



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

ESTRATÉGIAS DE CONTROLE CORRETIVO EM SITUAÇÕES DE
INFACTIBILIDADE DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Por
André Gustavo Campos da Conceição

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

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro Jr. (Orientador) - FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Roberto Salgado - UFSC

Prof. Dr. Ariovaldo V. Garcia - FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Vivaldo F. da Costa - FEEC/UNICAMP

Campinas, Dezembro de 2000.

*Aos meus pais Gilberto e Doraci,
à minha amada Karla Regina,
aos meus irmãos Ronald e Rita,
e ao meu sobrinho Vinícius.*

“There is an island of opportunity in every difficulty.”
[Albert Einstein]

Agradecimentos

Às pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta dissertação de Mestrado. Espero carregar comigo para sempre o respeito de todos e quem sabe algum dia ser capaz de retribuir o apoio recebido. Em especial, gostaria de agradecer:

- ao professor Carlos Alberto de Castro Jr. não apenas pela excelente orientação, mas também pelo seu irrestrito apoio, paciência e cordialidade nesses dois anos e meio de trabalho em conjunto;
- aos companheiros do DSEE com os quais compartilhei momentos saudáveis e, à Miriam, administradora da rede, pela paciência e apoio;
- aos colegas de trabalho da FIGENER S.A. Engenheiros Associados pela colaboração e apoio nos momentos que precisei me dedicar exclusivamente à pesquisa;
- à minha Karla, a companheira de todos os momentos, pela confiança, lealdade e amor;
- a Gilberto, meu pai herói, que por um chamado de Deus não pôde estar presente nessa etapa da minha vida, à Doraci, minha mãe guerreira, e aos meus irmãos, Rita e Ronald pelo apoio incondicional;
- aos meus sogros, Carlos e Dinalva, que sempre me apoiaram nos momentos difíceis;
- à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo suporte financeiro no primeiro ano de pesquisa.

Resumo

Um método que lida com situações de operação infactíveis é proposto neste trabalho. Caso ocorram estas situações, ações de controle apropriadas devem ser eficientemente obtidas e rapidamente implementadas. Para se conseguir isto é necessário (a) quantificar o *grau de infactibilidade* (GI) do sistema, e (b) determinar uma estratégia de controle corretivo para colocar o sistema de volta à região de operação factível. GI é determinado através da menor distância entre o ponto de operação infactível (instável) e a fronteira de factibilidade no espaço de parâmetros (de carga). Neste trabalho as estratégias de controle podem ser obtidas por dois métodos, denominados *método das proporcionalidades* (MP) e *método baseado em programação não-linear* (MPNL). Fontes de reativos (geralmente bancos de capacitores), mudança em *tap* de transformadores e corte de carga são os controles, em geral, disponíveis. A busca dos controles mais apropriados é baseada na idéia da localização adaptativa. Foram realizadas simulações para pequenos e grandes sistemas, sob contingências e situações de carga pesada, com a finalidade de mostrar a eficiência do método proposto. Ele pode ser usado como uma ferramenta muito útil em estudos de planejamento da operação, particularmente em análise da estabilidade de tensão.

Abstract

A method that deals with infeasible operating situations is proposed in this work. In case these situations occur, appropriate corrective actions must be efficiently obtained and quickly implemented. In order to accomplish this, it is necessary (a) to quantify the system's *unsolvability degree* (UD), and (b) to determine a corrective control strategy to pull the system back to the feasible operation region. UD is determined through the smallest distance between the infeasible (unstable) operating point and the feasibility boundary in parameter (load) space. In this work the control strategies can be obtained by two methods, namely the *proportionality method* (PM) and the *non linear programming based method* (NLPM). Reactive fonts (usually capacitor banks), tap changing transformers and load shedding are the usual controls available. The search for the most appropriate controls is based on the idea of localization. Simulations have been carried out, for small to large systems, under contingency and heavy load situations, in order to show the efficiency of the proposed method. It can be used as very useful tool in operation planning studies, particularly in voltage stability analysis.

Sumário

1	Introdução	1
2	Solução do Fluxo de Carga Utilizando Multiplicador Ótimo	8
2.1	Descrição do Método de Newton com Otimização de Passo	10
2.2	Considerações sobre o Método Apresentado	12
3	Determinação do Grau de Inactibilidade da Operação de Redes Elétricas	14
3.1	Fluxo de Carga com Ponto de Operação Inactível	15
3.2	Cálculo da Melhor Solução para o Fluxo de Carga Inactível	20
4	Determinação das Ações de Controle Corretivo para Retornar à Factibilidade	28
4.1	Análise da Sensibilidade do GI em relação às variáveis de controle	28
4.1.1	Determinação dos elementos do vetor $[f(x^m) - S]_u$	29
4.1.2	Cálculo dos componentes do vetor \mathcal{D}_u	33
4.2	Definição das Estratégias de Controle Corretivo	36
4.2.1	Método das Proporcionalidades (MP)	39
4.2.2	Método baseado em Programação Não-Linear (MPNL)	39
4.2.3	Caso Exemplo	40
5	Testes e Resultados	43
5.1	Rede exemplo de 3 barras	43
5.2	IEEE 14 barras	46
5.2.1	Verificação da precisão dos controles	46
5.2.2	Verificação da situação (7.a) - $ \mathbf{EC}_T \geq \mathcal{D}$	47
5.2.3	Verificação da situação (7.b) - $\beta \cdot \mathcal{D} \leq \mathbf{EC}_T < \mathcal{D}$	48
5.2.4	Verificação da situação (7.c) - $ \mathbf{EC}_T < \beta \cdot \mathcal{D}$	49
5.2.5	Comparação entre as versões A e B do programa	49
5.3	IEEE 118 barras	50
5.4	Rede de 904 barras	51
6	Conclusões	53
	Referências Bibliográficas	55

Lista de Figuras

1.1	Espaço multidimensional de parâmetros.	4
1.2	Funções de supervisão e controle de rede.	5
2.1	Evolução do processo iterativo para um caso sem solução.	12
3.1	Ilustração de uma situação de infactibilidade.	14
3.2	Efeito das ações de controle.	15
3.3	Sistema exemplo de duas barras.	16
3.4	Regiões factível e infactível no espaço de parâmetros.	17
3.5	Melhor solução possível para $P_2= 400$ MW, $Q_2= 200$ MVar.	19
4.1	Fluxos de potência referentes à barra k	31
4.2	Estado final da rede utilizando MP.	41
4.3	Estado final da rede utilizando MPNL.	42
4.4	Efeito das ações de controle na rede de 2 barras.	42
5.1	Sistema exemplo de três barras.	44
5.2	Sistema IEEE 14 bus.	46

Lista de Tabelas

1.1	Estados de operação da rede.	3
3.1	Convergência do fluxo de carga para $P_2 = 400$ MW, $Q_2 = 200$ MVar.	22
5.1	Rede de 3 barras: dados de ramos.	43
5.2	Solução do caso base para a rede de três barras.	44
5.3	Estado final da rede após a realização dos controles – Método MP.	45
5.4	Estado final da rede após a realização dos controles – Método MPNL.	46
5.5	Precisão dos controles.	47
5.6	Capacitor <i>shunt</i> como um controle.	47
5.7	Situação (7.a).	48
5.8	Primeira iteração, $\mathcal{D} = 0,25$	48
5.9	Comparação de MP e MPNL.	49
5.10	Valores relevantes utilizados pelo método proposto.	50
5.11	Ajustes obtidos com a versão A do programa.	50
5.12	Ajustes obtidos com a versão B do programa.	50
5.13	Simulação para a rede de 118 barras, situação (7.a).	51
5.14	Simulação para a rede de 118 barras, situação (7.b).	51
5.15	Simulação para a rede de 904 barras.	52
5.16	Simulação para a rede de 904 barras – fator de segurança de 10%.	52
5.17	Capacitor <i>shunt</i> da barra 805 como controle.	52

Capítulo 1

Introdução

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 geradoras;
- 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 tornou-se 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). Deseja-se que os COS tenham a capacidade de monitorar, analisar e realizar controle supervisão sobre a rede em tempo real. Isto é conseguido através da execução de uma série de *ações de controle*. 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 1.1 da forma como são descritos em [4].

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 1.1 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 e horários de pico de demanda.

Ocasionalmente, a situação pode se tornar ainda mais crítica, com o sistema deixando de apresentar um ponto de operação factível. Isto ocorre pois, atualmente, com o alto nível de carregamento dos sistemas elétricos, tende a aumentar o número de situações onde as equações do fluxo de carga não possuem solução real, particularmente em análise de contingências e aplicações de planejamento. A partir do momento em que essas situações comecem a ameaçar a operação do sistema é importante que uma técnica computacional eficiente seja desenvolvida para quantificar o *grau de infactibilidade* e recomendar estratégias de ações de controle corretivo de forma a trazer o sistema de volta à operação factível.

Uma análise mais detalhada dessas situações pode ser feita com o auxílio da figura 1.1, na qual é mostrado o chamado *espaço multidimensional de parâmetros* [5]. Pontos no espaço de parâmetros são

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.

Tabela 1.1: Estados de operação da rede.

definidos para diferentes níveis de carregamento da rede. Para cada nível de carregamento, deve-se obter o estado de operação correspondente em termos das tensões nas barras da rede. Isto é conseguido através do cálculo de fluxo de carga. O espaço de parâmetros é dividido em duas regiões básicas: *região factível* e *região infactível*. A primeira abrange pontos em que a operação da rede é possível e o cálculo de fluxo de carga executado aqui, deve apresentar solução. A segunda abrange pontos em que a operação da rede não é possível e o cálculo de fluxo de carga não tem solução. Essas regiões são separadas pela fronteira Σ . A região factível é subdividida em duas outras regiões, definidas em termos do estado de operação da rede. Esta pode operar na região *segura* (S), no caso em que a carga é atendida e todos os seus limites operacionais são respeitados (níveis 1, 2 e 3 da tabela 1.1), ou na região de *emergência* (E), caso em que a carga é atendida mas alguns limites operacionais são violados (níveis 4 e 5 da tabela 1.1, por exemplo havendo sobre ou subtensões, sobrecargas em linhas de transmissão, etc.). Naturalmente, deseja-se operar a rede na região factível segura todo o tempo.

Em muitos casos, é possível que a rede opere na região factível de emergência por um certo tempo até que medidas corretivas sejam tomadas para levá-la de volta à região segura. A região infactível se caracteriza pela impossibilidade de atendimento à demanda de carga especificada. Em termos de *pontos de operação* da rede, pode-se dizer que se o nível de carregamento determinar um ponto dentro da região factível, esta admitirá um ponto de operação. Se o carregamento for tal que determine um ponto na região infactível, não haverá ponto de operação possível. A fronteira Σ é caracterizada por representar pontos no

espaço de parâmetros cujo estado de operação resulte em um determinante nulo para a matriz Jacobiana do sistema de equações de fluxo de carga. Estes pontos são em geral associados a pontos de bifurcação do tipo nó-sela (*saddle-node*) e são também associados a pontos a partir dos quais ocorre instabilidade de tensão e conseqüente colapso de tensão.

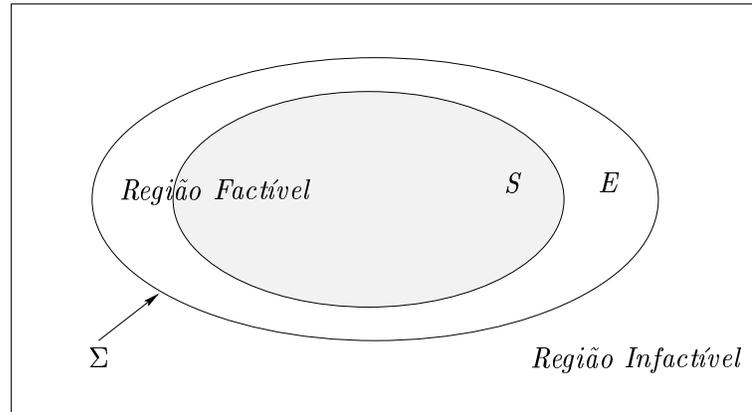


Figura 1.1: Espaço multidimensional de parâmetros.

Caso na rede sejam detectadas situações (contingências, aumento da demanda) tais que a rede possa ser levada à região infactível, deve-se tomar providências adequadas para que, apesar dessa situação indesejável, a máxima qualidade de fornecimento seja mantida. Essas providências consistem no desenvolvimento de estratégias de ações de controle. Essas ações de controle podem 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;
- 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 1.2 mostra uma visão geral das funções de supervisão e controle existentes em um COS [1].

Os blocos sombreados na figura 1.2 correspondem às ações de controle corretivas e preventivas discutidas anteriormente. 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 (área limitada pelo retângulo com linha tracejada) 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,

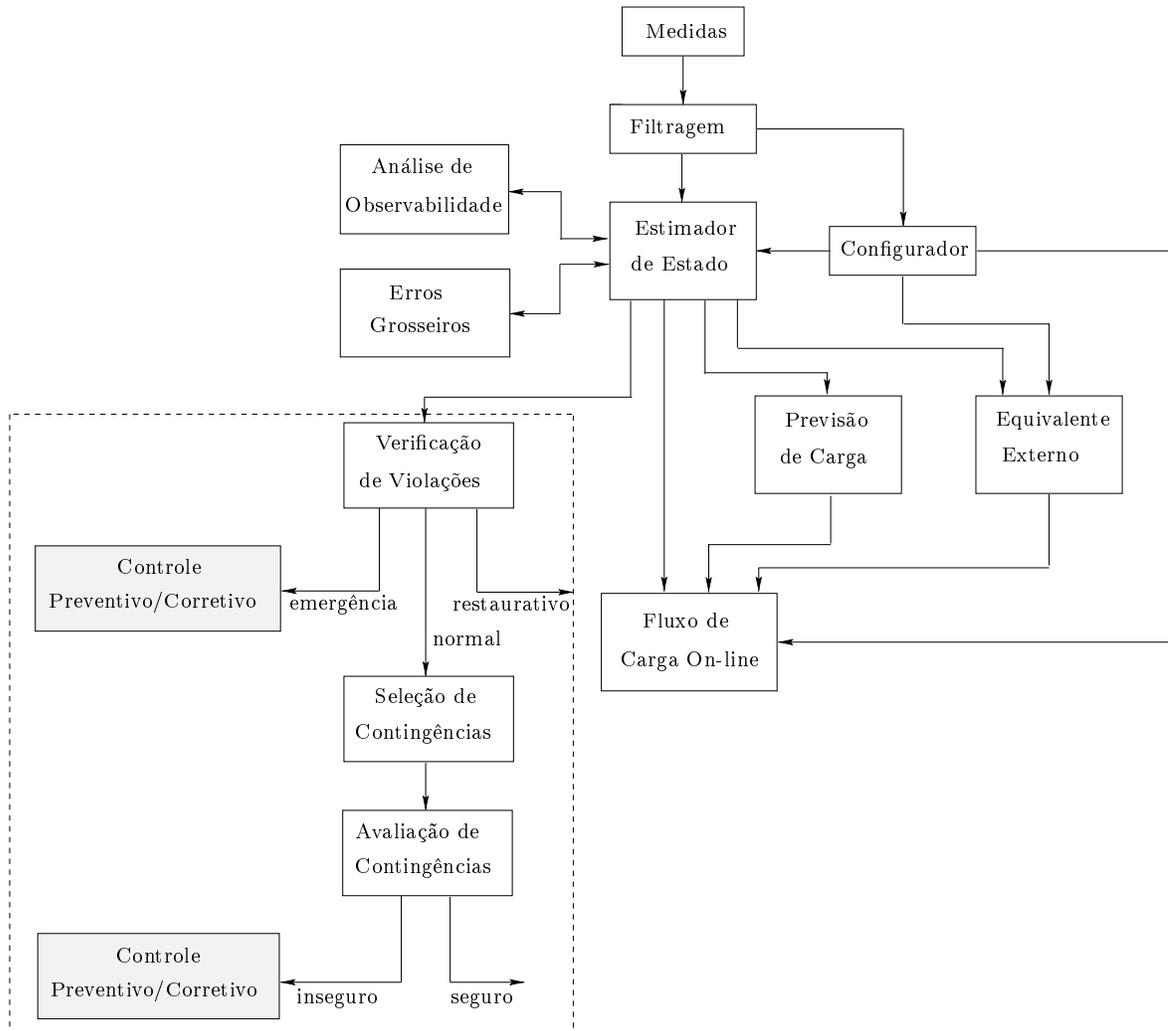


Figura 1.2: Funções de supervisão e controle de rede.

duas delas em particular constituem desafios que requerem novas metodologias para suas utilizações em tempo real:

- avaliação de segurança dinâmica de redes (associada à estabilidade transitória);
- obtenção de estratégias de controle corretivo/preventivo.

