



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

Seleção de contingências para violações de MW em ramos de sistemas elétricos de potência utilizando abordagem multinível adaptativa

Autor: Antônio Fernandes Guerra
Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro Jr.

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

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro Jr.	FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. José Vicente Canto dos Santos	UNISINOS/RS
Prof. Dr. André Luiz Morelato França	FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva	FEEC/UNICAMP

Campinas, 20 de Setembro de 2002.

Aos meus pais,
Antônio Fernandes Nsuttu e
Maria Luzia Txitxi

Resumo

Este trabalho de pesquisa pretende apresentar contribuições para o desenvolvimento de um método de seleção de contingências para violações de MW (sobrecargas) em linhas de transmissão e transformadores, utilizando abordagem multinível adaptativa, que possa ser utilizado como uma ferramenta de auxílio ao operador na operação de sistemas elétricos de potência em tempo real. Um dos desafios consiste no desenvolvimento de um método eficiente que atenda às restrições severas de tempo existentes em ambientes de tempo real. Um outro aspecto importante do método a ser proposto é a sua característica dinâmica, no sentido de que informações da rede obtidas em tempo real para um ciclo de operação poderão ser utilizadas em um ciclo seguinte, com base na hipótese de que o estado de operação de redes elétricas em geral muda pouco entre dois ciclos de operação consecutivos.

Abstract

A multilevel adaptive prefilter for MW contingency selection algorithm is proposed in this research work. The idea is to develop a method which could be used as a tool in the real time power systems operation. One of the challenges consists in developing an efficient method for time constrained environments such as in real time operation. A multilevel prefilter is proposed to discard the contingencies that are certainly harmless to the system operation from the standpoint of MW power overflows. Another important aspect of the proposed method is its adaptive nature, since information from one operation cycle can be used in the next operation cycle, provided that the change in the system operating conditions is small, which is often the case.

Agradecimentos

Gostaria, antes de mais nada, expressar o meu profundo e sincero agradecimento:

- A Deus pela luz e proteção ao longo destes anos;
- À minha família pelo carinho, apoio, incentivo e paciência;
- Ao Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro Jr. pela excelente orientação, estímulo, amizade, confiança e paciência a mim dispensados ao longo destes anos;
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, sem o qual não seria possível a realização desta pesquisa;
- Ao Departamento de Sistemas de Energia Elétrica (DSEE) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), nas pessoas de seus professores: Alcir Monticelli, André Morelato, Ariovaldo Garcia, Carlos A. Castro Jr., Carlos Murari e Fujio Sato pelo ótimo ambiente de trabalho que propiciam aos estudantes de pós-graduação;
- Ao Walmir de Freitas Filho pela amizade, ajuda e paciência ao longo destes anos;
- À Mirian por manter a rede computacional do DSEE sempre funcionando e atualizada;
- À Edna Servidone por ser sempre tão prestativa;
- Aos amigos do DSEE pela amizade, ajuda e respeito. Em especial: Luis, Asada, Sérgio (Grilo), Irênio, Adriana, Ana Carolina, Brito, Marcos e Enrique;
- A todos aqueles que não tenha mencionado mas cujas contribuições foram necessárias para que esse sonho se tornasse uma realidade.

Sumário

1	Introdução	1
2	Uma visão geral da operação de redes elétricas	3
3	Análise de segurança	7
4	Seleção de contingências com abordagem multinível adaptativa	12
4.1	Introdução	12
4.2	Primeiro Bloco - Pré-filtro	13
4.2.1	Estágio 1	13
4.2.2	Estágio 2	14
4.2.3	Estágio 2 modificado	14
4.2.4	Estágio 3	17
4.3	Fusão dos estágios 1 e 2 do primeiro Bloco	21
4.4	Segundo Bloco - Bloco adaptativo	22
4.4.1	Equacionamento do pré-filtro adaptativo	23
4.4.2	Algoritmos	24
4.4.2.1	Algoritmo para um tempo t_0	25
4.4.2.2	Algoritmo para um tempo t_1	25
5	Testes e resultados	29
5.1	Análise de desempenho geral do processo de seleção de contingências	29
5.1.1	Rede de 14 Barras e 20 Ramos	30
5.1.2	Rede de 30 Barras e 41 Ramos	31

5.1.3	Rede de 118 Barras e 186 Ramos	32
5.1.4	Rede de 904 Barras e 1283 Ramos	33
5.1.5	Algumas observações finais	35
5.2	Bloco Adaptativo	35
5.2.1	Tipo 1: variação de carga em uma barra	37
5.2.1.1	Rede de 14 Barras e 20 Ramos	37
5.2.1.2	Rede de 30 Barras e 41 Ramos	39
5.2.1.3	Rede de 118 Barras e 186 Ramos	40
5.2.1.4	Rede de 904 Barras e 1283 Ramos	40
5.2.2	Tipo 2: variação generalizada de carga	41
5.2.2.1	Rede de 14 Barras e 20 Ramos	41
5.2.2.2	Rede de 30 Barras e 41 Ramos	42
5.2.2.3	Rede de 118 Barras e 186 Ramos	43
5.2.2.4	Rede de 904 Barras e 1283 Ramos	43
5.2.3	Tipo 3: variação generalizada de carga e de geração	44
5.2.3.1	Rede de 14 Barras e 20 Ramos	44
5.2.3.2	Rede de 30 Barras e 41 Ramos	45
5.2.3.3	Rede de 118 Barras e 186 Ramos	45
5.2.3.4	Rede de 904 Barras e 1283 Ramos	46
5.2.4	Tipo 4: saída de um ramo	46
5.2.4.1	Rede de 14 Barras e 20 Ramos	46
5.2.4.2	Rede de 30 Barras e 41 Ramos	47
5.2.4.3	Rede de 118 Barras e 186 Ramos	48
5.2.4.4	Rede de 904 Barras e 1283 Ramos	48
5.2.5	Tipo 5: saída de um gerador	49
5.2.5.1	Rede de 14 Barras e 20 Ramos	50
5.2.5.2	Rede de 30 Barras e 41 Ramos	51
5.2.5.3	Rede de 118 Barras e 186 Ramos	51
5.2.5.4	Rede de 904 Barras e 1283 Ramos	52

6	Conclusões	54
6.1	Pré-Filtro	54
6.2	Bloco Adaptativo	55
6.3	Sugestões para futuros trabalhos	55
	Referências Bibliográficas	56
A	Algumas redes testadas	59
A.1	Rede de 14 Barras e 20 Ramos	59
A.2	Fluxos nos ramos	60
A.3	Rede de 30 Barras e 41 Ramos	61
A.4	Fluxos nos ramos	62
B	Divulgação da pesquisa	63

Lista de Figuras

2.1	Funções de supervisão e controle de rede	6
3.1	Diferentes níveis de análise de contingências	8
3.2	Processo de análise de contingências com um nível de seleção.	11
4.1	Rede de grande porte	15
4.2	Estágio 2 modificado	16
4.3	Situações para aplicação do estágio 3 quando a barra i é (a) de geração, e (b) de carga.	18
4.4	Situações para aplicação do estágio 3 quando a barra i é de geração.	19
4.5	Situações para aplicação do estágio 3 quando a barra i é de geração.	19
4.6	Situações para aplicação do estágio 3 quando a barra i é de geração.	20
4.7	Situações para aplicação do estágio 3 quando a barra i , (a) e (b) são de geração.	20
4.8	Esquema de seleção de contingências proposto	26
A.1	Rede de 14 barras e 20 ramos	59
A.2	Rede de 30 barras e 41 ramos	61

Lista de Tabelas

2.1	Estados de operação da rede	5
3.1	Classificação dos métodos de pré-seleção de contingências.	10
5.1	Testes e resultados rede 14 barras	30
5.2	Testes e resultados rede 30 barras	31
5.3	Testes e resultados para a rede de 118 barras	32
5.4	Testes e resultados rede 904 barras	33
5.5	Taxas de captura para a rede de 14 barras	38
5.6	Classificação de contingências para aumentos de 0, 150 e 300% de carga.	39
5.7	Taxas de captura para a rede de 30 barras	39
5.8	Taxas de captura para a rede de 118 barras	40
5.9	Taxas de captura para a rede de 904 barras	41
5.10	Taxas de captura para a rede de 14 barras	41
5.11	Taxas de captura para a rede de 30 barras	42
5.12	Taxas de captura para a rede de 118 barras	43
5.13	Taxas de captura para a rede de 904 barras	43
5.14	Classificação de contingências para aumentos de 3% de carga.	44
5.15	Taxas de captura para a rede de 14 barras	45
5.16	Taxas de captura para a rede de 30 barras	45
5.17	Taxas de captura para a rede de 118 barras	45
5.18	Taxas de captura para a rede de 904 barras	46
5.19	Taxas de captura para a rede de 14 barras	46
5.20	Taxas de captura para a rede de 30 barras	47

5.21	Taxas de captura para a rede de 118 barras	48
5.22	Taxas de captura para a rede de 904 barras	49
5.23	Taxas de captura para a rede de 14 barras	50
5.24	Taxas de captura para a rede de 30 barras	51
5.25	Taxas de captura para a rede de 118 barras	52
5.26	Taxas de captura para a rede de 904 barras	53
A.1	Rede de 14 barras e 20 ramos	60
A.2	Rede de 30 barras e 41 ramos	62

Capítulo 1

Introdução

Durante a operação de um sistema elétrico de potência (SEP), após a obtenção das magnitudes das tensões e seus respectivos ângulos, também conhecido como caso base, realiza-se a análise de segurança na rede, em que são identificadas as contingências cujas ocorrências resultam em violações dos seus limites operacionais. Em seguida, estratégias de controle preventivo e/ou corretivo são desenvolvidos para garantir a operacionalidade da rede. Um dos métodos é a análise de contingências, em que se simula sequencialmente a saída de um ramo e resolve-se um fluxo de carga completo para cada contingência. Dentro desse mesmo processo calcula-se também o chamado *Performance Index* (PI) para cada contingência, que é um escalar que reflete o montante de violações que ocorrerá caso essa contingência venha a ocorrer. Faz-se também um *Ranking* de todas as contingências e fornece-se uma lista dessas contingências onde a primeira possui o maior *Performance Index* e por conseguinte a mais grave de todas. A partir desse momento, ações de controle preventivo ou corretivo passarão a ser feitas partindo da contingência mais grave até ao menos grave.

A análise de contingências determina com exatidão as contingências críticas da rede. Contudo, para redes de grande porte, a resolução sucessiva de fluxos de carga completos para cada contingência implica num elevado consumo de tempo computacional, neste caso inviável em ambientes de tempo real. Um procedimento comum na análise de contingências consiste em dividir o processo em diferentes níveis. Ou seja, entre o caso base e análise de contingências introduz-se mais um nível chamado de *seleção de contingências*, cujo objetivo é exatamente reduzir, no caso de redes de grande porte, o número de contingências que passarão para a análise de contingências. O processo de seleção de contingências em si não retira da lista de contingências aquelas consideradas como inofensivas à rede (aquelas cuja saída não sobrecarregará os demais ramos da rede), mas sim faz uma classificação de contingências na qual as consideradas como sendo mais graves são colocadas no topo de uma lista para que sejam as primeiras a serem analisadas na outra etapa que é precisamente a análise de contingências.

Neste trabalho pretendemos apresentar contribuições para o desenvolvimento de um método de seleção de contingências para violações de MW (sobrecargas) em linhas de transmissão e transformadores, utilizando abordagem multinível adaptativa, que possa ser utilizado como uma ferramenta de auxílio ao operador na operação de sistemas elétricos de potência em tempo real. Pretendemos assim desenvolver um método eficiente que atenda às restrições severas de tempo existentes em ambientes de tempo real. Um outro aspecto importante do método é a sua característica adaptativa,

em que informações da rede obtidas em tempo real para um ciclo de operação poderão ser utilizados em ciclo seguinte, evitando-se assim cálculos desnecessários, com base na hipótese de que o estado de operação de redes elétricas em geral muda pouco entre dois ciclos de operação consecutivos.

Dada uma lista de contingências, a seleção terá como objetivo retirar desta mesma lista aquelas contingências que obviamente são inofensivas à operação da rede, ou seja, suas ocorrências não provocarão violações de limites operacionais da rede reduzindo desta maneira o número de contingências que passarão para a etapa de análise de contingências, reduzindo-se assim o tempo computacional imprescindível em ambientes de tempo real. O método de seleção de contingências que será apresentado neste trabalho está subdividido em dois grupos. No primeiro realiza-se sempre a análise de todas as contingências simples da lista, não utilizando informações do ciclo anterior. Neste são usados métodos heurísticos de fácil implementação e baixo custo computacional. Enquanto que no outro grupo utilizam-se os resultados já obtidos em ciclos de operação anteriores. Basicamente são transferidas informações sobre as sensibilidades existentes entre os fluxos de potência nos ramos e as contingências.

Espera-se contribuir com uma proposta de um procedimento para seleção de contingências que seja eficiente e confiável. Somente violações de fluxo de potência ativa em ramos serão consideradas.

Este trabalho está organizado conforme descrito a seguir.

No Capítulo 2 faz-se uma breve introdução à operação de redes elétricas sendo introduzidas as idéias de controle de redes em tempo real e análise de segurança.

No Capítulo 3 são apresentados alguns aspectos relacionados à análise de segurança. Breves explicações são dadas sobre a *análise de contingências* que é feita na rede para se detectar contingências críticas e adotar medidas preventivas e/ou corretivas. Neste Capítulo aborda-se também questões relacionadas com o nível de *seleção de contingências* que é uma função realizada antes da análise de contingências, visando reduzir o esforço computacional.

No Capítulo 4 as implementações feitas para a obtenção de um procedimento de seleção de contingências para violações de MW em linhas de transmissão e transformadores com abordagem multinível adaptativa são apresentadas. O nível de seleção de contingências foi subdividido em dois blocos sendo que no primeiro estão os diferentes estágios que têm como missão retirar da lista de contingências aquelas consideradas não críticas. No segundo bloco apresenta-se um pré-filtro adaptativo onde se faz uma classificação (*ranking*) e uma seleção (*screening*) de contingências que serão depois submetidas à análise de contingências.

No Capítulo 5 os testes e resultados de simulações dos estágios e blocos são apresentados e analisados. Um dos testes consistiu na medição de tempos computacionais para a execução, por exemplo, de um estágio ou de todo o bloco. São feitas comparações entre os tempos obtidos. Além disso são apresentados resultados de taxas de captura que foram obtidas com o objetivo de mostrar a eficiência do procedimento proposto.

Finalmente, no Capítulo 6 expõem-se as principais conclusões obtidas, discutindo-se melhorias e propostas para serem investigadas em trabalhos futuros como continuação deste trabalho.

Alguns esquemas de redes e alguns dados como fluxos de potência ativa nos ramos que foram utilizados para testes e simulações são fornecidos nos apêndices. Para implementar os programas desenvolvidos foi utilizada a linguagem computacional FORTRAN.

Capítulo 2

Uma visão geral da operação de redes elétricas

O conceito de operação de redes elétricas tem evoluído ao longo do tempo. A idéia básica, e que era praticada pelas companhias concessionárias de energia, é de que a operação deveria cumprir os seguintes objetivos [1]:

- garantir o fornecimento de energia às cargas;
- garantir o despacho econômico da geração de energia;
- garantir uma reserva girante (*spinning reserve*) para cobrir possíveis aumentos de carga não previstos e perdas de unidades geradores;
- verificar os efeitos potenciais da retirada de equipamentos de operação para manutenção.

Alguns fatores, no entanto, levaram a mudanças nessa idéia. Principalmente a partir dos anos 60, notou-se que:

- a demanda de energia sempre crescia, a despeito das variações econômicas e desenvolvimentos políticos;
- a manutenção de um sistema elétrico robusto que pudesse atender a carga crescente e ainda operar normalmente sob contingências se tornou economicamente inviável;
- a massiva interligação de sistemas, que por um lado vinha a aumentar a capacidade de despacho de geração, também contribuía para um aumento dos níveis de insegurança da rede em situações de contingências;
- a falta de investimentos na expansão da rede elétrica, aliada ao crescimento da demanda levou os equipamentos existentes a operarem mais próximos de seus limites físicos de operação.

Um fato marcante na área da operação de redes elétricas foi o *blackout* da região Nordeste dos Estados Unidos da América em novembro de 1965. Em uma região densamente povoada e com alto índice de industrialização, os efeitos do *blackout* foram significativos. Este evento foi o maior em área atingida, em número de pessoas atingidas, sendo que algumas áreas ficaram desenergizadas por até 24 horas.

A partir daí, tomou força o conceito de *controle de segurança*, que já vinha sendo discutido há algum tempo na época. A ampliação do conceito da operação de redes incluindo a *análise de segurança* foi inevitável [2, 3].

A idéia da operação automatizada de redes em tempo real também ganhou força, principalmente devido a:

- o aumento da complexidade da operação das redes, limitando a ação eficiente dos operadores;
- o fato de que a inclusão do controle de segurança aumentava muito o volume de análises (e cálculos) a serem executados;
- o rápido desenvolvimento da tecnologia de computação digital e à queda acelerada dos preços dos equipamentos, passando a permitir sua utilização na realização das tarefas exigidas na operação segura de redes.

De fato, a instalação de Centros da Operação do Sistema (COS) é uma tendência mundial. Como exemplos de COS no Brasil, pode-se citar os da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) e das Centrais Elétricas de Minas Gerais (CEMIG), ambos em fase de desenvolvimento.

Como parte da incorporação do controle de segurança na operação em tempo real de sistemas elétricos, foi introduzida a definição dos chamados *estados de operação* da rede. Esses estados de operação são apresentados na tabela 2.1 da forma como são descritos em [4].

Pode-se definir uma contingência como sendo um evento em que um ou mais equipamentos saem de operação de forma não esperada. Como exemplo de uma contingência, pode-se citar a saída de operação de uma linha de transmissão devido à ocorrência de um raio em uma de suas torres. Naturalmente, deseja-se operar a rede sempre no nível seguro. No entanto, hoje em dia isso é praticamente impossível, devido aos altos índices de carregamento dos equipamentos da rede. É comum então a operação nos níveis corretivamente seguro e alerta, este último ocorrendo em horários de pico de demanda (carga pesada).

Nota-se na tabela 2.1 que há situações em que a rede opera com violações de alguns limites de operação, como por exemplo sobrecargas em linhas de transmissão e transformadores e sobre ou subtensões em barramentos. Tais violações podem ocorrer tanto em condições normais de operação quanto em situações de contingências. Naturalmente surge a idéia de se eliminar tais violações. A eliminação das violações é conseguida através da execução de ações de controle na rede. Por exemplo, pode-se eliminar uma sobrecarga em uma linha de transmissão através de um redespacho da geração, ou uma subtensão através da mudança de *tap* de um transformador. Essas ações de controle fazem parte de uma estratégia, que pode ser de dois tipos:

- controle **corretivo**: após detectada uma violação, tanto em condições normais de operação como sob contingências, ações de controle são executadas para eliminá-la;

Tabela 2.1: Estados de operação da rede

NÍVEL	ESTADO DE OPERAÇÃO	DESCRIÇÃO
1	Seguro	A carga é atendida. Não há violações de limites de operação. Possíveis contingências não causam violações.
2	Corretivamente seguro	A carga é atendida. Não há violações de limites de operação. Violações causadas por possíveis contingências podem ser eliminadas por ações de controle sem perda de carga.
3	Alerta	A carga é atendida. Não há violações de limites de operação. Algumas violações causadas por possíveis contingências não podem ser eliminadas sem que haja perda de carga.
4	Emergência corrigível	A carga é atendida. Há violações de limites de operação que podem ser eliminadas por ações de controle sem perda de carga.
5	Emergência não corrigível	A carga é atendida. Há violações de limites de operação que não podem ser eliminadas sem que haja perda de carga.
6	Restaurativo	Não há violações de limites de operação. Ocorreu perda de carga.

- controle **preventivo**: ações de controle são executadas de forma a mudar o ponto de operação corrente da rede e evitar o surgimento de violações caso contingências venham a ocorrer.

As ações de controle corretivas e/ou preventivas têm seu lugar entre uma série de funções de supervisão e controle de rede que são executadas nos COS. A tendência mundial é que tais funções sejam executadas em tempo real. A figura 2.1 mostra uma visão geral das funções de supervisão e controle existentes em um COS [1].

A área sombreada e limitada pelo retângulo com linha tracejada da figura 2.1 corresponde ao processo de análise comumente denominado *análise de segurança*.

A execução das funções de supervisão e controle na operação de redes em tempo real está sujeita a uma restrição severa de tempo, ou seja, as funções devem ser executadas o mais rapidamente possível. Por exemplo, a análise de segurança deve ser executada ciclicamente a intervalos de 15 a 30 minutos. Já o monitoramento do estado de operação da rede (configurador, estimador de estado) é executado a cada 15 segundos em média.

Assim, torna-se necessário o desenvolvimento de funções de supervisão e controle cujas execuções sejam rápidas, sem no entanto perder a precisão necessária.

Com relação ao estado atual de desenvolvimento de tais funções, quatro delas em particular constituem desafios que requerem novas metodologias para suas utilizações em tempo real:

1. obtenção de estratégias de controle corretivo/preventivo (associada a processos de otimização);
2. obtenção de estratégias de análise eficientes para detecção de situações em que a rede poderá operar segundo os estados 2 e 3 principalmente, ou seja, estados em que ocorrem violações;

3. avaliação de segurança de redes com relação à estabilidade de tensão;
4. avaliação de segurança dinâmica de redes (associada à estabilidade transitória).

A dificuldade básica reside na complexidade dos modelos e métodos de solução disponíveis, que os tornam incompatíveis com as severas restrições de tempo da operação em tempo real. Este trabalho trata especificamente do item 2 descrito anteriormente.

