21	0,161620 E + 02
17	5	0,161374 E + 02
18	40	0,161307 E + 02
19	11	0,160948 E + 02
20	2	0,159811 E + 02
21	7	0,159422 E + 02
22	12	0,159124 E + 02
23	35	0,159028 E + 02
24	28	0,157918 E + 02
25	31	0,157549 E + 02
26	1	0,157257 E + 02
27	26	0,156934 E + 02
28	24	0,155928 E + 02
29	30	0,155138 E + 02
30	6	0,153190 E + 02
31	25	0,153167 E + 02
32	15	0,152958 E + 02
33	3	0,152836 E + 02
34	22	0,152680 E + 02
35	19	0,152626 E + 02
36	17	0,149238 E + 02
37	27	0,145922 E + 02
*38	16	0,140364 E + 02
*39	13	0,137945 E + 02
40	18	0,127539 E + 02
41	14	0,118468 E + 02

* Contingências que deixam o sistema desconexo.

Índice de Desempenho para o caso básico = 0,163094 E + 02.

TABELA 5.5

Índice de desempenho pelas violações do fluxo de potência ativa máximo calculado pela primeira iteração do método desacoplado-rápido.

Nº de ordem	Contingência	Índice
1	10 (9)	0,959628 E + 03
2	41	0,337874 E + 03
3	36 (1)	0,243247 E + 03
4	27	0,200487 E + 03
5	18	0,136862 E + 03
6	15	0,130088 E + 03
7	17	0,108531 E + 03
8	14	0,614821 E + 02
9	5	0,605011 E + 02
10	11	0,532533 E + 02
11	31	0,507024 E + 02
12	25	0,491806 E + 02
13	7	0,470043 E + 02
14	28	0,425207 E + 02
15	1 (7)	0,413675 E + 02
16	24	0,392186 E + 02
17	35	0,366702 E + 02
18	19	0,329402 E + 02
19	30	0,328101 E + 02
20	38 (3)	0,324022 E + 02
21	12	0,323951 E + 02
22	22	0,318641 E + 02
23	26	0,296388 E + 02
24	21	0,261521 E + 02
25	37 (2)	0,258649 E + 02
26	6	0,253504 E + 02
27	9 (4)	0,253261 E + 02
28	23	0,252206 E + 02
29	*13	0,245323 E + 02
30	2	0,245258 E + 02
31	4 (5)	0,243751 E + 02
32	39 (6)	0,239860 E + 02
33	32	0,239718 E + 02
34	40	0,236702 E + 02
35	*34	0,234626 E + 02
36	20	0,232902 E + 02
37	33 (8)	0,231115 E + 02
38	*16	0,230962 E + 02
39	29 (10)	0,228019 E + 02
40	3	0,225539 E + 02
41	8	0,224904 E + 02

* Contingências que deixam o sistema desconexo

() Os nºs entre parenteses, nesta lista, indicam a posição destas mesmas contingências na lista da tabela 5.4, onde a classificação foi feita com base em tensão e potência reativa.

Índice de Desempenho para o caso básico = 0,239590 E + 02.

TABELA 5.6

Índice de desempenho por violações dos limites de fluxo de potência ativa máximo considerando no índice apenas as linhas que violam os limites

Nº de ordem	Contingência	Índice
1	10	0,938124 E + 03
2	41	0,317142 E + 03
3	36	0,229601 E + 03
4	27	0,183226 E + 03
5	18	0,121061 E + 03
6	15	0,118791 E + 03
7	17	0,883598 E + 02
8	14	0,493652 E + 02
9	5	0,419876 E + 02
10	11	0,382769 E + 02
11	7	0,373635 E + 02
12	31	0,350676 E + 02
13	25	0,310175 E + 02
14	1	0,251649 E + 02
15	24	0,222540 E + 02
16	28	0,219318 E + 02
17	35	0,165418 E + 02
18	12	0,143486 E + 02
19	22	0,138451 E + 02
20	19	0,130724 E + 02
21	30	0,126298 E + 02
22	26	0,122014 E + 02
23	38	0,104569 E + 02
24	2	0,831085 E + 01
25	4	0,813571 E + 01
26	6	0,665901 E + 01
27	9	0,508979 E + 01
28	23	0,448608 E + 01
29	3	0,440625 E + 01
30	21	0,344489 E + 01
31	37	0,306977 E + 01
32	32	0,268579 E + 01
33	*13	0,237359 E + 01
34	39	0,185135 E + 01
35	*16	0,114505 E + 01
36	33	0,0
37	*34	0,0
38	20	0,0
39	29	0,0
40	40	0,0
41	8	0,0

* Contingências que deixam o sistema desconexo.

TABELA 5.7

Índice de desempenho levando em conta a potência reativa calculado pela primeira iteração do método desacoplado rápido considerando apenas as barras que tiverem violação de limites.

Nº de ordem	Contingência	Índice
*1	34	0,253414 E + 05
2	36	0,144061 E + 02
3	38	0,474949 E + 01
4	37	0,459897 E + 01
5	21	0,442241 E + 01
6	26	0,437225 E + 01
7	31	0,436342 E + 01
8	25	0,434097 E + 01
9	24	0,432931 E + 01
10	4	0,420432 E + 01
11	9	0,353368 E + 01
12	11	0,349233 E + 01
13	8	0,340807 E + 01
14	14	0,339796 E + 01
15	33	0,336508 E + 01
16	30	0,335579 E + 01
17	32	0,334390 E + 01
18	27	0,333742 E + 01
19	10	0,333637 E + 01
20	28	0,333571 E + 01
21	23	0,333548 E + 01
22	20	0,333505 E + 01
23	22	0,333479 E + 01
24	40	0,333447 E + 01
25	39	0,333298 E + 01
26	29	0,333230 E + 01
27	17	0,333183 E + 01
28	41	0,332569 E + 01
29	35	0,331514 E + 01
30	12	0,329926 E + 01
31	2	0,294418 E + 01
32	1	0,280149 E + 01
33	7	0,257797 E + 01
34	18	0,239862 E + 01
35	19	0,235747 E + 01
*36	13	0,227236 E + 01
37	15	0,208585 E + 01
38	6	0,197258 E + 01
39	3	0,192260 E + 01
40	5	0,184165 E + 01
*41	16	0,118325 E + 01

* Contingências que deixam o sistema desconexo.

CAPÍTULO VI

OUTRA TÉCNICA DE SELEÇÃO DE CONTINGÊNCIAS UTILIZANDO CRITÉRIOS DE TENSÃO

6.1. Introdução

O critério utilizado para seleção de contingências [17], descrito neste Capítulo, parte da premissa de que o caso básico corresponde a um ponto de operação possível, enquadrado dentro de um subespaço de soluções limitado pelo conjunto de restrições do sistema. A partir desta suposição, calcula-se um índice de desempenho para cada contingência, utilizando o seguinte artifício: obtêm-se o somatório das variações de cargas que ocorreriam nas barras do sistema, em que a tensão é variável (barras PQ), caso se tentasse levar os níveis de tensão pós-contingência aos níveis de tensão existentes na situação de pré-contingência através de variações nas cargas.

6.2. Índice de Desempenho

Define-se $DP_i + jDQ_i$, como a variação de carga na barra i , de modo a trazer o módulo da tensão V_i , de pós-contingência da barra i , para o valor do módulo da tensão V_i^0 de pré-contingência.