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. Por exemplo, a obtenção de estratégias de controle corretivo/preventivo em geral se baseia na resolução de problemas de otimização, ou seja, define-se um objetivo a ser alcançado e busca-se a melhor solução sujeita a uma série de restrições, que são relacionadas com as características da rede, as limitações dos equipamentos de controle, etc. Problemas de otimização envolvem modelos de alta complexidade, associados a métodos de solução que demandam um esforço computacional muito grande [1, 4]. Assim, tem-se dificuldades de implementação de funções envolvendo otimização em tempo real. Alguns trabalhos podem ser encontrados na literatura que procuram evitar a metodologia complexa de otimização. Em [6, 7] metodologias heurísticas são obtidas para eliminação de violações. Embora o desempenho delas seja muito bom em termos de adequação às restrições de tempo, as ações de controle determinadas visam tão somente obter algum ponto de operação tal que as violações sejam eliminadas, sem dar prioridade a alguns aspectos também importantes e abrindo mão de qualquer requisito de otimalidade de operação. Por exemplo, as ações de controle podem resultar em pontos de operação afastados do despacho ótimo previamente determinado, ou podem exigir um número alto de ajustes das variáveis de controle, etc. Deve-se ressaltar que os métodos desenvolvidos em [6, 7] visam classificar contingências como corrigíveis ou não corrigíveis, no sentido da possibilidade de se eliminar ou não violações decorrentes de contingências.

Neste trabalho busca-se obter metodologias a serem inseridas no conjunto de funções de controle que busquem dar um tratamento adequado a situações em que a operação da rede não seja possível. São encontrados na literatura alguns trabalhos que tratam deste tema. Em [8] um método foi proposto para providenciar alternativas de controle que atenuem infactibilidades. Basicamente, este tratamento pode ser definido como a obtenção do *grau de infactibilidade* da rede e posterior definição de estratégias de controle corretivo para retornar à região factível (baseando-se nas sensibilidades do *grau de infactibilidade* em relação aos controles disponíveis). Em [9] um método é proposto para encontrar o corte de carga mínimo para restaurar a factibilidade. Um método de otimização de pontos interiores é utilizado para minimizar o corte de carga enquanto permite que outros controles atuem (tais como *taps* de transformadores e níveis de tensão nos terminais dos geradores). Em [10] um método é proposto para restaurar a solução das equações do fluxo de carga na forma polar, utilizando-se dos componentes do autovetor à esquerda que se relacionam apenas aos desbalanços de potência. Este tratamento possibilita a identificação dos *mismatches* com maior influência na restauração da factibilidade.

Este trabalho se baseia na referência [8]. Como contribuições específicas procurou-se: (a) definir e analisar metodologias específicas de utilização dos controles; e (b) acrescentar a idéia de localização adaptativa na busca dos controles a serem utilizados. Esta dissertação será apresentada da seguinte maneira:

-
- no capítulo 2 será apresentada uma abordagem para a resolução do fluxo de carga pelo método de Newton utilizando-se da otimização de passo, já que este será uma ferramenta fundamental para o desenvolvimento de toda a estratégia proposta;
 - a situação na qual o fluxo de carga não tem solução é examinada em detalhes no capítulo 3;
 - no capítulo 4 um algoritmo é apresentado para quantificar o *grau de infeasibilidade* da rede e providenciar o retorno à região factível de acordo com critérios predefinidos;
 - no capítulo 5 os resultados dos testes realizados com o algoritmo proposto serão apresentados e discutidos.

Capítulo 2

Solução do Fluxo de Carga Utilizando Multiplicador Ótimo

O cálculo de fluxo de carga é uma ferramenta básica na análise de sistemas de potência, tanto no planejamento como na operação de sistemas elétricos. Foram observadas dificuldades na utilização dos métodos tradicionais de resolução do problema de fluxo de carga para: (a) redes mal-condicionadas – possuem um ponto de operação factível mas os métodos existentes não conseguem obtê-lo, ou o obtêm com dificuldades numéricas; (b) redes que, devido ao seu crescente carregamento, tornam-se mal-condicionadas; (c) redes que não possuem de fato um ponto de operação factível; (d) redes que admitem múltiplas soluções. São necessárias ferramentas que:

- melhorem as características de convergência da rede caso ela seja mal-condicionada e haja um ponto de operação factível;
- obtenham um estado da rede mesmo que não haja um ponto de operação factível e quantifiquem a distância do estado obtido à fronteira Σ , identificando o *grau de infactibilidade* e os parâmetros que otimizem a volta do sistema para a região factível.

Desde a década passada estudos vêm sendo feitos visando quantificar a distância do ponto de operação da rede ao colapso de tensão (fronteira Σ). Há basicamente dois métodos propostos na literatura que procuram resolver as equações do fluxo de carga para os tipos de redes citados anteriormente – onde os métodos clássicos de fluxo de carga não convergem ou mesmo divergem, não fornecendo informações úteis ao usuário. Uma alternativa é o método da continuação [11, 12], em que resolve-se as equações de fluxo de carga parametrizadas. Uma segunda alternativa foi originalmente proposta em [13, 14, 15], onde o cálculo de uma solução para as equações de fluxo de carga pode ser considerado como um problema de programação não-linear. São determinadas a direção e a magnitude da correção do estado da rede em cada iteração tal que uma certa função custo seja minimizada. O valor da função custo torna-se zero quando houver uma solução para a rede, ou permanece não nulo e constante caso a solução não exista.

Modificando o caminho de convergência e/ou o passo de cada iteração, pode-se conseguir uma melhor característica de convergência para o problema de fluxo de carga.

Seguindo a idéia de se considerar o fluxo de carga como um problema de programação não-linear, foi proposto em [16, 17] a introdução de um *fator multiplicador escalar ótimo* que otimize cada passo de iteração do fluxo de carga. Esse fator (μ) é calculado de forma a minimizar uma função quadrática baseada nos *mismatches* de potência e é multiplicado pelo vetor de correção de estado para melhorar o caminho de convergência do fluxo de carga. Nesta formulação as tensões aparecem em coordenadas retangulares. Em [18, 19] foi proposta uma adaptação deste método para a formulação do fluxo de carga em que as tensões aparecem em coordenadas polares, que é o caso mais comum encontrado na prática. Tal método utiliza transformações de coordenadas polar-retangular e vice-versa durante o processo iterativo, além de envolver algumas aproximações em relação ao método original. Em [20] foi proposto um método originalmente desenvolvido para o caso em que as tensões são dadas em coordenadas polares. A idéia básica do método é similar ao método proposto em [17], onde é obtido um fator de amortecimento (λ) que é multiplicado pelo vetor de correção de estado. A função a ser minimizada no entanto é diferente da utilizada em [17]. Este método apresenta algumas dificuldades básicas com relação ao cálculo de λ : (a) a função a ser minimizada assume queda quadrática da norma do vetor de *mismatches* de potência, o que pode não ser verdadeiro e resultar em valores de λ não utilizáveis, especialmente para redes bem condicionadas; (b) ele depende de um fator de ajuste que é obtido empiricamente; (c) este fator de ajuste funciona bem para casos em que não há solução das equações de fluxo de carga, mas pode resultar em desempenho fraco para redes bem condicionadas; e (d) seu cálculo apresenta problemas na primeira iteração, sendo eventualmente necessário mudar o ponto de operação inicial para valores não usuais.

A formulação proposta em [21, 22, 23], e que será utilizada neste trabalho, baseia-se na obtenção de um *fator de otimização de passo* similar ao proposto em [17], mas originalmente aplicado ao fluxo de carga com as tensões em coordenadas polares, não exigindo transformações trigonométricas ou definição de fatores empíricos. A utilização do método proposto garante a obtenção da *solução ótima*¹, mesmo para os casos do fluxo de carga sem solução ou com soluções múltiplas. Outras vantagens desse método são um pequeno esforço computacional e pouca memória de armazenamento adicionais, podendo ser facilmente incorporado a um programa de fluxo de carga (em coordenadas polares) com poucas e simples modificações, que são apenas acrescentadas ao programa para o cálculo de μ , sem alterar o algoritmo original de resolução do fluxo de carga. Esta formulação será utilizada para a obtenção da *solução ótima* para as equações do fluxo de carga. Partindo de um ponto no interior da região factível, o caminho percorrido por um fluxo de carga convencional seria totalmente imprevisível (para redes mal-condicionadas e/ou que não possuem um ponto de operação factível), chegando a resultados inúteis em termos de análise. Já utilizando a otimização de passo, sabe-se que, se o problema não tiver solução, pode-se chegar a algum ponto na fronteira Σ . Em função dos resultados obtidos (em especial dos *mismatches* de potência) pode-se avaliar a distância entre um ponto qualquer da fronteira Σ e S (demanda de potência da rede em certa situação e que define um ponto na região infactível), permitindo então a desejada quantificação do *grau de infactibilidade*.

¹Em [21, 22, 23] esta mesma solução é denominada de “*melhor solução possível*”

2.1 Descrição do Método de Newton com Otimização de Passo

As injeções nodais líquidas de potência ativa e reativa com as tensões em coordenadas polares são:

$$P_k = V_k \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2.1)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km})$$

onde n é o número de barras da rede, $(V_k \angle \theta_k)$ é a tensão da barra k , $\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$ e $(G_{km} + jB_{km}) = Y_{km}$ é um elemento da matriz admitância nodal. As equações básicas do fluxo de carga para uma rede de n barras podem ser colocadas na forma matricial:

$$\begin{aligned} \Delta s(x) &= s^{esp} - s(x) \\ &= \begin{bmatrix} \Delta P(x) \\ \Delta Q(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{esp} - P(x) \\ Q^{esp} - Q(x) \end{bmatrix} = 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

onde Δs tem dimensão $(2n \times 1)$ e representa o vetor dos *mismatches* de potência, constituído pelas partes ativa ΔP ($n \times 1$) e reativa ΔQ ($n \times 1$). Os *mismatches* são dados pela diferença entre as injeções especificadas para as barras e as injeções calculadas através das equações (2.1). O vetor de estado x ($2n \times 1$) é dado por:

$$x = \left[\theta_1 \quad \theta_2 \quad \dots \quad \theta_n \quad V_1 \quad V_2 \quad \dots \quad V_n \right]^T \quad (2.3)$$

Considera-se o vetor x como tendo dimensão $(2n \times 1)$ para tornar mais simples a apresentação dos aspectos gerais do método. Evidentemente, alguns elementos de x não são incógnitas e constituem dados iniciais do problema. Por exemplo, a barra de referência (tipo *slack*) tem V_k e θ_k previamente definidos. Para barras de geração (tipo *PV*) V_k também é previamente definido. Essas particularidades alteram a forma das equações de fluxo de carga, porém não são relevantes para o entendimento do princípio geral do método descrito. As mesmas considerações são válidas para os vetores das potências. A expansão em série de Taylor das equações do fluxo de carga em torno de um ponto de operação x considerando os termos de ordem igual ou inferior a 2, resulta em:

$$\Delta s(x + \Delta x) = \Delta s(x) - J \cdot \Delta x + T(x) = 0 \quad (2.4)$$

onde J é a matriz Jacobiana e o vetor $T(x)$ ($2n \times 1$) corresponde aos termos de segunda ordem. Existem duas entradas em $T(x)$ para cada barra do sistema; uma correspondente ao *mismatch* de potência ativa e a outra correspondente ao *mismatch* de potência reativa. Desta forma, tem-se:

$$T(x) = \left[T^P(x) \quad T^Q(x) \right]^T$$

Os elementos para uma barra i são:

$$T_i^P = \frac{1}{2} \cdot \left[\sum_{j \in K_i} \left(\Delta \theta_j \cdot \frac{\partial}{\partial \theta_j} \right) + \sum_{j \in K_i} \left(\Delta V_j \cdot \frac{\partial}{\partial V_j} \right) \right]^2 \cdot \Delta P_i \quad (2.5)$$

$$T_i^Q = \frac{1}{2} \cdot \left[\sum_{j \in K_i} \left(\Delta \theta_j \cdot \frac{\partial}{\partial \theta_j} \right) + \sum_{j \in K_i} \left(\Delta V_j \cdot \frac{\partial}{\partial V_j} \right) \right]^2 \cdot \Delta Q_i$$

onde o conjunto K_i é formado por todas as barras que estão conectadas a ela inclusive a própria barra i . No caso em que a barra i é uma barra de geração (PV), $T_i^Q = 0$. Caso ela seja *slack* ($V\theta$), $T_i^P = T_i^Q = 0$.

Em cada iteração ξ o vetor de correção de estado é multiplicado por um *fator multiplicador escalar ótimo* que otimiza cada passo de iteração. Esse fator (μ) é calculado de forma a minimizar uma função quadrática baseada nos *mismatches* de potência que é dada por:

$$F(x^\xi) = \frac{1}{2} \cdot [\Delta s(x^\xi)]^T \cdot [\Delta s(x^\xi)] \quad (2.6)$$

onde $x^\xi = x^{\xi-1} + \mu \cdot \Delta x^{\xi-1}$. De (2.4) e (2.5):

$$\begin{aligned} \Delta s(x + \mu \cdot \Delta x) &= s^{esp} - s(x) - \mu \cdot J \Delta x + \mu^2 \cdot T(x) \\ &= \mathbf{a} + \mu \mathbf{b} + \mu^2 \mathbf{c} = 0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

Note que $\mathbf{a} = -\mathbf{b}$ é o vetor de *mismatches* de potência do método convencional e \mathbf{c} é dado por:

$$\mathbf{c} = T(x) \quad (2.8)$$

Os vetores \mathbf{a} e \mathbf{b} são definidos da mesma forma como em [17]. Substituindo (2.7) em (2.6) e aplicando a condição de otimalidade (mínimo local) $\partial F / \partial \mu = 0$, obtém-se o valor μ que é dado pela seguinte equação cúbica em μ :

$$g_0 + g_1 \mu + g_2 \mu^2 + g_3 \mu^3 = 0 \quad (2.9)$$

onde os coeficientes g_i são:

$$\begin{aligned} g_0 &= \sum_{i=1}^{2n} (\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{b}_i) & g_2 &= 3 \cdot \sum_{i=1}^{2n} (\mathbf{b}_i \cdot \mathbf{c}_i) \\ g_1 &= \sum_{i=1}^{2n} (\mathbf{b}_i^2 + 2\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{c}_i) & g_3 &= 2 \cdot \sum_{i=1}^{2n} (\mathbf{c}_i^2) \end{aligned}$$

No caso em que o sistema é bem-condicionado, μ assume valores próximos de 1 (e a performance do método aproxima-se do método convencional). Para sistemas sem um ponto de operação factível μ assume valores muito baixos (teoricamente μ tende a zero), indicando que a solução atual não pode ser melhorada a fim de minimizar a função F de (2.6). O processo iterativo básico de solução do fluxo de carga utilizando o fator de otimização de passo μ é:

- (1) Inicializar contador de iterações $\xi = 0$. Escolher estimativa inicial de estado x^ξ ;
- (2) Calcular *mismatches* de potência $\Delta s(x^\xi)$ e vetores \mathbf{a} e \mathbf{b} ;
- (3) Calcular correção no estado $\Delta x^\xi = (J^\xi)^{-1} \cdot \Delta s(x^\xi)$;
- (4) Calcular o vetor \mathbf{c} ;
- (5) Calcular coeficientes da equação cúbica g_0, g_1, g_2 e g_3 ;
- (6) Calcular fator μ ;
- (7) Obter novo estado $x^{\xi+1} = x^\xi + \mu \cdot \Delta x^\xi$;
- (8) Incrementar contador de iterações $\xi = \xi + 1$ e voltar ao passo (2).

A inserção dos passos (4), (5) e (6) e as modificações dos passos (2) e (7) representam um esforço computacional adicional muito pequeno ao problema. Vale salientar que a introdução do fator de otimização de passo não altera os procedimentos convencionais de consideração de controles e limites no problema de fluxo de carga, tais como controle de *tap* de transformadores e limites de geração de potência reativa em geradores.

2.2 Considerações sobre o Método Apresentado

A figura 2.1 mostra a evolução típica no espaço de parâmetros (carga) do processo iterativo de cálculo de fluxo de carga para um caso sem solução. O ponto S , que representa basicamente a demanda de potência da rede, está fora da região de factibilidade. Partindo-se de um estado (tensões) inicial associado ao ponto S^0 , o processo de cálculo de fluxo de carga evolui até a fronteira Σ , situação em que μ se torna igual a zero (ponto S^3).

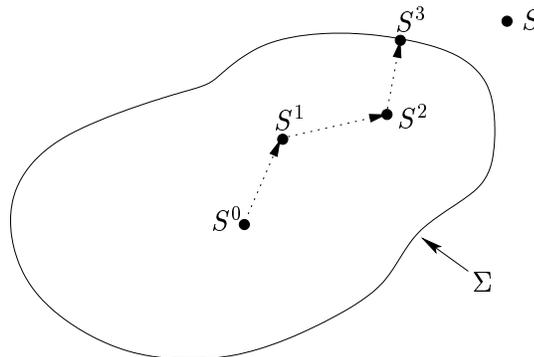


Figura 2.1: Evolução do processo iterativo para um caso sem solução.

Pode-se concluir que a utilização de otimização de passo permite a obtenção de soluções para redes mal-condicionadas, mesmo quando o método convencional falha. Caso não haja solução na região factível, o método apresentado (e que será adotado neste trabalho) fornece resultados importantes para a análise da situação da rede, fornecendo um ponto de operação o mais próximo possível da região de factibilidade. Isso permite a definição de estratégias de retorno da rede à região de factibilidade através de análise de sensibilidade e rejeição de carga, por exemplo. O citado método mostrou-se preciso, robusto e não exige um esforço computacional adicional significativo comparando-se ao método de Newton convencional. Ele pode ser utilizado como uma ferramenta útil de suporte aos estudos de instabilidade de tensão e colapso de tensão como será mostrado nos capítulos posteriores.