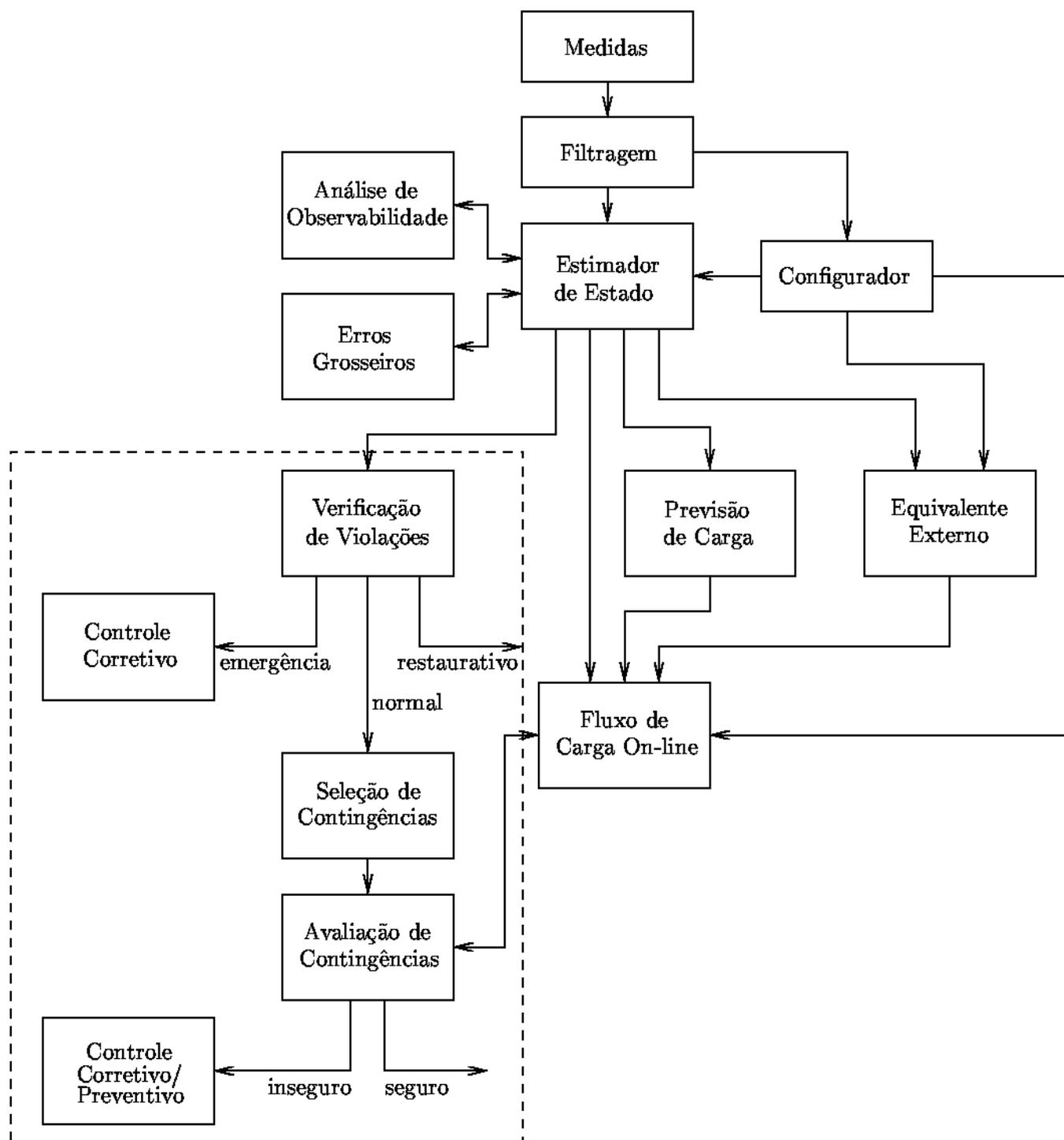


Figura 2.1: Funções de supervisão e controle de rede

Capítulo 3

Análise de segurança

De acordo com a figura 2.1, uma vez conhecido o estado de operação corrente da rede (comumente chamado de *caso base*), pode-se iniciar o processo de análise de segurança, que começa com a verificação de violações de seus limites operacionais. Em caso positivo, deve-se imediatamente realizar o controle corretivo, ou seja, ações de controle devem ser realizadas de forma a eliminar as violações que foram detectadas.

Caso a rede se encontre em um ponto de operação que corresponda aos estados 1, 2 ou 3 da tabela 2.1 (carga atendida e não há violações dos limites operacionais), deve-se verificar qual seria o efeito da ocorrência de contingências na rede, sob o ponto de vista de violações dos limites operacionais. Este tipo de análise é denominado de *análise de contingências*, ou seja, simula-se a ocorrência de contingências e avalia-se seu impacto sobre a operação da rede. Os limites operacionais normalmente levados em conta na análise de contingências são as sobrecargas em linhas de transmissão e transformadores (MW) e sobre ou subtensões em barramentos.

Caso seja detectado o aparecimento de violações após a ocorrência de uma certa contingência, três tipos de atitude podem ser tomadas pelo operador [4]:

- desenvolver uma estratégia corretiva, que será usada caso a contingência realmente ocorra;
- desenvolver uma estratégia preventiva, e implementá-la imediatamente, de forma que a contingência passe a não provocar mais violações;
- não fazer nada, já que a ocorrência de contingências é um fato pouco comum e é mais provável que o estado de operação da rede mude antes que ocorra qualquer contingência.

Contingências podem ser classificadas como sendo *simples*, quando somente um equipamento sai de operação (como uma linha de transmissão, ou uma unidade geradora), ou *múltiplas*, quando dois ou mais equipamentos saem de operação.

É possível imaginar que o número total de contingências que podem ocorrer em uma rede é muito grande. O número de contingências simples, que já é muito grande, deve ser somado ao número de contingências múltiplas resultante da combinação dos equipamentos dois a dois, três a três, e assim por diante. Para uma rede de grande porte, como é o caso do sistema interligado

brasileiro, o número de contingências a ser analisado faz com que em princípio uma análise exaustiva dos efeitos de todas essas contingências seja impraticável.

Assim, é uma prática geral realizar a análise **(a)** de todas as contingências simples e **(b)** das contingências múltiplas cujas ocorrências sejam mais prováveis, de acordo com critérios definidos pela própria empresa operadora da rede. Mesmo após a redução dos casos a serem analisados, o número total de casos continua grande, especialmente para redes de grande porte. O problema torna-se ainda mais grave no caso da operação em tempo real em que, como já mencionado, as restrições de tempo de computação são muito severas, ou seja, deve-se realizar muitos cálculos em um intervalo de tempo pequeno. Por isso o problema de análise de contingências, que é uma função a ser executada durante o ciclo de operação em tempo real, é amplamente conhecido como um dos processos de análise que demandam maior tempo de processamento [6].

As redes elétricas de potência atuais são projetadas de forma que elas possam suportar todas as contingências simples, ou seja, a saída de um único equipamento não deve causar nenhum tipo de violação de limites operacionais. Neste caso a rede também é chamada de *segura* ($n - 1$). Durante certos períodos de tempo, a rede pode vir a operar sob condições não usuais, como por exemplo quando equipamentos estão fora de serviço para manutenção ou mesmo devido à ocorrência de uma contingência anteriormente. Neste caso, a rede pode se tornar vulnerável a certas contingências simples, além das contingências múltiplas. Por essa razão, deve-se em princípio analisar todas as contingências definidas segundo o critério mencionado anteriormente.

A análise de contingências pode ser realizada classicamente através da resolução de um problema de fluxo de carga para cada contingência da lista de contingências mais prováveis. Em seguida é feita a verificação de possíveis violações, tarefa bastante simples de ser realizada. No ambiente de operação em tempo real, entretanto, múltiplas resoluções de problemas de fluxo de carga se tornam impraticáveis devido às restrições de tempo de computação. Como consequência desta limitação, inúmeros trabalhos de pesquisa têm sido realizados na área de análise de contingências nos últimos anos.

Um procedimento já bem aceito de análise de contingências é dividir o processo em diferentes níveis e em cada um desses níveis um modelo apropriado de rede assim como uma técnica de cálculo e análise de resultados são utilizados. A figura 3.1 mostra esta divisão em níveis de forma genérica.

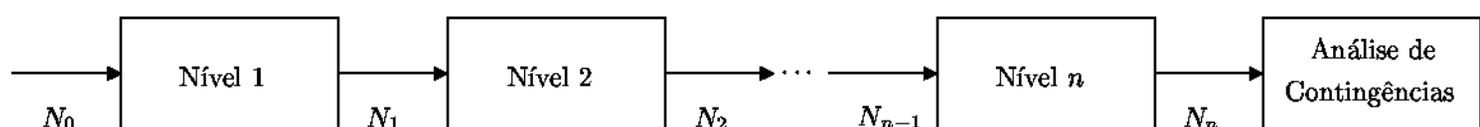


Figura 3.1: Diferentes níveis de análise de contingências

De acordo com a figura 3.1 a lista completa de contingências (ou de contingências mais prováveis) N_0 é inicialmente analisada através de um método muito simples e rápido do ponto de vista de tempo computacional (Nível 1). As contingências são classificadas de acordo com algum critério que leve em conta os seus impactos sobre a operação da rede, em particular no que se refere a violações dos limites operacionais. Aquelas consideradas mais severas farão parte de uma nova

lista N_1 . As demais (que não aparecem em N_1) são consideradas contingências cujas ocorrências são inofensivas do ponto de vista operacional e não são mais consideradas. As contingências da lista N_1 são então submetidas a uma nova análise (Nível 2), cujo modelo adotado já é um pouco mais elaborado que o do Nível 1, e como resultado é produzida uma nova lista (N_2) menor que N_1 , contendo as contingências mais severas segundo o novo modelo mais elaborado. O processo se repete, sempre com modelos mais elaborados a cada passo, até que, após o Nível n , uma lista N_n é produzida e contém as contingências consideradas mais severas, e que merecem uma análise bastante detalhada a fim de se verificar as reais violações e elaborar estratégias corretivas/preventivas. As contingências da lista N_n são submetidas então à *análise de contingências* clássica, ou seja, resolve-se um problema de fluxo de carga completo para cada uma delas. O processo de análise simplificada que envolve os Níveis de 1 a n é normalmente chamado de *seleção de contingências* (também conhecido como *screening*). Na prática, devido aos fatores já descritos anteriormente, a seleção de contingências normalmente é realizada somente para as contingências simples.

Normalmente a classificação das contingências (*ranking*) é feita com base no cálculo dos chamados *índices de performance* (na prática conhecidos por sua denominação inglesa *performance indices* – PI) para cada uma delas. PI é um escalar que reflete o montante de violações que ocorrerá caso a contingência considerada venha a ocorrer. As contingências com os maiores valores de PI são consideradas as mais severas.

Na prática é comum adotar-se somente um nível para a seleção de contingências (ver figura 3.1 antes da análise de contingências). O estado pós-contingência da rede na seleção de contingências é normalmente obtido através do cálculo de fluxo de carga pelo método desacoplado rápido [7, 8]. No caso da seleção de contingências visar somente a obtenção de violações de fluxo de potência em ramos, somente uma iteração ativa é realizada. No caso de se desejar também obter as violações de tensão, uma iteração ativa e uma iteração reativa são realizadas [9]. Em todos os casos as técnicas de vetores esparsos [10] têm se mostrado extremamente úteis e tornam o processo de cálculo ainda mais eficiente. Sabe-se também que, especialmente para redes de grande porte, a maioria das contingências acabam tendo um PI pequeno, ou seja, a ocorrência da maioria delas não resulta em violações. Daí a importância de se evitar uma análise detalhada e demorada de casos sem nenhum impacto no que diz respeito a violações, sendo que métodos mais simples já seriam capazes de detectá-los.

Vários trabalhos podem ser encontrados na literatura abordando alguns tipos de dificuldades encontradas na classificação de contingências, como por exemplo o *maskamento* (*masking effect*). O *maskamento* consiste na dificuldade de diferenciar uma contingência que resulta em várias pequenas violações de outra que resulta em uma única grande violação. Existem propostas de formulações para o cálculo de PI que tentam minimizar este problema, incluindo desde alterações na própria formulação de PI até a utilização de técnicas mais avançadas, como algoritmos genéticos [11].

Com relação às contingências múltiplas, em geral estas não são submetidas ao processo de seleção de contingências, sendo analisadas diretamente através de um método detalhado (análise de contingências). Além disso, as contingências múltiplas a serem analisadas são escolhidas com rigor, de forma que somente aquelas cujas ocorrências são muito prováveis sejam incluídas. Por exemplo, a saída de duas linhas de transmissão em paralelo que utilizam as mesmas torres de transmissão constituiria uma contingência múltipla candidata a entrar na lista das mais prováveis.

Como o processo de seleção de contingências resulta em uma economia de tempo compu-

tacional considerável, o tema recebeu atenção especial dos pesquisadores ultimamente. As referências [12–16] representam alguns dos esforços realizados para aumentar a eficiência da seleção de contingências. Essas referências apresentam métodos de seleção de contingências segundo duas abordagens básicas:

- **métodos indiretos**, para os quais o cálculo de PI é realizado após a determinação do estado de operação pós-contingência da rede (magnitudes das tensões e ângulos de fase das barras);
- **métodos diretos**, para os quais PI é calculado sem que se conheça o estado de operação da rede após a contingência. Naturalmente, o estado de operação é levado em conta implicitamente na própria formulação de PI.

As referências citadas anteriormente tratam dos tipos de violações comumente levados em conta nesse tipo de análise, ou seja, sobrecargas em ramos e violações de tensão.

Trabalhos de pesquisa mais recentes mostraram que a eficiência do processo de análise de contingências pode ser melhorada ainda mais através do aumento de número de níveis de seleção de contingências, de acordo com a idéia geral apresentada na figura 3.1. Em particular, foi proposto que mais um nível de seleção seja acrescentado ao processo [17–21], chamado de *pré-seleção de contingências*. Assim, o processo completo seria composto por pré-seleção, seleção e análise.

Os métodos de pré-seleção de contingências podem ser divididos em dois grupos, como mostrado na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Classificação dos métodos de pré-seleção de contingências.

Grupo I	realizam sempre a análise de todas as contingências simples da lista (N_0 da figura 3.1), não utilizando informações do ciclo de operação anterior. São também chamados de pré-filtros. Por exemplo, o método proposto em [19] se enquadra neste grupo.
Grupo II	utilizam os resultados já obtidos em ciclos de operação anteriores para eliminar cálculos desnecessários. São também chamados de métodos adaptativos ou pré-filtros adaptativos. Por exemplo, os métodos propostos em [17, 20, 21] se enquadram neste grupo.

A figura 3.2 mostra como se dá o processo de análise de contingências normalmente adotado hoje em dia, que contém somente um nível de seleção de contingências.

A cada ciclo de operação, a estrutura e o estado de operação da rede é inicialmente identificada e modelada através do estimador de estado juntamente com a obtenção de um equivalente externo (EE/Eq) e outras funções correlatas (ver figura 2.1 para maiores detalhes). Este estado de operação da rede é chamado de *caso base* do ciclo. As contingências potencialmente críticas são selecionadas pelo módulo de seleção de contingências (SC) e são analisadas mais detalhadamente no módulo de análise de contingências (AC) através da resolução de um fluxo de carga para cada uma delas. O parâmetro h refere-se ao intervalo de tempo entre ciclos de operação, em geral de 15 a 30 minutos,

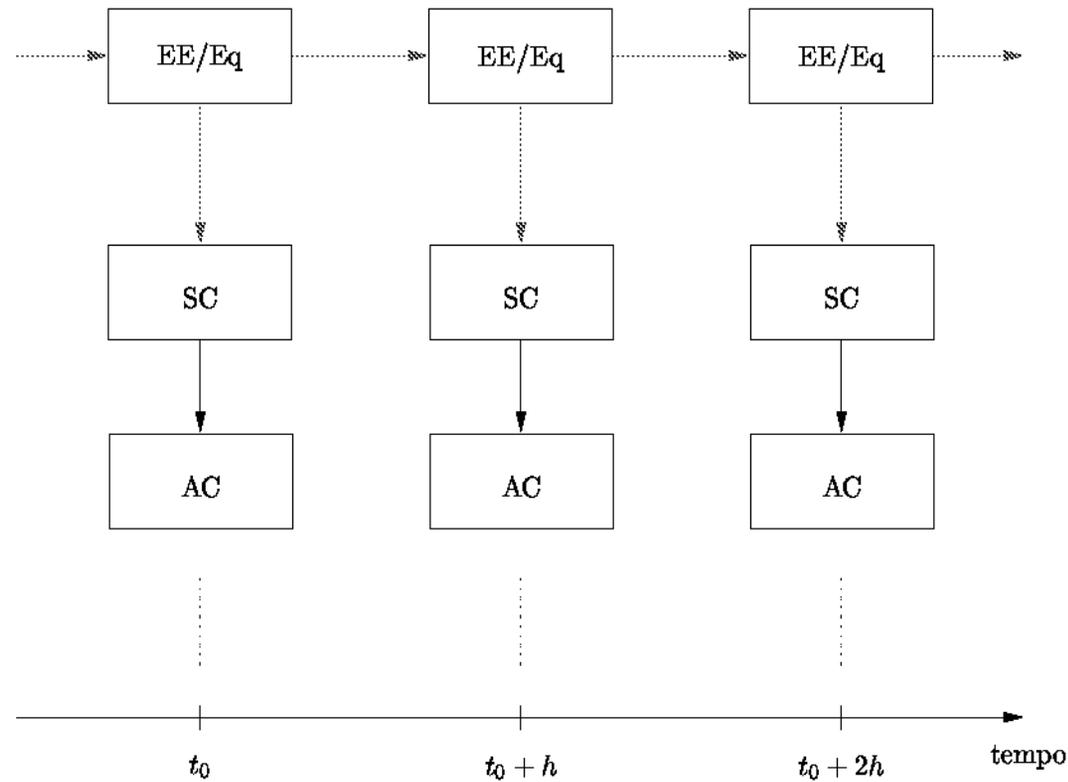


Figura 3.2: Processo de análise de contingências com um nível de seleção.

como já mencionado. Em cada ciclo o módulo SC é executado de forma completa, sem utilizar informações do ciclo anterior.

Em função do valor típico de h , é razoável supor que a estrutura e as condições de geração e consumo da rede sofrerão alterações pequenas entre ciclos. Assim, espera-se que melhoras na eficiência do processo de análise possam ser obtidas se alguns dos resultados obtidos no ciclo anterior puderem ser utilizados. Obviamente, como alterações acontecem de fato, as informações do ciclo anterior não podem simplesmente ser usadas sem algum processamento. Algumas informações podem continuar as mesmas, mas outras devem ser atualizadas em função das alterações ocorridas.

Outros trabalhos apresentados discutiram também a possibilidade de se fornecer informações adicionais sobre a contingência além do PI, de forma a tornar mais confiável o processo de decisão sobre quais são as contingências mais severas. A possibilidade de se eliminar ou não as violações pós-contingência foi discutida em [22,23]. Um método heurístico foi proposto para determinar se as violações resultantes de uma contingência podem ser eliminadas por ações de controle apropriadas ou não.

Uma contribuição também importante é a utilização de sistemas especialistas para estabelecer uma lista das prováveis contingências críticas [24]. A utilização de sistemas especialistas resulta em uma importante ferramenta de apoio ao operador. Em particular, seu sistema de esclarecimento sobre a decisão tomada (*explanation facility*) é muito útil neste caso. O operador recebe informações adicionais sobre os casos críticos. Essas informações são úteis para um melhor entendimento do comportamento das redes e podem fornecer subsídios na definição de eventuais ações de controle preventivo/corretivo.

Capítulo 4

Seleção de contingências com abordagem multinível adaptativa

4.1 Introdução

Foi dito anteriormente que durante a operação de um sistema elétrico de potência, realizam-se análises de segurança na rede após a obtenção do seu estado de operação, também conhecido como caso base, em que são identificados todos os ramos cujas saídas poderão provocar sobrecargas em outros ramos da rede, ou seja, violação de limites de fluxos estabelecidos em outros ramos. A operacionalidade da rede deve ser garantida através de ações de controle preventivas *e/ou* corretivas. Para tal realiza-se análise de contingências, simulando-se sequencialmente a saída de ramos e aplica-se fluxo de carga completo para cada contingência. Contudo, em redes de grande porte, a aplicação sucessiva de fluxos de carga completo para cada contingência acarreta consequências que se traduzem em elevados consumo de tempo computacional, neste caso inviável em ambientes de tempo real apesar de que o método determina com exatidão todas as contingências críticas da rede, ou seja, ramos cuja saída resultam em sobrecarga de outros ramos da rede.

Para tentar resolver a questão de tempo computacional frisada anteriormente, foi acrescentado mais um nível, chamado de *seleção de contingências*, realizado antes da análise de contingências, cujo objetivo é precisamente reduzir a lista de contingências que passará para a análise de contingências. Após a execução da etapa de seleção de contingências, uma lista ordenada de todas as contingências é apresentada, em que as primeiras da lista são consideradas como sendo as mais severas ou críticas da rede, ou seja, a saída delas provocará violações de limites de fluxos (sobrecargas) em outros ramos da rede. Foi também dito anteriormente que numa análise de contingências, isto é, sem passar pela etapa de seleção de contingências, todas as contingências são analisadas, sendo elas críticas ou não, isto é simulando-se sequencialmente a saída de cada contingência e aplicando-se um fluxo de carga completo. Como vimos, para redes de grande porte o tempo computacional é elevado tornando o método inviável quando se trabalha em ambientes de tempo real. Quando se passa primeiro pela etapa de seleção de contingências antes de fazer a análise de contingências tem-se como resultado uma lista de contingências, em que as primeiras são consideradas como as mais críticas e então poderemos selecionar n primeiras contingências que passarão para análise de contingências. Assim,

teremos uma lista de contingências menor para esta última etapa e conseqüentemente o tempo computacional será também menor.

O método de seleção de contingências para violações de MW em ramos de sistemas elétricos de potência (SEP) pesquisado neste trabalho apresenta abordagem multinível adaptativa. Queremos com isto dizer que a etapa de seleção de contingências está dividida em dois blocos. Passaremos então a descrever, na continuação, mais detalhadamente os dois blocos.

4.2 Primeiro Bloco - Pré-filtro

O pré-filtro proposto neste trabalho baseia-se em [19], sendo composto de três estágios em que, através de uma simples e rápida análise das condições de operação do sistema, são retiradas da lista de contingências aquelas consideradas como sendo inofensivas à operação do sistema elétrico de potência, do ponto de vista de violações de limites de fluxos de potência em ramos da rede. O pré-filtro, de acordo com a classificação adotada na Tabela 3.1, pertence ao grupo I, em que se realiza a análise de todas as contingências simples da lista, não utilizando informações do ciclo anterior. Usa também heurísticas, que são um grupo de regras desenvolvidas a partir da análise da rede e da experiência do operador. Essas regras são bastante simples, de fácil implementação e bastante efetivas para eliminar a necessidade de analisar contingências inofensivas do ponto de vista operacional. Os três estágios que compõem o pré-filtro serão descritos a seguir. Através da avaliação dos filtros, decidiu-se utilizar apenas dois deles.

4.2.1 Estágio 1

Considerar que os fluxos de potência ativa nos ramos de uma rede de NB barras e NR ramos sejam P_1, P_2, \dots, P_{NR} para o caso base. Considerar também que os seus respectivos limites máximos de fluxo sejam $P_1^{max}, P_2^{max}, \dots, P_{NR}^{max}$. Portanto, a *folga* de cada ramo em termos de fluxo de potência ativa será:

$$\text{Folga}_\ell = P_\ell^{max} - P_\ell \quad \ell = 1, \dots, NR$$

A mínima folga será dada por:

$$\text{Folga}^{min} = \min \{ \text{Folga}_\ell \} \quad \ell = 1, \dots, NR$$

Se a contingência envolve a saída de um ramo k tal que $P_k \leq \text{Folga}^{min}$, então essa contingência particular não causará sobrecargas (violações de fluxo de potência ativa). Este estágio é mais utilizado no caso de contingências simples e contingências múltiplas envolvendo ramos em paralelo.