O equivalente de Thevenin para o sistema, visto da barra i , pode ser representado pela figura abaixo:

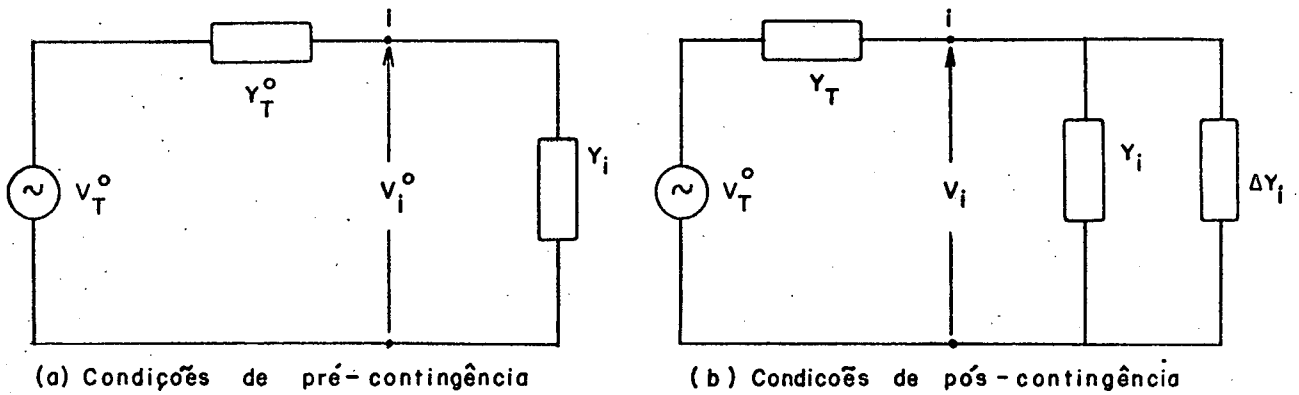


Figura 6.1 - Circuito equivalente do sistema visto da barra i .

A carga da barra i , é suposta como constante e igual a $P_i + jQ_i$. O desvio em tensão é representado por:

$$\Delta V_i = V_i^0 - V_i \quad (6.1)$$

A mudança da admitância da barra i , relacionada com a mudança de tensão, é representada por ΔY_i .

Sob condições de pós-contingência, tem-se:

$$(P_i + jQ_i) = E_i I_i^* \quad (6.2)$$

$$\text{onde } E_i = V_i \angle \delta_i \quad (6.3)$$

e I_i é a corrente na barra i , expressa como:

$$I_i = V_i (Y_i + \Delta Y_i) \quad (6.4)$$

A partir de (6.2) vem:

$$(P_i - jQ_i) = E_i^* I_i \quad (6.5)$$

Substituindo (6.4) em (6.5) tem-se:

$$P_i - jQ_i = V_i^2 (Y_i + \Delta Y_i) \quad (6.6)$$

$$P_i - jQ_i = V_i^2 Y_i + V_i^2 \Delta Y_i \quad (6.7)$$

Substituindo (6.1) em (6.7) vem que:

$$P_i - jQ_i = (V_i^0 - \Delta V_i)^2 Y_i + V_i^2 \Delta Y_i \quad (6.8)$$

$$P_i - jQ_i = (V_i^0)^2 Y_i - 2V_i^0 \Delta V_i Y_i + (\Delta V_i)^2 Y_i + V_i^2 \Delta Y_i \quad (6.9)$$

como $P_i + jQ_i$ é constante, obtem-se:

$$P_i - jQ_i = (V_i^0)^2 Y_i \quad (6.10)$$

Substituindo (6.10) em (6.9) chega-se a:

$$(V_i^0)^2 Y_i = (V_i^0)^2 Y_i - 2V_i^0 \Delta V_i Y_i + (\Delta V_i)^2 Y_i + V_i^2 \Delta Y_i \quad (6.11)$$

que rearranjando fornece:

$$\Delta Y_i = Y_i \left[\frac{2V_i^0 \Delta V_i}{V_i^0} - \frac{\Delta V_i^2}{V_i^0} \right] \quad (6.12)$$

mas $\Delta V_i^2 \ll 2V_i^0 \Delta V_i$,

e portanto:

$$\Delta Y_i \approx Y_i \frac{2V_i^0 \Delta V_i}{V_i^0} \quad (6.13)$$

Substituindo (6.10) em (6.13) tem-se:

$$\Delta Y_i \approx 2(P_i - jQ_i) \Delta V_i / (V_i^0 V_i^0) \quad (6.14)$$

A carga total DL a ser alterada na barra i é:

$$DL = V_i^2 (\Delta Y_i)^* \quad (6.15)$$

Substituindo (6.14) em (6.15) fica:

$$DL = 2(P_i + JQ_i)\Delta V_i/V_i^0 \quad (6.16)$$

A potência real a ser alterada na barra i é:

$$DP_i = 2P_i\Delta V_i/V_i^0 \quad (6.17)$$

A potência reativa a ser alterada na barra i é:

$$DQ_i = 2Q_i\Delta V_i/V_i^0 \quad (6.18)$$

Para uma dada contingência, define-se o índice de desempenho da mesma por:

$$DS = \left[\left(\sum_B |DP_i| \right)^2 + \left(\sum_B |DQ_i| \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.19)$$

onde

B = conjunto de barras em que P e Q são considerados constantes e V variável (barras do tipo PQ).

6.3. Implementação do Algoritmo

Analisando (6.17), (6.18) e (6.19) pode-se observar

que para a implementação de um algoritmo para seleção automática de contingências, com base nesse índice de desempenho, necessita-se dos valores dos módulos de tensão de barra de sistema para cada contingência. Relembrando que é proposição deste trabalho o estudo de métodos de seleção de contingências para utilização em tempo real, propôs-se calcular o módulo de tensão pós-contingência utilizando a primeira iteração de método de Newton Desacoplado Rápido, já visto no Capítulo V. Isto porque em [17] os autores não tiveram como preocupação determinar um método rápido para o cálculo do estado do sistema para cada contingência. A forma de implementação, aqui adotada, é semelhante à do Capítulo V, alterando-se apenas a forma de cálculo do índice de desempenho para cada contingência. Desse modo o algoritmo se torna compatível com a utilização em tempo real, uma vez que o tempo de cálculo para o exemplo foi de 8,89 segundos. Os resultados são apresentados no item seguinte.

6.4. Resultados

A tabela 6.1 mostra os resultados obtidos. Comparando estes resultados com aqueles do Capítulo V (tabelas 5.4 e 5.5), para o exemplo adotado, pode-se notar que a ordenação obtida aqui neste Capítulo, é diferente. A razão desta mudança está na mudança de critérios adotados para a seleção das contingências. Estes resultados não foram melhor explorados porque se os consideram insuficientes para afirmativas mais conclusivas. Para tanto, seriam interessantes testes mais completos, envolvendo inclusive a pró

pria análise de contingências.

TABELA 6.1

Índice desempenho por desvios de tensão do caso básico considerando a potência de barra.

Nº de ordem	Contingência	Índice
*1	34	0,105916 E + 03
2	1	0,103378 E + 00
3	36	0,731266 E - 01
4	18	0,352104 E - 01
5	14	0,346224 E - 01
6	15	0,232645 E - 01
7	25	0,226572 E - 01
*8	16	0,224422 E - 01
*9	13	0,211919 E - 01
10	27	0,187150 E - 01
11	38	0,167965 E - 01
12	26	0,164638 E - 01
13	24	0,163622 E - 01
14	31	0,147010 E - 01
15	9	0,137589 E - 01
16	37	0,132626 E - 01
17	30	0,131733 E - 01
18	7	0,128491 E - 01
19	4	0,125345 E - 01
20	2	0,120567 E - 01
21	17	0,117237 E - 01
22	6	0,112750 E - 01
23	5	0,105837 E - 01
24	22	0,101115 E - 01
25	19	0,990951 E - 02
26	3	0,933731 E - 02
27	35	0,713331 E - 02
28	33	0,643808 E - 02
29	41	0,579793 E - 02
30	39	0,565049 E - 02
31	11	0,547492 E - 02
32	8	0,543090 E - 02
33	32	0,479858 E - 02
34	28	0,445376 E - 02
35	23	0,420822 E - 02
36	21	0,414874 E - 02
37	12	0,411281 E - 02
38	40	0,193739 E - 02
39	29	0,188006 E - 02
40	20	0,162448 E - 02
41	10	0,13537 E - 02

* Contingências que deixam o sistema desconexo.