Capítulo 3

Determinação do Grau de Infactibilidade da Operação de Redes Elétricas

Como foi visto no capítulo 2, o método de Newton com otimização de passo permite obter a solução ótima para as equações de fluxo de carga para situações em que o ponto de operação pertence à região inactível. A partir dos resultados obtidos (principalmente dos *mismatches* de potência na solução ótima) pode-se quantificar o *grau de inactibilidade*. Considerar que as condições de operação de uma rede elétrica são representadas pelo ponto S no espaço de parâmetros, como mostra a figura 3.1. De acordo com a figura os pontos S^0 , S^1 , S^2 e S^3 correspondem ao caminho iterativo do método de Newton otimizado, sendo S^3 a melhor solução possível para o problema. A menor distância entre o ponto S e a fronteira Σ é dada pela distância $(S - S^m)$.

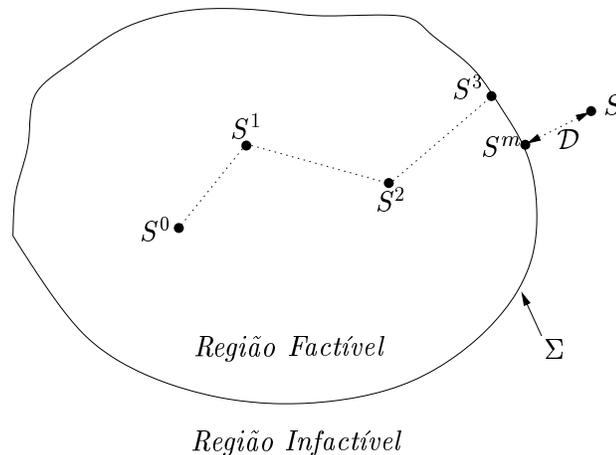


Figura 3.1: Ilustração de uma situação de inactibilidade.

O objetivo deste trabalho de pesquisa é (a) implementar um método de obtenção de S^m e, depois, (b)

definir as ações de controle necessárias para que a rede percorra o caminho $S \rightarrow S^m$, que é o caminho que intuitivamente requer as ações de controle mais brandas. Neste último caso, estratégias de controle devem ser obtidas com a finalidade de colocar o sistema de volta a uma condição de factibilidade. Geralmente os controles disponíveis são fontes de reativos (em geral, bancos de capacitores), *taps* de transformadores e, em situações de emergência, corte de carga. Basicamente os controles agem de duas maneiras: deslocando o ponto S na direção da região factível – através de corte de carga – ou aumentando a região de factibilidade – através do chaveamento de bancos de capacitores ou por mudança dos *taps* de transformadores. A figura 3.2 mostra o efeito das ações de controle geralmente utilizadas. O novo ponto de operação S' resulta do corte de carga e a nova fronteira Σ' resulta do chaveamento de bancos de capacitores ou mudança dos *taps* de transformadores. Obviamente, uma vez restaurada a factibilidade outras medidas devem ser tomadas de modo a levar em conta os custos operacionais (como redespacho de geração) e violações de alguns limites (como ramos sobrecarregados).

Neste capítulo o item (a) será abordado. Em [5] é proposto um método para a obtenção de S^m que consiste em um processo iterativo baseado na análise do autovetor esquerdo da matriz Jacobiana. Este método será apresentado neste capítulo. Conhecendo o valor de S^m , pode-se determinar a distância $(S - S^m)$ e, então, o *grau de infactibilidade* (GI ou \mathcal{D}).

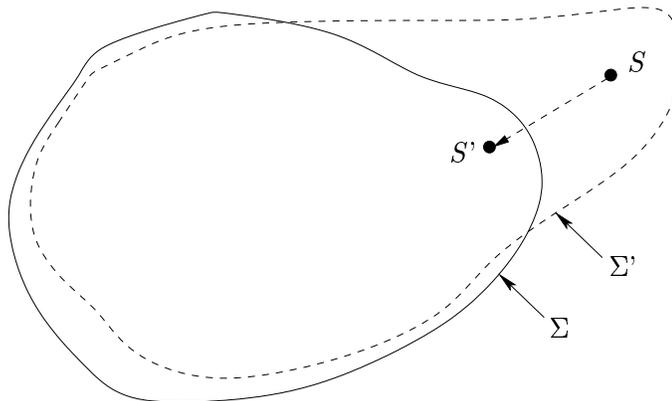


Figura 3.2: Efeito das ações de controle.

3.1 Fluxo de Carga com Ponto de Operação Infactível

Atualmente, devido ao crescimento acentuado da demanda de energia elétrica, vários estudos vêm focalizando o problema em que as equações do fluxo de carga não têm solução real. Este problema será apresentado através de um exemplo simples de duas barras [5]. Considere um sistema com uma única linha de transmissão conectando duas barras, conforme mostra a figura 3.3.

A barra 1 é adotada como referência e possui tensão constante de $(1\angle 0^\circ)$ pu. A barra 2 é de carga com demanda $P_2 + jQ_2$. Assume-se que a linha de transmissão não apresenta perda de potência ativa,

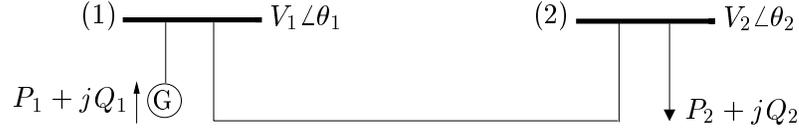


Figura 3.3: Sistema exemplo de duas barras.

nem carregamento *shunt*, e possui reatância igual a 0,1 pu (na base de 100 MVA). As equações de fluxo de carga para este sistema, com as tensões em coordenadas polares, são:

$$P_2 = V_2 \cdot V_1 \cdot (G_{21} \cdot \cos \theta_{21} + B_{21} \cdot \sin \theta_{21}) + V_2^2 \cdot G_{22} \quad (3.1)$$

$$Q_2 = V_2 \cdot V_1 \cdot (G_{21} \cdot \sin \theta_{21} - B_{21} \cdot \cos \theta_{21}) - V_2^2 \cdot B_{22}$$

Para o exemplo em questão temos que:

$$r_{12} = 0 ; V_1 = 1,0 \text{ pu} ; \theta_1 = 0^\circ$$

Logo,

$$P_2 = V_2 \cdot B_{21} \cdot \sin \theta_2 \quad (3.2)$$

$$Q_2 = -V_2 \cdot B_{21} \cdot \cos \theta_2 - V_2^2 \cdot B_{22} \quad (3.3)$$

onde $(V_2 \angle \theta_2)$ é o fasor de tensão na barra 2, $P_2 + jQ_2$ a demanda na barra de carga e $B_{12} = 10 = -B_{22}$ os elementos da matriz admitância nodal. A matriz Jacobiana de (3.2) é:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

e seus elementos são iguais a:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} &= V_2 \cdot B_{21} \cdot \cos \theta_2 \\ \frac{\partial P_2}{\partial V_2} &= B_{21} \cdot \sin \theta_2 \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} &= V_2 \cdot B_{21} \cdot \sin \theta_2 \\ \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} &= -B_{21} \cdot \cos \theta_2 - 2 \cdot V_2 \cdot B_{22} \end{aligned} \quad (3.5)$$

A figura 3.4 mostra as regiões no espaço de parâmetros de carga para os quais, dependendo dos valores de P_2 e Q_2 , (3.2) pode ter solução ou não [24]. Os pontos **a** e **b** correspondem a demandas para as quais as equações de fluxo de carga apresentam solução. O ponto **c** é tal que não há solução para as equações de fluxo de carga, ou seja, representa uma demanda que torna a operação da rede inafectível. Como foi

mostrado na figura 1.1, estas duas regiões são separadas pela fronteira Σ , que é o lugar geométrico em que as equações do fluxo de carga têm uma única solução. Para o conjunto de pontos sobre Σ o Jacobiano de (3.2) é singular. Deste modo, o ponto **a** com uma demanda $S_2 = (200 + j100)$ MVA está no interior da região factível; o ponto **b** com uma demanda $S_2 = (300 + j150)$ MVA está próximo à fronteira Σ mas ainda é factível; enquanto o ponto **c**, com uma demanda $S_2 = (400 + j200)$ MVA, é inactível.

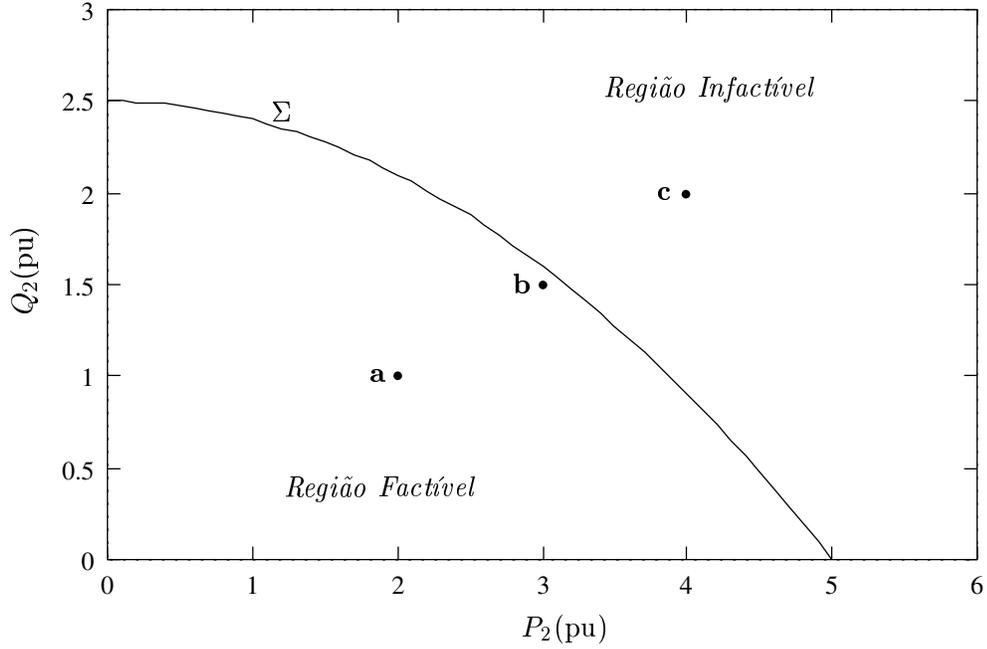


Figura 3.4: Regiões factível e inactível no espaço de parâmetros.

Para este exemplo simples, é possível obter analiticamente a equação que define a fronteira Σ pois, sabe-se que o determinante de J , em Σ , é zero. Então, tem-se:

$$\begin{aligned} \det(J) &= [(V_2 B_{21} \cos \theta_2) \cdot (-B_{21} \cos \theta_2 - 2V_2 B_{22}) - (B_{21} \sin \theta_2) \cdot (V_2 B_{21} \sin \theta_2)] = 0 \\ &= -V_2 B_{21}^2 \cos^2 \theta_2 - 2V_2^2 B_{22} B_{21} \cos \theta_2 - V_2 B_{21}^2 \sin^2 \theta_2 = 0 \end{aligned}$$

Como $\sin^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_2 = 1$, tem-se:

$$\begin{aligned} \det(J) &= -V_2 B_{21}^2 - 2V_2^2 B_{22} B_{21} \cos \theta_2 = 0 \\ 2V_2 B_{22} \cos \theta_2 &= -B_{21} \\ V_2 \cos \theta_2 &= -\frac{B_{21}}{2B_{22}} = 0,5 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Elevando ambos os membros ao quadrado,

$$V_2^2 \cos^2 \theta_2 = V_2^2 - V_2^2 \sin^2 \theta_2 = 0,25 \rightarrow V_2^2 \sin^2 \theta_2 = V_2^2 - 0,25 \quad (3.7)$$

Elevando a equação (3.2) ao quadrado e utilizando (3.7), tem-se:

$$P_2^2 = V_2^2 B_{21}^2 \sin^2 \theta_2 = B_{21}^2 \cdot (V_2^2 - 0,25) \quad (3.8)$$

Das equações (3.2) e (3.5), tem-se:

$$Q_2 = -\frac{B_{21}}{2} - V_2^2 B_{22} \rightarrow V_2^2 = -\frac{B_{21}}{2B_{22}} - \frac{Q_2}{B_{22}} \quad (3.9)$$

Substituindo (3.9) em (3.8), chega-se à expressão que define a fronteira Σ :

$$P_2^2 = \left(-\frac{B_{21}^3}{2B_{22}} - \frac{B_{21}^2}{B_{22}} \cdot Q_2 - \frac{B_{21}^2}{4} \right) \quad (3.10)$$

Como já foi mencionado anteriormente, vários estudos têm sido propostos para identificar uma medida que quantifique a distância de uma solução do fluxo de carga (i.e., um ponto na região factível) à fronteira Σ [27]. Uma medida que será particularmente útil neste trabalho, para o desenvolvimento de medidas similares em casos onde as equações do fluxo de carga não têm solução (i.e., um ponto na região infactível), é a distância (*norma Euclideana*) entre algum ponto infactível e o ponto mais próximo de Σ definidos no espaço de parâmetros [25, 26]. Em [27] um método iterativo é usado para calcular o ponto mais próximo de Σ a partir do ponto factível. Logo, a distância entre eles pode ser calculada e utilizada como uma medida de segurança do sistema. O método proposto neste trabalho para quantificar o *grau de infactibilidade* de um ponto na região infactível do espaço de parâmetros, também utiliza-se da distância entre um ponto de operação infactível e o ponto mais próximo da fronteira Σ . Entretanto, o problema é diferente do primeiro quando existe solução para as equações do fluxo de carga. As diferenças aparecem primeiramente na definição de uma função que se baseia na metade do quadrado das equações dos *mismatches* de potência:

$$F(x) = \frac{1}{2} \cdot [f(x) - S]^T \cdot [f(x) - S] \quad (3.11)$$

Deste modo $F(x)$ é maior ou igual a zero para todo x , e somente igual a zero na solução do fluxo de carga. Para o sistema de duas barras a equação fica:

$$F(x) = \frac{1}{2} \cdot [(V_2 B_{21} \sin \theta_2 - P_2)^2 + (-V_2 B_{21} \cos \theta_2 - V_2^2 B_{22} - Q_2)^2] \quad (3.12)$$

Para os casos onde não existe solução, define-se x^m como sendo o valor de x correspondente ao mínimo da função custo $F(x)$. Desta maneira, x^m pode ser encarado como a *melhor solução possível* para as equações do fluxo de carga. O objetivo do algoritmo apresentado neste capítulo é determinar x^m . Define-se $S^m = f(x^m)$ como sendo o ponto de operação no espaço de parâmetros correspondente a x^m . Conhecendo-se x^m e S^m , pode-se definir uma medida que quantifique a infactibilidade da solução. Esta medida pode ser desenvolvida a partir das seguintes observações a respeito de x^m [8]:

1. O Jacobiano das equações do fluxo de carga em x^m , $J(x^m)$, é singular. Isso pode ser verificado recorrendo às condições necessárias de Karush-Kuhn-Tucker para x^m ser um ponto de mínimo local de (3.11):

$$\nabla F(x^m) = [f(x^m) - S]^T \cdot J(x^m) = 0 \quad (3.13)$$

Como $[f(x^m) - S] \neq 0$, implica que $J(x^m)$ é singular.

2. O ponto mais próximo entre a fronteira Σ (utilizando uma norma Euclideana) e S é $S^m = f(x^m)$. O fato de que S^m é um elemento de Σ provém da primeira observação. S^m é o ponto mais próximo de S , segundo a definição de x^m como ponto que minimiza (3.11), que equivale a minimizar a norma Euclideana.
3. A direção “ótima” para o movimento no espaço de parâmetros para retornar à factibilidade é dada por $[S - S^m]$. Nota-se, intuitivamente, que no ponto x^m , $[S - S^m]$ equivale aos *mismatches* de potência ativa e reativa para cada barra. Pode-se perceber também, que para trazer o sistema de volta à região factível basta mudar as injeções de potência nas barras e, em consequência desse procedimento, faz-se com que os *mismatches* nas respectivas barras tornem-se iguais a zero. Observando a equação (3.13), nota-se que $[S - S^m]$ é o *autovetor esquerdo*, w^m , do autovalor zero de $J(x^m)$. Em [26, 28] é mostrado que w^m é paralelo ao vetor normal a Σ em S^m . Como o sentido do vetor normal é de S^m para S , a direção “ótima” para retornar a Σ é dada pela direção oposta à normal, que é $[S - S^m]$.

A distância entre a melhor solução possível para as equações do fluxo de carga, S^m , e S , é dada por:

$$\mathcal{D} = \sqrt{[S^m - S]^T \cdot [S^m - S]} \quad (3.14)$$

e pode então ser usada como uma medida do *grau de infactibilidade* de uma solução do fluxo de carga, sendo a direção ótima de retorno à factibilidade dada por $[S - S^m]$. Para o exemplo da figura 3.3, considerando que no ponto **c** a demanda de potência é de $400 + j200$ MVA, a melhor solução possível para o estado final da rede (de acordo com [5], pois neste trabalho x^m só será determinado por meio de um algoritmo apresentado mais adiante) é $x^m = V_2 = (0,6100\angle -34,95^\circ)$ pu. Com esse valor, pode-se calcular analiticamente o valor de $f(x^m)$. De (3.2) tem-se:

$$\begin{aligned} P_2 &= 0,6100 \cdot 10 \sin(-34,95^\circ) = -3,495 \text{ pu} \\ Q_2 &= -0,6100 \cdot 10 \cdot \cos(-34,95^\circ) - (0,6100)^2 \cdot (-10) = -1,279 \text{ pu} \end{aligned}$$

Logo, $f(x^m) = S^m = (-3,495 - j1,279)$ pu. A figura 3.5 ilustra essa situação, onde os *mismatches* de potência na barra 2 são $\Delta P_2 = 50,5$ MW e $\Delta Q_2 = 72,1$ MVAr. O valor da distância em pu (base de 100

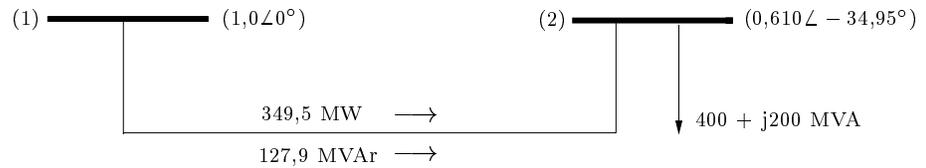


Figura 3.5: Melhor solução possível para $P_2 = 400$ MW, $Q_2 = 200$ MVAr.