Um algoritmo para a realização do estágio 1 é descrito a seguir.

- Após a obtenção do caso base, calcular a folga dos ramos;

- Determinar a folga mínima;
- Suponhamos que haja uma lista de contingências. Fazer o teste: se a contingência envolve a saída de um ramo k tal que o fluxo de potência ativa nesse ramo k é menor ou igual que a folga mínima, então essa contingência não causará violações de limites de fluxos de potência ativa nos demais ramos da rede. Considerar a contingência k como sendo não crítica e analisar o próximo ramo da lista de contingências;
- Caso contrário, ou seja, se a contingência envolve a saída de um ramo k tal que o fluxo de potência ativa nesse ramo k é maior que a folga mínima, então essa contingência poderá causar violações de limites de fluxos de potência ativa em alguns ramos da rede. Considerar a contingência k como sendo crítica. Analisar o próximo ramo da lista de contingências;

4.2.2 Estágio 2

O processo de filtragem do estágio 2 é baseado na seguinte afirmação: “se a contingência envolve a saída do ramo k cujo fluxo de potência ativa do caso base é P_k , então todos os ramos i da rede para os quais $Folga_i \geq P_k$ não sofrerão sobrecarga.” O estágio 2 apresenta um aspecto interessante, pois separa a rede em uma parte segura e uma parte insegura, podendo ser uma informação importante do ponto de vista do desenvolvimento de ações de controle corretivo/preventivo posteriores.

Um algoritmo para a realização do estágio 2 é descrito a seguir.

- Tomar a primeira contingência k da lista de contingências;
- Fazer o teste: se todas as folgas dos ramos i forem maiores ou iguais ao fluxo de potência ativa no ramo k , então considerar a contingência k como sendo não crítica e analisar outro ramo k da lista de contingências;
- Caso contrário, ou seja, se o fluxo de potência ativa do caso base P_k for maior que a folga de algum ramo i , é possível que haja sobrecarga no ramo i . Neste caso considerar a contingência k como sendo crítica. Analisar outro ramo k da lista de contingências;

4.2.3 Estágio 2 modificado

Esta é uma das contribuições importantes deste trabalho. Mudanças significativas foram introduzidas neste estágio na tentativa de reduzir o tempo computacional e desta forma contornar as restrições severas de tempo existentes em ambientes de tempo real.

No estágio 2 proposto em [19] e descrito anteriormente tínhamos que comparar o fluxo de potência ativa de um ramo k , com a folga dos demais ramos i da rede. Como vimos no algoritmo, se as folgas de todos os ramos i forem maiores ou iguais ao fluxo de potência ativa no ramo k em análise, então a saída do ramo k não provocaria sobrecargas nos outros ramos i da rede. Em outras palavras pode-se dizer que o ramo k em análise poderá ser considerado como sendo uma contingência não crítica. Agora, se algum ramo i tivesse a sua folga menor que o fluxo de potência

ativa no ramo k em análise, então o processo seria imediatamente interrompido e o ramo k em análise seria considerado como uma contingência crítica.

Quando se trata de redes de pequeno porte, problemas de tempo computacional para a execução do estágio 2 serão imperceptíveis. Agora a situação não é a mesma quando se trata de uma rede de grande porte. Tomemos como exemplo uma rede de 2000 ramos. Deve-se simular a saída sequencial dos 2000 ramos da rede pelo estágio 2 descrito anteriormente. Começaremos simulando a saída do ramo 1. Neste caso teremos que comparar o fluxo de potência ativa do ramo 1 com as folgas dos demais ramos, ou seja 1999 ramos. Imaginemos agora que as folgas desses 1999 ramos restantes sejam iguais ou maiores que o fluxo de potência ativa do ramo 1 em análise. Portanto o ramo 1 será considerado como uma contingência não crítica. Observem que para declarar o ramo 1 como sendo uma contingência não crítica foi necessário percorrer toda rede. O esforço computacional, neste caso é enorme, dada o tamanho da rede.

Verificou-se que havia a possibilidade de introduzir mudanças, que poderíamos chamar de *menos conservadoras*, no estágio 2. As mudanças sugeridas baseiam-se na idéia descrita a seguir. Sabe-se que o fluxo de potência que deixa de circular por um ramo que sai de operação devido a uma contingência será distribuído entre os demais ramos da rede. Essa distribuição ocorre de acordo com as características da rede, mas é importante notar que os fluxos que sofrem maiores variações são aqueles eletricamente próximos do ramo que saiu de operação. Considere uma rede de grande porte mostrada na figura.

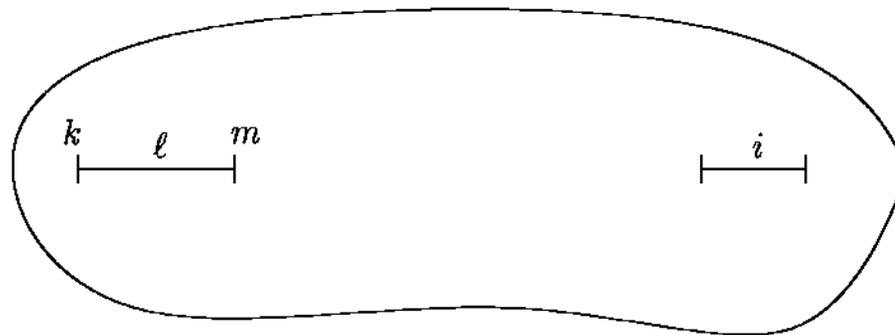


Figura 4.1: Rede de grande porte

Uma contingência envolvendo a saída do ramo ℓ afetará muito pouco o fluxo de potência do ramo i caso a distância elétrica entre eles seja grande. Assim, a comparação entre P_ℓ e $Folga_i$ é muito conservadora, no sentido de que a variação de fluxo no ramo i será muito menor que $Folga_i$.

Um segundo aspecto importante a ser observado é que o fluxo que deixa de circular pelo ramo ℓ , ou seja, entre as barras k e m , será distribuído entre os demais ramos de forma a percorrer caminhos elétricos paralelos ao ramo ℓ [13].

A idéia básica da alteração proposta é apresentada na Figura 4.2. Começa-se pela obtenção das barras k e m que conectam o ramo ℓ onde ocorreu a contingência. O processo continua agora com a obtenção dos ramos n_i que estão conectados às barras k e m . À medida que se obtém um ramo n_i , a sua folga é imediatamente comparada com o fluxo de potência ativa do ramo ℓ (caso base). Caso o fluxo de potência ativa no ramo ℓ for maior que a folga do ramo n_i , então o processo é

interrompido de imediato e a contingência é considerada como sendo crítica. Em seguida simula-se a próxima contingência da lista, repetindo-se o processo anterior.

Caso o fluxo de potência ativa do ramo ℓ seja menor ou igual que a folga do ramo n_i , o processo continuará com a obtenção de um outro ramo n_i conectado a essa mesma barra. Igualmente, é feita novamente a comparação. Persistindo o resultado anterior da comparação, isto é, o fluxo de potência ativa no ramo ℓ , é menor ou igual que a folga no ramo n_i e caso não houver mais ramos conectados a essa mesma barra k então toma-se a outra barra m que conectada ao ramo ℓ para que seja feito o mesmo processo de análise. Ao longo desse processo, durante a obtenção de ramos conectados às barras (k e m), vai-se observando também se algum caminho elétrico, ou seja, uma ligação entre as barras k e m por um caminho diferente do ramo ℓ foi fechado, como aparece na figura 4.2. Em seguida continua-se expandindo a área em torno do ramo ℓ , vizinhança por vizinhança, realizando as comparações entre P_ℓ e as folgas dos ramos vizinhos. O número de vizinhanças a serem analisadas é definido a priori e baseia-se nas características da rede. Para uma mesma rede, este número de vizinhanças pode também variar, por exemplo, em função do carregamento da rede. Assim, pode-se definir um número de vizinhanças maior para horários de pico de demanda, e um número menor para períodos de carga leve.

Se o número de vizinhanças estabelecidas for atingido ao longo do processo em que se analisa o ramo ℓ e se o seu fluxo de potência ativa continuar sendo menor ou igual que a folga dos ramos n_i obtidos, então o processo de análise será imediatamente cancelado e o ramo ℓ será considerado como sendo não crítico. Neste caso já não será necessário percorrer toda rede para se chegar a esta conclusão porque no começo foi estabelecido o número de vizinhanças que devem ser analisadas. O algoritmo do estágio 2 modificado é apresentado em seguida.

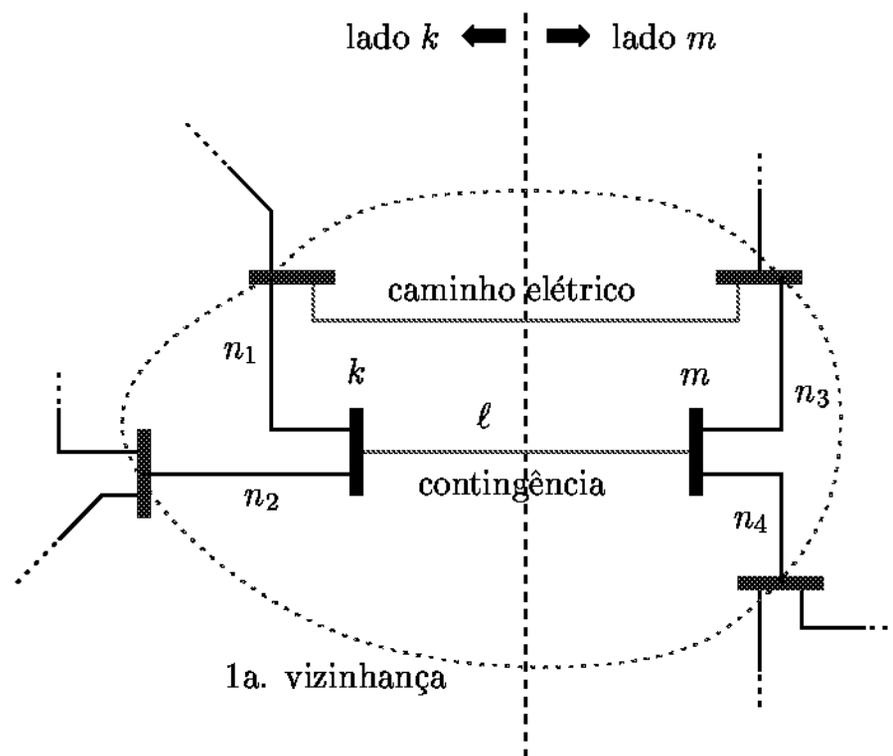


Figura 4.2: Estágio 2 modificado

- Estabelecer o número de vizinhanças a serem analisadas;
- Tomar a primeira contingência ℓ da lista de contingências;
- Obter as barras terminais do ramo $\ell(k$ e $m)$;
- Obter todos os ramos n_i que estão conectados à barra k ;
- À medida que os ramos n_i conectados à barra k e barras terminais do ramo n_i vão sendo obtidos, verifica-se: se o ramo n_i já foi ou não analisado anteriormente. Em caso afirmativo, obter outro ramo n_i . Em seguida verifica-se se o caminho elétrico foi fechado. Caso tenha sido, então poderemos ter a idéia de que o fluxo de potência que deixou de passar no ramo ℓ devido à contingência nesse ramo ℓ , estará passando por outros ramos para suprir cargas que deixaram de ser atendidas através do ramo ℓ . Se o fluxo de potência ativa do caso base do ramo ℓ for maior que a folga no ramo n_i obtido, então o processo é interrompido, a contingência será considerada como crítica. O processo segue com a análise do próximo ramo ℓ da lista de contingências. Caso contrário continuar no item a seguir;
- Se o fluxo de potência ativa no caso base do ramo ℓ for menor ou igual que a folga no ramo n_i obtido, então o processo segue com a obtenção de outro ramo n_i , conectado à barra k , e será feita novamente a comparação. Caso o fluxo de potência ativa no caso base do ramo ℓ continuar sendo menor ou igual que a folga em todos os ramos n_i obtidos, isto é, conectados à barra k , e caso não haja mais nenhum ramo n_i conectado a essa barra, então passa-se a analisar a barra m , como mostra a figura 4.2, para que ramos n_i conectados à barra m sejam obtidos e as suas folgas sejam comparadas com o fluxo de potência ativa no caso base do ramo ℓ ;
- Novamente, se o fluxo de potência ativa no caso base do ramo ℓ continuar sendo menor ou igual que a folga de todos os ramos n_i obtidos, isto é conectados à barra m , então passa-se a analisar as barras da primeira vizinhança do ramo ℓ da mesma forma que foi feito para as barras k e m , até que seja atingido o número de vizinhanças estabelecido inicialmente;
- Se for atingido o número de vizinhanças estabelecido, então o processo é interrompido. Se o fluxo de potência ativa no caso base do ramo ℓ continuar sendo menor ou igual que a folga de todos os ramos n_i obtidos, então a contingência será considerada não crítica. O processo continuará com a análise de um outro ramo ℓ até que todas as contingências listadas sejam analisadas;

4.2.4 Estágio 3

Este estágio, também definido em [19], é específico para situações particulares em que dois ramos são conectados conforme mostrado na figura 4.3

Considerar inicialmente a situação mostrada na figura 4.3 (a) em que a barra i é de geração. Neste caso tem-se:

- (a) se o fluxo de potência do ramo ji no caso base é no sentido $j \rightarrow i$, então, a saída de ji não sobrecarregará o ramo ik ;

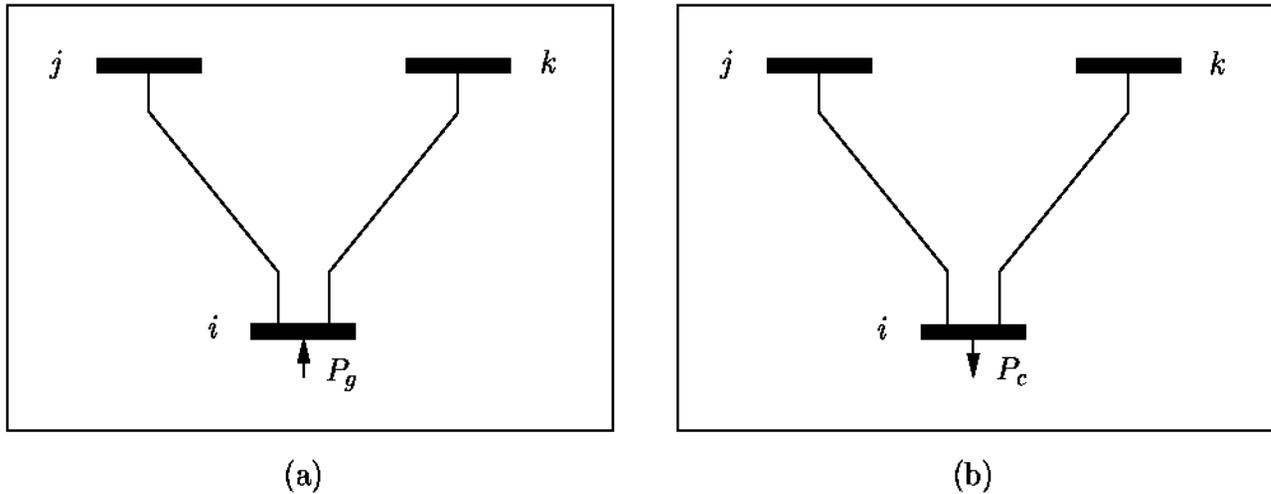


Figura 4.3: Situações para aplicação do estágio 3 quando a barra i é (a) de geração, e (b) de carga.

- (b) se o fluxo de potência do ramo ji no caso base é no sentido $i \rightarrow j$ e o ramo ik é tal que $P_{ik}^{max} \geq P_g$, então, a saída de ji não sobrecarregará o ramo ik .

Para a situação mostrada na figura 4.2 (b) em que a barra i é de carga, tem-se:

- (a) se o fluxo de potência do ramo ji no caso base é no sentido $i \rightarrow j$, então, a saída de ji não sobrecarregará o ramo ik ;
- (b) se o fluxo de potência do ramo ji no caso base é no sentido $j \rightarrow i$ e o ramo ik é tal que $P_{ik}^{max} \geq P_c$, então, a saída de ji não sobrecarregará o ramo ik .

Concluída a implementação do estágio 3 e depois de algumas observações e análises feitas em relação à idéia deste estágio, chegou-se a conclusão de que o mesmo não deveria fazer parte do conjunto de estágios que compõem o pré-filtro, isto porque, apesar dos seus fundamentos teóricos serem verdadeiros, os resultados apresentados, em termos práticos, não são aplicáveis à seleção de contingências. Tomemos novamente, de forma mais detalhada, o método e as situações apresentadas neste estágio.

Considerar inicialmente a situação mostrada na figura 4.4 em que a barra i é de geração.

De acordo com a figura 4.4 (a), antes da contingência tem-se $P_{ik}^0 = P_g^0 + P_{ij}^0$. De acordo com a Figura 4.3 (b), depois da contingência: $P_{ik}^1 = P_g^1$. Logo temos que: $P_{ik}^1 < P_{ik}^0$.

Logo a saída do ramo ji não sobrecarregou o ramo ik . Aconteceu o contrário, ou seja, o ramo ik ficou mais aliviado. A análise feita anteriormente está correta considerando apenas os dois ramos em questão. Façamos a mesma análise, mas agora, considerando mais barras e ramos conectados, como acontece normalmente na prática.

Observando as figuras 4.5 (a) e (b), temos que o fluxo máximo de potência ativa no ramo lk é $P_{lk}^{max} = 7\text{MW}$. A saída do ramo ji não sobrecarrega o ramo ik mas em contrapartida sobrecarrega

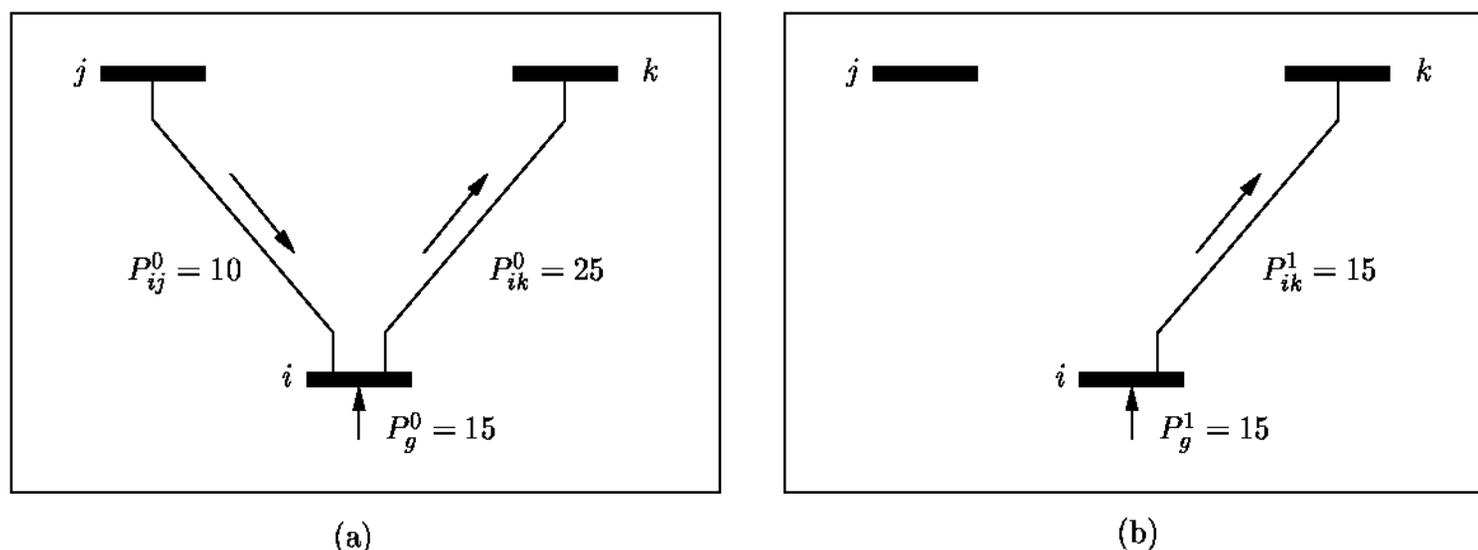


Figura 4.4: Situações para aplicação do estágio 3 quando a barra i é de geração.

o ramo lk . Pode-se verificar que o fluxo de potência ativa no ramo lk , antes da contingência, era de $P_{lk}^0 = 5\text{MW}$. Depois da contingência, provocada pela saída do ramo ji , o fluxo de potência ativa no ramo lk passou a ser $P_{lk}^1 = 10\text{MW}$. Assim temos $P_{lk}^1 > P_{lk}^0$, mas $P_{lk}^{max} = 7\text{MW}$. Quer dizer que $P_{lk}^1 > P_{lk}^{max}$, por isso concluímos que a saída do ramo ji sobrecarregará o ramo lk apesar de não sobrecarregar o ramo ik .

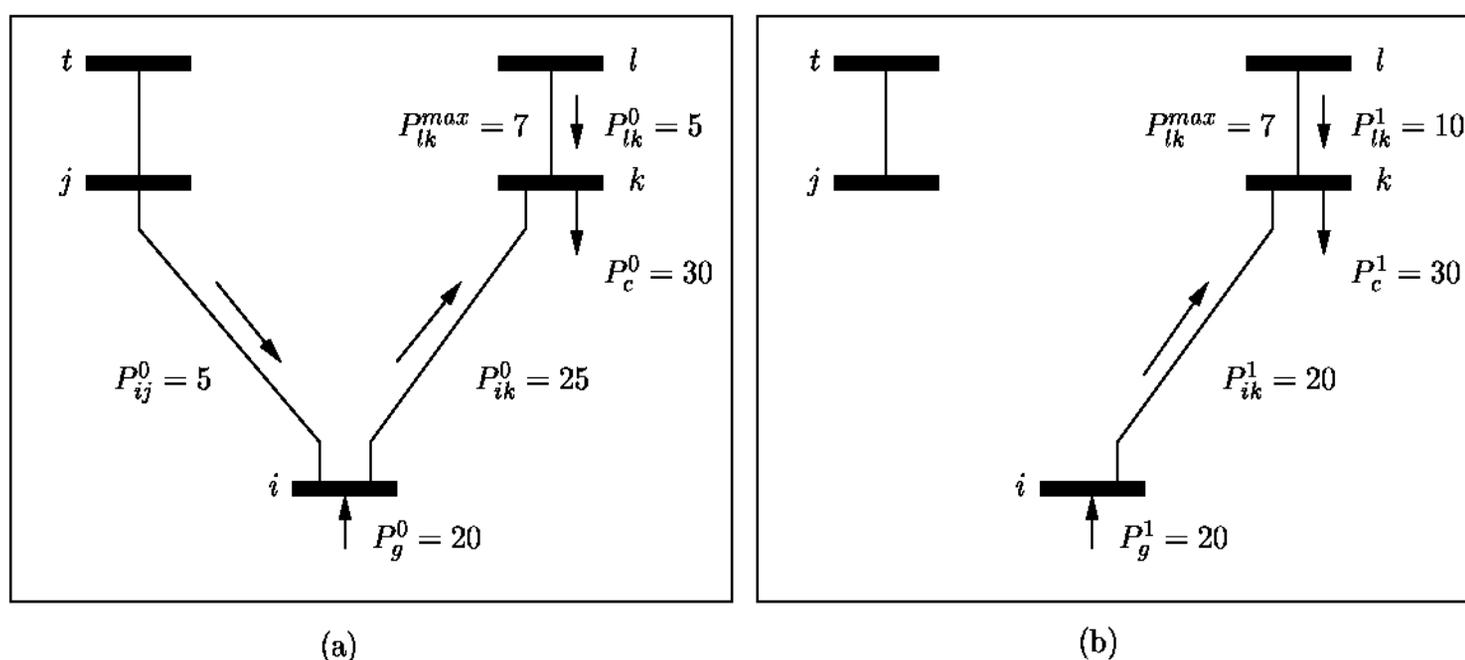


Figura 4.5: Situações para aplicação do estágio 3 quando a barra i é de geração.