É interessante, entretanto, observar que:

- 1º) Juntando-se os resultados obtidos no Capítulo V, tabela 5.4 e 5.5, pode-se notar que das 20 primeiras contingências agrupadas, 15 aparecem na tabela 6.1, por exemplo. Nota-se que na tabela 5.4 o índice adotado leva em conta as violações de limites de tensão de barra e injeções de potência reativa, enquanto que na tabela 5.5 o índice utilizado leva em conta as violações nos limites do fluxo de potência ativa.
- 2º) Algumas contingências que são classificadas entre as primeiras, através dos resultados aqui encontrados, não aparecem nas primeiras posições das ordenações obtidas com os índices definidos nos Capítulos anteriores, o que leva pelo menos a um questionamento quanto ao impacto dos diferentes métodos de seleção de contingências na segurança da operação do sistema de potência.

6.5. Resumo do Capítulo

Apresentou-se neste Capítulo um novo critério para seleção automática de contingências. O critério leva em conta a variação da tensão de barra relativamente ao caso básico. Além da tensão leva em conta a injeção nas barras.

A implementação do algoritmo e os resultados obtidos, foram também apresentados.

C A P Í T U L O . VII

APLICAÇÃO DOS ALGORITMOS A UM SISTEMA REAL

7.1. Introdução

Neste capítulo, faz-se a aplicação dos algoritmos implementados a um sistema real. O exemplo utilizado é uma redução do sistema sul do Brasil [24]. Comenta-se também a atribuição de fatores de peso aos algoritmos de seleção automática de contingências.

7.2. Sistema Exemplo

O sistema exemplo aqui apresentado é transcrito da referência [24] com dados adicionais obtidos do próprio autor da quele trabalho. Trata-se de uma rede com 45 barras e 75 linhas, on de se contam 9 barras com regulação de tensão, 10 barras de geração, 19 transformadores e 7 reatores estáticos.

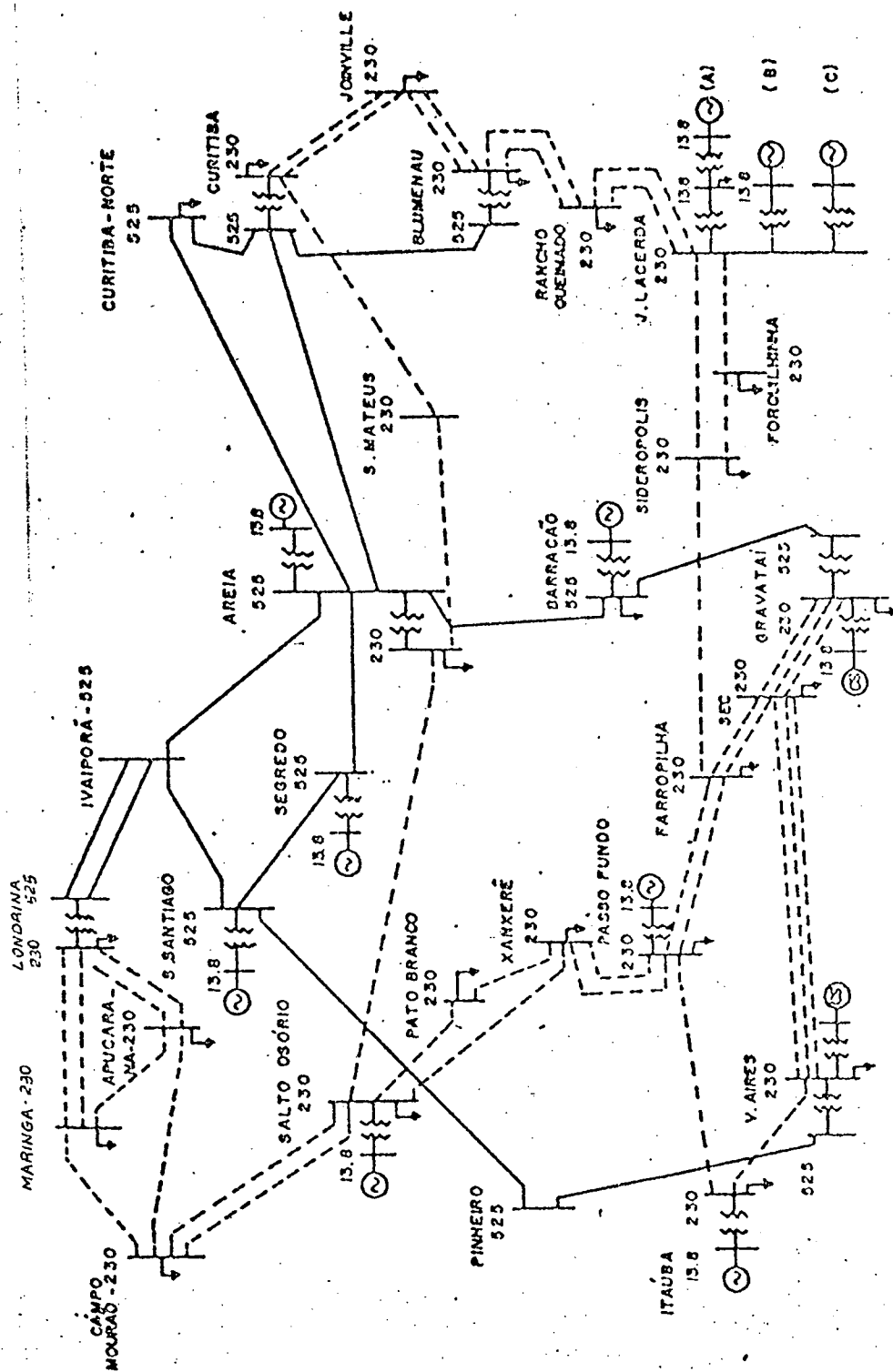


Figura 7.1 - Diagrama Unifilar do Sistema Exemplo.