MVA) da equação (3.14) é:

$$\mathcal{D} = \sqrt{\begin{bmatrix} 0,505 & 0,721 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,505 \\ 0,721 \end{bmatrix}} = \sqrt{0,7749} \rightarrow \mathcal{D} = 0,8803$$

Deste modo, a variação mínima de carga para conseguir factibilidade seria diminuir a demanda ativa de 50,5 MW e a demanda reativa de 72,1 MVar. Recorrendo às equações (3.4) e (3.5), calcula-se o valor do Jacobiano nesse ponto (carga de 349,5 MW, 127,9 MVar):

$$J(x^m) = \begin{bmatrix} 5,00000 & -5,72861 \\ -3,49445 & 4,00347 \end{bmatrix}$$

O determinante da matriz Jacobiana teoricamente seria nulo mas, com a precisão adotada, será igual a:

$$\det[J(x^m)] = -0,00099$$

O autovetor esquerdo associado ao autovalor zero de $J(x^m)$ é $w^m = [0,572 \ 0,820]$, [5]. Note que $w^m \cdot J(x^m) = 0$ e que w^m é paralelo ao vetor de *mismatches*.

Comparando o método proposto neste trabalho para quantificar a infactibilidade de um caso do fluxo de carga com o pior caso de aumento de carga de [27], que quantifica a segurança de um caso factível, várias semelhanças e diferenças podem ser observadas. Ambos os métodos se utilizam da norma Euclideana ou da distância no espaço de parâmetros entre a demanda atual S e o ponto mais próximo da fronteira Σ como uma medida da margem de segurança do sistema. Em [27] essa medida pode ser usada para indicar qual a distância do sistema ao colapso de tensão, o que significa uma bifurcação do tipo nó-sela (*saddle-node*), tipicamente com um valor grande indicando um ponto de operação do sistema mais seguro. No entanto, a grandeza proposta aqui indica quanto a demanda atual está longe da fronteira de factibilidade com um valor grande indicando uma situação mais severa. Deste modo, os dois métodos podem ser vistos como complementares. Se a demanda do sistema está dentro da região factível, então [27] poderia ser utilizado; se um estudo de contingência ou planejamento resultar em um ponto fora da região factível, então a medida apresentada aqui poderia ser usada. A menor distância no espaço de parâmetros para retornar à factibilidade é \mathcal{D} . Geralmente o mais interessante é realizar esse retorno à região factível, deixando a margem de segurança para segundo plano. A determinação da melhor solução possível para o caso infactível do fluxo de carga, x^m , não é trivial. Porém, uma vez que x^m tenha sido determinado, o ponto mais próximo da fronteira Σ é simplesmente $S^m = f(x^m)$. Um algoritmo eficiente para a determinação de x^m será apresentado a seguir.

3.2 Cálculo da Melhor Solução para o Fluxo de Carga Infactível

O problema de determinar a melhor solução possível para um caso infactível do fluxo de carga é diferente da solução de um fluxo de carga convencional em vários aspectos. Para o fluxo de carga convencional a meta é obter um vetor de tensões x tal que os balanços de potência em todas as barras sejam satisfeitos (lei das correntes de Kirchhoff):

$$f(x) - S = 0 \tag{3.15}$$

Para esse problema, o algoritmo de Newton-Raphson (N-R) geralmente funciona muito bem, sendo que no caso de redes elétricas de potência é possível inicializar o problema com uma estimativa de x já bem

próxima da sua solução. Porém, sabe-se que o problema da infactibilidade do fluxo de carga ocorre quando (3.15) não tem solução. Então, o problema pode ser reformulado como um problema de minimização irrestrita da função quadrática definida em (3.11):

$$\min F(x) = \frac{1}{2} \cdot [f(x) - S]^T \cdot [f(x) - S] \quad (3.16)$$

Para esse problema de minimização existem numerosas técnicas de solução tais como o método do gradiente de maior descida e o método das direções conjugadas [35]. No entanto esses métodos apresentam convergência lenta para a função do problema do fluxo de carga. Um método iterativo será utilizado para resolver (3.15) baseado no algoritmo de fluxo de carga N-R, com a tensão das barras em coordenadas polares, e utilizando-se do multiplicador ótimo descrito anteriormente.

O algoritmo de obtenção da melhor solução para o fluxo de carga infactível pode ser desenvolvido partindo-se de observações relativas à convergência do método N-R quando o multiplicador ótimo é usado:

1. Se (3.15) não tem solução real, então o fluxo de carga converge em direção a um ponto x^* onde o Jacobiano de $f(x^*)$ é singular. Isso pode ser visto, lembrando-se que no algoritmo do método Newton-Raphson convencional o vetor de correção de estado (Δx^k), em cada iteração, é dado por $\Delta x^k = -J(x^k)^{-1} \cdot [f(x^k) - S]$; então, o multiplicador ótimo é escolhido de modo a minimizar a função custo na direção Δx^k . A única maneira de a função custo não poder ser minimizada seria se Δx^k apontasse no plano tangente de $F(x) = constante$ ou, de maneira equivalente, se o gradiente de $F(x^k)$,

$$\nabla F(x^k) = [f(x^k) - S]^T \cdot J(x^k) \quad (3.17)$$

fosse perpendicular a Δx^k . Isto só seria verdadeiro se o produto interno entre eles fosse igual a zero. Porém, como $J(x^k)$ não é singular,

$$\begin{aligned} \frac{\nabla F(x^k) \bullet \Delta x^k}{\|\Delta x^k\|} &= -\frac{[f(x^k) - S]^T \cdot J(x^k) \cdot J(x^k)^{-1} \cdot [f(x^k) - S]}{\|\Delta x^k\|} \\ &= -\frac{[f(x^k) - S]^T \cdot [f(x^k) - S]}{\|\Delta x^k\|} \neq 0 \end{aligned} \quad (3.18)$$

pois, $[f(x^k) - S] \neq 0$ (que por definição só é verdadeiro na solução do fluxo de carga). Quando $J(x^k)$ aproxima-se da singularidade, pode-se verificar que (3.18) aproxima-se de zero e, como o ponto de singularidade do Jacobiano é aproximado, $\|\Delta x^k\|$ tende a ∞ .

2. Da primeira observação segue que $f(x^*)$ está sobre a fronteira Σ no espaço de parâmetros. Uma vez que o *mismatch* do fluxo de carga é $[f(x) - S]$, em x^* o valor de $f(x^*)$ é justamente S mais o *mismatch* final. Porém, não é necessariamente verdadeiro que $x^* = x^m$; em geral, $f(x^*) \neq S^m$. Em (2.7) μ é determinado para minimizar $F(x)$ somente no espaço unidimensional dado por $[x + \mu \Delta x]$. Também, como o fluxo de carga converge para x^* , o multiplicador ótimo μ tende a zero ($\mu \rightarrow 0$).

3. O autovetor esquerdo w^i associado com o autovalor zero de $J(x^*)$ é perpendicular a Σ em $f(x^*)$ [26].

Estas observações podem ser ilustradas utilizando-se do sistema de duas barras anterior para o caso em que $P_2 = 400$ MW e $Q_2 = 200$ MVar. Iniciando da condição de *flat start* ($V_2 = 1,0$ pu, $\theta_2 = 0^\circ$), a tabela 3.1 mostra a convergência do fluxo de carga com otimização de passo. Nota-se que o processo iterativo converge para um ponto de singularidade do Jacobiano na fronteira Σ (verificável com (3.4)), enquanto o multiplicador ótimo aproxima-se de zero. O valor em pu de $f(x^*) = (3,4895 + j1,2824)$ é obtido do somatório de $S = (4,00 + j2,00)$ com o *mismatch* final. Porém, o valor de $f(x^*)$ não é igual ao de S^m (mostrado na figura 3.5) como sendo igual a $(-3,4950 - j1,2790)$ e não é único, sendo dependente do valor inicial arbitrado para a barra 2.

Iteração	Tensão na barra 2 (pu)		Mismatch da barra 2		Multiplicador Ótimo μ
	V_2	θ_2	MW	MVar	
0	1,0000	0,00°	-400,00	-200,00	1,1512
1	0,7697	-26,38°	-57,92	-102,95	0,4762
2	0,6216	-34,15°	-51,09	-71,95	0,0038
3	0,6099	-34,90°	-51,05	-71,76	0,0000

Tabela 3.1: Convergência do fluxo de carga para $P_2 = 400$ MW, $Q_2 = 200$ MVar.

Se a superfície Σ fosse plana, o valor desconhecido de S^m poderia ser determinado diretamente dos valores conhecidos de S e $f(x^*)$, notando que a direção do autovetor esquerdo de $J(x^*)$, w , é paralelo a w^m . O valor de $(S - S^m)$ é, então, a projeção do vetor $(f(x^*) - S)$ sobre a direção normalizada do autovetor esquerdo w^m , ou:

$$S^m = S + [(f(x^*) - S)^T \bullet w] \cdot w \quad (3.19)$$

Para um sistema real, onde Σ não é plana, a equação (3.19) é, portanto, somente uma aproximação. O quanto ela se aproxima do verdadeiro valor de S^m depende da curvatura de Σ . As observações anteriores sugerem o seguinte algoritmo iterativo para encontrar os valores de x^m e, conseqüentemente, S^m :

- (1) Ajustar $S^0 = S$ e $i = 0$;
- (2) Resolver o problema de fluxo de carga usando o método de Newton com otimização de passo (FCOP). Considerar que a solução seja x^{i*} . Se o maior componente do *mismatch* $\|f(x^{i*}) - S^i\|_\infty$ for menor do que uma tolerância ξ , então pare, sendo $S^m = f(x^{i*})$. Caso contrário, prosseguir;
- (3) Inicializar a variável que guarda o valor do maior *mismatch* ($mismax = \|f(x^{i*}) - S^i\|_\infty$);
- (4) Inicializar a variável $\alpha = 1,0$;
- (5) Calcular o autovetor esquerdo normalizado w^{i*} associado com o autovalor zero de $J(x^{i*})$;
- (6) Fazer $S^{i+1} = S^i - \alpha \cdot \beta \cdot w^{i*}$, onde $\beta = [(f(x^{i*}) - S^i)^T \bullet w^{i*}]$;

- (7) Executar o FCOP. Uma das seguintes situações podem ocorrer:
- (7.a) se o processo iterativo convergir (S^{i+1} na região factível), atualizar $\alpha = \alpha \cdot 0,9$ e corrigir a demanda de potência, fazendo $S^{i+1} = S^{i+1} + (1,0 - \alpha) \cdot \beta \cdot w^{i*}$, onde $\beta = [(f(x^{i*}) - S^i)^T \bullet w^{i*}]$. Repetir o passo (7);
 - (7.b) se o processo iterativo não convergir (S^{i+1} na região infactível) e $\|f(x^{i+1*}) - S^{i+1}\|_\infty$ for menor do que uma tolerância ξ , calcular o autovetor esquerdo normalizado w^{i*} . Se $\|f(x^{i+1*}) - S^{i+1}\|_\infty$ for menor do que $mismax$, atualizar $mismax = \|f(x^{i*}) - S^i\|_\infty$ e ir para o passo (9). Caso contrário, prosseguir.
- (8) Fazer $S^{i+1} = S^i + \alpha \cdot \beta \cdot w^{i*}$, onde $\beta = [(f(x^{i*}) - S^i)^T \bullet w^{i*}]$. Executar o FCOP e considerar $S^m = f(x^{i+1*})$;
- (9) Fazer $i = i + 1$ e retornar ao passo (2).

Com relação ao algoritmo apresentado seguem alguns comentários gerais.

- A tolerância ξ pode ser maior que a tolerância de convergência do fluxo de carga (ε), por exemplo $\xi = 10 \cdot \varepsilon$.
- A atualização e verificação da variável $mismax$ teve por objetivo evitar que seja considerada uma solução de pior qualidade que a solução da iteração anterior.
- O algoritmo faz com que S^* se aproxime de S^m pela região infactível. Sempre que a atualização de S resulte em convergência, volta-se um pouco até que a região de infactibilidade seja novamente atingida. Por isso α é atualizado no passo (7.a).
- O autovetor esquerdo normalizado w^{i*} é obtido utilizando-se do método da potência inversa que será apresentado a seguir.

A motivação para este algoritmo é derivada do método apresentado em [27], onde uma medida similar para o problema de fluxo de carga factível foi determinada. O passo (2) do algoritmo corresponde à solução do fluxo de carga. Se o sistema possuir um ponto de operação factível a tolerância de convergência do fluxo de carga seria imediatamente satisfeita e o algoritmo terminaria com um esforço computacional equivalente a uma única solução do fluxo de carga. Para os casos infactíveis o algoritmo funciona iterativamente, obtendo de forma sequencial as melhores aproximações para o ponto mais próximo S^m em Σ com a finalidade de resolver o fluxo de carga. Finalmente, um ponto S^i que satisfaz uma certa tolerância de convergência é encontrado, pois está próximo o bastante da fronteira Σ . O autovetor esquerdo associado ao autovalor zero de $J(x^{i*})$ pode ser calculado utilizando-se do *método da potência inversa*. A complexidade computacional é equivalente à fatoração, uma única vez, da matriz Jacobiana e algumas substituições *forward/backward*. A dificuldade de usar o método da potência inversa com $J(x^{i*})$ singular pode ser superada adicionando-se um valor constante pequeno aos elementos da diagonal de $J(x^{i*})$; com estas mudanças o autovalor passa a ser não-nulo, mas o autovetor correspondente tem a mesma direção [35]. O algoritmo do método da potência inversa (*inverse iteration* ou *inverse power method*) é:

- (1) Calcular $J(x^{i*})' = J(x^{i*}) + r \cdot I$, onde r é um número pequeno, I é a matriz identidade;
- (2) Inicializar $i = 1$;
- (3) Escolher estimativa inicial para o autovetor esquerdo w^i ;
- (4) Calcular $u^i = [J(x^{i*})']^{-1} \cdot w^i$;
- (5) Atualizar $w^{i+1} = u^i / \|u^i\|_2$;
- (6) Se $\|w^{i+1} - w^i\|_2 < \epsilon$, parar. Caso contrário, siga;
- (7) Incrementar contador de iterações $i = i + 1$ e voltar ao passo (4).

As seguintes observações podem ser feitas:

- O autovetor à esquerda de $J(x^{i*})$ é igual ao autovetor à direita de $[J(x^{i*})]'^T$ para o mesmo autovalor λ .
- O valor de $\|u^i\|$ deve ser grande. Se for muito pequeno inicialmente, assumir que a escolha inicial de w^i foi ruim.

Utilizando-se da demanda definida para o ponto **c** da figura 3.4 (rede de duas barras e um ramo, da figura 3.5), segue o desenvolvimento completo que permite encontrar o valor de x^m e, conseqüentemente, S^m .