Considerar agora a figura 4.6, em que o fluxo de potência no ramo ji é no sentido $i \rightarrow j$.

De acordo com a figura 4.6 (a), antes da contingência tem-se $P_{ij}^0 = P_g^0 - P_{ik}^0$. De acordo com a

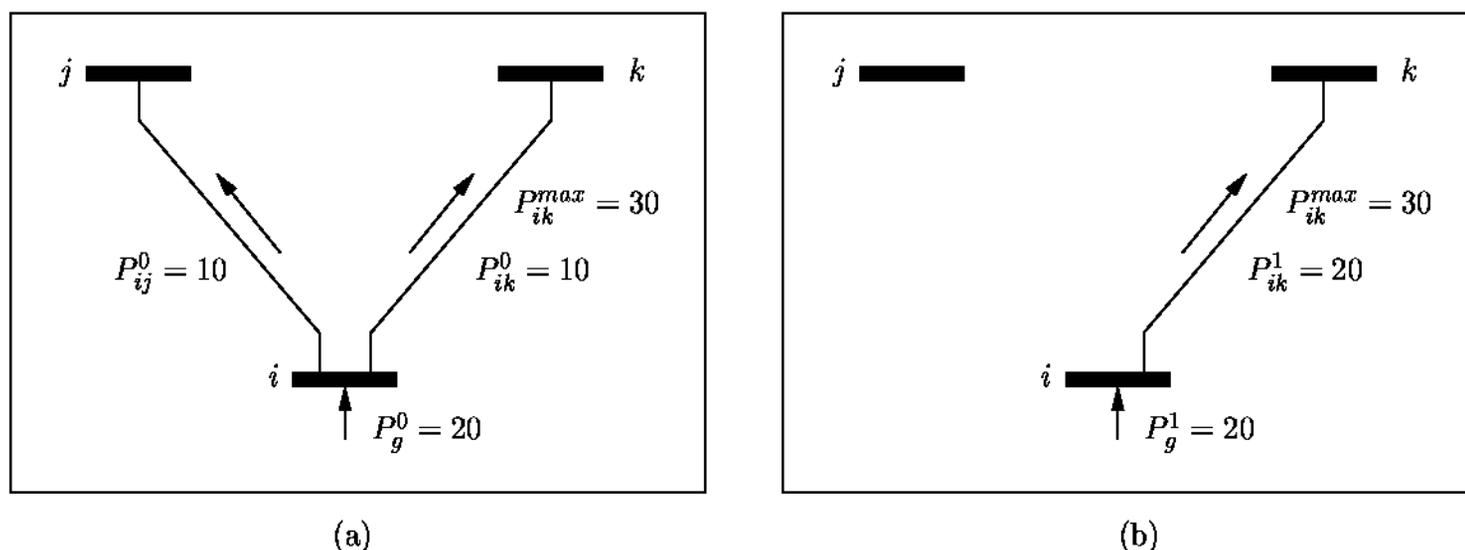


Figura 4.6: Situações para aplicação do estágio 3 quando a barra i é de geração.

figura 4.5 (b), depois da contingência tem-se $P_{ik}^1 = P_g^1$. Logo $P_{ik}^1 = P_{ik}^0$

Na figura 4.6 (b) verifica-se que depois da saída do ramo ji , o ramo ik não ficou sobrecarregado. A análise feita anteriormente também está correta considerando apenas as duas barras. Fazendo a mesma análise para mais barras e ramos em conexão como ocorre na prática, teremos a situação descrita a seguir, baseada na figura 4.7.

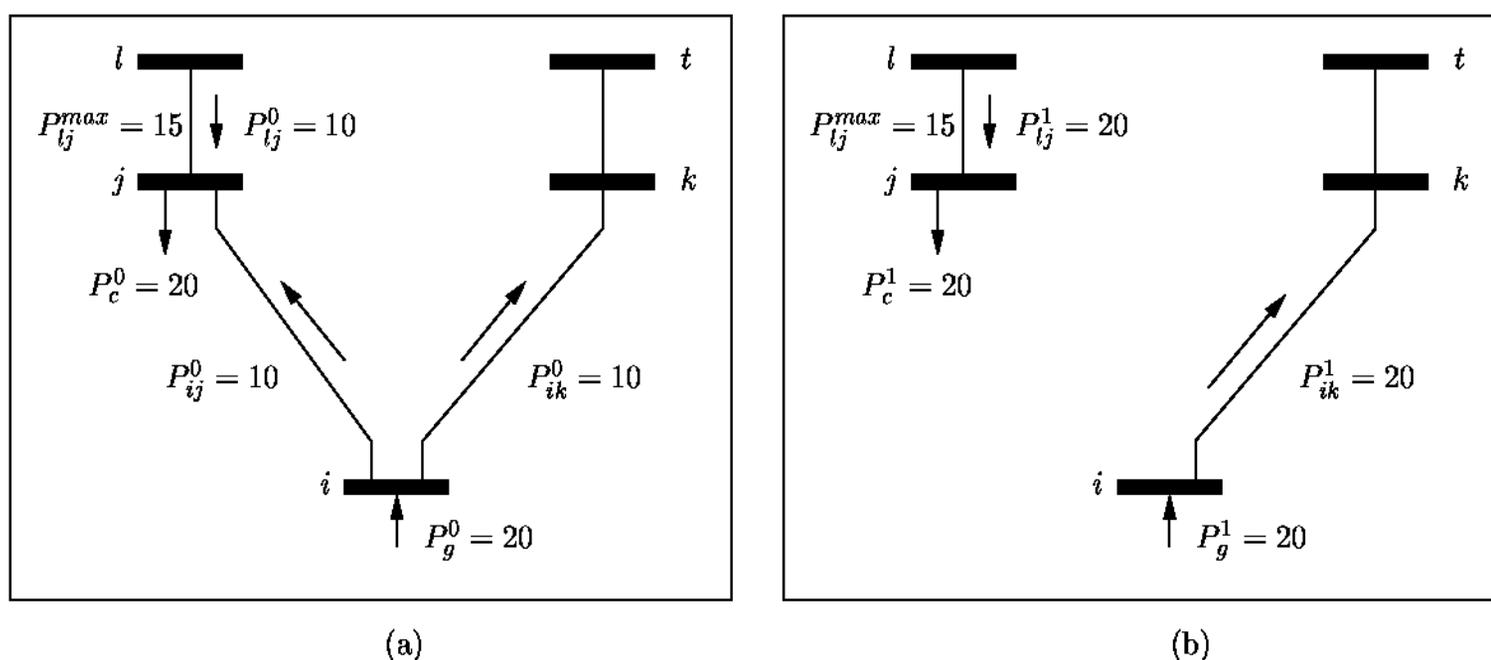


Figura 4.7: Situações para aplicação do estágio 3 quando a barra i , (a) e (b) são de geração.

Observando as figuras 4.7 (a) e (b), temos que o fluxo máximo de potência ativa no ramo lj é $P_{lj}^{max} = 15\text{MW}$. O fluxo de potência ativa no ramo lj antes da contingência é $P_{lj}^0 = 10\text{MW}$. Com a saída do ramo ji , o fluxo de potência ativa no ramo lj passa ser $P_{lj}^1 = 20\text{MW}$, ou seja $P_{lj}^1 > P_{lj}^0$ mas $P_{lj}^{max} = 15\text{MW}$. Logo $P_{lj}^1 > P_{lj}^{max}$ e sobrecarrega o ramo lj . Podemos concluir que a saída do

ramo ji não sobrecarregará o ramo ik mas em contrapartida sobrecarregará o ramo lj .

Análises semelhantes podem ser feitas nos casos em que há uma carga conectada à barra i .

Estas foram as razões que nos levaram a excluir o estágio 3 do pré-filtro, cujo objetivo principal é retirar da lista de contingências aquelas que forem consideradas inofensivas à rede. A análise crítica que foi feita, mostrou claramente que os fundamentos teóricos do estágio estão corretos. Porém, quando a análise é feita para toda extensão da rede, foi demonstrado que os seus resultados não são aplicáveis neste caso. Todas as etapas implementadas devem ser aplicadas à rede em toda a sua extensão e não para uma determinada área da rede em particular.

4.3 Fusão dos estágios 1 e 2 do primeiro Bloco

Analisando os estágios 1 e 2 foi possível verificar que uma das características que o estágio 2 possui, que é uma vantagem em relação ao estágio 1, é que consegue eliminar também algumas contingências não críticas que o estágio 1 elimina. E chegamos a uma conclusão de que não havia necessidade de tratar os dois estágios separadamente. Isso não significa que o estágio 1 será também excluído do primeiro bloco já que o estágio 2 consegue eliminar as suas contingências não críticas. A vantagem do estágio 1 é que o seu método é muito mais simples, comparando-o com o estágio 2, e elimina de uma forma muito mais rápida e simples as contingências não críticas que o estágio 2. Além disso, ambos os estágios baseiam-se em uma varredura de todos os ramos da rede. Naturalmente, espera-se uma redução do esforço computacional se essa varredura for feita uma só vez, e os estágios 1 e 2 modificados forem fundidos num só.

O algoritmo a seguir mostra o procedimento final proposto para o pré-filtro.

- (a) Estabelecer o número de vizinhanças que o programa deverá percorrer;
- (b) Após a obtenção do caso base, calcular a folga dos ramos;
- (c) Determinar a folga mínima;
- (d) Suponhamos que haja uma lista de contingências. Fazer o teste: se a contingência envolve a saída de um ramo ℓ tal que o fluxo de potência ativa nesse ramo ℓ é menor ou igual que a folga mínima, então essa contingência não causará violações de limites de fluxos de potência ativa nos demais ramos da rede. Considerar a contingência ℓ como sendo não crítica e analisar o próximo ramo da lista de contingências;
- (e) Caso contrário, ou seja, se a contingência envolve a saída de um ramo ℓ tal que o fluxo de potência ativa nesse ramo ℓ é maior que a folga mínima, então começar com o processo de obtenção das barras k e m que estão conectados ao ramo ℓ ;
- (f) Obter todos os ramos n_i que estão conectados à barra k ;
- (g) À medida que os ramos n_i conectados à barra k e barras terminais do ramo n_i vão sendo obtidos, verifica-se se o ramo n_i já foi ou não analisado anteriormente. Em caso afirmativo, obter outro ramo n_i . Em seguida verifica-se se o caminho elétrico foi fechado. Caso tenha

vido, então ativar o contador de vizinhanças para que o programa percorra somente o número de vizinhanças estabelecidas no início do programa. Se o fluxo de potência ativa do caso base do ramo ℓ for maior que a folga no ramo n_i obtido, então o processo é interrompido. A contingência ℓ será considerada como crítica. O processo segue com a análise do próximo ramo ℓ da lista de contingências;

- (h) Caso contrário, ou seja, se o fluxo de potência ativa do caso base no ramo ℓ for menor ou igual que a folga no ramo n_i obtido, então o processo segue com a obtenção de outro ramo n_i , conectado à barra k , e será feita novamente a comparação. Caso o fluxo de potência ativa no caso base do ramo ℓ continuar sendo menor ou igual que a folga em todos os ramos n_i obtidos, isto é conectados à barra k , e caso não haja mais nenhum ramo n_i conectado a essa barra, então passa-se a analisar a barra m , para que ramos n_i conectados à barra m também sejam obtidos e as suas folgas sejam comparadas com o fluxo de potência ativa no caso base do ramo ℓ ;
- (i) Novamente, se o fluxo de potência ativa no caso base do ramo ℓ continuar sendo menor ou igual que a folga de todos os ramos n_i obtidos, isto é, conectados à barra m , então passa-se a analisar as barras da primeira vizinhança do ramo ℓ da mesma forma que foi feito para as barras k e m , até que seja atingido o número de vizinhanças estabelecido inicialmente;
- (j) Se for atingido o número de vizinhanças estabelecido, então o processo é interrompido. Se o fluxo de potência ativa no caso base do ramo ℓ continuar sendo menor ou igual que a folga de todos os ramos n_i obtidos, então a contingência ℓ será considerada não crítica. O processo continuará com a análise de um outro ramo ℓ até que todas as contingências listadas sejam analisadas;

Para facilitar referências futuras ao novo pré-filtro, define-se:

- **Primeira Regra:** refere-se ao que foi definido na alínea (d) do algoritmo resultante da fusão dos estágios 1 e 2. Ou seja, esta primeira regra corresponde ao estágio 1 original.
- **Segunda Regra:** refere-se ao que foi definido nas alíneas (e,f,g,h,i,j) do algoritmo resultante da fusão dos estágios 1 e 2. Ou seja, a segunda regra corresponde ao estágio 2 modificado.

4.4 Segundo Bloco - Bloco adaptativo

Esta etapa pode ser considerada também como uma das mais importantes deste trabalho. A lista de contingências consideradas críticas no bloco anterior é novamente analisada neste bloco, não para retirar da lista as contingências não críticas como foi feito anteriormente mas, sim, para que seja feita uma classificação de todas as contingências da lista, aplicando-se uma iteração do fluxo de carga desacoplado rápido para cada contingência, em que a contingência mais severa, e por conseguinte a que apresenta também o maior *performance index* (PI), é colocada em primeiro lugar da lista. As outras contingências vão sendo também colocadas na lista de forma decrescente até a última, esta considerada a menos severa de todas e com o menor *performance index*. Como

foi definido antes, PI é um escalar que reflete o montante de violações que ocorre quando a remoção de um ramo é simulada.

O bloco é composto por um pré-filtro adaptativo e classificado na tabela 3.1 como pertencente ao grupo II em que se utilizam os resultados já obtidos em ciclos anteriores, evitando-se assim cálculos desnecessários. Antes da execução do pré-filtro deve-se fazer primeiro uma avaliação das mudanças que teriam ocorrido no sistema elétrico desde o ciclo anterior. Essas mudanças podem ser, por exemplo, topológicas, variação de carga, etc. Essas mudanças determinarão os passos a seguir no bloco que está em análise.

4.4.1 Equacionamento do pré-filtro adaptativo

Sabe-se que, de forma aproximada, o fluxo de potência ativa em um ramo depende basicamente da chamada *abertura angular* do ramo. Para um ramo ℓ da rede que conecta as barras k e m , este fluxo pode ser dado aproximadamente por:

$$P_{km} = \frac{\theta_k - \theta_m}{x_{km}} = \frac{\theta_{km}}{x_{km}}$$

em que x_{km} é a reatância série do ramo e θ_{km} é a abertura angular. O problema aqui consiste em se obter uma relação entre a mudança no ângulo de fase de uma barra após uma contingência em um certo ponto do ciclo de operação e usar esta informação para realizar uma predição da mudança no ângulo nesta barra quando a mesma contingência ocorrer em um outro ponto do ciclo.

O modelo de rede adotado corresponde à parte ativa das equações do fluxo de carga desacoplado rápido [7]:

$$\Delta \mathbf{P} = \mathbf{B}' \cdot \Delta \theta$$

em que $\Delta \mathbf{P}$ é o vetor de *mismatches* de potência ativa nodais, $\Delta \theta$ é o vetor de variações dos ângulos nodais e \mathbf{B}' é uma matriz que contém informações sobre as características topológicas da rede.

Considerar que, para um certo ponto no ciclo de operação da rede t_0 os ângulos de fase das tensões nodais sejam representados pelo vetor $\theta^{cb}(t_0)$, em que o índice superior cb indica o caso base. Após a saída do ramo ℓ (contingência), o novo vetor dos ângulos de fase será $\theta^\ell(t_0)$, em que o índice superior indica o ramo que saiu de operação. Portanto, o vetor de variação angular no caso da ocorrência da contingência ℓ será:

$$\Delta \theta^\ell(t_0) = \theta^\ell(t_0) - \theta^{cb}(t_0)$$

Utilizando o modelo de rede adotado, o vetor $\Delta \theta^\ell(t_0)$ pode ser obtido através de:

$$\Delta\theta^\ell(t_0) = \mathbf{B}'_\ell{}^{-1} \cdot \Delta\mathbf{P} = \mathbf{B}'_\ell{}^{-1} \cdot \mathbf{e}^\ell \cdot P_\ell^{cb}(t_0)$$

em que \mathbf{B}'_ℓ é a matriz após a saída do ramo ℓ , \mathbf{e}^ℓ é um vetor com $+1$ e -1 nas posições correspondentes às barras k e m do ramo ℓ respectivamente, e $P_\ell^{cb}(t_0)$ é o fluxo de potência ativa no ramo ℓ no caso base. Pode-se então escrever:

$$\Delta\theta^\ell(t_0) = \alpha^\ell(t_0) \cdot P_\ell^{cb}(t_0)$$

em que $\alpha^\ell(t_0) = \mathbf{B}'_\ell{}^{-1} \cdot \mathbf{e}^\ell$. O vetor $\alpha^\ell(t_0)$ é calculado como a razão entre as variações de ângulo e o fluxo de potência do ramo que saiu de operação:

$$\alpha^\ell(t_0) = \frac{\Delta\theta^\ell(t_0)}{P_\ell^{cb}(t_0)} = \frac{\theta^\ell(t_0) - \theta^{cb}(t_0)}{P_\ell^{cb}(t_0)}$$

Os elementos de $\alpha^\ell(t_0)$, representam sensibilidades entre os ângulos de fase nodais e o fluxo de potência ativa no ramo ℓ .

No próximo ponto do ciclo $t_1 = t_0 + \Delta t$, os valores de $\alpha^\ell(t_0)$ serão usados para calcular rapidamente as novas variações de ângulo após a ocorrência da contingência ℓ . Ou seja, a variação de ângulo será calculada por:

$$\Delta\theta^\ell(t_1) = \alpha^\ell(t_0) \cdot P_\ell^{cb}(t_1)$$

Os novos ângulos de tensões nas barras para um tempo t_1 serão calculados por:

$$\theta^\ell(t_1) = \theta^{cb}(t_1) + \Delta\theta^\ell(t_1)$$

ou seja:

$$\theta^\ell(t_1) = \theta^{cb}(t_1) + \alpha^\ell(t_0) \cdot P_\ell^{cb}(t_1)$$

4.4.2 Algoritmos

Descreveremos a seguir os algoritmos para o bloco adaptativo. Apresentaremos dois algoritmos, em que o primeiro corresponde a um tempo t_0 e o segundo para um tempo t_1 . Para a execução do algoritmo para um tempo t_0 partimos do pressuposto de que ocorreram grandes mudanças na

rede, podendo elas serem topológicas ou de variação de carga. Neste caso precisa-se construir uma nova matriz de sensibilidades (α) que poderá ser usada num próximo tempo t_1 . Devido à essas grandes mudanças, a matriz de sensibilidades (α) tornou-se desatualizada e para um tempo t_1 o uso dessa matriz não irá garantir resultados satisfatórios.

Se as mudanças na rede forem pequenas e a matriz de sensibilidades (α) não for muito alterada, então poderemos usar essa mesma matriz em futuros cálculos para um tempo t_1 . O uso da matriz elimina cálculos desnecessários e assim o tempo computacional será bem menor. Os tipos de alterações na rede que podem ocorrer entre dois ciclos de operação, e que foram consideradas neste trabalho, serão mencionados no capítulo de testes e resultados.

4.4.2.1 Algoritmo para um tempo t_0

Considerar que as mudanças no sistema foram grandes e neste caso a tabela de sensibilidades precisa ser atualizada ou reconstruída.

- Tomar a primeira contingência ℓ da lista de contingências;
- Realizar uma iteração do fluxo de carga desacoplado rápido;
- Cálculo das variações dos ângulos das tensões e das sensibilidades. Guardar a matriz das sensibilidades (α) para futuros cálculos;
- Calcular o *performance index*;
- Tomar próxima contingência da lista para que seja analisada. Caso não haja mais contingências na lista para serem analisadas, então continuar no item abaixo;
- Ordenar as contingências de acordo com o PI;
- Montar a tabela de *ranking* das contingências.

4.4.2.2 Algoritmo para um tempo t_1

Considerar que ocorreram pequenas mudanças no sistema. Neste caso, os novos ângulos de fase pós-contingência nas barras serão calculados usando a tabela de sensibilidades.

- Tomar a primeira contingência ℓ da lista de contingências;
- Calcular os novos valores dos ângulos das tensões nas barras, usando para tal a matriz das sensibilidades (α);
- Calcular o *performance index*;
- Tomar a próxima contingência da lista para que seja analisada. Caso não haja mais contingências na lista para serem analisadas, então continuar no item abaixo;
- Ordenar as contingências de acordo com o PI;

- Montar a tabela de *ranking* das contingências;

A figura 4.8 mostra o esquema de seleção de contingências multinível adaptativa proposto neste trabalho.