DADOS DE BARRA

NÚMERO	NOME	GERAÇÃO		CARGA	
		MW	MVAR	MW	MVAR
366	Barracão 13.8	650.0	-	-	-
367	Siderópolis 230	-	-	177.0	68.0
368	Farroupilha 230	-	-	190.7	42.0
369	P. Fundo 13.8	215.0	-	-	-
370	P. Fundo 230	-	-	171.0	18.5
371	Xanxerê 230	-	-	126.0	47.0
372	P. Branco 230	-	-	46.0	14.7
373	S. Osório 13.8	1050.0	-	-	-
374	S. Osório 230	-	-	280.6	56.5
375	Areia 230	-	-	279.0	60.7
376	S. Mateus 230	-	-	130.0	29.4
377	Curitiba 230	-	-	427.0	-25.0
378	Joinville 230	-	-	310.0	141.0
379	Blumenau 230	-	-	424.0	90.6
380	R. Queimado 230	-	-	117.0	53.1
381	F. Areia 13.8	1110.0	-	-	-
382	Areia 525	-	-	0.0	0.0
383	Curitiba 525	-	-	0.0	0.0
384	Curitiba N 525	-	-	368.0	69.6
385	Blumenau 525	-	-	0.0	0.0
386	Barracão 525	-	-	174.0	-8.2
387	Gravatá 525	-	-	0.0	0.0
388	V. Aires 525	-	-	0.0	0.0
389	Pinheiro 525	-	-	0.0	0.0
390	S. Santiago 13.8	1325.0	-	-	-
391	S. Santiago 525	-	-	0.0	0.0
392	J. Lacerda 13.8	90.0	-	-	-
393	J. Lacerda 13.8	-	-	126.0	39.8
394	J. Lacerda 13.8	120.0	-	-	-
395	J. Lacerda 13.8	241.0	-	-	-
396	J. Lacerda 230	-	-	0.0	0.0

*397	Segredo 13.8	-	-	-	-
398	Segredo 525	-	-	0.0	0.0
399	SECI 230	-	-	813.0	110.0
402	Gravataí 230	-	-	612.0	-455.0
407	Itaúba 13.8	490.0	-	-	-
408	Itauba 230	-	-	403.6	134.9
414	V.Aires 230	-	-	393.3	-111.0
430	Apucarana 230	-	-	262.0	13.2
431	Londrina 230	-	-	229.0	183.0
432	Maringá 230	-	-	184.0	60.2
433	C. Mourão	-	-	139.0	53.7
437	Forquilha 230	-	-	90.1	55.3
343	Ivaiporã 525	-	-	0.0	0.0
344	Londrina 525	-	-	0.0	0.0

* Barra de folga.

DADOS BARRAS DE REGULAÇÃO

BARRA	TENSÃO (PU)	Q MÁXIMO (MVAR)	Q MÍNIMO (MVAR)
366	1.020	-300	+300
369	1.040	-130	+130
373	1.020	-600	+600
381	1.022	-500	+500
390	1.018	-600	+600
392	1.030	-90	+90
394	1.030	-60	+60
395	1.030	-188	+188
407	1.000	-240	+240

DADOS DE LINHAS

NÚMERO	B. INICIAL	B. FINAL	R%	X%	B (MVA)
1	366	386	0.00	1.36	0.00
2	367	368	3.86	19.85	34.00
3	367	396	0.96	4.91	8.42
4	367	437	0.33	1.67	2.86
5	368	370	4.63	23.78	40.84
6	368	370	4.63	23.78	40.84
7	368	399	1.77	9.10	15.85
8	368	399	1.77	9.10	15.85
9	369	370	0.00	4.60	0.00
10	370	371	1.63	8.35	14.40
11	370	371	1.63	8.35	14.40
12	371	372	1.63	8.35	14.40
13	371	374	3.16	16.21	27.84
14	372	374	1.53	8.61	13.44
15	373	374	0.00	1.14	0.00
16	374	375	3.06	15.23	27.02
17	374	433	3.44	17.60	30.40
18	374	433	3.44	17.60	30.40
19	375	376	2.45	12.56	20.41
20	376	377	0.88	4.15	52.11
21	377	378	1.82	9.35	15.95
22	377	378	1.82	9.35	15.95
23	378	379	1.54	7.76	13.50
24	378	379	1.54	7.76	13.50
25	379	380	2.16	11.05	18.63
26	379	380	2.16	11.05	18.63
27	380	396	1.80	9.20	15.53
28	380	396	1.80	9.20	15.53
29	381	382	0.00	0.67	0.00
30	382	383	0.19	2.80	335.76
31	382	384	0.19	2.74	328.67

Dados de Linhas (Cont.)

32	382	398	0.05	0.70	83.92
33	343	382	0.18	2.27	227.21
34	382	375	0.00	3.00	0.00
35	383	384	0.05	0.69	82.16
36	383	385	0.12	1.75	209.70
37	377	383	0.00	0.62	0.00
38	379	385	0.00	0.62	0.00
39	386	387	0.21	3.09	371.83
40	382	386	0.14	1.95	239.68
41	387	402	0.00	0.62	0.00
42	388	389	0.22	3.00	383.00
43	388	414	0.00	0.62	0.00
44	389	391	0.14	1.95	239.70
45	390	391	0.00	1.14	0.00
46	343	391	0.14	2.04	244.75
47	391	398	0.05	0.70	83.92
48	392	393	0.00	8.71	0.00
49	393	396	0.00	5.90	0.00
50	394	396	0.00	7.01	0.00
51	395	396	0.00	4.50	0.00
52	396	437	0.29	6.57	11.28
53	397	398	0.00	0.68	0.00
54	399	402	0.22	1.11	2.32
55	399	402	0.22	1.11	2.32
56	399	402	0.22	1.11	2.32
57	399	414	2.07	9.33	17.18
58	399	414	1.68	9.30	17.20
59	399	414	1.76	9.84	17.98
60	370	408	2.50	15.48	46.90
61	407	408	0.00	2.36	0.00
62	408	414	2.02	11.29	20.62
63	430	433	2.29	11.74	20.27
64	430	432	1.10	11.84	20.27
65	430	431	1.25	6.41	11.09

Dados de Linha (Cont.)

66	430	431	0.89	4.61	7.96
67	431	432	1.72	8.84	14.34
68	431	432	1.72	8.84	14.34
69	432	433	1.81	9.29	16.07
70	343	344	0.07	1.45	166.10
71	343	344	0.07	1.45	166.10
72	344	431	0.00	0.63	0.00

REATORES ESTÁTICOS

BARRA	MVAR
343	-200
383	-150
384	-150
386	-100
387	-150
388	-150
389	-150

LIMITES MÁXIMOS DE FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA

Linhas	230 KV	279 MW
Linhas	525 KV	2540 MW
Transformadores	230/525	600 MW

Obs: Os limites máximos para os transformadores elevadores nas saídas de geradores foram fixados num valor elevado, para que não influenciem no valor do índice, pois contingências nestes

transformadores tornam o sistema desconexo.

LIMITES DAS TENSÕES DE BARRAS COM TENSÃO NÃO CONTROLADA

$$V_{\text{Máximo}} = 1,05 \text{ p.u.}$$

$$V_{\text{Mínimo}} = 0,95 \text{ p.u.}$$

7.3. Resultados Obtidos

Os resultados obtidos para o novo sistema exemplo utilizando-se os algoritmos vistos nos capítulos IV, V e VI são apresentados nas tabelas 7.1, 7.2 e 7.3 respectivamente. Nestas tabelas são apresentadas as contingências que deixam o sistema conexo. Para se ter uma idéia real do potencial de utilização de cada algoritmo a partir dos dados obtidos, deve-se contar com novos meios de avaliação. Nos capítulos anteriores fez-se uso do índice de captura que mostra o bom desempenho matemático dos algoritmos, mas não certifica quanto à validade dos critérios adotados para seleção automática de contingências. Acredita-se que uma melhor avaliação dos algoritmos pode ser feita através dos resultados obtidos por um algoritmo de análise de contingências [5] aplicado a todas as contingências possíveis e, a partir destes resultados, adotar um critério para que se possa ordenar as contingências de modo a constituir parâmetros de comparação dos resultados obtidos pelos algoritmos de seleção automática de contingências. Os tempos

gastos na execução dos algoritmos cujos resultados estão ap^{re}senta^{dos} no final do capítulo são:

tabela 7.1 - 9,62 segundos

tabela 7.2 - 37,83 segundos

tabela 7.3 - 30,89 segundos.