- Iteração 0:

- (1) $S^0 = (4,0 + j2,0)$ pu (na base de 100 MVA) e $i = 0$;
- (2) Executar o FCOP (com $\epsilon = 10^{-4}$ e $\xi = 10^{-3}$):

$$\Delta S^0 = \begin{bmatrix} -0,5105 \\ -0,7176 \end{bmatrix} \quad (\text{melhor solução})$$

Como $\|f(x^{0*}) - S^0\|_\infty > \xi$, prosseguir;

- (3) $mismax = \|f(x^{0*}) - S^0\|_\infty = 0,7176$;
- (4) $\alpha = 1,0$;
- (5) Autovetor esquerdo normalizado obtido pelo método da potência inversa:

$$w^{0*} = \begin{bmatrix} -0,5724 \\ -0,8200 \end{bmatrix}$$

(6) $\beta = [\Delta S^0 \bullet w^{0*}] = 0,8807$. Correção da demanda $\rightarrow S^1 = S^0 - \alpha \cdot \beta \cdot w^{0*}$:

$$S^1 = \begin{bmatrix} 3,4959 \\ 1,2778 \end{bmatrix}$$

(7) Executar o FCOP (com $\varepsilon = 10^{-4}$ e $\xi = 10^{-3}$):

$$\Delta S^1 = \begin{bmatrix} 2,28 \cdot 10^{-6} \\ -6,05 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix} \quad (\text{convergiu})$$

Como $\|f(x^{1*}) - S^1\|_\infty < \varepsilon$, o processo iterativo convergiu (S^1 na região factível). Atualizar $\alpha = \alpha \cdot 0,9$ e corrigir a demanda de potência $\rightarrow S^1 = S^1 + (1,0 - \alpha) \cdot \beta \cdot w^{0*}$:

$$S^1 = \begin{bmatrix} 3,5463 \\ 1,3501 \end{bmatrix}$$

Executar o FCOP (com $\varepsilon = 10^{-4}$ e $\xi = 10^{-3}$):

$$\Delta S^1 = \begin{bmatrix} -0,0504 \\ -0,0722 \end{bmatrix} \quad (\text{melhor solução})$$

Como $\|f(x^{1*}) - S^1\|_\infty > \xi$, prosseguir. Porém, deve-se verificar se a solução encontrada é melhor ou pior que a solução anterior $\Rightarrow \|f(x^{1*}) - S^1\|_\infty < \text{mismax} \Rightarrow 0,0722 < 0,7176$. Atualizar mismax e ir para o passo (9) $\Rightarrow \text{mismax} = \|f(x^{1*}) - S^1\|_\infty = 0,0722$;

(9) $i = 1$ e retornar ao passo (4);

• Iteração 1:

(4) $\alpha = 1,0$;

(5) Autovetor esquerdo normalizado obtido pelo método da potência inversa:

$$w^{1*} = \begin{bmatrix} 0,5731 \\ 0,8195 \end{bmatrix}$$

(6) $\beta = [\Delta S^1 \bullet w^{1*}] = -0,0881$. Correção da demanda $\rightarrow S^2 = S^1 - \alpha \cdot \beta \cdot w^{1*}$:

$$S^2 = \begin{bmatrix} 3,4959 \\ 1,2779 \end{bmatrix}$$

(7) Executar o FCOP (com $\varepsilon = 10^{-4}$ e $\xi = 10^{-3}$):

$$\Delta S^2 = \begin{bmatrix} 7,09 \cdot 10^{-5} \\ -4,96 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix} \quad (\text{convergiu})$$

Como $\|f(x^{2*}) - S^2\|_\infty < \varepsilon$, o processo iterativo convergiu (S^2 na região factível). Atualizar $\alpha = \alpha \cdot 0,9$ e corrigir a demanda de potência $\rightarrow S^2 = S^2 + (1,0 - \alpha) \cdot \beta \cdot w^{1*}$:

$$S^2 = \begin{bmatrix} 3,5009 \\ 1,2851 \end{bmatrix}$$

Executar o FCOP (com $\varepsilon = 10^{-4}$ e $\xi = 10^{-3}$):

$$\Delta S^2 = \begin{bmatrix} -0,0049 \\ -0,0073 \end{bmatrix} \quad (\text{melhor solução})$$

Como $\|f(x^{2*}) - S^2\|_\infty > \xi$, prosseguir. Porém, deve-se verificar se a solução encontrada é melhor ou pior que a solução anterior $\Rightarrow \|f(x^{2*}) - S^2\|_\infty < \text{mismax} \Rightarrow 0,0073 < 0,0722$. Atualizar mismax e ir para o passo (9) $\Rightarrow \text{mismax} = \|f(x^{2*}) - S^2\|_\infty = 0,0073$;

(9) $i = 2$ e retornar ao passo (4);

• Iteração 2:

(4) $\alpha = 1,0$;

(5) Autovetor esquerdo normalizado obtido pelo método da potência inversa:

$$w^{2*} = \begin{bmatrix} -0,5730 \\ -0,8195 \end{bmatrix}$$

(6) $\beta = [\Delta S^2 \bullet w^{2*}] = 0,0089$. Correção da demanda $\rightarrow S^3 = S^2 - \alpha \cdot \beta \cdot w^{2*}$:

$$S^3 = \begin{bmatrix} 3,4959 \\ 1,2779 \end{bmatrix}$$

(7) Executar o FCOP (com $\varepsilon = 10^{-4}$ e $\xi = 10^{-3}$):

$$\Delta S^3 = \begin{bmatrix} 6,97 \cdot 10^{-5} \\ -4,87 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix} \quad (\text{convergiu})$$

Como $\|f(x^{3*}) - S^3\|_\infty < \varepsilon$, o processo iterativo convergiu (S^3 na região factível). Atualizar $\alpha = \alpha \cdot 0,9$ e corrigir a demanda de potência $\rightarrow S^3 = S^3 + (1,0 - \alpha) \cdot \beta \cdot w^{2*}$:

$$S^3 = \begin{bmatrix} 3,4964 \\ 1,2786 \end{bmatrix}$$

Executar o FCOP (com $\varepsilon = 10^{-4}$ e $\xi = 10^{-3}$):

$$\Delta S^3 = \begin{bmatrix} -0,0004 \\ -0,0008 \end{bmatrix} \quad (\text{melhor solução})$$

Como $\varepsilon < \|f(x^{3*}) - S^3\|_\infty < \xi$, calcular o autovetor esquerdo normalizado.

$$w^{2*} = \begin{bmatrix} -0,5730 \\ -0,8195 \end{bmatrix}$$

(8) Fazer $S^3 = S^2 + \alpha \cdot \beta \cdot w^{2*}$:

$$S^3 = \begin{bmatrix} 3,5009 \\ 1,2851 \end{bmatrix} + 0,9 \cdot 0,0089 \cdot \begin{bmatrix} -0,5730 \\ -0,8195 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,4963 \\ 1,2785 \end{bmatrix}$$

Executar o FCOP e considerar $S^m = f(x^{3*})$.

$$S^m = \begin{bmatrix} 3,4959 \\ 1,2779 \end{bmatrix}$$

Logo, a *melhor solução possível* para as equações do fluxo de carga é:

$$x^m = (0,6101 \angle -34,96^\circ) \text{ pu} \quad ; \quad S^m = \begin{bmatrix} 349,59 \\ 127,79 \end{bmatrix} \text{ MVA}$$

O *grau de inactibilidade* para esta situação é calculado utilizando a equação (3.14):

$$\mathcal{D} = \sqrt{(0,5041)^2 + (0,7221)^2} \Rightarrow \mathcal{D} = 0,8807$$

Capítulo 4

Determinação das Ações de Controle Corretivo para Retornar à Factibilidade

Foi apresentado no capítulo anterior um método que permite quantificar o *grau de infactibilidade* (GI) para uma determinada situação de carregamento que leva a rede para a região infactível. Neste capítulo, serão apresentados dois métodos que permitirão a definição das ações de controle a serem tomadas para que o sistema volte a operar na região factível. São eles: (a) o método das Proporcionalidades (MP) e (b) o método baseado em Programação Não-Linear (MPNL). No primeiro método a determinação das ações de controle é baseada em uma grandeza chamada *coeficiente de eficiência* (EC) que depende da disponibilidade dos controles e de suas sensibilidades em relação a GI. No segundo método, um problema de PNL é resolvido baseando-se na minimização das variações dos controles que participarão do processo de retorno à região factível, tendo como restrições as disponibilidades dos controles. A identificação dos controles será obtida de duas formas a saber: (a) na **versão A** do programa todos os controles disponíveis no sistema são identificados e (b) na **versão B** os controles mais eficientes são determinados baseando-se na ideia da *localização adaptativa* dos controles que consiste em buscar pelos controles disponíveis no sistema respeitando critérios pré-estabelecidos, que dependerá de características particulares do problema. Neste caso, os controles mais próximos das barras que contribuem mais para a situação de infactibilidade serão analisados primeiro.

4.1 Análise da Sensibilidade do GI em relação às variáveis de controle

Uma vez determinado o GI que caracteriza de maneira quantitativa a infactibilidade de um problema, o próximo passo é determinar a melhor maneira de definir os controles que factibilizem o problema. Primeiramente, será mostrado como calcular as sensibilidades do GI em relação às variáveis de controle disponíveis. Como já foi mencionado, o autovetor esquerdo associado com o autovalor zero de $J(x^m)$ define a direção “ótima” no espaço de parâmetros para voltar à região factível, no sentido de que a menor

distância entre o ponto de operação inactível e Σ ocorre nesta direção. No entanto, do ponto de vista prático, esta direção não faz muito sentido pois, comumente, estão envolvidas injeções de potência em um grande número de barras do sistema e, quando foi determinada, não foi levado em consideração custo ou disponibilidade desses controles.

Definindo u como sendo o vetor das variáveis de controle e \mathcal{D} representando o grau de inactibilidade, utilizando-se o resultado de [28], as sensibilidades de \mathcal{D} em relação a u são dadas por:

$$\mathcal{D}_u = \frac{\partial}{\partial u} \mathcal{D} = -w^m \cdot [f(x^m) - S]_u \quad (4.1)$$

onde $[f(x^m) - S]_u$ é o vetor das derivadas das equações de fluxo de carga com relação aos elementos do vetor u , e w^m é o autovetor esquerdo normalizado associado com o autovalor zero de $J(x^m)$. Devido à forma como w^m é calculado, deve-se usar w^m ou $-w^m$ na equação (4.1) de forma que a variação do controle leve efetivamente a uma diminuição de \mathcal{D} , isto é, o sinal de w^m é escolhido de tal forma que $(S - S^m) \bullet w^m > 0$. Os valores de \mathcal{D}_u são uma aproximação linear do efeito que os controles têm sobre \mathcal{D} . Desconsiderando as não-linearidades, as mudanças necessárias em um controle u_i para que ele seja utilizado no retorno à factibilidade, é dado por $\frac{-\mathcal{D}}{\mathcal{D}_{u_i}}$. Para o caso de controle por injeções de potência (i.e., elementos de S), para o qual $[f(x^m) - S]_{u_i}$ (a coluna da matriz Jacobiana correspondente a u_i) é constante, a exatidão da linearização depende tanto da distância \mathcal{D} (de S a Σ), quanto da curvatura de Σ nas vizinhanças de S^m . O erro está na diferença entre Σ e a aproximação do seu plano tangente em S^m . Para outros controles a exatidão da linearização também depende de quanto $[f(x^m) - S]$ está aproximado pela linearização do Jacobiano.

A seguir será apresentado o procedimento adotado neste trabalho para calcular as sensibilidades do GI (ou \mathcal{D}) em relação às variáveis de controle disponíveis, consideradas aqui como sendo: banco de capacitores, *tap* de transformadores e rejeição de carga.

4.1.1 Determinação dos elementos do vetor $[f(x^m) - S]_u$

Antes de determinar a derivada das equações de fluxo de carga em relação às variáveis de controle há a necessidade de se recordar alguns conceitos fundamentais. Os elementos da matriz admitância nodal $Y = (G + jB)$ são [29]:

$$\begin{aligned} Y_{km} &= -a_{km}^{-1} e^{-j\varphi_{km}} y_{km} \\ Y_{mk} &= -a_{km}^{-1} e^{j\varphi_{km}} y_{km} \\ Y_{kk} &= j b_k^{sh} + \sum_{m \in \Omega_k} (j b_{km}^{sh} + a_{km}^{-2} y_{km}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

em que:

y_{km} – admitância série do ramo km .

b_{km}^{sh} – carregamento *shunt* do ramo km .

- b_k^{sh} – elemento *shunt* conectado à barra k .
 a_{km} – posição do *tap* fora do nominal de transformador em fase. Se o ramo km for uma linha de transmissão, $a_{km} = 1$.
 φ_{km} – ângulo correspondente à posição do *tap* fora do nominal de transformador defasador. Se o ramo km for uma linha de transmissão, $\varphi_{km} = 0$.
 Ω_k – conjunto das barras diretamente conectadas à barra k .

No conjunto de equações (4.2) considera-se que os transformadores sejam modelados como um transformador ideal de relação de transformação $a_{km} : 1$ (ou $e^{j\varphi_{km}} : 1$, no caso de transformador defasador) conectado à barra k , em série com a admitância y_{km} , conectada à barra m (modelo recomendado pelo IEEE [30]).

Os fluxos de potência ativa e reativa em linhas de transmissão, transformadores em fase, defasadores puros e defasadores, obedecem às expressões gerais:

$$\begin{aligned}
P_{km} &= (a_{km}^{-1}V_k)^2 g_{km} - (a_{km}^{-1}V_k)V_m g_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) - (a_{km}^{-1}V_k)V_m b_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km}) \\
Q_{km} &= -(a_{km}^{-1}V_k)^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + (a_{km}^{-1}V_k)V_m b_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) - (a_{km}^{-1}V_k)V_m g_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km}) \\
P_{mk} &= g_{km}V_m^2 - (a_{km}^{-1}V_k)V_m [g_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) - b_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km})] \\
Q_{mk} &= -(b_{km} + b_{km}^{sh})V_m^2 + (a_{km}^{-1}V_k)V_m [g_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km}) + b_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km})]
\end{aligned}$$

No caso de linhas de transmissão, $a_{km} = 1$ e $\varphi_{km} = 0$. Para transformadores em fase, $b_{km}^{sh} = 0$ e $\varphi_{km} = 0$. Para os defasadores puros, $b_{km}^{sh} = 0$ e $a_{km} = 1$. Finalmente, para os defasadores, $b_{km}^{sh} = 0$. Neste trabalho será utilizado o modelo de transformador em fase, com *tap* $t = 1/a_{km}$. As equações de balanço de potência para uma dada barra k do sistema são dadas por:

$$\begin{aligned}
p_k(x) &= P_k^{calc} - P_k^{esp} = 0 \\
&= [V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{m \in \Omega} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km})] - P_k^{esp} = 0
\end{aligned} \tag{4.3}$$

$$\begin{aligned}
q_k(x) &= Q_k^{calc} - Q_k^{esp} = 0 \\
&= [-V_k^2 B_{kk} + V_k \sum_{m \in \Omega} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km})] - Q_k^{esp} = 0
\end{aligned}$$

em que

$$\begin{aligned}
B_{kk} &= b_k^{sh} + \sum_{m \in \Omega_k} (b_{km}^{sh} + a_{km}^{-2} b_{km}) \\
b_k^{sh} &= \omega C_k = 2\pi f C_k
\end{aligned}$$

sendo C_k o valor do capacitor. Com auxílio da figura 4.1, nota-se que:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km} \implies P_k = P_{km} + \sum_{\substack{j \in \Omega_k \\ j \neq m}} P_{kj}$$

(raciocínio análogo vale para a potência reativa Q_k). Portanto, as equações (4.3) também podem ser dadas por:

$$\begin{aligned} p_k(x) &= P_k^{calc} - P_k^{esp} = (P_{km} + \sum_{\substack{j \in \Omega_k \\ j \neq m}} P_{kj}) - P_k^{esp} \\ q_k(x) &= Q_k^{calc} - Q_k^{esp} = (Q_{km} + \sum_{\substack{j \in \Omega_k \\ j \neq m}} Q_{kj}) - Q_k^{esp} \end{aligned} \quad (4.4)$$

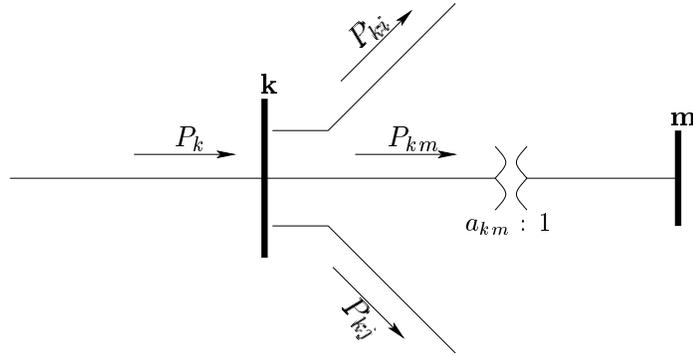


Figura 4.1: Fluxos de potência referentes à barra k .