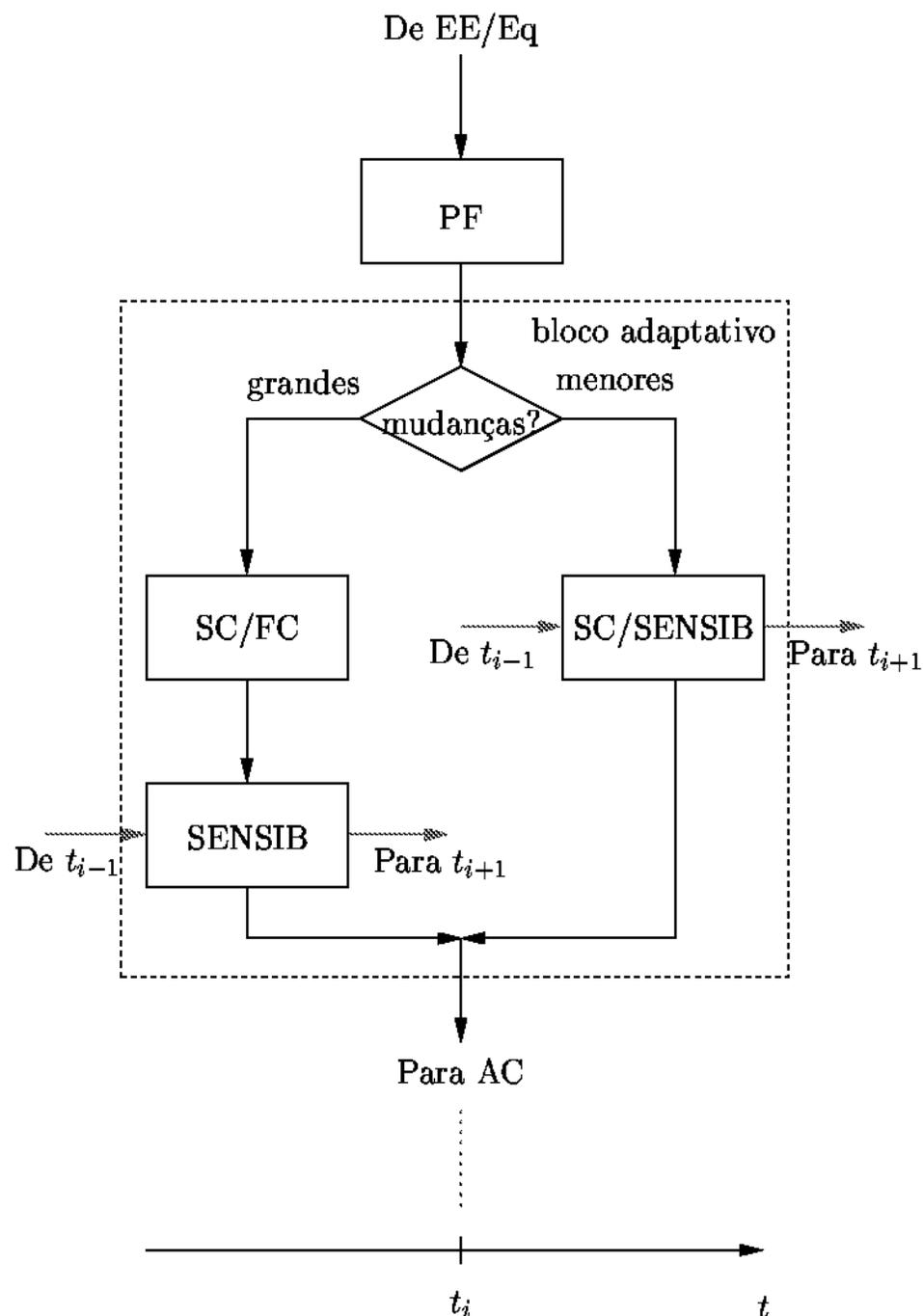


Figura 4.8: Esquema de seleção de contingências proposto

O esquema desta figura substitui o bloco de seleção de contingências (SC) representado na figura 3.2, como resultado do trabalho desenvolvido.

A cada ciclo de operação, uma vez identificada a estrutura e o estado de operação da rede para o caso base, modelada através do estimador de estado juntamente com a obtenção de um equivalente externo, (EE/Eq), o módulo de seleção de contingências inicia com o bloco pré-filtro

(PF). Através de análises simples das condições de operação do sistema, algumas contingências consideradas inofensivas à operação da rede são descartadas da lista de contingências a analisar. Lembramos que o bloco pré-filtro, composto de duas regras, não aproveita informações obtidas no ciclo anterior.

As contingências que foram consideradas críticas no pré-filtro serão agora analisadas no bloco adaptativo. Faz-se primeiro uma avaliação de mudanças que podem ter ocorrido no sistema no ciclo anterior. Caso essas mudanças forem significativas, então a seleção de contingências será feita da mesma forma como é mostrado na figura 3.2, isto é através de uma iteração de fluxo de carga desacoplado rápido para cada contingência (SC/FC) e da classificação (*ranking*) das contingências de acordo com seus *performances indices* (PI). Neste trabalho o *performance index* devido a uma contingência no ramo ℓ , foi definido como:

$$PI_{\ell} = \sum_{i=1}^{nbr} \left(\frac{P_i}{P_i^{max}} \right)^{20}$$

Ao mesmo tempo calcula-se e armazena-se a matriz das sensibilidades (α) (SENSIB). Se as mudanças na rede forem pequenas, então o cálculo dos novos ângulos de tensões nas barras será feito usando-se somente a tabela das sensibilidades (SC/SENSIB), com a grande vantagem de que o tempo computacional será bem menor, como será mostrado no Capítulo de testes e resultados.

Após a classificação das contingências, as que forem consideradas como potencialmente perigosas ao sistema, normalmente são as primeiras colocadas do topo da classificação, são enviadas para a análise de contingências (AC) onde serão analisadas detalhadamente, isto é uma por uma, através de resoluções de fluxos de carga completo.

Dependendo do tipo e do montante de alterações que ocorrem entre dois ciclos consecutivos, a matriz de sensibilidades (α) pode se tornar desatualizada, no seu todo ou em partes. Assim, o bloco SENSIB da figura 4.8 poderia ser mais elaborado, no sentido de que os valores de α calculados seriam somente aqueles estritamente necessários para que a matriz permanecesse atualizada. Este ponto específico não foi abordado neste trabalho, ficando como sugestão para um trabalho futuro. No entanto, no capítulo de testes e resultados mostrou-se que o bloco adaptativo é bastante robusto, ou seja, fornece resultados precisos mesmo após a ocorrência de alterações significativas, envolvendo saída de equipamentos e grandes variações de cargas e geração.

Acabamos de analisar neste capítulo os dois blocos que compõem a etapa de seleção de contingências. O primeiro bloco, também chamado de pré-filtro, está composto de dois estágios cujo objetivo é eliminar, de uma maneira rápida e simples, aquelas contingências que forem consideradas não críticas, sobrando na lista apenas as contingências críticas para que sejam analisadas no estágio seguinte, reduzindo desta forma a lista de contingências. Vimos também que o estágio 3 proposto em [19] foi excluído deste bloco, porque apesar dos fundamentos teóricos deste estágio serem verdadeiros, os seus resultados não se adequam aos procedimentos desse trabalho.

O segundo bloco, também chamado de bloco adaptativo, é composto por um pré-filtro adaptativo. O computo é realizado considerando-se um tempo t_0 e um tempo t_1 levando em conta as possíveis mudanças que venham a ocorrer na rede. Um dos objetivos dos cálculos que são feitos para um tempo t_0 é obter e armazenar a matriz das sensibilidades (α), que poderá ser usada mais

tarde para futuros cálculos para um tempo t_1 , dependendo das mudanças que ocorrerem na rede. A grande vantagem dos cálculos feitos para um tempo t_1 é que se a matriz das sensibilidades (α) obtida e armazenada no ciclo anterior for utilizada, pode-se evitar cálculos desnecessários e com isso o tempo computacional será bem menor, isto constitui o objetivo deste trabalho.

Capítulo 5

Testes e resultados

Este capítulo tem como finalidade ilustrar e discutir o desempenho dos blocos pré-filtro (PF), adaptativo e do processo de seleção de contingências de uma forma geral. Tanto para o pré-filtro como para o bloco adaptativo, apresentaremos os tempos computacionais para sua execução. Para o pré-filtro em particular serão fornecidas importantes informações referentes ao número de contingências não críticas que cada regra elimina e vai-se mostrar também que o pré-filtro pode vir a ser mais ou menos *conservador*, em função da necessidade e da condição de carregamento do sistema.

No tocante ao bloco adaptativo, serão apresentados os tempos computacionais resultantes da sua execução, primeiro sem o uso da tabela das sensibilidades e depois usando-se a tabela. Será mostrado que consegue-se obter bons *rankings* através do uso da tabela de sensibilidades (α), cuja utilidade e eficiência reduz bastante o tempo computacional requerido. A qualidade desses *rankings* são quantificados por uma taxa de captura (*capture ratio*), cujos cálculos também serão apresentados.

5.1 Análise de desempenho geral do processo de seleção de contingências

Para fins de apresentação dos resultados, foram definidas as seguintes grandezas:

- A- Número total de ramos da rede;
- B- Contingências que não fazem parte da lista por terem sido consideradas muito graves e requerem outros métodos para a sua análise. Essas contingências são tais que resultam em ilhamento de parte da rede ou cuja resolução do fluxo de carga resulta em divergência;
- C- Total de contingências que fazem parte da lista;
- D- Total de contingências não críticas eliminadas pela primeira regra do pré-filtro (PF);

- E-** Número de vizinhanças consideradas na segunda regra do pré-filtro (PF). Ressalta-se que este número de vizinhanças refere-se à expansão da área de trabalho do pré-filtro após ter-se obtido o fechamento do caminho elétrico (ver figura 4.1);
- F-** Total de contingências não críticas eliminadas pela segunda regra do pré-filtro (PF);
- G-** Total de contingências consideradas como sendo críticas e que deverão passar para o bloco adaptativo;
- H-** Total de contingências consideradas como sendo não críticas ($D + E$);
- I-** Tempo total de execução do pré-filtro (PF), em [s];
- J-** Tempo total de execução do bloco adaptativo, sem o uso da tabela de sensibilidades, em [s];
- K-** Tempo total de execução dos dois blocos, pré-filtro e adaptativo, em [s];
- L-** Tempo total de execução do bloco adaptativo, usando a tabela de sensibilidades, em [s];
- M-** Tempo total de execução do programa, sem o uso da tabela de sensibilidades, em [s];
- N-** Tempo total de execução do programa, com o uso da tabela de sensibilidades, em [s];

5.1.1 Rede de 14 Barras e 20 Ramos

A tabela 5.1 apresenta alguns resultados obtidos com a rede de 14 barras e 20 ramos cujos dados aparecem em [25]. O diagrama unifilar da rede, assim como a distribuição de fluxos de potência para o caso base são mostrados no apêndice A.

Tabela 5.1: Testes e resultados rede 14 barras

REDE 14 BARRAS													
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
20	2	18	2	0	1	15	3	0,00	0,16	0,16	0,02	0,22	0,07
20	2	18	2	1	1	15	3	0,00	0,16	0,16	0,02	0,22	0,07
20	2	18	2	2	0	16	2	0,00	0,17	0,17	0,02	0,23	0,07
20	2	18	2	3	0	16	2	0,00	0,17	0,17	0,02	0,23	0,07

Pode-se ver na tabela 5.1 que, a rede possui 20 ramos (A) que deverão ser analisados. Foram constatados uma divergência e um ilhamento em consequência da saída de 2 ramos (B) e estes foram excluídos da lista por terem sido considerados como casos graves e requerem outros métodos mais completos para a sua análise. Na lista de contingências restam 18 ramos (C) para serem analisados na próxima etapa. Ao passarem pelo pré-filtro (PF), 2 contingências foram eliminadas pela primeira regra (D). Em relação à segunda regra, para zero e uma vizinhanças (E) foi eliminada mais uma contingência para cada (F), totalizando 3 contingências não críticas a serem descartadas da lista

(H), enquanto que para duas e três vizinhanças não se eliminou nenhuma (F), permanecendo com 2 contingências não críticas a descartar da lista (H).

A idéia da segunda regra do pré-filtro (PF) ser mais ou menos *conservadora* será explicada aqui. Através de simulações utilizando o fluxo de carga chegou-se a conclusão de que o número de vizinhanças igual a zero produz resultados corretos, ou seja, que não havia necessidade de se aumentar o número de vizinhanças, pois as três contingências não críticas descartadas são realmente não críticas. A saída de qualquer um desses três ramos não provocará sobrecargas em outros ramos. Pode-se notar na tabela 5.1 que à medida que o número de vizinhanças aumenta, o número de contingências não críticas, descartadas pela segunda regra do pré-filtro, diminui. Em consequência, aumenta também o número de contingências críticas (G). Ou seja, com o aumento desnecessário do número de vizinhanças perde-se contingências não críticas e ganha-se contingências críticas, contrariando completamente o objetivo do método que é precisamente descartar da lista o maior número possível de contingências não críticas para que a análise de contingências envolva o menor número de simulações possível. Neste caso específico, um *maior conservadorismo*, ou seja, o aumento do número de vizinhanças, torna o processo menos eficiente.

Em relação aos tempos computacionais, na tabela 5.1 pode-se ainda mostrar que as duas regras que compõem o pré-filtro (PF) são bastante simples e apresentam custo computacional (I) desprezível.

Um detalhe muito interessante e importante acontece no bloco adaptativo. O tempo cronometrado durante a execução do bloco adaptativo, para um tempo t_1 (*simulação 2*), usando a tabela de sensibilidades (L), corresponde somente a 12% do tempo cronometrado sem usar a tabela de sensibilidades (J). Isso mostra a importância do uso da tabela de sensibilidades se não houve mudanças na rede no ciclo anterior ou em caso de pequenas mudanças na rede.

5.1.2 Rede de 30 Barras e 41 Ramos

A tabela 5.2 mostra os resultados obtidos da rede de 30 barras e 41 ramos cujos dados aparecem em [25]. O diagrama unifilar da rede, assim como a distribuição de fluxos no caso base são apresentados no apêndice A.

Tabela 5.2: Testes e resultados rede 30 barras

REDE 30 BARRAS													
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
41	4	37	1	0	3	33	4	0,00	0,42	0,42	0,06	0,51	0,15
41	4	37	1	1	1	35	2	0,00	0,44	0,45	0,07	0,54	0,15
41	4	37	1	2	1	35	2	0,00	0,44	0,45	0,07	0,54	0,15
41	4	37	1	3	0	36	1	0,00	0,46	0,46	0,07	0,55	0,15

Os comentários feitos em relação a tabela 5.2 são idênticos aos relativos à tabela 5.1. Na tabela 5.2 pode-se verificar que a rede possui 41 ramos (A) a serem analisados. Após ter-se executado fluxos

de carga, constatou-se divergências ou ilhamentos em 4 ramos (B), que foram excluídos da lista. Da lista de contingências restaram 37 (C), que passaram para a primeira regra do pré-filtro (PF). Esta eliminou somente uma contingência (D), independentemente do número de vizinhanças. Em relação à segunda regra do pré-filtro (F) pode-se ver que à medida que se aumenta o número de vizinhanças, diminui o número de contingências não críticas descartadas através desta regra.

Testes realizados mostraram que as 4 contingências não críticas descartadas como resultado da sua passagem pelo pré-filtro, são realmente não críticas. Portanto, o aumento de vizinhanças neste caso é desnecessária porque como vimos, à medida que se aumenta o número de vizinhanças, diminuem as contingências não críticas a descartar.

Em relação ao tempo computacional, na tabela 5.2 mostra-se que as duas regras do pré-filtro continuam sendo bastante simples e o custo computacional (I) é desprezível. Pode-se observar também que à medida que se aumentam as vizinhanças, também aumenta o tempo computacional.

Para o bloco adaptativo, o tempo medido durante (L) a execução do adaptativo para um tempo t_1 (*simulação 2*) usando a tabela de sensibilidades (α), corresponde aproximadamente a 14% do tempo registrado pelo mesmo bloco adaptativo (J), sem usar a tabela de sensibilidades (α). Mais uma vez, está mostrada a importância do uso da tabela de sensibilidades caso não ocorram mudanças ou ocorram mudanças pequenas entre ciclos de operação.

5.1.3 Rede de 118 Barras e 186 Ramos

Os dados da rede de 118 barras e 186 ramos foram obtidos em [26]. A tabela 5.3 mostra os resultados obtidos nas simulações realizadas.

Tabela 5.3: Testes e resultados para a rede de 118 barras

REDE 118 BARRAS													
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
186	9	177	29	0	21	127	50	0,02	4,29	4,34	0,90	4,63	2,66
186	9	177	29	1	14	134	43	0,02	4,73	4,76	0,95	4,99	2,66
186	9	177	29	2	11	137	40	0,02	4,80	4,91	0,98	5,14	2,66
186	9	177	29	3	7	141	36	0,02	5,13	5,14	1,01	5,37	2,66

Para esta rede de 118 barras, obtivemos resultados semelhantes aos das redes de 14 e 30 barras analisadas anteriormente. Esta rede possui 186 ramos (A) a serem analisados. Através de simulações com o fluxo de carga, constatou-se divergências ou ilhamentos em 9 ramos (B), que foram excluídos da lista de contingências. Da lista restaram 177 (C), que passaram para a primeira regra do pré-filtro (PF) que eliminou 29 contingências (D). Em relação à segunda regra do pré-filtro (F) pode-se ver que à medida que se aumenta o número de vizinhanças, diminui o número de contingências não críticas descartadas. Testes realizados mostraram que as 50 contingências não críticas descartadas como resultado da sua passagem pelo pré-filtro considerando zero vizinhanças (E), são realmente não críticas.

Portanto, o aumento do número de vizinhanças neste caso também é desnecessária porque como vimos, à medida que se aumenta mais vizinhanças, diminuem as contingências não críticas a descartar. Neste caso, quanto maior o número de vizinhanças (procedimento mais conservador), menor o número de contingências não críticas descartadas.

Em relação aos tempos computacionais, na tabela 5.3 mostra-se que as duas regras do pré-filtro continuam a não exigir um esforço computacional significativo (I), apesar de que para esta rede o tempo já não é mais zero. Isso se deve ao tamanho da rede. Pode-se observar também que à medida que se aumentam as vizinhanças, também aumenta o tempo computacional.

Para o bloco adaptativo, o tempo medido (L) durante a sua execução para um tempo t_1 (*simulação 2*) usando a tabela de sensibilidades (α), corresponde a aproximadamente 20% do tempo registrado (J) para a execução da mesma tarefa, neste caso para um tempo t_0 (*simulação 1*), sem usar a tabela de sensibilidades (α). Mais uma vez, está mostrada a importância do uso da tabela de sensibilidades na obtenção dos novos ângulos de tensões nas barras caso não tenham ocorrido mudanças no sistema ou se as mudanças foram pequenas.

5.1.4 Rede de 904 Barras e 1283 Ramos

Esta rede corresponde a uma versão reduzida do sistema elétrico do sudoeste do EUA. A tabela 5.4 mostra os resultados obtidos.

Tabela 5.4: Testes e resultados rede 904 barras

REDE 904 BARRAS													
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1283	327	956	4	0	255	697	259	0,38	287,30	287,95	38,93	294,52	39,72
1283	327	956	4	1	152	800	156	0,40	333,27	334,85	44,65	350,95	45,82
1283	327	956	4	2	108	844	112	0,41	352,47	352,90	47,06	370,45	47,89
1283	327	956	4	3	79	873	83	0,42	364,41	365,05	48,71	390,26	49,18

Em relação a esta rede de 904 barras, pode-se dizer que os resultados obtidos não são idênticos em comparação às outras redes já analisadas até agora. Portanto há mudanças interessantes em alguns dos resultados, para os quais chamamos a atenção nesta análise.

Pela tabela 5.4 pode-se verificar que esta rede possui 1283 ramos (A) a serem analisados. Após estudo de fluxo de carga, constatou-se divergências ou ilhamentos em 327 ramos (B), que pelo fato de essas contingências serem graves, foram excluídos da lista de contingências para que outros métodos mais avançados sejam usados para as suas análises. Da lista de contingências restaram 956 (C) que passaram para a primeira regra do pré-filtro (PF) que eliminou apenas 4 (D). Repetindo o mesmo raciocínio utilizado para as redes analisadas anteriormente, verifica-se que em relação à segunda regra do pré-filtro (F), à medida que se aumenta o número de vizinhanças, diminui o número de contingências não críticas descartadas através desta regra.

Para zero vizinhanças (primeira linha da tabela 5.4), os testes realizados mostraram que 259

(H) contingências foram descartadas como resultado da atuação do pré-filtro. As 4 contingências que foram descartadas pela primeira regra (D) são, de fato, não críticas. Das 255 contingências descartadas pela segunda regra, na verdade, nem todas são não críticas (F). Isso foi confirmado pelos testes realizados através de estudos de fluxo de carga. Na verdade 4 delas são críticas, ou seja, a saída de cada uma delas provoca sobrecargas em outros ramos. Isso quer dizer que, das 255 contingências eliminadas pela segunda regra, apenas 251 são de fato não críticas.

Para este caso, precisa-se ser *mais conservador*, contrariamente aos casos analisados para as redes de 14, 30 e 118 barras. Ou seja, para a rede de 904 barras, deve-se expandir pelo menos uma vizinhança para que tenhamos somente contingências não críticas. Como vimos, zero vizinhanças não é suficiente para que as contingências descartadas na segunda regra sejam de fato não críticas.

Ainda com relação à segunda regra do pré-filtro, passamos a analisar o caso de uma vizinhança (segunda linha da tabela 5.4). Nota-se que existem 156 contingências não críticas (H) descartadas pelo pré-filtro (PF). Houve uma diminuição em relação ao caso anterior, sendo que 4 pela primeira regra e 152 pela segunda regra. Analisando novamente as contingências descartadas pela segunda regra, concluiu-se que ainda havia uma contingência crítica. A saída dessa contingência provoca sobrecarga em outros ramos. Daí a necessidade de se ser ainda *mais conservador*, ou seja, acrescentar ainda mais uma vizinhança.

Pela tabela 5.4, para duas vizinhanças pode-se notar que existem 112 contingências não críticas (H) descartadas pelo pré-filtro (PF). Houve também uma diminuição em relação a zero e uma vizinhança, sendo que 4 pela primeira regra (D) e 108 pela segunda regra (F). Após testes realizados chegou-se a conclusão de que as 108 contingências descartadas pela segunda regra são de fato não críticas. Foi necessário ser *mais conservador*, ou seja, percorrer até a segunda vizinhança para que se pudesse encontrar somente contingências não críticas que são descartadas pelo pré-filtro através da primeira e segunda regra. A saída de cada uma das 112 contingências não provoca sobrecargas em outros ramos.

Em relação ao tempo registrado, pode-se dizer que os resultados obtidos para essa rede de 904 barras se assemelham às realizadas para as redes de 14, 30 e 118 barras. Portanto há uma grande economia de tempo no uso do pré-filtro e da tabela de sensibilidades quando não houver mudanças na rede ou se elas forem pequenas.

Pode-se demonstrar a eficiência do pré-filtro através de cálculos simples mostrados a seguir, com base na Tabela 5.4. Os cálculos foram feitos tomando como referência os dados obtidos que correspondem a 2 (duas) vizinhanças onde, como se sabe, foram eliminadas as verdadeiras 112 contingências não críticas da lista de contingências.