O aumento desproporcional dos tempos de execução pa^{ra} os algoritmos utilizados nas tabelas 7.2 e 7.3 foi ocasionado pela necessidade de desativação de uma subrotina que identifica as adjacências de cada barra do sistema, no método de Newton Desaco^{plado}-Rápido, que não admitia linhas paralelas, como no exemplo utilizado neste capítulo. Uma nova versão para o programa já está sendo elaborada alterando a subrotina para consideração de linhas paralelas. Com esta providência estima-se que os tempos de execu^{ção} irão diminuir bastante.

TABELA 7.1

Índice de desempenho calculado pelo algoritmo utilizando fluxo de potência linearizado (Capítulo IV).

Ordem	Contingência	Barra Inic.	Barra Final	Índice
1	40	382	386	0,197623 E + 02
2	41	387	402	0,167660 E + 02
3	39	386	387	0,167659 E + 02
4	42	388	389	0,158322 E + 02
5	43	388	414	0,158322 E + 02
6	44	389	391	0,158322 E + 02
7	3	367	396	0,139609 E + 02
8	32	382	398	0,138675 E + 02
9	36	383	385	0,118499 E + 02
10	38	379	385	0,118493 E + 02

Tabela 7.1 (cont.)

11	28	380	396	0,112377	E + 02
12	27	380	396	0,112377	E + 02
13	34	375	382	0,110877	E + 02
14	25	379	380	0,108888	E + 02
15	26	379	380	0,108888	E + 02
16	72	344	431	0,108686	E + 02
17	37	377	383	0,108104	E + 02
18	30	382	383	0,106675	E + 02
19	23	378	379	0,106671	E + 02
20	24	378	379	0,106671	E + 02
21	63	430	433	0,106344	E + 02
22	31	382	384	0,106242	E + 02
23	46	343	391	0,106179	E + 02
24	58	399	414	0,105247	E + 02
25	57	399	414	0,105241	E + 02
26	59	399	414	0,105148	E + 02
27	64	430	432	0,105061	E + 02
28	65	430	431	0,104374	E + 02
29	60	370	408	0,104066	E + 02
30	66	430	431	0,103906	E + 02
31	35	383	384	0,103826	E + 02
32	70	343	344	0,103721	E + 02
33	71	343	344	0,103721	E + 02
34	19	375	376	0,103704	E + 02
35	68	431	432	0,103694	E + 02
36	67	431	432	0,103694	E + 02
37	10	370	371	0,103585	E + 02
38	54	399	402	0,103527	E + 02
39	55	399	402	0,103527	E + 02
40	56	399	402	0,103527	E + 02
41	69	432	433	0,103520	E + 02
42	14	372	374	0,103449	E + 02
43	33	343	382	0,103205	E + 02
44	12	371	372	0,103186	E + 02
45	62	408	414	0,103053	E + 02
46	18	374	433	0,103033	E + 02
47	17	374	433	0,103033	E + 02
48	22	377	378	0,103002	E + 02
49	8	368	399	0,102885	E + 02
50	7	368	399	0,102885	E + 02
51	6	368	370	0,102885	E + 02
52	5	368	370	0,102885	E + 02
53	20	376	377	0,102500	E + 02
54	11	370	371	0,102302	E + 02
55	21	377	378	0,101367	E + 02
56	16	374	375	0,100297	E + 02
57	13	371	374	0,989475	E + 01
58	47	391	398	0,985798	E + 01
59	2	367	368	0,927705	E + 01
60	4	367	437	0,798005	E + 01
61	52	396	437	0,600000	E + 01

Índice de Desempenho para o caso básico = 0,103590 E + 02.

TABELA 7.2

Índice de desempenho levando em conta a tensão de barra e injeções de potência reativa (Capítulo V).

Ordem	Contingência	Barra Inic.	Barra Final	Índice
1	72	344	431	0,113459 E + 03
2	39	386	387	0,708448 E + 02
3	41	387	402	0,560767 E + 02
4	36	383	385	0,431764 E + 02
5	30	382	383	0,422797 E + 02
6	37	377	383	0,394333 E + 02
7	31	382	384	0,394053 E + 02
8	42	368	399	0,391595 E + 02
9	38	369	370	0,348415 E + 02
10	43	388	414	0,335586 E + 02
11	44	389	391	0,284254 E + 02
12	34	382	375	0,272577 E + 02
13	35	383	384	0,264299 E + 02
14	32	382	398	0,252785 E + 02
15	40	382	386	0,249194 E + 02
16	2	367	368	0,240822 E + 02
17	70	343	344	0,238580 E + 02
18	71	343	344	0,238576 E + 02
19	20	376	377	0,236255 E + 02
20	21	377	378	0,235435 E + 02
21	22	377	378	0,235434 E + 02
22	3	367	396	0,235220 E + 02
23	19	375	376	0,232897 E + 02
24	52	396	437	0,231758 E + 02
25	46	343	391	0,231687 E + 02
26	14	372	374	0,230401 E + 02
27	62	408	414	0,230247 E + 02
28	17	374	433	0,229403 E + 02
29	18	374	433	0,229403 E + 02
30	27	380	396	0,228975 E + 02
31	28	380	396	0,228974 E + 02
32	16	374	375	0,228583 E + 02
33	13	371	374	0,227907 E + 02
34	66	430	431	0,225478 E + 02
35	67	431	432	0,224851 E + 02
36	68	431	432	0,224851 E + 02
37	23	378	379	0,224341 E + 02
38	24	378	379	0,224340 E + 02
39	11	370	371	0,224192 E + 02
40	10	370	371	0,224192 E + 02
41	33	343	382	0,223772 E + 02
42	63	430	433	0,223243 E + 02
43	25	379	380	0,223017 E + 02
44	26	379	380	0,223016 E + 02

Tabela 7.2 (cont.)

45	65	430	431	0,222785	E + 02
46	8	368	399	0,222480	E + 02
47	7	368	399	0,222470	E + 02
48	47	391	398	0,222322	E + 02
49	69	432	433	0,222033	E + 02
50	64	430	432	0,220728	E + 02
51	4	367	437	0,220674	E + 02
52	60	370	408	0,220370	E + 02
53	12	371	372	0,219610	E + 02
54	56	399	402	0,217431	E + 02
55	55	399	402	0,217430	E + 02
56	54	399	402	0,217430	E + 02
57	5	368	370	0,215634	E + 02
58	6	368	370	0,215634	E + 02
59	57	399	414	0,213670	E + 02
60	58	399	414	0,213485	E + 02
61	59	399	414	0,213375	E + 02

TABELA 7.3

Índice de desempenho calculado pelos desvios de tensão em relação ao caso básico e levando em conta a potência de barra (Capítulo VI).

Ordem	Contingência	Barra Inic.	Barra Final	Índice
1	72	344	431	0,259013 E + 02
2	39	386	387	0,164337 E + 02
3	2	367	368	0,130037 E + 02
4	41	387	402	0,129115 E + 02
5	37	377	383	0,111196 E + 02
6	36	383	385	0,108594 E + 02
7	30	382	383	0,107680 E + 02
8	31	382	384	0,102016 E + 02
9	38	379	385	0,990891 E + 01
10	34	382	375	0,774728 E + 01
11	42	388	389	0,726414 E + 01
12	35	383	384	0,713642 E + 01
13	46	343	391	0,679680 E + 01
14	70	343	344	0,677956 E + 01
15	71	343	344	0,677945 E + 01
16	21	377	378	0,667655 E + 01
17	22	377	378	0,667650 E + 01
18	62	408	414	0,666555 E + 01
19	20	376	377	0,657692 E + 01

Tabela 7.3 (cont.)