A representação do vetor $[f(x^m) - S]_u$ para uma rede de n barras e m controles é dada por:

$$[f(x^m) - S]_u = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial u_1} p_1(x) & \dots & \frac{\partial}{\partial u_m} p_1(x) \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial}{\partial u_1} p_n(x) & \dots & \frac{\partial}{\partial u_m} p_n(x) \\ \frac{\partial}{\partial u_1} q_1(x) & \dots & \frac{\partial}{\partial u_m} q_1(x) \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial}{\partial u_1} q_n(x) & \dots & \frac{\partial}{\partial u_m} q_n(x) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Para o caso do controle ser um banco de capacitores b_k^{sh} :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial b_k^{sh}} q_k(x) &= -V_k^2 \\ \frac{\partial}{\partial b_k^{sh}} q_j(x) &= 0 \quad j = 1, \dots, n ; j \neq k \\ \frac{\partial}{\partial b_k^{sh}} p_j(x) &= 0 \quad j = 1, \dots, n \end{aligned}$$

Para o caso do controle ser o corte de potência ativa P_k^{esp} :

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial P_k^{esp}} p_k(x) &= -1 \\ \frac{\partial}{\partial P_k^{esp}} p_j(x) &= 0 \quad j = 1, \dots, n ; j \neq k \\ \frac{\partial}{\partial P_k^{esp}} q_j(x) &= 0 \quad j = 1, \dots, n\end{aligned}$$

Para o caso do controle ser o corte de potência reativa Q_k^{esp} :

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial Q_k^{esp}} q_k(x) &= -1 \\ \frac{\partial}{\partial Q_k^{esp}} q_j(x) &= 0 \quad j = 1, \dots, n ; j \neq k \\ \frac{\partial}{\partial Q_k^{esp}} p_j(x) &= 0 \quad j = 1, \dots, n\end{aligned}$$

Para o caso do controle ser o *tap* de um transformador a_{km} , a obtenção dos elementos da derivada é mais complexa e, portanto, será apresentada com maiores detalhes. Considerando que o transformador não é defasador, tem-se:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial a_{km}} p_k(x) &= \frac{\partial}{\partial a_{km}} P_{km} = \frac{1}{a_{km}} \cdot \left[-2 \cdot \left(\frac{V_k}{a_{km}} \right)^2 g_{km} + \frac{1}{a_{km}} V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} + \frac{1}{a_{km}} V_k V_m b_{km} \sen \theta_{km} \right] \\ &= -\frac{1}{a_{km}} \cdot \left\{ \left[\left(\frac{V_k}{a_{km}} \right)^2 + \left(\frac{V_k}{a_{km}} \right)^2 \right] \cdot g_{km} - \frac{1}{a_{km}} V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} - \frac{1}{a_{km}} V_k V_m b_{km} \sen \theta_{km} \right\}\end{aligned}$$

Portanto,

$$\frac{\partial}{\partial a_{km}} p_k(x) = -\frac{1}{a_{km}} \cdot \left[\left(\frac{V_k}{a_{km}} \right)^2 \cdot g_{km} + P_{km} \right]$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial a_{km}} q_k(x) &= \frac{\partial}{\partial a_{km}} Q_{km} = \frac{1}{a_{km}} \cdot \left[2 \cdot \left(\frac{V_k}{a_{km}} \right)^2 \cdot b_{km} - \frac{1}{a_{km}} V_k V_m b_{km} \cos \theta_{km} + \frac{1}{a_{km}} V_k V_m g_{km} \sen \theta_{km} \right] \\ &= -\frac{1}{a_{km}} \cdot \left\{ - \left[\left(\frac{V_k}{a_{km}} \right)^2 - \left(\frac{V_k}{a_{km}} \right)^2 \right] \cdot b_{km} + \frac{1}{a_{km}} V_k V_m b_{km} \cos \theta_{km} - \frac{1}{a_{km}} V_k V_m g_{km} \sen \theta_{km} \right\}\end{aligned}$$

Portanto,

$$\frac{\partial}{\partial a_{km}} q_k(x) = -\frac{1}{a_{km}} \cdot \left[- \left(\frac{V_k}{a_{km}} \right)^2 \cdot b_{km} + Q_{km} \right]$$

$$\frac{\partial}{\partial a_{km}} p_m(x) = \frac{\partial}{\partial a_{km}} P_{mk} = \frac{1}{a_{km}} \cdot \left[\left(\frac{V_k}{a_{km}} \right) V_m g_{km} \cos \theta_{km} - \left(\frac{V_k}{a_{km}} \right) V_m b_{km} \sin \theta_{km} \right]$$

Inserindo a parcela $(g_{km} V_m^2 - g_{km} V_m^2)$, tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial a_{km}} p_m(x) = \frac{1}{a_{km}} \cdot \left[\underbrace{g_{km} V_m^2 - g_{km} V_m^2 + \left(\frac{V_k}{a_{km}} \right) V_m g_{km} \cos \theta_{km} - \left(\frac{V_k}{a_{km}} \right) V_m b_{km} \sin \theta_{km}}_{-P_{mk}} \right]$$

Portanto,

$$\frac{\partial}{\partial a_{km}} p_m(x) = \frac{1}{a_{km}} \cdot [g_{km} V_m^2 - P_{mk}]$$

$$\frac{\partial}{\partial a_{km}} q_m(x) = \frac{\partial}{\partial a_{km}} Q_{mk} = \frac{1}{a_{km}} \cdot \left[- \left(\frac{V_k}{a_{km}} \right) V_m g_{km} \sin \theta_{km} - \left(\frac{V_k}{a_{km}} \right) V_m b_{km} \cos \theta_{km} \right]$$

Inserindo a parcela $(-b_{km} V_m^2 + b_{km} V_m^2)$, tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial a_{km}} q_m(x) = \frac{1}{a_{km}} \cdot \left[\underbrace{-b_{km} V_m^2 + b_{km} V_m^2 - \left(\frac{V_k}{a_{km}} \right) V_m g_{km} \sin \theta_{km} - \left(\frac{V_k}{a_{km}} \right) V_m b_{km} \cos \theta_{km}}_{Q_{mk}} \right]$$

Portanto,

$$\frac{\partial}{\partial a_{km}} q_m(x) = \frac{1}{a_{km}} \cdot [-b_{km} V_m^2 + Q_{mk}]$$

Além disso:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial a_{km}} p_j(x) &= 0 & j = 1, \dots, n; j \neq k; j \neq m \\ \frac{\partial}{\partial a_{km}} q_j(x) &= 0 & j = 1, \dots, n; j \neq k; j \neq m \end{aligned}$$

4.1.2 Cálculo dos componentes do vetor \mathcal{D}_u

Uma representação mais adequada da equação (4.1) é mostrada abaixo:

$$\mathcal{D}_u = - \begin{bmatrix} w_P^m & w_Q^m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_u \\ \Delta Q_u \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

O vetor \mathcal{D}_u tem dimensão $[1 \times nc]$, em que nc é o número de controles disponíveis. O autovetor tem dimensão $[1 \times 2nb]$, em que nb é o número de barras da rede. Ele pode ser dividido em elementos relativos à potência ativa w_P^m e reativa w_Q^m . O vetor de *mismatches* tem dimensão $[2nb \times 1]$ e também pode ser dividido segundo os elementos relativos à potência ativa e reativa.

Com base na equação (4.6) será mostrado o procedimento adotado neste trabalho para o cálculo das sensibilidades de \mathcal{D} em relação às variáveis de controle já mencionadas (banco de capacitores, *tap* de transformadores e rejeição de carga). Da equação (4.6) e considerando como controles o corte de carga na barra k , tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial u} \mathcal{D} = - \left[\dots \quad w_k^P \quad w_k^Q \quad \dots \right] \cdot \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \\ \dots & \frac{\partial}{\partial P_k} p_k(x) & \frac{\partial}{\partial Q_k} p_k(x) & \dots \\ \dots & \frac{\partial}{\partial P_k} q_k(x) & \frac{\partial}{\partial Q_k} q_k(x) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \end{bmatrix}$$

Logo,

$$\frac{\partial}{\partial P_k} \mathcal{D} = - \left(w_k^P \cdot \frac{\partial}{\partial P_k} p_k(x) + w_k^Q \cdot \frac{\partial}{\partial P_k} q_k(x) \right) = -w_k^P \cdot (-1) - w_k^Q \cdot 0 \rightarrow \frac{\partial}{\partial P_k} \mathcal{D} = w_k^P \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial Q_k} \mathcal{D} = - \left(w_k^P \cdot \frac{\partial}{\partial Q_k} p_k(x) + w_k^Q \cdot \frac{\partial}{\partial Q_k} q_k(x) \right) = -w_k^P \cdot 0 - w_k^Q \cdot (-1) \rightarrow \frac{\partial}{\partial Q_k} \mathcal{D} = w_k^Q$$

Como a variação de carga depende tanto da potência ativa P quanto da potência reativa Q (fator de potência mantido constante), pode-se combinar as expressões acima com a finalidade de explicitar a sensibilidade de \mathcal{D} em função da variação das injeções de potência ativa. Então, para uma dada barra k , tem-se:

$$\text{tg } \alpha_k = \frac{Q_k^{esp}}{P_k^{esp}}$$

em que α_k é o ângulo do fator de potência. Linearizando a equação acima, tem-se:

$$\text{tg } \alpha_k = \frac{\Delta Q_k^{esp}}{\Delta P_k^{esp}} \rightarrow \Delta Q_k = \Delta P_k \cdot \text{tg } \alpha_k \quad (4.8)$$

Das equações (4.7), têm-se:

$$\Delta \mathcal{D} = w_k^P \cdot \Delta P_k \quad \text{e} \quad \Delta \mathcal{D} = w_k^Q \cdot \Delta Q_k \quad (4.9)$$

Substituindo convenientemente (4.8) em (4.9),

$$\Delta \mathcal{D} = w_k^Q \cdot \text{tg } \alpha_k \cdot \Delta P_k$$

Então:

$$\begin{aligned}\Delta \mathcal{D} &= \frac{\partial}{\partial P_k} \mathcal{D} \cdot \Delta P_k + \frac{\partial}{\partial Q_k} \mathcal{D} \cdot \Delta Q_k = w_k^P \cdot \Delta P_k + w_k^Q \cdot \Delta Q_k \\ \Delta \mathcal{D} &= \left[w_k^P + w_k^Q \cdot \text{tg } \alpha_k \right] \cdot \Delta P_k\end{aligned}$$

Portanto, a sensibilidade da distância \mathcal{D} em relação às injeções de potência ativa e considerando fator de potência constante, é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial P_k} \mathcal{D} = w_k^P + w_k^Q \cdot \text{tg } \alpha_k \quad (4.10)$$

Caso o controle seja um banco de capacitores na barra k :

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial b_k^{sh}} \mathcal{D} &= - \left(w_k^P \cdot \frac{\partial}{\partial b_k^{sh}} p_k(x) + w_k^Q \cdot \frac{\partial}{\partial b_k^{sh}} q_k(x) \right) \\ &= -w_k^P \cdot 0 - w_k^Q \cdot (-V_k^2)\end{aligned}$$

Portanto, a sensibilidade da distância \mathcal{D} em relação às injeções de potência reativa (consideradas neste trabalho como provenientes de banco de capacitores), é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial b_k^{sh}} \mathcal{D} = w_k^Q \cdot V_k^2 \quad (4.11)$$

Recorrendo a uma variação de (4.6) para se representar mais adequadamente o cálculo da sensibilidade de \mathcal{D} em relação ao *tap* de um ramo $k - m$, teremos:

$$\frac{\partial}{\partial a_{km}} \mathcal{D} = - \left[\dots \quad w_k^P \quad w_k^Q \quad w_m^P \quad w_m^Q \quad \dots \right] \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \frac{\partial}{\partial a_{km}} p_k(x) \\ \frac{\partial}{\partial a_{km}} q_k(x) \\ \frac{\partial}{\partial a_{km}} p_m(x) \\ \frac{\partial}{\partial a_{km}} q_m(x) \\ \vdots \end{bmatrix}$$

Efetuando-se o produto, teremos:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial a_{km}} \mathcal{D} &= - \left[w_k^P \cdot \frac{\partial}{\partial a_{km}} p_k(x) + w_k^Q \cdot \frac{\partial}{\partial a_{km}} q_k(x) + w_m^P \cdot \frac{\partial}{\partial a_{km}} p_m(x) + w_m^Q \cdot \frac{\partial}{\partial a_{km}} q_m(x) \right] \\ &= \frac{w_k^P}{a_{km}} \cdot \left[\left(\frac{V_k}{a_{km}} \right)^2 \cdot g_{km} + P_{km} \right] + \frac{w_k^Q}{a_{km}} \cdot \left[- \left(\frac{V_k}{a_{km}} \right)^2 \cdot b_{km} + Q_{km} \right] - \frac{w_m^P}{a_{km}} \cdot \left[g_{km} V_m^2 - P_{mk} \right] \\ &\quad - \frac{w_m^Q}{a_{km}} \cdot \left[-b_{km} V_m^2 + Q_{mk} \right]\end{aligned}$$

Portanto, a sensibilidade da distância \mathcal{D} em relação ao *tap* (a_{km}), é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial a_{km}} \mathcal{D} = \frac{1}{a_{km}} \cdot \left\{ w_k^P \cdot \left[\left(\frac{V_k}{a_{km}} \right)^2 \cdot g_{km} + P_{km} \right] + w_k^Q \cdot \left[- \left(\frac{V_k}{a_{km}} \right)^2 \cdot b_{km} + Q_{km} \right] - w_m^P \cdot [g_{km} V_m^2 - P_{mk}] - w_m^Q \cdot [-b_{km} V_m^2 + Q_{mk}] \right\} \quad (4.12)$$

4.2 Definição das Estratégias de Controle Corretivo

O próximo passo após a determinação das sensibilidades do GI em relação às variáveis de controle u (\mathcal{D}_u), é saber como proceder na manipulação de tais informações. Com base nos valores das sensibilidades, pode-se saber, a priori, quais controles produzirão maior efeito sobre GI com o intuito de minimizá-lo e, em consequência disso, levar o ponto de operação S de volta à região factível. Além dos valores das sensibilidades deve-se, também, ter informações a respeito da disponibilidade dos controles. Por exemplo, se um banco de capacitores instalado em uma barra m é um dos controles disponíveis no sistema, o fato da sensibilidade do GI em relação a esse controle ser grande não garante que ele possa ser usado e levar o sistema à região factível. Há a necessidade de se conhecer qual é a disponibilidade de acréscimo de injeção de reativos no sistema utilizando-se daquele controle (existe a possibilidade de ele já estar funcionando no seu limite). A definição de quais controles serão utilizados é baseada no conceito do *coeficiente de eficiência* (EC) que foi utilizado em [6, 7]. O coeficiente de eficiência para um controle i é dado por:

$$EC_i = \mathcal{D}_{u_i} \cdot (u_i^{lim} - u_i^{atual}) \quad (4.13)$$

em que, u_i^{lim} é definido como o limite inferior ou superior do controle i , dependendo do sinal de \mathcal{D}_{u_i} e u_i^{atual} é o valor corrente do controle i . Vale salientar que o termo $(u_i^{lim} - u_i^{atual})$ representa a disponibilidade do controle.

Segue uma descrição do algoritmo implementado neste trabalho para restauração da factibilidade quando as condições de operação do sistema correspondem a um ponto S infactível no espaço de parâmetros.

- (1) Ajustar *loadsh* = ‘no’ (em que *loadsh* indica a utilização ou não do corte de carga).
- (2) Resolver as equações do fluxo de carga para S utilizando-se do método de Newton com otimização de passo. Se o processo de cálculo convergir, então S é um ponto de operação factível. Caso contrário, a otimização de passo fornece S^* , que é um ponto sobre Σ .
- (3) Calcular S^m e \mathcal{D} como apresentado no capítulo 2.
- (4) Identificar os controles disponíveis. Na **versão A** do programa, todos os controles disponíveis no sistema são identificados. Na **versão B** do programa, os controles mais eficazes são determinados com auxílio da *busca local*. O algoritmo da busca local (ou localização adaptativa) será apresentado em detalhes adiante. Se *loadsh* = ‘no’, somente chaveamento de capacitores e posições de *tap* de transformadores são considerados. Se *loadsh* = ‘yes’, corte de carga é adicionado à lista dos controles.

- (5) Calcular EC para todos os controles de acordo com o que foi apresentado neste capítulo. Um limiar α pode ser definido de tal forma que os controles com pequeno EC são descartados. Assumir nc como sendo o número de controles disponíveis.
- (6) Ordenar os controles em ordem decrescente em relação aos ECs.
- (7) Uma das seguintes situações será encontrada:
- (7.a) um número de controles j (onde $j < nc$) são encontrados tais que:

$$|EC_T| = \sum_{i=1}^j |EC_i| \geq \mathcal{D}$$

Neste caso, obter a participação de cada controle Δu_i , $i = 1, \dots, j$, utilizando o *método das proporcionalidades* (MP) ou o *método baseado em programação não-linear* (MPNL). Ambos os métodos serão descritos em detalhes adiante. Voltar ao passo (2).

- (7.b) *loadsh* = ‘no’, todos nc controles considerados e:

$$\beta \cdot \mathcal{D} \leq \sum_{i=1}^{nc} |EC_i| < \mathcal{D}$$

onde β é um limiar pré-definido. Ajustar todos os controles selecionados em seus respectivos limites (superior ou inferior, dependendo de suas sensibilidades), ajustar *loadsh* = ‘yes’ e voltar ao passo (2).

- (7.c) *loadsh* = ‘no’, todos nc controles considerados e:

$$\sum_{i=1}^{nc} |EC_i| < \beta \cdot \mathcal{D}$$

Ajustar *loadsh* = ‘yes’ e voltar ao passo (4).

- (7.d) *loadsh* = ‘yes’ e:

$$\sum_{i=1}^{nc} |EC_i| < \mathcal{D}$$

Redefinir os limites de corte de carga permitindo corte total de todas as cargas (incluindo as cargas prioritárias). Voltar ao passo (4).

Com relação ao algoritmo proposto anteriormente seguem alguns comentários gerais.

- O valor do limiar α depende das condições atuais do sistema. Ele pode ser definido automaticamente como uma porcentagem de \mathcal{D} . Por exemplo, se $\alpha = 0,1 \cdot \mathcal{D}$, os controles que contribuírem para uma diminuição de \mathcal{D} menor do que 10% serão descartados.

- Na situação (7.b) os controles selecionados não são capazes de restaurar a factibilidade, porém eles podem levar o sistema para as proximidades de Σ . Por exemplo, se $\beta = 0,9$, a distância entre o ponto de operação infactível e Σ pode ser reduzida de aproximadamente 90% e, neste caso, todos os controles selecionados são ajustados para seus respectivos limites. Cortes de carga adicionais serão necessários para restaurar a factibilidade, porém eles serão mínimos.
- A princípio sempre é possível restaurar a factibilidade dos sistemas, contanto que seja permitido corte de carga suficiente. Por essa razão, a situação (7.d) ocorre somente nos casos onde o corte de carga permitido é limitado. Por exemplo, o corte de carga de algumas cargas prioritárias pode estar bloqueado. Em (7.d) a prioridade dos limites de carga é redefinida. Então a factibilidade será efetuada através de *ações de controle emergenciais* que incluem cortes de cargas prioritárias.