Usando uma iteração do fluxo de carga desacoplado rápido (FCDR):

$$\text{Tempo/contingência} = \frac{J}{G} = \frac{352,47}{844} = 0,4176 \text{ segundos/contingência}$$

$$0,4176 \cdot H = 0,4176 \cdot 112 = 46,77 \text{ segundos}$$

Usando a tabela de sensibilidades (α):

$$\text{Tempo/contingência} = \frac{L}{G} = \frac{47,06}{844} = 0,0558 \text{ segundos/contingência}$$

$$0,0558 \cdot H = 0,0558 \cdot 112 = 6,25 \text{ segundos}$$

Analisando os resultados obtidos nos cálculos anteriores, pela Tabela 5.4 tem-se que 112 contingências foram descartadas pelo pré-filtro, isto é considerando 2 (duas) vizinhanças. Se essas contingências fossem analisadas usando uma iteração do fluxo de carga desacoplado rápido (FCDR), seriam necessários 46,77 segundos. Se essas mesmas contingências fossem analisadas usando a tabela de sensibilidades (α), seriam necessários 6,25 segundos. No entanto, somente 0,41 segundos (I) foram necessários para que o pré-filtro as descartasse.

Esses cálculos vêm mais uma vez nos mostrar a utilidade do pré-filtro apesar de que, como foi visto, consegue eliminar somente poucas contingências não críticas. Mas o fato de as suas regras serem bastante simples e fáceis sem qualquer custo computacional aumenta o interesse no seu uso. Na verdade, essas regras foram feitas para que apenas algumas contingências não críticas fossem eliminadas, assim evita-se que contingências consideradas críticas sejam eliminadas.

5.1.5 Algumas observações finais

Pode-se verificar através dos resultados mostrados que a utilização do pré-filtro (composto por duas regras) e do bloco adaptativo (tabela de sensibilidades) resulta em um processo de cálculo muito eficiente do ponto de vista computacional. A modificação introduzida na regra 2 do pré-filtro implica na definição de um número de vizinhanças para a expansão da região de trabalho a partir da obtenção do caminho elétrico de retorno de fluxo. Esse número de vizinhanças define o tamanho da região de trabalho e é fundamental para a obtenção de resultados confiáveis no que diz respeito à retirada das contingências não críticas da lista.

Para as redes de pequeno porte, verificou-se que se o número de vizinhanças for muito grande deixa-se de filtrar um grande número de contingências não críticas. Por outro lado, no caso da rede de grande porte, um número de vizinhanças muito pequeno implicou na filtragem de contingências críticas. Isso implica na necessidade de um certo cuidado na definição desse número. Observa-se também que esse número não precisa ser constante ao longo do dia. Pode-se, por exemplo, definir um número pequeno em horários de baixa demanda, e aumentá-lo nos horários de pico de demanda.

5.2 Bloco Adaptativo

Nessa seção apresentaremos resultados referentes aos *rankings* obtidos com o uso da tabela de sensibilidades (α), em que a qualidade desses *rankings* foram quantificados por uma taxa de captura (*Capture Ratio*).

Para testar o desempenho do bloco adaptativo, foram necessários dois tipos de simulações, conforme descrito a seguir.

Simulação 1

- Obtenção do caso base. A lista de contingências passa pelo pré-filtro, onde contingências não críticas são descartadas pela primeira e segunda regras.
- Considerando que as mudanças no sistema no ciclo anterior foram grandes, então deve-se atualizar ou reconstruir a tabela de sensibilidades. Neste caso deve-se realizar uma iteração do fluxo de carga desacoplado rápido para cada contingência da lista e calcular as sensibilidades (α) que ao mesmo tempo serão armazenados em vetores.
- Calcula-se o *performance index* de acordo com os resultados do fluxo de carga e classificam-se (*ranking*) as contingências.
- Considerar a lista das contingências obtida como a *lista 1*.

Simulação 2

- Considerar que a tabela de sensibilidades (α) tenha sido obtida no ciclo anterior e está disponível para utilização.
- Verificar as mudanças que ocorreram desde o ciclo anterior. Os tipos de mudanças que foram simulados foram:
 - Tipo 1: variação de carga em uma barra;
 - Tipo 2: variação generalizada de carga, isto é em todas as barras;
 - Tipo 3: variação generalizada de carga e de geração na mesma proporção;
 - Tipo 4: saída de um ramo;
 - Tipo 5: saída de um gerador;
- Obtenção do caso base. A lista de contingências passa pelo pré-filtro, onde contingências não críticas são descartadas pela primeira e segunda regra.
- Para cada contingência da lista que foi considerada potencialmente crítica, usando a tabela de sensibilidades (α), calcular os novos valores dos ângulos de fase das tensões, pós-contingência, em todas as barras através da expressão:

$$\theta^\ell(t_1) = \theta^{cb}(t_1) + \alpha^\ell(t_0) \cdot P_\ell^{cb}(t_1)$$

- Calcular o *performance index*(PI) e classificar (*ranking*) as contingências.
- Considerar a lista das contingências ordenado como a *lista 2*.
- Calcular a taxa de captura (*Capture Ratio*).

A taxa de captura utilizada neste trabalho, é a medida da habilidade do bloco adaptativo de classificar as contingências corretamente, comparando as listas de contingências geradas através das simulações 1 e 2. A *lista 1* obtida pela *simulação 1* através da aplicação de uma iteração do fluxo de carga desacoplado rápido é comparada com a *lista 2*, obtida pela *simulação 2* na qual se fez uso da tabela de sensibilidades. Foi definido o seguinte procedimento para se calcular a taxa de captura:

- Definir o número n das primeiras contingências do topo da *lista 1*;
- Definir o número m das primeiras contingências do topo da *lista 2*;
- Determinar k , que é o número de contingências da *lista 2* que aparecem na *lista 1*;
- A Taxa de Captura (*Capture Ratio*) é definida pela expressão:

$$\left(\frac{k}{n}\right) * 100\%$$

A *simulação 1* corresponde basicamente ao processo de seleção de contingências convencional e aceito hoje, ou seja, através de cálculos de uma iteração do fluxo de carga desacoplado rápido. A única diferença é que o pré-filtro proposto neste trabalho é utilizado.

A *simulação 2* corresponde ao procedimento proposto neste trabalho, envolvendo a atuação do pré-filtro e do bloco adaptativo em substituição à iteração do fluxo de carga desacoplado rápido.

A idéia é comparar as qualidades dos resultados das duas simulações e verificar se os resultados da *simulação 2* são confiáveis, além de serem obtidos com menor esforço computacional.

Serão mostrados algumas simulações para $n=5$ e $m=5$. Resultados referentes à taxas de captura serão agora apresentados de acordo com os 5 tipos de mudanças que venham a ocorrer no sistema e que foram definidos neste trabalho de pesquisa.

5.2.1 Tipo 1: variação de carga em uma barra

Neste caso escolheu-se uma barra de carga da rede e procedeu-se a acréscimos graduais de carga. Os resultados obtidos pelas simulações 1 e 2 são então analisados.

5.2.1.1 Rede de 14 Barras e 20 Ramos

A tabela 5.5 mostra um resumo dos resultados obtidos. Para essa rede escolheu-se a barra 13, cujas potências ativa e reativa iniciais são respectivamente, $P_{13}^0=13,50$ MW e $Q_{13}^0=5,80$ Mvar. VAR corresponde à variação de carga em relação ao caso base e TC a taxa de captura.

Tabela 5.5: Taxas de captura para a rede de 14 barras

VAR(%)	0	10	30	50	70	100	150	200	250	300
TC(%)	80	80	80	80	80	100	100	80	60	60
CNC	3	1	1	1	0	0	0	2	0	1
CC	15	17	17	17	18	17	16	13	15	12
TOT	18	18	18	18	18	17	16	15	15	13
VLR	0	0	0	0	0	1	2	3	3	5

A tabela 5.5 não somente apresenta resultados sobre as taxas de captura mas também o desempenho do pré-filtro, onde, por exemplo para um acréscimo de 10% de carga na barra 13, obteve-se uma contingência que foi descartada (CNC) e 17 contingências críticas (CC), totalizando 18 contingências (TOT). Aparece também o número de ramos com violações de limites (VLR) para cada aumento percentual de carga na barra 13.

Nota-se também na tabela 5.5 que o número total de contingências (TOT) diminui com o aumento da carga na barra. Isto ocorre porque algumas contingências passam a resultar em divergência do fluxo de carga e são retiradas da lista de contingências. Temos também que o número de ramos com violações de limites aumenta à medida que aumentam os acréscimos de carga na barra 13.

Se observarmos os aumentos de carga na barra 13 na tabela 5.5, veremos que de zero à 70% de aumento, a taxa de captura foi de 80%, para aumentos de 100 e 150%, a taxa de captura foi de 100%, para 200% de aumento, a taxa foi de 80% e finalmente para aumentos de 250% e 300%, a taxa de captura foi de 60%. Pode-se notar que a partir desse momento a taxa de captura tende a piorar devido à aumentos de carga.

Outro detalhe importante diz respeito à aumento de zero% de carga. Observem que para um aumento de zero% não houve nenhum acréscimo de carga na barra 13, tanto para o diretório para um tempo t_0 (*simulação 1*) como para o diretório para um tempo t_1 (*simulação 2*). Pelo que a taxa de captura deveria ser de 100%, porque para esse aumento de 0% os dois diretórios são iguais. Mas o fato de que em uma das simulações os cálculos são feitos usando-se sensibilidades (aproximações foram realizadas na dedução das equações para a obtenção destas sensibilidades), constitui a causa fundamental para que as taxas de captura não sejam iguais a 100 % em ambos os diretórios.

A tabela 5.6 mostra as classificações de contingências obtidas através das simulações 1 e 2 para aumentos de carga de 0, 150 e 300%. Pode-se observar nessa tabela, em relação ao aumento de 0% que, 15 contingências passaram para o bloco adaptativo e obteve-se as classificações para as simulações 1 e 2 onde, analisando as 5 primeiras posições das duas simulações, confirma-se a taxa de captura de 80% obtida anteriormente.

Para um aumento de 150% de carga na barra 13, 16 contingências, consideradas críticas no estágio anterior, passaram para o bloco adaptativo, cujas classificações aparecem na tabela 5.6, após terem sido realizadas as duas simulações. Neste caso, se analisarmos as 5 primeiras posições desta tabela, confirma-se também a taxa de captura de 100% obtida e mostrada na tabela 5.5. Observem também que a ordem das classificações para as duas simulações não é a mesma. Isso deve-se ao fato de que as duas simulações utilizam metodologia diferente para se obter a classificação.

Para um aumento de 300% de carga na barra 13, pode-se verificar que apenas 12 contingências, consideradas como críticas no estágio anterior, passaram para o bloco adaptativo. Analisando as classificações nas 5 primeiras posições para as duas simulações, confirma-se a taxa de captura de 60% obtida anteriormente.

Tabela 5.6: Classificação de contingências para aumentos de 0, 150 e 300% de carga.

	Simulação 1 $P_{13}^0 ; Q_{13}^0$ 0%	Simulação 2 $P_{13}^0 ; Q_{13}^0$ 0%	Simulação 1 $P_{13} ; Q_{13}$ 150%	Simulação 2 $P_{13} ; Q_{13}$ 150%	Simulação 1 $P_{13} ; Q_{13}$ 300%	Simulação 2 $P_{13} ; Q_{13}$ 300%
Posição	Ramo	Ramo	Ramo	Ramo	Ramo	Ramo
1	10	10	10	10	10	10
2	3	3	3	3	3	3
3	13	13	17	17	12	2
4	11	9	11	9	16	9
5	17	11	9	11	20	20
6	9	2	12	2	9	18
7	16	17	16	18	18	16
8	2	20	18	20	2	19
9	20	16	20	16	19	12
10	15	4	2	19	6	6
11	4	15	19	12	5	5
12	8	8	15	6	7	7
13	7	5	6	15		
14	5	7	8	8		
15	6	6	5	5		
16			7	7		

5.2.1.2 Rede de 30 Barras e 41 Ramos

A tabela 5.7 mostra os resultados obtidos nas simulações desta rede de 30 barras. Foi escolhida a barra 7, cujas potências ativa e reativa iniciais são respectivamente, $P_7^0=22,80$ MW e $Q_7^0=10,90$ Mvar.

Tabela 5.7: Taxas de captura para a rede de 30 barras

VAR(%)	0	10	30	50	70	100	150	200	250	300
TC(%)	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
CNC	4	4	4	4	5	5	4	5	4	4
CC	33	33	32	32	31	30	29	27	27	26
TOT	37	37	36	36	36	35	33	32	31	30
VLR	0	0	1	1	1	2	5	6	7	8

Foi-se acrescentando carga na barra 7 até 300%, obtendo-se uma taxa de captura de 80% em todos os casos. Para esta rede e tipo de evento verificou-se também que com acréscimos de carga na barra 7 até 300%, a taxa de captura ainda se mantinha boa, o que nos leva a concluir novamente que para este tipo de evento, a tabela de sensibilidades para um tempo t_1 (*simulação 2*) poderá ser utilizada até para grandes aumentos de carga, com a garantia de que ela não será danificada como consequência deste evento.

O desempenho do pré-filtro também é apresentado através de contingências não críticas descartadas pela primeira e segunda regra do pré-filtro (CNC), pelas contingências críticas em análise no bloco adaptativo (CC) e pelo número total de contingências (TOT), além de números de ramos com violações de limites (VLR) em cada aumento percentual de carga na barra 7.

5.2.1.3 Rede de 118 Barras e 186 Ramos

Os resultados para essa rede são mostrados na tabela 5.8. Foi escolhida a barra 3, cujas potências ativa e reativa iniciais são $P_3^0=39,00$ MW e $Q_3^0=10,00$ Mvar, respectivamente.

Tabela 5.8: Taxas de captura para a rede de 118 barras

VAR(%)	0	10	30	50	70	100	150	200
TC(%)	100	100	100	100	100	100	100	100
CNC	50	49	49	50	48	45	43	39
CC	127	128	128	127	129	132	133	135
TOT	177	177	177	177	177	177	176	174
VLR	0	0	0	0	0	0	1	3

O aumento de carga nessa barra variou de zero à 200%, tendo-se obtido uma excelente taxa de captura de 100% em todos os acréscimos de carga. Pode-se verificar que, para esta rede e tipo de mudança, mesmo com acréscimos de carga até 200% na barra 3 ainda tinha-se uma boa taxa de captura, fato que deixa claro que a tabela de sensibilidades poderá ser usada para este tipo de evento até aumentos superiores de carga sem que esta tabela seja deteriorada devido à este tipo de evento.

Na tabela 5.8 são apresentados também o número de contingências críticas, não críticas e o total deles para cada aumento de carga na barra 3 e refletem o comportamento do pré-filtro, através das suas regras, para este tipo de evento. O número de violações de limites de fluxos de potência ativa devido ao aumento de carga na barra também são apresentados.

5.2.1.4 Rede de 904 Barras e 1283 Ramos

A tabela 5.9 mostra os resultados obtidos nas simulações desta rede de 904 barras. Variou-se a carga da barra 19, cujas potências ativa e reativa iniciais são respectivamente $P_{19}^0=42,76$ MW e $Q_{19}^0=15,39$ Mvar.

Tabela 5.9: Taxas de captura para a rede de 904 barras

VAR(%)	0	10	30	50	70	100	150	200	250	300
TC(%)	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
CNC	112	112	112	112	111	109	108	109	107	106
CC	844	844	844	844	845	847	848	847	849	850
TOT	956	956	956	956	956	956	956	956	956	956
VLR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

A taxa de captura obtida foi de 80%, para aumentos de carga na barra 19 de zero à 300%, sendo esta uma taxa que confirma mais uma vez a possibilidade de se poder usar a tabela de sensibilidades(α) mesmo para grandes aumentos de carga, sem que a mesma se deteriore.

O desempenho do pré-filtro também é mostrado. A grande diferença em relação às outras redes é que aqui não houve violações de limites em ramos (VLR) em todos os aumentos de carga que foi realizada na barra 19.

5.2.2 Tipo 2: variação generalizada de carga

Diferentemente do que foi realizado no evento do tipo 1, para este tipo de evento aumenta-se a carga em todas as barras da rede simultaneamente.

5.2.2.1 Rede de 14 Barras e 20 Ramos

A tabela 5.10 mostra os resultados obtidos nas simulações para essa rede de 14 barras.

Tabela 5.10: Taxas de captura para a rede de 14 barras

VAR(%)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
TC(%)	80	80	80	80	80	80	80	60	60	60	60	60	80	100
CNC	3	1	2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	2
CC	15	17	15	16	16	16	15	13	11	11	9	9	8	5
TOT	18	18	17	17	17	17	16	13	11	11	9	9	8	7
VLR	0	0	1	1	1	1	3	6	8	8	10	10	11	12

Observando a tabela 5.10 pode-se perceber que para aumentos de zero à 30% de carga obteve-se uma taxa de captura de 80%, enquanto que de 35 à 55% de aumento a taxa foi de 60% e finalmente para aumentos de 60 à 65% de carga, a taxa foi subindo até alcançar 100%. Isso ocorreu porque, pelo fato da rede ser pequena, a esta altura restavam apenas poucas contingências críticas a serem analisadas, daí a possibilidade de se ter essa taxa de 100%. Esse fato pode ser constatado na tabela 5.10, onde pode-se verificar que para o último aumento de carga de 65%, restavam apenas 5 contingências críticas que passaram para o bloco adaptativo. Nesse caso teremos $n=5$ e $k=5$, com

isso a taxa de captura vai ser de 100%, precisamente porque já não existe quantidade suficiente de contingências críticas para serem analisadas no bloco adaptativo.

Se a rede fosse maior, talvez tivéssemos tido essa taxa de 100% mais a frente, ou talvez tivéssemos também mais quedas na taxa de captura e além disso pode ser que nunca tivéssemos a taxa de 100%, porque como foi explicado anteriormente, à medida que se acrescenta carga em todas as barras, as chances de divergências ou sobrecargas em todos os ramos da rede são maiores. Nessa rede de 14 barras, a tabela de sensibilidades(α) não corre grandes riscos de ser deteriorada já que a taxa de captura decresce até 60%, podendo ser ainda considerada como boa para as condições definidas.

À medida que se aumenta a carga, o desempenho do pré-filtro também é apresentado. Com o aumento da carga, o número de ramos com violações de limites de fluxo de potência (VLR) também aumenta.

5.2.2.2 Rede de 30 Barras e 41 Ramos

A tabela 5.11 mostra os resultados obtidos nas simulações desta rede.

Tabela 5.11: Taxas de captura para a rede de 30 barras

VAR(%)	0	5	7	10	15	20	25	30	35	40	45	50	53
TC(%)	80	80	80	80	80	80	80	60	60	40	60	40	40
CNC	4	2	2	2	3	1	1	2	1	2	1	1	2
CC	33	35	34	31	24	26	25	22	23	21	20	20	18
TOT	37	37	36	33	27	27	26	24	24	23	21	21	20
VLR	0	0	1	5	11	11	12	14	14	15	17	17	18

Observando a tabela 5.11, percebe-se que a taxa de captura é de 80% para aumentos de carga que vão de zero à 25%. A partir daí começam as quedas nas taxas de captura, que atingiram 40%.

Pode-se dizer que, para essa rede e tipo de evento, a tabela de sensibilidades (α), usado na simulação 2, fornece bons resultados para um aumento de até 25% de carga, onde se alcança uma taxa e captura de 80%. No último caso, pode-se chegar até aumentos de 35% de carga, onde a taxa de captura é de 60%, podendo ser ainda considerada como uma taxa razoável. A partir daí, ou seja para aumentos de carga superior a 35%, a tabela de sensibilidades(α) não deverá ser usada para se calcular os novos ângulos de tensões, com risco de se obter dados errados. A tabela de sensibilidades já estará deteriorada para esses aumentos superiores, e precisa ser atualizada.

O desempenho do pré-filtro através das duas regras é apresentado. Observa-se novamente que o número de ramos com violações de limites de fluxo de potência (VLR) aumenta conforme a carga aumenta.

5.2.2.3 Rede de 118 Barras e 186 Ramos

A tabela 5.12 mostra os resultados obtidos nas simulações desta rede.

Tabela 5.12: Taxas de captura para a rede de 118 barras

VAR(%)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
TC(%)	100	100	100	100	100	100	80	100	100	100	60	60	60
CNC	50	44	31	22	12	12	9	5	4	6	5	4	2
CC	127	131	139	139	144	136	134	133	127	119	112	109	109
TOT	177	175	170	161	156	148	143	138	131	125	117	113	111
VLR	0	2	7	16	21	29	34	39	46	52	60	64	66

A taxa de captura foi considerada boa para um aumento de carga de até 60%. Houve queda na taxa de captura para aumentos superiores a 60%. Outro detalhe a ser observado é o grande aumento de número de ramos com limites de fluxo violados à medida que se acrescenta simultaneamente mais carga em todas as barras.

5.2.2.4 Rede de 904 Barras e 1283 Ramos

A tabela 5.13 mostra os resultados obtidos nas simulações desta rede.

Tabela 5.13: Taxas de captura para a rede de 904 barras

VAR(%)	0	1	2	3	4	5
TC(%)	80	80	80	80	80	80
CNC	112	92	86	75	70	62
CC	844	863	868	876	878	880
TOT	956	955	954	951	948	942
VLR	0	1	2	5	8	14

A margem de carregamento desta rede é pequena (5%) se comparada com as redes de menor porte. A taxa de captura manteve-se em um bom patamar de 80%.

Todas as simulações mostradas até aqui para a avaliação das taxas de captura foram feitas para $n = 5$ e $m = 5$. Se as taxas de captura fossem 100%, isto indicaria que o uso da tabela de sensibilidades (α) seria em, termos de precisão, idêntico a executar uma iteração do fluxo de carga desacoplado rápido. Naturalmente, isto não ocorre devido às aproximações realizadas na dedução das equações para obtenção de α . Uma maneira de compensar essas aproximações é ser mais conservador no sentido de aumentar m .

Por exemplo se $n = 5$ e $m = 10$, considera-se um bom resultado se as 5 contingências mais

críticas estiverem entre as 10 contingências da *lista 2*. A tabela 5.14 mostra os resultados obtidos nesta situação, em relação à essa rede de 904 barras e para um aumento generalizado de 3% de carga em todas as barras. A tabela 5.14 nos fornece a classificação das 10 primeiras contingências, para ambas as simulações, de um total de 876 contingências consideradas críticas no estágio anterior, que passaram para o bloco adaptativo.

Tabela 5.14: Classificação de contingências para aumentos de 3% de carga.

Aumento 3%	Simulação 1 (n)	Simulação 2 (m)
Posição	Ramo	Ramo
1	279	552
2	829	279
3	800	829
4	799	800
5	995	799
6	997	995
7	181	997
8	1017	181
9	552	1017
10	191	191

Nota-se que para $n=5$ e $m=5$, a taxa de captura é de 80%. Mas para $n=5$ e $m=10$ tem-se uma taxa de captura de 100%, fato que comprova a afirmação anterior em relação à aumentos de m .

5.2.3 Tipo 3: variação generalizada de carga e de geração

Neste tipo de mudança no sistema, além de se fazer aumentos generalizados de carga, como acontecia para a mudança do tipo 2, faz-se também aumentos generalizados de geração.