20	19	375	376	0,652203	E + 01
21	33	343	382	0,648639	E + 01
22	23	378	379	0,644326	E + 01
23	24	378	373	0,644321	E + 01
24	66	430	431	0,642493	E + 01
25	27	380	396	0,642349	E + 01
26	28	380	396	0,642347	E + 01
27	17	374	433	0,642271	E + 01
28	18	374	433	0,642270	E + 01
29	67	431	432	0,638959	E + 01
30	68	431	432	0,638959	E + 01
31	65	430	431	0,636061	E + 01
32	47	391	398	0,635258	E + 01
33	63	430	433	0,631767	E + 01
34	64	430	432	0,630540	E + 01
35	8	368	399	0,630334	E + 01
36	7	368	399	0,630334	E + 01
37	69	432	433	0,629809	E + 01
38	52	396	437	0,629472	E + 01
39	25	379	380	0,629466	E + 01
40	26	379	380	0,629462	E + 01
41	14	372	374	0,627418	E + 01
42	13	371	374	0,627376	E + 01
43	3	367	396	0,626258	E + 01
44	16	374	375	0,625308	E + 01
45	4	367	437	0,624554	E + 01
46	10	370	371	0,624496	E + 01
47	11	370	371	0,624495	E + 01
48	60	370	408	0,624453	E + 01
49	12	371	372	0,622442	E + 01
50	56	399	402	0,617538	E + 01
51	55	399	402	0,617538	E + 01
52	54	399	402	0,617538	E + 01
53	32	382	398	0,611111	E + 01
54	6	368	370	0,603854	E + 01
55	5	368	370	0,603852	E + 01
56	57	399	414	0,600775	E + 01
57	59	399	414	0,598178	E + 01
58	58	399	414	0,597754	E + 01
59	40	382	386	0,536335	E + 01
60	43	388	414	0,520033	E + 01
61	44	389	391	0,505581	E + 01

7.4. Atribuições de Peso

Tendo em vista a necessidade de ter que se atribuir maior importância a determinadas linhas do sistema, utilizam-se os fatores de peso, que multiplicam os índices de desempenho adotados. Estes fatores de peso podem alterar a ordem de uma contingência na lista fazendo com que ela suba ou desça na ordenação. Na referência [12], Fischl, Halpin e Guvenis (1982) fazem uma aplicação dos fatores de peso com o objetivo de minimizar os erros de ordenação dos algoritmos de seleção automática de contingências, atribuindo fatores de peso adequados às linhas do sistema. No trabalho os autores procuram um valor limite (J_{LIM}) para o índice de desempenho no qual as contingências com índice maior que J_{LIM} são consideradas contingências críticas e com índice menor que J_{LIM} como contingências não-críticas. Adotando este critério, pode-se chegar a erros de classificação do tipo:

- 1) MÁ-CLASSIFICAÇÃO - Contingência considerada não crítica é ativa, ou seja, provoca violações nas restrições do sistema.
- 2) FALSO ALARME - Contingência considerada crítica é inativa, ou seja, não provoca violações nas restrições do sistema.

Para minimizar os erros de ordenação deve-se minimizar tanto a probabilidade de falso alarme como a probabilidade de má-classificação. Como ambas minimizações não podem ser feitas ao mesmo tempo, utiliza-se o critério de decisão de Neyman-Pearson.

Este critério observa que se pode minimizar a probabilidade de falso alarme para um determinado nível de probabilidade de má-classificação. Para forçar o cumprimento dos objetivos dos algoritmos de seleção automática de contingências, Fischl, Halpin e Guvenis desenvolveram um método sistemático de atribuição de fatores de peso aos algoritmos, minimizando a probabilidade de falso alarme para uma probabilidade de má-classificação zero, garantindo que todas as contingências ativas sejam capturadas.

7.5. Conclusões sobre a aplicação dos algoritmos a um Sistema Real

- 1) Analisando as listas, pode-se observar que, como já foi visto anteriormente, uma ordenação feita baseando-se em critérios que levam em conta as violações nos limites de potência ativa apresentam diferenças com relação às ordenações feitas levando-se em conta critérios de tensão. Por exemplo, a contingência 40, que foi ordenada como a primeira na tabela 7.1, teve ordem 15 na tabela 7.2 e ordem 59 na tabela 7.3. A contingência 72, que foi ordenada como a primeira nas tabelas 7.2 e 7.3, teve ordem 16 na tabela 7.1.
- 2) Juntando-se as tabelas 7.1 e 7.2 numa única ordenação e comparando com a ordenação da tabela 7.3, observa-se que a tendência de se ter uma certa semelhança nas ordenações, observada no exemplo do Capítulo VI, não se repete aqui. Po

de-se constatar que contingências ordenadas no topo da lista da tabela 7.1, estão ordenadas no final da lista na tabela 7.3. Isto justifica mais ainda a precaução na utilização dos algoritmos estudados para a seleção automática de contingências da análise de segurança em tempo real.

- 3) Não foi possível avaliar os índices de desempenho, para o exemplo aqui adotado tomando como critério o índice de captura. A dificuldade foi devido à não-convergência, mesmo em se utilizando algoritmos de fluxo de potência completo, para algumas contingências de sistema.

- 4) Não é possível afirmar com propriedade qual dentre estas listas revela um melhor algoritmo e portanto qual é o melhor critério de classificação, sem que se desenvolva uma análise completa das contingências para o sistema considerado.

C A P Í T U L O VIII

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

8.1. Introdução

Reunem-se neste capítulo as principais conclusões do presente trabalho, apresentando-se sugestões para desenvolvimento futuro do mesmo.

8.2. Conclusões

- O exame das listas obtidas, pelos diferentes algoritmos para seleção automática de contingências estudados, revela diferenças de ordenação que resultam da adoção de diferentes critérios de seleção. Estas diferenças podem ser atribuídas à simplificação do processo de seleção, através de definições de índices de sobrecarga artificialmente criados, com a finalidade de evitar a necessidade de resolver o problema na sua forma completa, bem como às próprias diferenças de definição dos índices de seleção utilizados em cada caso. Desta forma, parece claro que uma ordenação baseada em critérios de sobrecarga de fluxo ativo não será conforme com uma ordenação que tenha sido realizada através de um indicador de desvios de tensão desde o caso pré-contingência ao caso

pós-contingência.

- No desenvolvimento do trabalho constatou-se que a fixação de limites, que nem sempre correspondem às capacidades reais dos equipamentos, pode falsear os cálculos dos índices de desempenho, resultando em ordenações onde contingências críticas, para o sistema como um todo, aparecem classificadas após contingências reconhecidamente menos críticas. Esta má classificação seria resultante da distância entre os valores dos limites fixados para o cálculo dos índices e os valores destes limites na realidade.

- Os algoritmos implementados não foram programados para tratar o caso de contingências que dividem a rede em várias componentes conexas (ilhamento) e nesse caso os valores dos índices de desempenho, para estas contingências, não parecem ter um maior significado.

- Na avaliação dos algoritmos, pela análise do índice de captura e pelos tempos de execução, pode-se concluir que os mesmos apresentam um desempenho satisfatório para operação em tempo real, com base nos trabalhos que serviram de referência para este estudo. Entretanto, nada se pode afirmar com relação ao desempenho comparativo dos algoritmos, pois para tanto seria necessário observar os resultados dos mesmos quando inseridos num conjunto coerente de programas, formando uma cadeia informática para operação em tempo real.

- Tendo usado como referência, para avaliação da precisão dos cálculos dos algoritmos, o fluxo de carga completo é possível confirmar somente o bom desempenho numérico dos algoritmos.

MOS.

- Conclui-se ainda, que as ordenações podem apresentar má-classificação devido à perda da dominância diagonal no caso de algoritmos que utilizam a primeira iteração do método de Newton Desacoplado Rápido, em consequência de problemas de convergência. No caso de redes malhadas, raramente aparece este tipo de problema.