Após o passo (4) do algoritmo proposto uma das alternativas para a seleção dos controles é a utilização da *busca local (versão B)*, que identifica os controles mais eficientes nas vizinhanças da(s) barra(s) crítica(s) do sistema. Abaixo, segue uma descrição do algoritmo para a busca local dos controles.

- (1) Colocar as barras ordenadas pelo maior valor (entre as posições ativa e reativa) do autovetor esquerdo w^m , em ordem decrescente¹.
- (2) Tomar a primeira barra da lista ordenada que será designada por i .
- (3) Fazer uma busca de controles na(s) vizinhança(s) da barra i e acrescentá-los à lista de controles. Parar a busca quando:
 - (3.a) os controles forem suficientes, isto é, $|EC_T| \geq \mathcal{D}$. Ir para o passo (7) do algoritmo anterior;
 - (3.b) duas vizinhanças consecutivas não apresentarem controles. Ir para o passo (4);
 - (3.c) o acréscimo de um controle n , ΔEC , das últimas duas vizinhanças for menor que um limiar γ pré-definido ($\gamma \cdot \mathcal{D} > \Delta EC$). Ir para o passo (4).
- (4) Tomar a próxima barra da lista ordenada (e que não tenha sido considerada até o momento) que será designada por j .
 - (4.a) Se $w_j^m \leq \gamma \cdot w_i^m$ (onde γ é um limiar pré-definido), ajustar $loadsh = 'yes'$ e utilizar somente os controles selecionados e cortes de carga selecionados. Ir para o passo (5).
 - (4.b) Se $w_j^m > \gamma \cdot w_i^m$, voltar ao passo (3).
- (5) Selecionar as barras que sofrerão corte de carga. Tomar as barras da lista que foram escolhidas. Uma das situações abaixo pode ser encontrada:
 - (5.a) se o corte de carga definido for suficiente, ir para o passo (7) do algoritmo anterior;
 - (5.b) se o corte de carga não for suficiente, expandir a área de corte de carga em uma vizinhança. Voltar ao passo (5.a).

¹O valor do autovetor esquerdo indica a direção de maior sensibilidade a variações nas injeções de potência ativa e reativa [31]

Comentários gerais sobre a busca local de controles.

- A idéia básica é procurar controles disponíveis na vizinhança do(s) ponto(s) da rede que resultou(aram) no problema de infactibilidade. Verificou-se que esses pontos resultam nos maiores *mismatches* de potência e, conseqüentemente, nos maiores elementos do autovetor esquerdo.
- A próxima barra da lista ordenada (passo 4) só será considerada de fato, caso o elemento correspondente do autovetor esquerdo tenha um valor razoável. Caso contrário, as sensibilidades também serão pequenas e os controles não serão efetivos.

4.2.1 Método das Proporcionalidades (MP)

Considerando j como sendo o número de controles selecionados, as mudanças nas variáveis de controle são calculadas por:

$$\Delta u_i = \frac{\mathcal{D}}{\mathcal{D}_{u_i}} \cdot \frac{EC_i}{|EC_T|} \quad i = 1, \dots, j \quad (4.14)$$

Elas dependem do *grau de infactibilidade*, do fator de sensibilidade e do “fator de participação” do controle i (EC_i/EC_T). Este procedimento garante que controles com maiores capacidades sofrerão maiores mudanças. Os controles que possuem variações através de valores discretos (como bancos de capacitores e *taps* de transformadores) devem ser arredondados para o próximo valor discreto.

4.2.2 Método baseado em Programação Não-Linear (MPNL)

Considerando j como sendo o número de controles selecionados, as mudanças nas variáveis de controle são calculadas por:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \quad \sum_{i=1}^j c_i \cdot \Delta u_i^2 \\ \text{s.a.} \quad \sum_{i=1}^j \mathcal{D}_{u_i} \cdot \Delta u_i \geq \mathcal{D} \\ \Delta u^{\min} \leq \Delta u \leq \Delta u^{\max} \end{array} \right.$$

onde c_i representa os custos associados aos controles. A formulação do MPNL é mais flexível do que a do MP, desde que os custos dos coeficientes possam ser definidos apropriadamente. Basicamente, este procedimento garante que controles com maiores sensibilidades sofrerão maiores mudanças. A observação feita na seção 4.2.1 com relação aos controles discretos também é válida neste caso. Neste trabalho a equação (4.15) é resolvida utilizando-se do pacote computacional de otimização MINOS [32], reconhecidamente de grande portabilidade [33] e sobretudo confiabilidade na precisão de seus resultados.

4.2.3 Caso Exemplo

Recorrendo novamente à rede exemplo da figura 3.5 (rede de duas barras e um ramo) e considerando que os controles disponíveis no sistema são um banco de capacitores conectado à barra 2 e um transformador com *tap* variável no ramo 1-2, mostrar-se-á neste item o procedimento adotado neste trabalho para a definição dos controles e posterior retorno à factibilidade. Como já foi mostrado no capítulo 3 para a demanda S_2 especificada igual a $(400 + j200)$ MVA (ponto **c** da figura 3.4), tem-se um grau de infactibilidade $\mathcal{D} = 0,8807$. Baseando-se nos algoritmos apresentados até aqui, seguem os passos que devem ser executados para retorno à região factível. Vale salientar que para este exemplo em particular foram considerados os seguintes limites para as variáveis de controle disponíveis:

Controle	Valor atual (pu)	Limites (pu)
b_2^{sh}	0,0	0,0 - 2,0
t_{1-2}	1,0	0,9 - 1,1

As sensibilidades de \mathcal{D} em relação às variáveis de controle são obtidas com o auxílio das equações (4.11) e (4.12):

$$\frac{\partial}{\partial b_2^{sh}} \mathcal{D} = -0,3050 \quad \text{e} \quad \frac{\partial}{\partial t_{1-2}} \mathcal{D} = 4,0065$$

Os coeficientes de eficiência (EC) para as variáveis de controle consideradas são:

$$\begin{aligned} \Rightarrow EC_{b_2^{sh}} &= \frac{\partial}{\partial b_2^{sh}} \mathcal{D} \cdot (2,0 - 0,0) = -0,61 \\ \Rightarrow EC_{t_{1-2}} &= \frac{\partial}{\partial t_{1-2}} \mathcal{D} \cdot (0,9 - 1,0) = -0,40 \end{aligned}$$

Nota-se pelos valores anteriores que o problema encontra-se na situação (7.a) do algoritmo proposto para a restauração da factibilidade, isto é:

$$|EC_T| = \sum_{i=1}^j |EC_i| \geq \mathcal{D}$$

Para a determinação das variações de cada controle, utilizar-se-á o método das proporcionalidades (MP) e o baseado em programação não-linear (MPNL) com o intuito de comparar os resultados.

1 – MP :

Os ajustes nas variáveis de controle são calculados por:

$$\begin{aligned} \Delta b_2^{sh} &= \frac{\mathcal{D}}{\mathcal{D}_{b_2^{sh}}} \cdot \frac{EC_{b_2^{sh}}}{|EC_T|} = \frac{0,8807}{-0,3050} \cdot \frac{-0,61}{1,01} = 1,74 \text{ pu} \\ \Delta t_{1-2} &= \frac{\mathcal{D}}{\mathcal{D}_{t_{1-2}}} \cdot \frac{EC_{t_{1-2}}}{|EC_T|} = \frac{0,8807}{4,0065} \cdot \frac{-0,40}{1,01} = -0,08 \text{ pu} \end{aligned}$$

Os valores assumidos pelas variáveis de controle após as ações de controle são:

$$\begin{aligned} b_2^{sh} &= b_2^{sh}(\text{atual}) + \Delta b_2^{sh} = 1,74 \text{ pu} \\ t_{1-2} &= t_{1-2}(\text{atual}) + \Delta t_{1-2} = 0,92 \end{aligned}$$

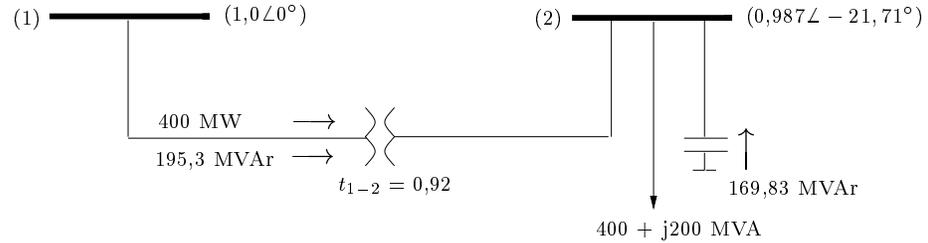


Figura 4.2: Estado final da rede utilizando MP.

O próximo passo é executar o FCOP. A figura 4.2 mostra o estado final da rede após a realização dos controles.

2 – **MPNL** :

Neste método deve-se resolver o seguinte problema de otimização não-linear:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \quad (\Delta b_2^{sh})^2 + (\Delta t_{1-2})^2 \\ \text{s.a.} \quad \mathcal{D}_{b_2^{sh}} \cdot \Delta b_2^{sh} + \mathcal{D}_{t_{1-2}} \cdot \Delta t_{1-2} \geq \mathcal{D} \\ 0,0 \leq \Delta b_2^{sh} \leq 2,0 \\ -0,1 \leq \Delta t_{1-2} \leq 0,1 \end{array} \right.$$

Os ajustes nas variáveis de controle após a execução do MINOS são:

$$\Delta b_2^{sh} = 1,57 \text{ pu} \quad \text{e} \quad \Delta t_{1-2} = -0,10$$

Os valores assumidos pelas variáveis de controle após as ações de controle são:

$$\begin{aligned} b_2^{sh} &= b_2^{sh}(\text{atual}) + \Delta b_2^{sh} = 1,57 \text{ pu} \\ t_{1-2} &= t_{1-2}(\text{atual}) + \Delta t_{1-2} = 0,90 \end{aligned}$$

O próximo passo é executar o FCOP. A figura 4.3 mostra o estado final da rede após a realização dos controles.

Como já foi mostrado no capítulo 3 os controles podem agir de duas maneiras distintas, ou seja, deslocando o ponto de operação inactível na direção da região factível (corte de carga) ou aumentando a

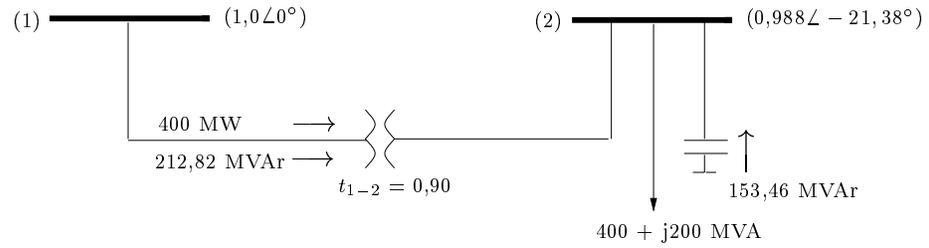


Figura 4.3: Estado final da rede utilizando MPNL.

região de factibilidade (chaveamento de bancos de capacitores ou alteração de *taps* de transformadores). Neste exemplo em particular a última ação foi a utilizada. A figura 4.4 mostra o efeito das ações de controle utilizadas na rede de duas barras.

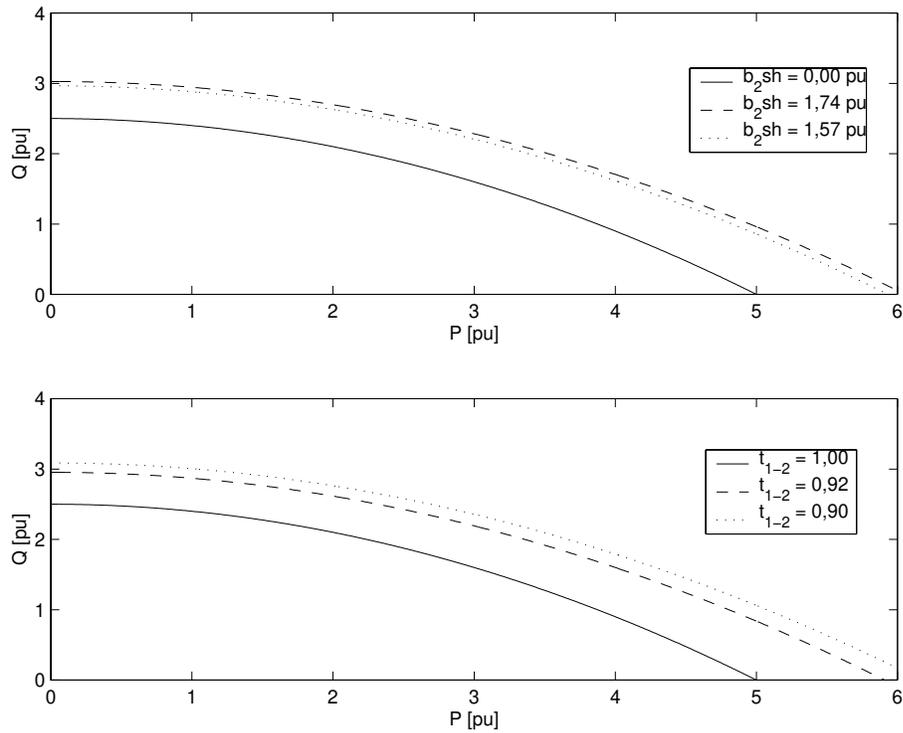


Figura 4.4: Efeito das ações de controle na rede de 2 barras.

Capítulo 5

Testes e Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados de algumas simulações com redes de pequeno e grande portes em diferentes condições de carregamento e disponibilidades de controles. Na ausência de controles no caso base foram escolhidas aleatoriamente barras de carga e ramos para dispor de bancos de capacitores e transformadores com *taps* variáveis, respectivamente.

Com o intuito de verificar a capacidade das **versões A e B** do programa em levar os sistemas a níveis desejáveis de operação (região factível), utiliza-se o artifício de “comprometer” o comportamento da rede elevando o carregamento localmente ou proporcionalmente em toda a rede, o que fatalmente originará em um ou mais pontos de operação na região infactível. Espera-se que após as ações de controle o(s) ponto(s) de operação retornem à região factível (onde as equações do fluxo de carga possuem solução real).

5.1 Rede exemplo de 3 barras

Considere um sistema com três linhas de transmissão conectando três barras, conforme mostra a figura 5.1. A barra 1 é adotada como referência e possui tensão constante de $(1,06\angle 0^\circ)$ pu. As barras 2 e 3 são as barras de carga do sistema possuindo as demandas indicadas na figura. A tabela 5.1 mostra os dados de ramos da rede de 3 barras. A tabela 5.2 mostra a solução do caso base para este sistema, em que as potências positivas indicam geração e potências negativas indicam consumo.

De	Para	r (pu)	x (pu)	b^{sh} (pu)
1	2	0,05	0,2	0,1
1	3	0,05	0,2	0,1
2	3	0,05	0,2	0,1

Tabela 5.1: Rede de 3 barras: dados de ramos.

Barra	Tensão (pu)	P_k (MW)	Q_k (MVAr)
1	$1,06 \angle 0^\circ$	+282,66	+143,54
2	$0,903 \angle -14,77^\circ$	-130,00	-30,00
3	$0,879 \angle -14,82^\circ$	-130,00	-50,00

Tabela 5.2: Solução do caso base para a rede de três barras.

Para se conseguir uma situação de inactibilidade, aumentou-se a demanda da barra 3 (mantendo um fator de potência constante) para $P_3 = 234$ MW e $Q_3 = 90$ MVAr.

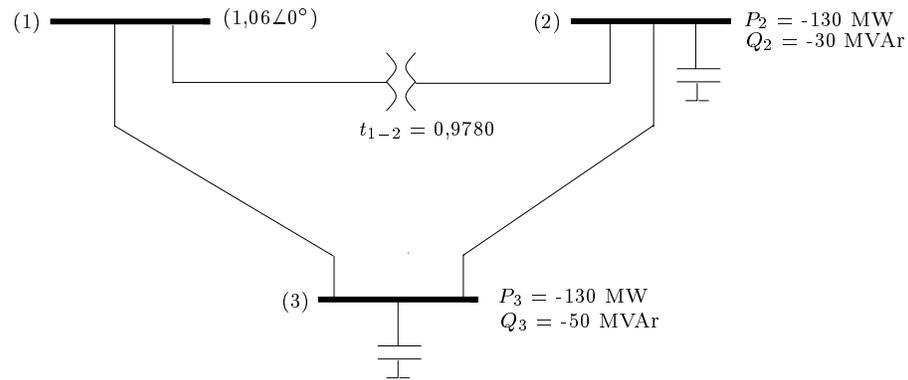


Figura 5.1: Sistema exemplo de três barras.

Foram considerados os seguintes limites para as variáveis de controle utilizadas:

Controle	Valor atual (pu)	Limites (pu)
b_2^{sh}	0,0	0,0 - 0,5
b_3^{sh}	0,0	0,0 - 0,5
t_{1-2}	0,978	0,9 - 1,1

Partindo dessas premissas será mostrado o desenvolvimento completo para se definir as estratégias de controle corretivo para essa situação de inactibilidade do sistema.