5.2.3.1 Rede de 14 Barras e 20 Ramos

A tabela 5.15 mostra os resultados, cuja análise é semelhante aos casos anteriores, ou seja, tem-se uma taxa de captura razoável para uma variação de carga e geração de até 65%.

Analisando detalhadamente a tabela 6.15 para um aumento generalizado de carga e de geração em 65%, têm-se que, como resultado desse aumento, o pré-filtro através das duas regras conseguiu descartar 2 contingências não críticas (CNC) que não farão mais parte da lista de contingências e 5 contingências foram consideradas como sendo críticas (CC) e passam para o bloco adaptativo, totalizando 7 contingências (TOT). Houve violações de limites de fluxo de potência em 12 ramos (VLR). Para o bloco adaptativo, a taxa de captura obtida foi de 100%.

Tabela 5.15: Taxas de captura para a rede de 14 barras

VAR(%)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
TC(%)	80	80	80	80	80	80	80	60	60	60	60	60	80	100
CNC	3	1	2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	2
CC	15	17	15	16	16	16	14	13	11	11	10	9	8	5
TOT	18	18	17	17	17	17	15	13	11	11	10	9	8	7
VLR	0	0	1	1	1	1	3	6	8	8	9	10	11	12

5.2.3.2 Rede de 30 Barras e 41 Ramos

A tabela 5.16 mostra os resultados obtidos nas simulações desta rede.

Tabela 5.16: Taxas de captura para a rede de 30 barras

VAR(%)	0	5	7	10	15	20	25	30	35	40	45	50	54
TC(%)	80	80	80	80	80	60	80	60	60	40	60	60	40
CNC	4	2	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2
CC	33	35	34	31	27	24	25	22	23	21	20	20	18
TOT	37	37	36	33	28	26	26	24	24	23	21	21	20
VLR	0	0	1	4	10	12	12	14	14	15	17	17	18

Como em outras tabelas que foram analisadas anteriormente, nessa tabela 5.16 também aparecem a quantidade de ramos com violações de limites de fluxo de potência (VLR), à medida aumenta a carga e a geração em todas as barras.

5.2.3.3 Rede de 118 Barras e 186 Ramos

Os resultados obtidos nas simulações desta rede são resumidos na tabela 5.17.

Tabela 5.17: Taxas de captura para a rede de 118 barras

VAR(%)	0	5	30	35	40	60	65	70	75	80	85	95
TC(%)	100	100	100	80	80	80	60	60	60	80	80	80
CNC	50	48	13	12	12	0	0	0	0	0	0	0
CC	127	129	157	148	147	149	142	139	136	129	123	107
TOT	177	177	170	160	159	149	142	139	136	129	123	107
VLR	0	0	8	18	20	30	38	42	45	52	58	74

Nessa rede o limite máximo de acréscimo de carga e de geração é de 95%. Acréscimos acima

deste valor resultam em problemas de divergência.

5.2.3.4 Rede de 904 Barras e 1283 Ramos

A tabela 5.18 mostra os resultados obtidos nas simulações desta rede.

Tabela 5.18: Taxas de captura para a rede de 904 barras

VAR(%)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
TC(%)	80	80	80	60	80	80	80	100	100	100
CNC	112	64	40	22	12	9	6	6	5	5
CC	844	882	894	904	899	895	885	865	849	823
TOT	956	946	934	926	911	904	891	871	854	828
VLR	0	16	34	48	69	87	111	149	181	225

5.2.4 Tipo 4: saída de um ramo

Com esse evento do tipo 4 pretende-se simular a saída de um ramo de uma rede e em seguida verificar os efeitos resultantes da sua remoção e através de cálculos de taxas de captura, concluindo se a tabela de sensibilidades poderá ou não ser utilizada.

Os três primeiros tipos de eventos que foram analisados anteriormente referem-se à aumentos de carga, geração ou ambos, de uma forma individualizada em uma barra ou generalizada em todas as barras. No evento do tipo 4 consiste em remover um a um, os ramos da rede para se testar o impacto que as tais remoções ou retiradas de ramos poderão provocar no sistema e verificar a possibilidade de se poder usar a tabela de sensibilidades, para a *simulação 2*, caso esse tipo de evento venha a ocorrer.

5.2.4.1 Rede de 14 Barras e 20 Ramos

A tabela 5.19 mostra os resultados obtidos para esta rede.

Tabela 5.19: Taxas de captura para a rede de 14 barras

RAMOS	2	3	4	6	7	10	11	12	13	15	16	18	19
FLUXO	75,5	73,1	56,1	23,6	61,7	44,1	7,3	7,8	17,0	28,1	5,2	3,7	1,5
TC(%)	80	80	80	80	80	80	80	100	80	80	80	80	100
CNC	3	2	3	3	1	1	1	0	0	2	2	1	1
CC	12	11	12	14	15	10	16	17	16	15	15	16	16
TOT	15	13	15	17	16	11	17	17	16	17	17	17	17
VLR	3	4	2	0	1	6	0	0	1	0	0	0	0

Analisando a tabela 5.19, pode-se dizer que existem ramos com grande fluxo de potência, como são os casos dos ramos 2(1 – 5) e 3(2 – 3), com 75,5 MW e 73,1 MW de fluxos de potência respectivamente. Existem também ramos com fluxo de potência que poderíamos considerar como sendo médios, como são os casos dos ramos 10(5 – 6) e 15(7 – 9), com 44,1 MW e 28.1 MW de fluxos de potência respectivamente. Finalmente, existem ramos com menor fluxo de potência, como são os casos dos ramos 18(10 – 11) e 19(12 – 13), com 3,7 MW e 1,5 MW de fluxos de potência respectivamente. (Ver tabela de ramos e fluxos de potência de algumas redes no Apêndice A).

Na tabela 5.19 pode-se observar que foi obtida uma boa taxa de captura após a saída de todos os ramos que foram testados, taxas essas que são de 80% em alguns ramos e chega-se a taxa de captura de 100% nos ramos 12(6 – 12) e 19(12 – 13). Esses resultados levam-nos a concluir que em casos de redes de pequeno porte, como essa de 14 barras, e para este tipo de mudança no sistema, independentemente da quantidade do fluxo em ramos, a tabela de sensibilidades poderá ser usada sem dificuldades.

Após a remoção do ramo 2 da rede, com fluxo de potência de 75,5 MW, obteve-se 3 contingências não críticas (CNC) eliminadas pela primeira e segunda regras do pré-filtro, e consequentemente descartadas da lista de contingências. As 12 contingências críticas (CC) restantes passaram para a outro bloco, totalizando 15 contingências (TOT). Além disso, houve violação de limites de fluxo de potência em 3 ramos da rede, durante a remoção do ramo 2. Analisando o desempenho do bloco adaptativo, na remoção do ramo 2, obteve-se uma taxa de captura de 80%.

5.2.4.2 Rede de 30 Barras e 41 Ramos

Os resultados das simulações para esta rede são apresentados na tabela 5.20.

Tabela 5.20: Taxas de captura para a rede de 30 barras

RAMOS	2	3	4	5	6	7	8	14	15	17	33	39
FLUXO	83,0	45,5	77,2	82,6	61,6	69,5	14,1	27,6	43,7	7,7	1,2	3,7
TC(%)	80	80	80	80	80	100	80	80	80	100	80	80
CNC	4	4	4	4	4	3	4	6	5	3	4	3
CC	30	29	30	25	27	28	32	24	22	32	32	33
TOT	34	33	34	29	31	31	36	30	27	35	36	36
VLR	2	3	2	7	5	5	0	6	9	1	0	0

Foram escolhidos ramos que possuem maior fluxo de potência, como por exemplo os ramos 2(1 – 3) e 5(2 – 5) com 83,0 MW e 82,6 MW de fluxos de potência respectivamente, enquanto que alguns ramos como o 3(2 – 4) e 6(2 – 6), possuem fluxos de potência intermediário, com 45,5 MW e 61,6 MW respectivamente. Por último, alguns ramos como o 33(24 – 25) e 39(29 – 30) apresentam menores fluxos de potência, 1,2 MW e 3,7 MW respectivamente.

Apesar de terem sido escolhidos ramos com diferentes fluxos de potência, pode-se notar que as taxas de captura são boas, variando entre 80% e 100%. As taxas de captura de 100% foram obtidas na remoção dos ramos 7 e 17 como se pode ver na tabela 5.20. Esses resultados nos garantem que

a tabela de sensibilidades poderá ser utilizada caso esta mudança venha a ocorrer no sistema.

O desempenho do pré-filtro e do bloco adaptativo poderá também ser visto na tabela 5.20. Para o pré-filtro, por exemplo, na remoção do ramo 15 com 43,7 MW de fluxo de potência, obteve-se 5 contingências não críticas (CNC) eliminadas pela primeira e segunda regras e logicamente foram retiradas da lista de contingências. As 22 contingências críticas (CC) restantes passaram para a outra etapa de análise e totalizaram 27 contingências (TOT). A remoção do ramo 15 provocou violações de limites de fluxo de potência em 9 ramos da rede. Já no bloco adaptativo obteve-se uma taxa de captura de 80%, com a saída desse ramo 15.

5.2.4.3 Rede de 118 Barras e 186 Ramos

A tabela 5.21 ilustra os resultados obtidos nas simulações para esta rede.

Tabela 5.21: Taxas de captura para a rede de 118 barras

RAMOS	8	36	38	51	97	116	123	136	142	154	179	182
FLUXO	340,4	229,4	222,5	238,8	183,0	109,7	99,0	72,4	63,5	31,4	4,6	1,2
TC(%)	80	100	80	100	100	100	100	100	100	100	100	100
CNC	32	28	34	31	39	43	45	47	41	46	49	49
CC	128	134	129	134	133	131	131	129	133	130	127	127
TOT	160	162	163	165	172	174	176	176	174	176	176	176
VLR	16	14	13	11	4	2	0	0	2	0	0	0

Para esta rede de 118 barras, foram escolhidos alguns ramos com valores elevados de fluxo de potência, como são os casos dos ramos 8(5 – 8) e 36(17 – 30) com 340,4 MW e 229,4 MW de fluxo de potência respectivamente. Ramos que apresentam valores intermediários de fluxo de potência também foram escolhidos, como são os casos dos ramos 136(85 – 89) e 142(89 – 92) com 72,4 MW e 63,5 MW de fluxo de potência respectivamente.

Apesar de se ter escolhido ramos com diferentes fluxos de potência na tentativa de se diversificar mais as características dos ramos a escolher, se analisarmos a tabela 5.21 poderemos notar que as taxas de captura praticamente são iguais em todos os ramos analisados, portanto de 100%. Na remoção dos ramos 8 e 38, a taxa de captura chegou a cair para 80%, mesmo assim ainda é considerada como uma taxa boa. A exemplo das outras redes, pode-se novamente afirmar que os novos ângulos de tensões em todas as barras que se possam vir a obter, para este tipo de evento, como resultado da utilização da tabela de sensibilidades (α) para a *simulação 2*, estarão corretos.

5.2.4.4 Rede de 904 Barras e 1283 Ramos

Os resultados das simulações obtidas para esta rede são mostrados na tabela 5.22.

Tabela 5.22: Taxas de captura para a rede de 904 barras

RAMOS	467	804	842	865	873	1017	1076	1154	1175	1222	1262
FLUXO	2850,1	973,9	720,8	514,2	370,0	135,4	93,0	69,5	40,0	16,7	0,2
TC(%)	80	80	80	80	100	80	80	80	80	80	80
CNC	66	74	100	111	109	111	113	112	107	109	112
CC	881	866	854	844	843	838	839	843	849	846	844
TOT	947	940	954	955	952	949	952	955	956	955	956
VLR	9	16	2	0	3	6	3	0	0	0	0

Na tabela 5.22 vemos que foram selecionados alguns ramos com valores elevados de fluxo de potência, como por exemplo, os ramos 467(882 – 890) e 804(457 – 465) com 2850,1 MW e 973,9 MW de fluxo de potência respectivamente. Alguns apresentam valores intermediários de fluxo de potência, como por exemplo, os ramos 1017(678 – 788) e 1076(858 – 645) com 135,4 MW e 93,0 MW de fluxo de potência respectivamente. E finalmente, outros apresentam valores menores de fluxo de potência, como por exemplo, o ramo 1262(340 – 281) com 0,2 MW de fluxo de potência.

Apesar dessa diversificação de ramos, nota-se na tabela 5.22 que as taxas de captura em todos os ramos que foram analisados são praticamente as mesmas, ou seja de 80% e são consideradas como boas taxas. Atingiu-se a taxa de captura de 100% na remoção do ramo 873. Neste caso também não haverá nenhuma inconveniência se a tabela de sensibilidades(α) for usada para calcular os novos ângulos de tensões nas barras, para a *simulação 2*, caso venha a acontecer este tipo de mudança na rede.

Se analisarmos o desempenho do pré-filtro e do bloco adaptativo na tabela 6.20 veremos, por exemplo, na remoção do ramo 1017 com fluxo de 135,4 MW, no pré-filtro foram eliminadas 111 contingências não críticas (CNC) pelas duas regras e obviamente descartadas da lista de contingências. Temos ainda 838 contingências que foram consideradas como sendo críticas (CC) e que passarão para o bloco adaptativo, totalizando 949 contingências (TOT). Foram constatados 6 ramos com violações de limites de fluxo, durante a remoção do ramo 1017. No bloco adaptativo obteve-se uma taxa de captura de 80%.

5.2.5 Tipo 5: saída de um gerador

Passaremos a analisar o último tipo de mudança no sistema considerado neste trabalho de pesquisa. Agora para este novo tipo de evento que é a saída de um gerador, pretende-se verificar os efeitos que a sua saída poderá provocar na rede e a possibilidade de se poder utilizar a tabela de sensibilidades (α) para o cálculo dos novos ângulos de tensões nas barras, caso este tipo de mudança venha a ocorrer no sistema. Com isso, como já foi dito antes, pretende-se reduzir o tempo computacional que é necessário em ambientes de tempo real.

Para as redes de pequeno porte que estão sendo utilizadas para simulações neste trabalho de pesquisa, foram analisados todas as barras de geração (PV). Por exemplo, as redes de 14 e de 30 barras possuem 4 e 5 barras de geração (PV), respectivamente, e todas elas foram analisadas. O mesmo não acontece com as redes consideradas de médio e grande porte, como é o caso das redes

de 118 e 904 barras, que possuem 53 e 185 barras de geração (PV), respectivamente. Em relação à estas duas últimas redes, foram escolhidas 10 barras para serem analisadas. Como poder-se-á verificar nas tabelas que serão apresentadas mais adiante, diversificou-se um pouco a escolha dessas barras. Por exemplo, algumas barras de geração estão sem a potência ativa gerada na barra (P_g), outras estão sem a potência reativa gerada na barra (Q_g), enquanto que algumas barras apresentam os dois dados.

Nas diferentes tabelas que serão apresentadas a seguir, além dos elementos como a taxa de captura (TC(%)), contingências não críticas (CNC), contingências críticas (CC), número total de contingências (TOT) e o número de ramos onde houve violações de limites (VLR), aparecem também os números das barras de geração e as respectivas potências P_g (MW) e Q_g (Mvar), que são as potências ativa e reativa geradas que haviam na barra antes dela ser retirada.

5.2.5.1 Rede de 14 Barras e 20 Ramos

A tabela 5.23 mostra os resultados obtidos nas simulações desta rede.

Tabela 5.23: Taxas de captura para a rede de 14 barras

BARRAS	2	3	6	8
P_g (MW)	40,00	0,00	0,00	0,00
Q_g (Mvar)	42,35	23,36	13,02	17,32
TC(%)	80	80	80	80
CNC	4	3	3	3
CC	14	15	15	15
TOT	18	18	18	18
VLR	0	0	0	0

Foram simuladas as saídas dos 4 geradores da rede. Pelos resultados obtidos e mostrados na tabela 5.23 pode-se dizer que obteve-se uma taxa de captura de 80% nas quatro simulações realizadas, resultados esses que nos confirmam a possibilidade de se poder utilizar a tabela de sensibilidades(α), quando se estiver em presença deste tipo de evento no sistema.

Como têm sido feito em outros tipos de eventos já analisados, aqui o desempenho do pré-filtro também é apresentado para esse evento, onde se poderá acompanhar o número de contingências não críticas (CNC) descartadas pelo pré-filtro, o número de contingências críticas (CC) que passaram para o bloco adaptativo e o número total de contingências analisadas (TOT), além do número de ramos onde houve violações de limites de fluxo de potência (VLR) como consequência da retirada da geração.

Analisando com mais detalhe a tabela 5.23, por exemplo, na remoção do gerador conectado à barra 2, pode-se ver que nessa barra havia uma geração de 40,00 MW de potência ativa e 42.35 Mvar de potência reativa. Quatro contingências não críticas (CNC) foram eliminadas pelo pré-filtro através das suas duas regras e logicamente foram descartadas da lista de contingências que deverão

passar para a outra etapa. 14 contingências consideradas como críticas (CC) passaram para o bloco adaptativo, totalizando 18 contingências (TOT) e não houve violações de limites de fluxo de potência durante a retirada da geração na barra 2. Para o bloco adaptativo, obteve-se uma taxa de captura de 80%.

5.2.5.2 Rede de 30 Barras e 41 Ramos

A tabela 5.24 mostra os resultados obtidos nas simulações para esta rede.

Tabela 5.24: Taxas de captura para a rede de 30 barras

BARRAS	2	5	8	11	13
P_g (MW)	40,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Q_g (Mvar)	50,00	36,83	37,33	16,25	10,62
TC(%)	80	80	80	80	80
CNC	5	5	5	4	4
CC	31	32	32	33	33
TOT	36	37	37	37	37
VLR	1	0	0	0	0

A rede de 30 barras é considerada também de pequeno porte e possui 5 barras de geração, sendo que foram todas analisadas. O resultado foi idêntico ao da rede de 14 barras, ou seja, aqui obteve-se também uma taxa de captura de 80% durante a simulação da remoção feita nos 5 geradores conectados às suas respectivas barras como mostra a tabela 5.24. A conclusão também é a mesma a que se chegou para a rede de 14 barras, de que a tabela de sensibilidades(α) poderá ser utilizada, para este tipo de evento no sistema.

O desempenho do pré-filtro e do bloco adaptativo poderá também ser acompanhado pela tabela 5.24, onde por exemplo, o gerador conectado à barra 2 tinha 40,00 MW de potência ativa e 50,00 Mvar de potência reativa. Para o pré-filtro, foram eliminadas 5 contingências não críticas (CNC) pelas suas duas regras e obviamente descartadas da lista de contingências em análise. Trinta e uma contingências consideradas como sendo críticas (CC) passaram para o bloco adaptativo, totalizando 36 contingências. Além disso, houve violação de limites de fluxo de potência em um ramo na retirada do gerador conectado à barra 2. Para o bloco adaptativo, obteve-se uma taxa de captura de 80% durante a análise das 31 contingências consideradas anteriormente como críticas e que estavam em análise neste bloco na remoção da geração conectada à barra 2.

5.2.5.3 Rede de 118 Barras e 186 Ramos

Os resultados das simulações obtidos para essa rede estão na tabela 5.25.

Tabela 5.25: Taxas de captura para a rede de 118 barras

BARRAS	1	8	10	12	25	42	46	54	89	100
P_g (MW)	0,00	-28,00	450,00	85,00	220,00	-59,00	19,00	48,00	607,00	252,00
Q_g (Mvar)	-3,14	58,12	-51,04	91,76	51,51	41,28	-4,98	3,94	-12,57	108,10
TC(%)	100	100	80	100	100	100	100	100	100	100
CNC	50	45	20	33	30	48	49	49	34	35
CC	127	132	131	144	136	128	128	128	121	129
TOT	177	177	151	177	166	176	177	177	155	164
VLR	0	0	26	0	11	1	0	0	22	13

A rede de 118 barras foi considerada como sendo de médio porte e nela existem 53 barras de geração (PV). Foram escolhidas 10 barras de geração para simulações. Essa escolha foi feita de uma maneira bem diversificada de tal forma que se pudesse obter as variantes necessárias para os testes.

Pelos resultados obtidos e mostrados na tabela 5.25, obteve-se somente uma taxa de captura de 80% durante a retirada da geração que está conectada à barra 10. Para as restantes barras a taxa de captura foi de 100%. O resultado é considerado bom e nos possibilita utilizar a tabela de sensibilidades(α), para este tipo de evento, para se calcular os novos valores dos ângulos de fase das tensões nas barras e os resultados serão confiáveis.

Como exemplo para se verificar o desempenho do pré-filtro e do adaptativo, pode-se ver que na remoção da geração conectada à barra 25, havia 220,00 MW de potência ativa de geração e 51,51 Mvar de potência reativa de geração. Temos então que no pré-filtro foram eliminadas 30 contingências não críticas (CNC) através das duas regras e colocadas para fora da lista de contingências, 136 contingências foram consideradas como críticas (CC) e deverão passar para o adaptativo, totalizando 166 contingências (TOT). Foram detectadas 11 violações de limites de fluxo de potência na retirada da geração conectada na barra 25. Em relação ao bloco adaptativo, na remoção da geração na barra 25, obteve-se uma taxa de captura de 100%.

5.2.5.4 Rede de 904 Barras e 1283 Ramos

A tabela 5.26 mostra os resultados de simulações obtidos para a rede de 904 barras.

Nesta rede de 904 barras existem 185 barras de geração e foram escolhidas 10 para os testes. Durante a simulação de remoção dos geradores conectados às 10 barras de geração obteve-se uma taxa de captura de 80%, como mostra a tabela 5.26. Essa taxa de captura é considerada boa, sendo assim nos possibilita o uso da tabela de sensibilidades(α).

Para ilustrar o desempenho do pré-filtro e do bloco adaptativo, como exemplo, analisemos a remoção da geração conectada à barra de geração 245, como mostra a tabela 5.26, onde havia 14,00 MW de potência ativa de geração e 24,96 Mvar de potência reativa de geração. O pré-filtro conseguiu retirar da lista 110 contingências não críticas (CNC) através das duas regras e 846 contingências foram declaradas como críticas (CC) e são os dados de entrada para o bloco adaptativo, totalizando 956 contingências. Não houve violação de limites de fluxo de potência em nenhum dos ramos da

Tabela 5.26: Taxas de captura para a rede de 904 barras

BARRAS	2	3	14	36	63	74	111	245	439	704
P_g (MW)	139,74	155,16	0,00	176,48	35,81	497,32	262,43	14,00	0,00	0,00
Q_g (Mvar)	29,01	-70,12	0,92	-58,00	-15,81	113,39	-54,59	24,96	-81,03	806,21
TC(%)	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
CNC	98	94	112	105	105	90	95	110	108	109
CC	856	862	844	851	851	864	860	846	848	847
TOT	954	956	956	956	956	954	955	956	956	956
VLR	2	1	0	1	0	3	2	0	0	0

rede na remoção da geração conectada na barra 245. A taxa de captura foi de 80%.