8.3. Sugestões para futuros trabalhos

Finaliza-se o presente trabalho com algumas sugestões no sentido de complementar e aperfeiçoar os estudos de seleção automática de contingências:

- Dotar os algoritmos de meios que permitam tratar o caso de contingências que dividem o sistema em diferentes componentes conexos.

- Modificar os algoritmos que utilizam a primeira iteração do método de Newton Desacoplado Rápido de modo a contornar os problemas de má ordenação provocada por perda de dominância diagonal.

- Completar os estudos para utilização dos fatores de peso, à partir da idéia de Fischl, Halpin e Guvenis [12].

- Estabelecer um critério para avaliação do desempenho dos algoritmos baseado numa análise completa das contingências selecionadas, de modo a poder comparar as ordenações das lis

tas obtidas com um maior sentimento físico.

- Testes dos algoritmos sob as condições da operação em tempo real de sistemas existentes que já utilizam análise de segurança na prática.

A N E X O A

FORMAÇÃO DA MATRIZ SUSCETÂNCIA B

Na formação da matriz B os elementos derivação das linhas de transmissão e transformadores não são considerados. A linha e a coluna da matriz correspondente a barra de folga são excluídas.

Os elementos B_{ik} de B, onde i é a linha e k a coluna da matriz, são dados por:

$$B_{ik} = -b_{ik} \quad (A.1)$$

$$B_{ii} = \sum_{k \in \mathcal{U}_i} b_{ik} \quad (A.2)$$

onde:

\mathcal{U}_i - conjunto das barras que se ligam diretamente a barra i .

b_{ik} - suscetância da linha ligada a barra i e k .

Tem-se três formas de expressar o valor de b_{ik} :

$$I^a) \quad b_{ik} = \frac{1}{X_{ik}} \quad (A.3)$$

X_{ik} - reatância da linha ligada as barras i e k .

$$\text{II}^{\text{a)}} \quad b_{ik} = \frac{X_{ik}}{X_{ik}^2 + r_{ik}^2} \quad (\text{A.4})$$

X_{ik} - reatância da linha ligada as barras i e k.

r_{ik} - resistência da linha ligada as barras i e k.

$$\text{III}^{\text{a)}} \quad b_{ik} = (g_{ik}^2 - b_{ik}^2)^{1/2} \quad (\text{A.5})$$

g_{ik} - condutância da linha ligada as barras i e k.

b_{ik} - suscetância da linha ligada as barras i e k.

De acordo com a referência [4] a forma (A.3) é a forma que parece mais adequada, pois evita problemas com a resistência da linha principalmente quando esta é elevada. As diferenças entre as três formas de se expressar b_{ik} só se tornam mais sensíveis quando utilizadas iterativamente, como no método desacoplado rápido.

ANEXO B

FLUXO DE CARGA LINEARIZADO

As equações de fluxo de carga [4] sem considerar os elementos derivação do sistema são:

$$P_k = V_k \sum_{i \in \Omega_k} (V_k g_{ki} - V_i g_{ki} \cos \theta_{ki} - V_i b_{ki} \sin \theta_{ki}) \quad (\text{B.1})$$

$$Q_k = V_k \sum_{i \in \Omega_k} (-V_k b_{ki} + V_i b_{ki} \cos \theta_{ki} - V_i g_{ki} \sin \theta_{ki}) \quad (\text{B.2})$$

$$T_{ki} = V_k^2 g_{ki} - V_k V_i g_{ki} \cos \theta_{ki} - V_k V_i b_{ki} \sin \theta_{ki} \quad (\text{B.3})$$

$$Q_{ki} = -V_k^2 b_{ki} + V_k V_i b_{ki} \cos \theta_{ki} - V_k V_i g_{ki} \sin \theta_{ki} \quad (\text{B.4})$$

onde:

P_k - injeção líquida de potência ativa na barra k .

Q_k - injeção líquida de potência reativa na barra k .

T_{ki} - fluxo de potência ativa na linha l ligada as barras i e k .

Q_{ki} - fluxo de potência reativa na linha l ligada as barra i e k .

V_k - módulo de tensão na barra k .

V_i - módulo de tensão na barra i .

δ_k - ângulo de fase da tensão da barra k .

δ_i - ângulo de fase da tensão da barra i .

θ_{ki} - diferença angular ($\delta_k - \delta_i$).

g_{ki}, b_{ki} - elementos da matriz admitância de barra ($y_{ki} = g_{ki} + jb_{ki}$)

Ω_k - conjunto de barras que se ligam diretamente à barra k .

NB - número de barras do sistema.

O modelo de fluxo de carga linearizado é obtido aplicando-se algumas hipóteses simplificadoras às expressões (B-1), (B-2), (B-3) e (B-4):

I - As barras são todas de tensão controladas (PV) e seus módulos são iguais a 1 p.u.

II - Sendo o valor de r_{ki} (resistência da linha que liga as barras k e i) muito menor que X_{ki} (reatância da linha)

$$X_{ki} \ll r_{ki} \quad (B.5)$$

o que é válida para tensões de 230 KV para cima.

Sabendo que:

$$g_{ki} = \frac{r_{ki}}{X_{ki}^2 + r_{ki}^2} \quad (\text{B.6})$$

de (B.5) $g_{ki} \approx 0$ (B.7)

III - As diferenças angulares das linhas são pequenas, sobretudo para linhas longas, de modo que se pode fazer as aproximações:

$$\text{sen } \theta_{ki} \approx \theta_{ki} \quad (\text{B.8})$$

$$\text{cos } \theta_{ki} \approx 1,0 \quad (\text{B.9})$$

Pela hipótese I a expressão (B.1) passa a formar um sistema de (NB-1) equações com (NB-1) incógnitas que são os ângulos de fase das tensões de barra. A equação correspondente a barra de folga é excluída, pois o ângulo de fase desta barra é arbitrado igual a zero. Com as hipóteses II e III, chega-se ao conjunto de equações lineares:

$$P_k = \sum_{i \in \Omega_k} -b_{ki} (\delta_k - \delta_i) \quad (\text{B.10})$$

Utilizando uma formulação matricial:

$$P = B \delta \quad (\text{B.11})$$

onde:

P - vetor das injeções líquidas de potência ativa nas barras, ex
cluída barra de folga.

B - matriz suscetância da rede (ANEXO A).

δ - vetor dos ângulos de fase das tensões de barra, ex
cluída barra de folga.

O sinal negativo da expressão (B.10) é incorporado na matriz B da expressão (B.11) na formulação aqui apresentada.

Pelas mesmas considerações, partindo de (B.2), (B.3) e (B.4) chega-se:

$$Q_k \approx 0 \quad (B.12)$$

$$Q_{ki} \approx 0 \quad (B.13)$$

$$T_{ki} = -b_{ki} \theta_{ki} \quad (B.14)$$

Redefinindo (B.14) tem-se:

$$T_{\ell} = b_{\ell} \theta_{\ell}$$

onde:

T_{ℓ} - fluxo de potência ativa na linha ℓ ligada as barras i e k .

b_ℓ - suscetância da linha ℓ

$$b_\ell = -b_{ik} \quad (\text{B.15})$$

θ_ℓ - diferença angular da linha ℓ .