Capítulo 6

Conclusões

Neste trabalho de pesquisa foi desenvolvido e apresentado um método de seleção de contingências para violações de MW em ramos de sistemas elétricos de potência utilizando uma abordagem multinível adaptativa. As conclusões derivadas desta implementação serão agora apresentadas neste capítulo, como resultado das análises e testes realizados no capítulo anterior. As conclusões e análises críticas em relação ao método implementado, serão apresentadas de acordo com as etapas de cada implementação. É bom lembrar mais uma vez que o método de seleção apresentado neste trabalho de pesquisa está dividido em dois blocos: *pré-filtro* e *adaptativo*.

6.1 Pré-Filtro

É composto de duas regras que, de uma maneira fácil e rápida, descartam da lista de contingências aquelas consideradas não críticas ou inofensivas à operação do sistema.

Primeira Regra

- É bom salientar que esta regra na verdade não descarta muitas contingências não críticas, consideradas inofensivas à operação do sistema, como foi mostrado em testes realizados. Mas a utilização desta primeira regra é importante do ponto de vista computacional a partir do momento em que consegue identificar e eliminar contingências consideradas como sendo não críticas de uma maneira rápida e fácil, e principalmente sem qualquer custo computacional.

Segunda Regra

- A grande novidade nesta regra foi a introdução do conceito *vizinhanças*, partindo-se do princípio de que na ocorrência de uma contingência, a região (barras e ramos) mais afetada é a que se encontra eletricamente próxima da contingência. Assim evita-se analisar toda a rede, e com isso consegue-se reduzir o tempo computacional que foi um dos objetivos deste trabalho de pesquisa.
- A definição do número de vizinhanças a estabelecer no começo do programa, vai depender do tamanho do sistema (pequeno, médio e grande porte) e do carregamento do sistema (leve,

médio e pesado).

- Os testes mostraram que há casos em que o número de vizinhanças é zero (redes de pequeno e médio porte, carregamento leve), ou seja não se estabelece nenhuma vizinhança a partir do momento em que se fecha um caminho elétrico. Neste caso pode-se ser *menos conservador*, no sentido de não se estabelecer vizinhanças desnecessárias, fato que reduziria o número de contingências não críticas a serem descartadas, o que implica ter mais contingências a serem analisadas na análise de contingências.
- Os testes mostraram também que existem casos em que o número de de vizinhanças deve ser maior (redes de grande porte, carregamento pesado), ou seja, precisa-se ser *mais conservador* para se evitar que o programa declare uma contingência como sendo não crítica sendo que na verdade ela é crítica.

6.2 Bloco Adaptativo

Foi visto que neste bloco foram realizadas duas simulações (*simulação 1 e simulação 2*), em que na primeira aplica-se uma iteração do fluxo de carga desacoplado rápido e monta-se a tabela de sensibilidades(α), enquanto que na segunda (próximo ciclo) faz-se o cálculo dos novos ângulos de fase de tensões nas barras usando a tabela de sensibilidades(α) armazenada anteriormente e concluiu-se que:

- As boas taxas de capturas obtidas revelaram que a tabela de sensibilidades(α) mostrou-se eficaz e pode ser utilizada no cálculo dos novos ângulos de fase de tensões nas barras, em ciclo posterior, sem comprometer os cálculos e os resultados obtidos, quando se estiver na presença de um dos cinco tipos de mudanças no sistema que foram analisados.
- Um problema encontrado nesta etapa diz respeito ao armazenamento da tabela de sensibilidades (α), que quando se trata de redes de grande porte, como a rede de 904 barras, requer mais espaço de memória.

De uma forma geral pode-se dizer que o método de seleção proposto e implementado neste trabalho de pesquisa mostrou ser preciso, robusto e capaz de identificar corretamente as contingências mais severas em relação à violações de MW em ramos de sistemas elétricos de potência.

6.3 Sugestões para futuros trabalhos

Considerando os resultados obtidos neste trabalho, sugere-se os seguintes tópicos para realização de trabalhos futuros:

- Desenvolver estratégias no sentido de se armazenar somente as informações necessárias da tabela de sensibilidades (α), porque na montagem ou construção da atual tabela de sensibilidades (α), são armazenadas todas as informações referente às sensibilidades.

- Acrescentar mais heurísticas, no sentido de se descartar mais contingências não críticas. Isso irá possibilitar que na análise de contingências haja ainda menos contingências para se analisar.
- Realizar a classificação de contingências com relação a violações das magnitudes de tensões seguindo procedimento semelhante ao utilizado neste trabalho.

Referências Bibliográficas

- [1] Balu N. On-line power system security analysis. *Proceedings of the IEEE*, 80(2):260–280, Feb 1992.
- [2] Dy Liacco T.E. The adaptive reliability control system. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-86, May 1967.
- [3] Dy Liacco T.E. The emerging concept of security control. *Proceedings of the 1970 Symposium on Power Systems, Purdue University, Lafayette, EUA*, May 1970.
- [4] Stott B., Alsac O., Monticelli A.J. Security analysis and optimization. *Proceedings of the IEEE*, 75(12):1623–1644, Dec 1987.
- [5] Heder D.C. Abrantes. Método eficiente para eliminar sobrecargas em sistemas de energia elétrica baseado em otimização não linear. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, SP, Mar 2000.
- [6] Castro C.A., Bose A., Handschin E., Hoffmann W. Comparison of different screening techniques for the contingency selection function. *Electrical Power & Energy Systems*, 18(7):425–430, 1996.
- [7] Stott B., Alsac O. Fast decoupled load flow. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-93(3):859–869, 1974.
- [8] Monticelli A.J., Garcia A., Saavedra O.R. Fast decoupled load flow: Hypothesis, derivations and testing. *IEEE/PES Winter Meeting, WM 172-8, New York*, Jan-Feb 1989.
- [9] Albuyeh F., Bose A., Heath B. Reactive power considerations in automatic contingency selection. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101(1):107–112, 1982.
- [10] Tinney W.F., Brandwajn V. Sparse vector methods. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104(2):295–301, 1985.
- [11] Ozdemir A., Singh C. Fuzzy decision making against masking problem in mw contingency ranking. *IEEE Power Engineering Review*, pages 55–56, Feb 2002.
- [12] Zaborszky J., Whang K.W., Prasad K. Fast contingency evaluation using concentric relaxation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-99(1):28–36, 1980.
- [13] Brandwajn V. Efficient bounding method for linear contingency analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(1):38–43, 1988.

- [14] Brandwajn V., Lauby M.G. Complete bounding method for ac contingency screening. *IEEE Transactions on Power Systems*, 4(2):724–729, 1989.
- [15] Ejebe G.C., Van Meeteren H.P., Wollenberg B.F. Fast contingency screening and evaluation for voltage security analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(4):1582–1590, 1988.
- [16] Chen Y., Bose A. Direct ranking for voltage contingency selection. *IEEE Transactions on Power Systems*, 4(4):1335–1344, 1989.
- [17] Chen Y., Bose A. An adaptive pre-filter for the voltage contingency selection function. *Proceedings of the 1989 IEEE Power Industry Computer Applications*, pages 225–231, 1989.
- [18] Brandwajn V., Liu Y., Lauby M.G. Pre-screening of single contingencies causing network topology changes. *IEEE Transactions on Power Systems*, 6(1):30–36, 1991.
- [19] Gundimeda D.P., Jana A.K. An efficient contingency evaluation method for power system security analysis. *Electrical Power & Energy Systems*, 14(4):298–302, 1992.
- [20] Harsan H., Hadjsaid N., Pruvot P. An adaptive prefilter algorithm for real-time cyclic security analysis. *Proceedings of the 1995 IEEE Power Industry Computer Applications*, pages 256–261, 1995.
- [21] Harsan H., Hadjsaid N., Pruvot P. Combining parallel processing and cyclic approach to speed-up the static security analysis. *Proceedings of the 1996 Power Systems Computation Conference*, pages 1–7, 1996.
- [22] Castro C.A., Bose A. Correctability in on-line contingency analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(3):807–814, 1993.
- [23] Castro C.A., Bose A. Correctability of voltage violations in on-line contingency analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(3):1651–1657, 1994.
- [24] Handschin E., Hoffmann W. Integration of an expert system for security assessment into an energy management system. *Electrical Power & Energy Systems*, 14(2):243–248, 1992.
- [25] Freris L.L., Sasson A.M. Investigation of the load-flow problem. *Proceedings of the IEE*, 115(10):1459–1470, 1968.
- [26] <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.

Apêndice A

Algumas redes testadas

A.1 Rede de 14 Barras e 20 Ramos

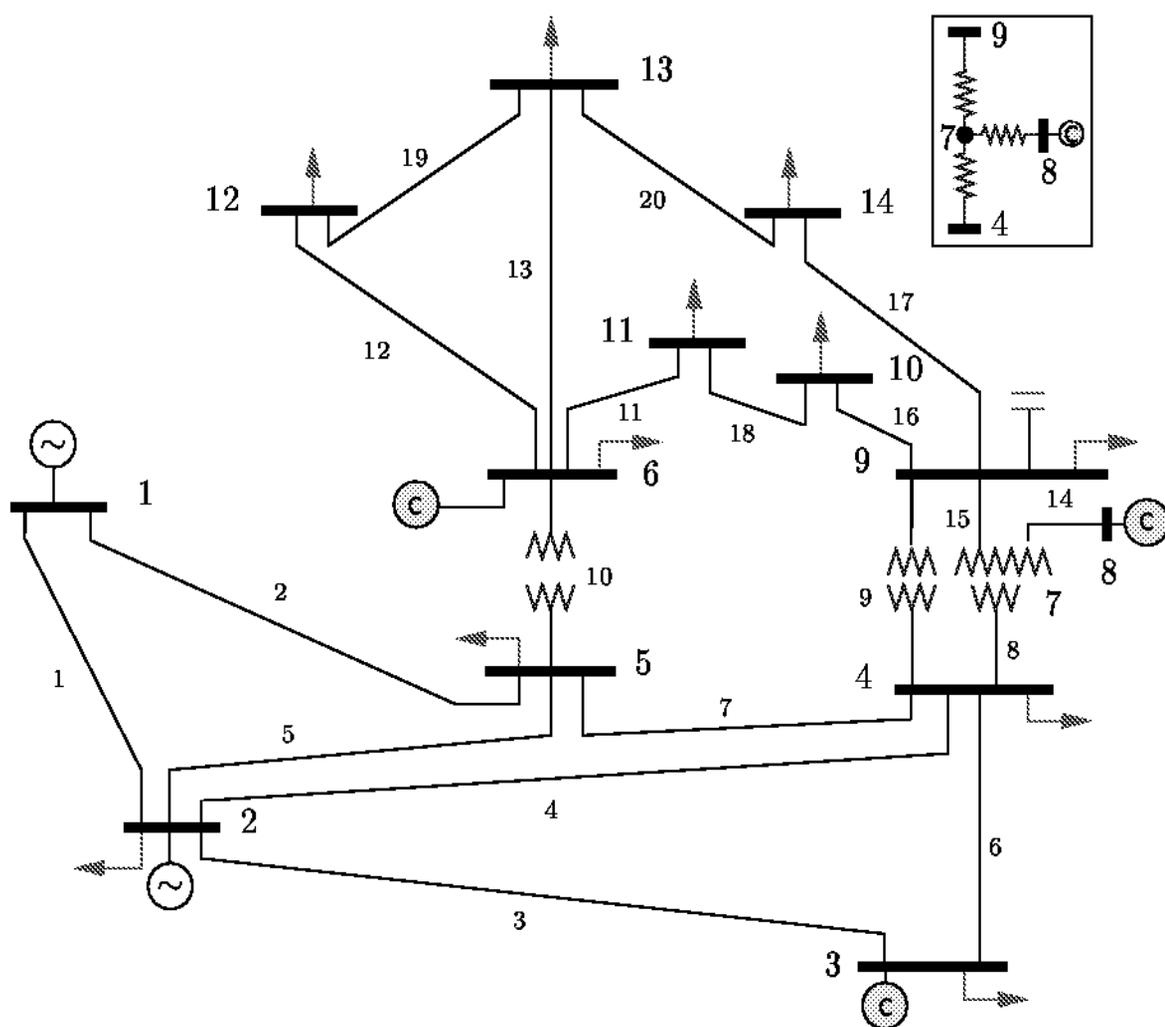


Figura A.1: Rede de 14 barras e 20 ramos

A.2 Fluxos nos ramos

Neste item apresentamos os fluxos nos ramos da rede e mais alguns elementos, em que:

Ramo: ramo da rede;

De: barra inicial do ramo;

Para: barra final do ramo;

Fluxo1: valor do fluxo de potência ativa no sentido barra inicial - barra final, em [MW];

Fluxo2: valor do fluxo de potência ativa no sentido barra final - barra inicial, em [MW];

Fluxo: valor do maior fluxo de potência ativa escolhido, em módulo, em [MW];

Limite: limite máximo fluxo de potência ativa no ramo, em [MW];

Folga: folga do ramo, em [MW];

Tabela A.1: Rede de 14 barras e 20 ramos

RAMO	DE	PARA	FLUXO1	FLUXO2	FLUXO	LIMITE	FOLGA
1	1	2	156.7499	-152.4596	156.7499	210.0000	53.2501
2	1	5	75.5264	-72.7646	75.5264	99.0000	23.4736
3	2	3	73.1606	-70.8422	73.1606	99.0000	25.8394
4	2	4	56.1272	-54.4508	56.1272	60.0000	3.8728
5	2	5	41.5077	-40.6057	41.5077	54.0000	12.4923
6	3	4	-23.3185	23.6892	-23.6892	36.0000	12.3108
7	4	5	-61.1889	61.7052	-61.7052	82.0000	20.2948
8	4	7	28.1143	-28.1143	28.1143	38.0000	9.8857
9	4	9	16.1077	-16.1077	16.1077	48.0000	31.8923
10	5	6	44.1036	-44.1036	44.1036	72.0000	27.8964
11	6	11	7.3921	-7.3358	7.3921	24.0000	16.6079
12	6	12	7.8722	-7.7977	7.8722	20.0000	12.1278
13	6	13	17.8865	-17.6688	17.8865	26.0000	8.1135
14	7	8	0.0000	0.0000	0.0001	28.0000	27.9999
15	7	9	28.1253	-28.1253	28.1253	38.0000	9.8747
16	9	10	5.2619	-5.2486	5.2619	15.0000	9.7381
17	9	14	9.4429	-9.3260	9.4429	15.0000	5.5571
18	10	11	-3.7128	3.7244	-3.7244	25.0000	21.2756
19	12	13	1.5766	-1.5706	1.5766	15.0000	13.4234
20	13	14	5.5640	-5.5124	5.5640	20.0000	14.4360

A.3 Rede de 30 Barras e 41 Ramos

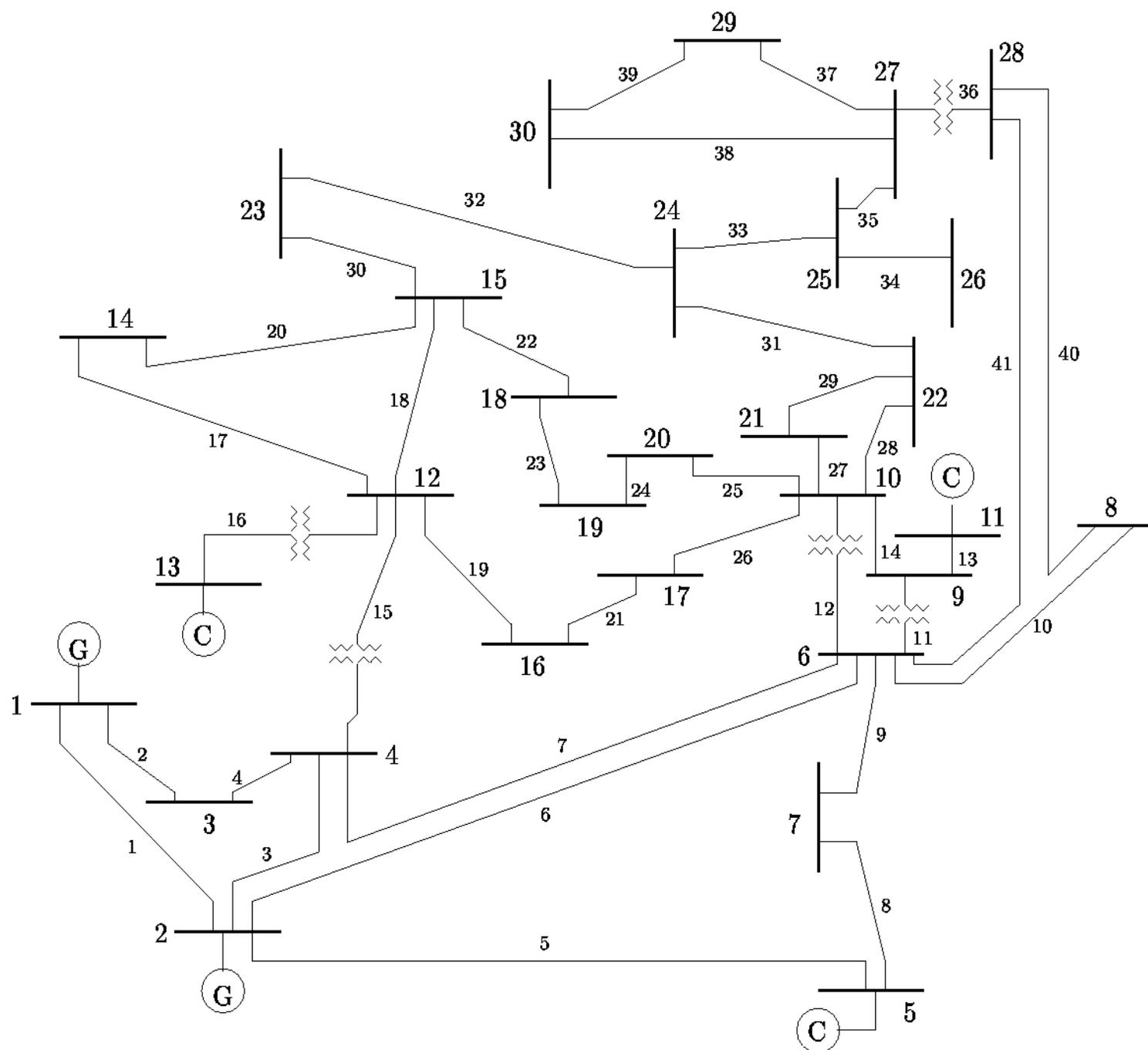


Figura A.2: Rede de 30 barras e 41 ramos

A.4 Fluxos nos ramos

Tabela A.2: Rede de 30 barras e 41 ramos

RAMO	DE	PARA	FLUXO1	FLUXO2	FLUXO	LIMITE	FOLGA
1	1	2	177.3740	-171.9376	177.3740	200.0000	22.6260
2	1	3	83.0047	-80.2072	83.0047	90.0000	6.9953
3	2	4	45.5538	-44.4511	45.5538	50.0000	4.4462
4	3	4	77.2683	-76.5109	77.2683	90.0000	12.7317
5	2	5	82.6463	-79.6751	82.6463	100.0000	17.3537
6	2	6	61.6135	-59.5829	61.6135	80.0000	18.3865
7	4	4	69.5190	-68.9301	69.5190	80.0000	10.4810
8	5	7	-13.9684	14.1261	-14.1261	30.0000	15.8739
9	6	7	37.2644	-36.9001	37.2644	40.0000	2.7356
10	6	8	29.2214	-29.1138	29.2214	40.0000	10.7786
11	6	9	27.6437	-27.6437	27.6437	40.0000	12.3563
12	6	10	15.7913	-15.7913	15.7913	30.0000	14.2087
13	9	11	0.0000	0.0000	0.0000	50.0000	50.0000
14	9	10	27.6334	-27.6334	27.6334	40.0000	12.3666
15	4	12	43.7942	-43.7942	43.7942	50.0000	6.2058
16	12	13	0.0000	0.0000	0.0001	50.0000	49.9999
17	12	14	7.7630	-7.6902	7.7630	20.0000	12.2370
18	12	15	17.6678	-17.4548	17.6678	20.0000	2.3322
19	12	16	7.1132	-7.0618	7.1132	20.0000	12.8868
20	14	15	1.5712	-1.5653	1.5712	10.0000	8.4288
21	16	17	3.6353	-3.6241	3.6353	10.0000	6.3647
22	15	18	5.9925	-5.9541	5.9925	10.0000	4.0075
23	18	19	2.7614	-2.7565	2.7614	10.0000	7.2386
24	19	20	-6.7390	6.7561	-6.7561	10.0000	3.2439
25	10	20	8.9594	-8.8791	8.9594	10.0000	1.0406
26	10	17	5.2685	-5.2541	5.2685	10.0000	4.7315
27	10	21	15.5856	-15.4762	15.5856	20.0000	4.4144
28	10	22	7.5247	-7.4729	7.5247	20.0000	12.4753
29	21	22	-1.7913	1.7919	-1.7919	20.0000	18.2081
30	15	23	5.0087	-4.9773	5.0087	20.0000	14.9913
31	22	24	5.7377	-5.6923	5.7377	20.0000	14.2623
32	23	24	1.7924	-1.7863	1.7924	20.0000	18.2076
33	24	25	-1.2070	1.2171	-1.2171	20.0000	18.7829
34	25	26	3.5530	-3.5080	3.5530	20.0000	16.4470
35	25	27	-4.7155	4.7391	-4.7391	20.0000	15.2609
36	28	27	18.0141	-18.0141	18.0141	20.0000	1.9859
37	27	29	6.1886	-6.1023	6.1886	20.0000	13.8114
38	27	30	7.1070	-6.9439	7.1070	20.0000	12.8930
39	29	30	3.7242	-3.6903	3.7242	20.0000	16.2758
40	8	28	-0.5140	0.5162	-0.5162	20.0000	19.4838
41	6	28	18.5144	-18.4576	18.5144	20.0000	1.4856

Apêndice B

Divulgação da pesquisa

Durante a realização desta pesquisa foram elaborados, submetidos e aceitos os seguintes artigos:

- Guerra A.F., Castro C.A. Multilevel adaptive prefilter for MW contingency selection, *2002 WSEAS International Conference on Power Engineering Systems (ICOPES 2002)*, Rio de Janeiro, Brazil, 2002.
- Guerra A.F., Castro C.A. Seleção de contingências para violações de MW em ramos de sistemas elétricos de potência utilizando abordagem multinível adaptativa, submetido ao *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XVII SNPTEE)*, Uberlândia-MG, Brasil, 2003.
- Guerra A.F., Castro C.A. Seleção de contingências para violações de MW em ramos de sistemas elétricos de potência utilizando abordagem multinível adaptativa, submetido ao *Décimo Encontro Latinoamericano de Cigré (X ERLAC)*, Foz do Iguaçu-PR, Brasil, 2003.