A N E X O C

DEMONSTRAÇÃO DO LEMA DA MATRIZ INVERSA [19]

Lema da Matriz Inversa:

Se as matrizes P_{n+1} , P_n , M_{n+1} e X_{n+1} satisfazem a equação:

$$P_{n+1}^{-1} = P_n^{-1} + M_{n+1}^T X_{n+1} M_{n+1} \quad (C.1)$$

onde P_{n+1} , P_n , X_{n+1} e $(M_{n+1}^T P_n M_{n+1} + X_{n+1})$ existem, o que requer que P_n^{-1} , P_{n+1}^{-1} e X_{n+1}^{-1} sejam não singulares e que M_{n+1} seja de caracte_rística máxima, então P_{n+1} pode ser obtida por:

$$P_{n+1} = P_n - P_n M_{n+1}^T (M_{n+1}^T P_n M_{n+1} + X_{n+1})^{-1} M_{n+1} P_n \quad (C.2)$$

Demonstração

Pode-se demonstrar o lema da matriz inversa manipulando as expressões de modo que chega-se a equação (C.2) diretamente de (C.1).

Pré-multiplicando (C.1) por P_{n+1} , tem-se:

$$I = P_{n+1} P_n^{-1} + P_{n+1} M_{n+1}^T X_{n+1}^{-1} M_{n+1} \quad (C.3)$$

Pós-multiplicando (C.3) por P_n , resulta em:

$$P_n = P_{n+1} + P_{n+1} M_{n+1}^T X_{n+1}^{-1} M_{n+1} P_n \quad (C.4)$$

Pós-multiplicando (C.4) por M_{n+1}^T , obtem-se:

$$\begin{aligned} P_n M_{n+1}^T &= P_{n+1} M_{n+1}^T + P_{n+1} M_{n+1}^T X_{n+1}^{-1} M_{n+1} P_n M_{n+1}^T \\ &= P_{n+1} M_{n+1}^T X_{n+1}^{-1} [X_{n+1} + M_{n+1} P_n M_{n+1}^T] \end{aligned} \quad (C.5)$$

Pós-multiplicando (C.5) por $[X_{n+1} + M_{n+1} P_n M_{n+1}^T]^{-1}$

chega-se:

$$P_{n+1} M_{n+1}^T X_{n+1}^{-1} = P_n M_{n+1}^T [M_{n+1} P_n M_{n+1}^T + X_{n+1}]^{-1} \quad (C.6)$$

Pós-multiplicando (C.6) por $M_{n+1} P_n$ vê-se que:

$$P_{n+1} M_{n+1}^T X_{n+1}^{-1} M_{n+1} P_n = P_n M_{n+1}^T [M_{n+1} P_n M_{n+1}^T + X_{n+1}]^{-1} M_{n+1} P_n \quad (C.7)$$

Subtraindo a equação (C.7) de P_n , resulta em:

$$P_n - P_{n+1} M_{n+1}^T X_{n+1}^{-1} M_n P_n = P_n - P_n M_{n+1}^T [M_{n+1} P_n M_{n+1}^T + X_{n+1}]^{-1} M_{n+1} P_n \quad (C.8)$$

Da equação (C.4) finalmente tem-se:

$$P_{n+1} = P_n - P_n M_{n+1}^T [M_{n+1} P_n M_{n+1}^T + X_{n+1}]^{-1} M_{n+1} P_n \quad (C.9)$$

A equação (C.9) é idêntica a equação (C.2), com o que fica demonstrado o lema da matriz inversa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - T.E., DY LIACCO. "Real Time Computer Control of Power System", Proceedings IEEE, Volume 62, julho de 1974, p. 884-891.
- [2] - T.E., DY LIACCO. "System Security: The Computer Role", IEEE Spectrum, junho 1978, p. 45-50.
- [3] - A.C. PIZZOLANTE. Representação de Partes Parcialmente observáveis de Sistemas de Energia Elétrica, Diss. de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, 1979.
- [4] - A.J. MONTICELLI, Análise Estática de Contingências em Sistemas de Energia Elétrica, Tese de Livre Docência, UNICAMP, Campinas, SP, 1980.
- [5] - A.S.DEBS, A.R.BENSON. "Security Assessment of Power System", System Engineering for Power Status and Prospects, ERDA & EPRI Conferência, Hennicker, 1975, p. 144-175.
- [6] - A.H.El-ABIAD, G.W.STAGG. "Automatic Evaluation of Power System Performance - Effects of Line and Transformer Outages", PAS IEEE, fevereiro, 1963, p. 712-716.
- [7] - G.C.EJEBE, B.F.WOLLE BERG. "Automatic Contingency Selection", PAS-IEEE, Volume 98, nº 1, Jan/Fev. 1979, p. 97-109.

- [8] - A.M.SASSON, G.IRISARRI, D.LEVNER. "Automatic Contingency Selection for on-line Security Analysis-Real-Time-Tests", PAS-IEEE, Volume 98, nº 5, Sept/Out. 1979, p.1552-1559.

- [9] - T.A.MIKOLINAS, B.F.WOLLEMBERG. "An Advanced Automatic Contingency Selection Algoritm", PAS-IEEE, Volume 100, nº 2, Fevereiro 1981, p. 608-617.

- [10] - G.D.IRISARRI, A.M.SASSON. "An Automatic Contingency Selection for on Line Security Analysis", PAS-IEEE, Volume 100, nº 4, April 1981, p. 1838-1844.

- [11] - F.ALBUYEH, A.BOSE, B.HEATH. "Reative Power Consideration in Automatic Contingency Selection", IEEE-PAS, Volume 101, nº 1, Janeiro 1982, p.107-112.

- [12] - A.J.FISCHL, T.F.HALPIN, A.GUVENIS. "The Aplication of Decision Theory to Contingency Selection", IEEE, Transaction on Circuits and Systems, Volume CAS-29, nº 11, Novembro 1982, p. 712-723.

- [13] - W.F. TINNEY, J.L.WALKER. "Direct Solutions of Sparse Network Equations by Optimally Ordered Triangular Factorization", Proceedings IEEE, Volume 55, nº 11, Novembro 1967, p. 1801-1809.

- [14] - I.S.DUFF. "A Survey of Sparse Matriz Research", Proceedings IEEE, Volume 65, nº 4, Abril 1977, p. 500-535.
- [15] - H.H.ZURN. Notas de Aula, UFSC.
- [16] - L.J.B.MACHADO. Notas de Aula, UFSC.
- [17] - T.K.P.MEDICHERLA, S.C.RASTOGI. "A Voltage-Criterion based Contingency Selection Technique".IEEE, Volume PAS-101, nº 9, Setembro, 1982, p. 3523-3531.
- [18] - M.R.SPIEGEL, Cálculo Avançado, Coleção Schaum, Editora MacGraw-Hill, 1963.
- [19] - A.P.SAGE, C.C.WHITE. "Optimum Systems Control", Englewood cliffs, Nova Jersey, 1977.
- [20] - E.S.HANDSCHIN, C.BONGERS. "Theoretical and Practical Considerations in the Design of State Estimators of Eletric Power Systems". Copo'75 - Ed. SC. Savulescu Elsevier - Scient Publ. Co. pp. 104-120,1976.
- [21] - F.ALBUYEH. "Automatic Contingency Selection by Sensitivity Matrices" paper apresentado no IEEE-PES Winter meeting, Nova Yorque, Fevereiro 1980.

- [22] - P.R.VAN HORNE. "An Improved Method of Identifying and Ranking Critical Transmission Contingencies", paper apresentado no COPS Conference, Oklahoma City, Março 1980..
- [23] - S.VEMURI, R.E.USHER. "On Line Automatic Contingency selection Algorithms" PAS-IEE Volume 102, nº 2, Fevereiro 1983, p. 346-354.
- [24] - GETULIO B.MARQUES. Algoritmo Computacional para Análise de Estabilidade Transitória usando o segundo método de Liapunov, Diss. de Mestrado, UFSC, Março 1981.