1 – Cálculo da melhor solução possível S^m

Com a auxílio do algoritmo apresentado no capítulo 3, obtém-se o valor de S^m que neste exemplo corresponde à melhor solução possível para a demanda da barra 3:

$$S_3^m = (220,38 + j75,59) \text{ MVA}$$

2 – Cálculo do grau de inactibilidade do sistema

Sabendo-se que $\mathcal{D} = [(\Delta P)^2 + (\Delta Q)^2]^{(1/2)}$, tem-se:

$$\mathcal{D} = 0,228$$

3 – Cálculo das sensibilidades e dos ECs

Baseando-se nas equações deduzidas no capítulo 4, tem-se:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial b_2^{sh}} \mathcal{D} &= -0,1963 & ; & \quad \text{EC}_{b_2^{sh}} = -0,098 \\ \frac{\partial}{\partial b_3^{sh}} \mathcal{D} &= -0,2297 & ; & \quad \text{EC}_{b_3^{sh}} = -0,115 \\ \frac{\partial}{\partial t_{1-2}} \mathcal{D} &= 1,4490 & ; & \quad \text{EC}_{t_{1-2}} = -0,1130\end{aligned}$$

4 – Definição dos controles

Pelos valores obtidos no item anterior tem-se: $|\text{EC}_T| \geq \mathcal{D}$. Portanto, para se conseguir factibilizar o problema as variáveis de controle devem ser ajustadas conforme os valores mostrados na tabela abaixo:

Método	Δb_2^{sh} (pu)	Δb_3^{sh} (pu)	Δt_{1-2}
MP	0,35	0,35	-0,054
MPNL	0,25	0,29	-0,078

Os valores assumidos pelas variáveis de controle após as ações de controle são:

Método	b_2^{sh} (pu)	b_3^{sh} (pu)	t_{1-2}
MP	0,35	0,35	0,924
MPNL	0,25	0,29	0,900

Nota-se que no método MPNL o controle que possui a maior sensibilidade (t_{1-2}) é o que sofre a maior variação, não sendo necessariamente o controle com a maior disponibilidade.

As tabelas 5.3 e 5.4 mostram o estado final da rede após as ações de controle.

Barra	Tensão (pu)	P_k (MW)	Q_k (MVar)
1	$1,06 \angle 0^\circ$	+423,13	+286,88
2	$0,871 \angle -19,98^\circ$	-130,00	-30,00
3	$0,735 \angle -27,14^\circ$	-234,00	-90,00

Tabela 5.3: Estado final da rede após a realização dos controles – Método MP.

Barra	Tensão (pu)	P_k (MW)	Q_k (MVar)
1	$1,06 \angle 0^\circ$	+422,79	+295,47
2	$0,884 \angle -19,18^\circ$	-130,00	-30,00
3	$0,741 \angle -26,49^\circ$	-234,00	-90,00

Tabela 5.4: Estado final da rede após a realização dos controles – Método MPNL.

5.2 IEEE 14 barras

Mostrar-se-á neste item as simulações realizadas com a rede de 14 barras e 20 ramos [34], mostrada na figura 5.2. Nestas simulações tentou-se mostrar todas as situações possíveis que podem ser encontradas num procedimento de retorno à factibilidade. Primeiramente, será mostrado ao leitor a precisão dos ajustes encontrados pelo algoritmo proposto em relação aos valores reais que são ajustados diretamente no banco de dados. Em seguida, as situações (7.a), (7.b) e (7.c) do algoritmo proposto serão verificadas. Finalmente, uma comparação entre as **versões A e B** do programa será realizada.

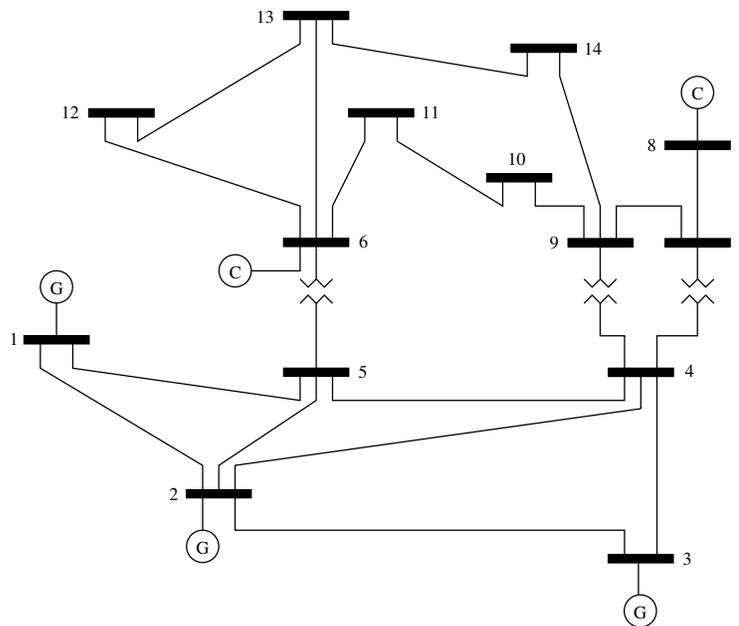


Figura 5.2: Sistema IEEE 14 bus.

5.2.1 Verificação da precisão dos controles

Para se discutir a precisão dos controles alguns resultados serão mostrados para o sistema em questão. A carga da barra 14 no caso base é (14,9 MW, 5,0 MVar). Uma situação infactível foi criada aumentando-se o carregamento na barra 14 para (90,0 MW, 30,2 MVar). O fator de potência do caso base permaneceu

constante. Esta nova condição implica em um *grau de inactibilidade* $\mathcal{D} = 3,7 \times 10^{-2}$. A tabela 5.5 mostra os resultados da utilização de três controles diferentes, cada um deles agindo individualmente.

Controle	b_9^{sh}	t_{4-9}	P_{14}
Valor atual	0,19	0,969	90,00
Novo valor calculado	0,40	0,663	83,40
Novo valor ajustado	0,41	0,750	83,38
Novo \mathcal{D}	$9,5 \times 10^{-4}$	factível	$1,4 \times 10^{-4}$

Tabela 5.5: Precisão dos controles.

Considerando a segunda coluna da tabela 5.5, o valor atual do capacitor *shunt* conectado à barra 9 é 0,19 pu. Utilizando o método proposto, um novo valor de 0,40 pu é calculado. No entanto, o valor requerido (obtido por ajustes manuais no banco de dados do sistema) é 0,41 pu. Um novo cálculo de fluxo de carga é realizado, resultando em um novo \mathcal{D} de $9,5 \times 10^{-4}$. Com relação aos valores do capacitor *shunt* e corte de carga, a quantidade de controle calculado pelo método proposto não leva o sistema de volta para o interior da região factível, no entanto, os baixos valores do novo \mathcal{D} mostram que o sistema está praticamente sobre Σ . Sabendo que estes controles são discretos, o arredondamento do valor dos controles para o próximo valor discreto certamente resultaria em factibilidade. Adicionalmente, as mudanças nos controles calculadas pelo método proposto podem ser multiplicadas por um fator de segurança (maior do que um) para compensar a falta de exatidão resultante dos cálculos linearizados.

Quanto a utilização do *tap* do transformador as simulações mostraram que sua utilização geralmente resulta em ações de controle conservadoras. A tabela 5.6 mostra que a utilização de capacitores *shunt* também tendem a resultar em ações de controle conservadoras à medida que o ponto de operação inicial esteja mais afastado de Σ .

P_{14} (MW)	Novo valor de b_9^{sh}	Valor ajustado de b_9^{sh}
90,00	0,40	0,41
100,00	0,71	0,69
120,00	1,25	1,15

Tabela 5.6: Capacitor *shunt* como um controle.

5.2.2 Verificação da situação (7.a) – $|\mathbf{EC}_T| \geq \mathcal{D}$

Para se verificar esta situação, aumentou-se a carga da barra 14 do sistema para (130,0 MW, 5,0 MVar), o que permitiu uma situação de inactibilidade com $\mathcal{D} = 0,13$. Dois controles foram permitidos nesta situação: bancos de capacitores nas barras 9 e 14, cujos valores no case base são 0,19 pu e 0,00 pu respectivamente. A tabela 5.7 mostra os resultados das simulações considerando diferentes limites superiores para os controles.

A sensibilidade do banco de capacitores da barra 9 (u_1) é um pouco maior do que a da barra 14 (u_2).

Caso	Capacitor	Limite superior (pu)	Sensibilidade $\frac{\partial}{\partial u_i} \mathcal{D}$	EC	Ajustes (pu)	
					MP	MPNL
1	9	0,6	-0,19	0,08	0,28	0,35
	14	0,6	-0,18	0,11	0,41	0,33
2	9	0,6	-0,19	0,08	0,39	0,38
	14	0,3	-0,18	0,06	0,29	0,30

Tabela 5.7: Situação (7.a).

No caso 1, os limites foram ajustados de tal maneira que u_2 tivesse um maior EC. Consequentemente, o método MP resultou em maiores variações de u_2 . Já quando se utilizou do método MPNL as maiores variações foram na variável de controle u_1 . Como foi apresentado no capítulo 4, a formulação do MP é baseada no coeficiente de eficiência EC ao passo que o MPNL é baseada nas sensibilidades. No caso 2, o limite de u_2 foi ajustado tal que a respectiva restrição estaria ativa na solução ótima. Ambos os métodos resultaram em variações maiores de u_1 .

5.2.3 Verificação da situação (7.b) – $\beta \cdot \mathcal{D} \leq | \text{EC}_T | < \mathcal{D}$

Para “comprometer” o comportamento da rede, aplicou-se um aumento de carga de 125% em todas as cargas do sistema e a barra *slack* assumiu sozinha este aumento repentino do carregamento. O limiar β foi ajustado em 0,8. A tabela 5.8 mostra os controles disponíveis e suas características na primeira iteração, tanto quanto os valores relevantes utilizados pelo método proposto.

Controle	Sensibilidade	EC	Limites
b_9^{sh}	-0,1128	0,1985	(0 – 1,95) pu
t_{4-7}	0,0291	0,0023	0,9 – 1,1
t_{4-9}	0,0074	0,0005	0,9 – 1,1
t_{5-6}	0,0332	0,0011	0,9 – 1,1

Tabela 5.8: Primeira iteração, $\mathcal{D} = 0,25$.

O soma de todos os ECs resulta em aproximadamente 0,202, o que corresponde a 82,4% de \mathcal{D} . Neste caso, os controles são ajustados em seus limites com a finalidade de minimizar o corte de carga na próxima iteração. Após esta ação de controle, o *grau de infactibilidade* \mathcal{D} vai para $1,54 \times 10^{-2}$. Na segunda iteração o corte de carga é permitido. O corte de carga mais efetivo ocorre na barra 14 ($| \text{EC} | = 0,1833 > \mathcal{D}$). A potência ativa na barra 14 foi cortada em aproximadamente 4,8 MW (com um corte correspondente na potência reativa, sempre mantendo um fator de potência constante). O novo \mathcal{D} vai para $2,10 \times 10^{-3}$. Uma terceira iteração é necessária. Novamente o corte de carga mais efetivo ocorre na barra 14. Nesta iteração a potência ativa na barra 14 foi cortada em aproximadamente 660 kW, originando um \mathcal{D} de $2,78 \times 10^{-4}$, o que corresponde a um ponto praticamente sobre Σ . Se um fator de segurança fosse aplicado ao corte de carga, a factibilidade teria sido restaurada na segunda iteração.

5.2.4 Verificação da situação (7.c) – $|\mathbf{EC}_T| < \beta \cdot \mathcal{D}$

Um aumento de carga de 130% foi aplicado em todas as cargas do sistema e a barra *slack* sozinha assumiu este aumento de carga. O limiar β foi ajustado em 0,8. A soma de todos os ECs resulta em aproximadamente 0,21, o que corresponde a 70% de \mathcal{D} (igual a 0,28). Neste caso, o corte de carga é permitido já na primeira iteração. O capacitor *shunt* da barra 9, b_9^{sh} , foi ajustado em 1,43 pu e 46,4 MW foram cortados na barra 9. O método MP foi utilizado para calcular cada contribuição dos controles, na medida que mais de um controle foi selecionado. A factibilidade foi restaurada na primeira iteração.

A mesma simulação foi executada utilizando o método MPNL para se obter a contribuição de cada controle. Na primeira iteração, b_9^{sh} foi ajustado em 1,95 pu e 29,5 MW foram cortados na barra 9. O novo \mathcal{D} após a realização das ações de controle foi de $4,3 \times 10^{-2}$. Adicionalmente 29,9 MW foram cortados da barra 4 na segunda iteração e, então, a factibilidade foi restaurada. A utilização do MPNL resultou em maior corte de carga. É importante ressaltar que nem toda a carga da barra 9 foi cortada na primeira iteração. Porém, na segunda iteração $|\mathbf{EC}_4| > |\mathbf{EC}_9|$, significando que a barra 4 tem maior disponibilidade do que a barra 9.

A tabela 5.9 mostra os resultados da simulação para as mesmas condições do sistema, agora considerando que todo o corte de carga calculado pelo método proposto é multiplicado por 1,1. A idéia é incluir um fator de segurança igual a 10% para levar em conta as imprecisões das linearizações efetuadas nos cálculos. Os resultados mostram que somente uma iteração é necessária em ambos os casos (MP e MPNL). Além disso, o MPNL resulta em um menor corte de carga.

Método	Corte de carga na barra 9 (MW)	b_9^{sh} (pu)
MP	51,0	1,43
MPNL	32,5	1,95

Tabela 5.9: Comparação de MP e MPNL.

5.2.5 Comparação entre as versões A e B do programa

Como já foi mencionado no capítulo 4 a **versão B** do programa utiliza-se da *busca local* para identificar os controles mais eficientes nas vizinhanças da barra crítica do sistema. Para estas simulações considerou-se que a barra 14 do sistema teve sua carga ajustada para (130,0 MW, 5,0 MVar) o que implica em um $\mathcal{D} = 0,13$. Foram permitidos três controles nesta situação: bancos de capacitores nas barras 5, 9 e 14, cujos valores no case base são 0,00 pu, 0,19 pu e 0,00 pu respectivamente. Note que o controle disponível na barra 5 encontra-se na terceira vizinhança da barra crítica do sistema (barra 14). A tabela 5.10 mostra os controles disponíveis e suas características assim como os valores relevantes utilizados pelo método proposto.

Pela tabela 5.10 vemos que o banco de capacitores da barra 5 é o controle com a maior disponibilidade e, a priori, seria o primeiro controle a participar do processo de retorno à factibilidade. De fato se

Controle	Sensibilidade	EC	Limites
b_5^{sh}	-0,0895	0,0806	(0 – 0,90) pu
b_9^{sh}	-0,1944	0,0797	(0 – 0,60) pu
b_{14}^{sh}	-0,1836	0,0551	(0 – 0,30) pu

Tabela 5.10: Valores relevantes utilizados pelo método proposto.

utilizarmos a **versão A** do programa, comprova-se esta afirmação. A tabela 5.11 mostra os resultados obtidos utilizando-se desta versão do programa. Nota-se que são necessários apenas dois controles para factibilizar o problema, pois $|EC_T| = EC_{b_5^{sh}} + EC_{b_9^{sh}} > \mathcal{D}$. Na **versão A** do programa o intuito é factibilizar o problema sem levar em consideração o tempo computacional, isto é, faz-se uma busca pela rede inteira sem critérios predefinidos (leva-se em conta apenas os valores absolutos dos ECs).

Método	Δb_5^{sh} (pu)	Δb_9^{sh} (pu)
MP	0,72	0,33
MPNL	0,54	0,41

Tabela 5.11: Ajustes obtidos com a **versão A** do programa.

Agora, considerando a utilização da **versão B** do programa, pode-se refinar um pouco mais a definição de quais controles serão utilizados na volta à factibilidade. Nesta versão, a busca dos controles disponíveis é realizada por vizinhança, evitando-se o cálculo dos valores de todo o sistema e o maior tempo computacional necessário. A tabela 5.12 mostra os valores obtidos para este caso. Nota-se que, mesmo sendo o controle b_5^{sh} mais disponível, a escolha dos outros dois controles (um pertencente à própria barra e o outro localizado na primeira vizinhança) já garantem o retorno à factibilidade. Deve-se notar também que o

Método	Δb_{14}^{sh} (pu)	Δb_9^{sh} (pu)
MP	0,29	0,39
MPNL	0,30	0,38

Tabela 5.12: Ajustes obtidos com a **versão B** do programa.

ajuste de b_5^{sh} é maior que os demais, ou seja, é necessário utilizar uma maior parcela de sua disponibilidade para factibilizar o problema. Do ponto de vista da operação, isto pode não ser conveniente.

5.3 IEEE 118 barras

Mostrar-se-á neste item as simulações realizadas com a rede de 118 barras e 186 ramos, cujos dados podem ser encontrados em (<http://www.ee.washington.edu/research>). As seguintes condições de simulação foram ajustadas: (a) a potência ativa original da barra 118 foi mudada para 150 MW e então todas as cargas e gerações de potência ativa foram dobradas de valor; (b) todas as ações de controle foram aumentadas em 10% (fator de segurança); (c) os únicos controles disponíveis foram bancos de capacitores

nas barras 75 e 118, com limites inferior e superior de (0,0 e 1,5) pu, respectivamente; (d) o método MP foi o utilizado. A tabela 5.13 mostra os resultados. O número de iterações depende tanto da natureza discreta dos controles quanto do fator de segurança utilizado. Pode-se notar que a variação do controle calculada na segunda iteração é pequena.

Iteração	\mathcal{D}	$(\Delta b_{75}^{sh}; \Delta b_{118}^{sh})$ pu
0	0,236	(1,14 ; 1,14)
1	0,029	(0,00 ; 0,24)
2	0,005	(0,04 ; 0,00)
3	<0,001	–

Tabela 5.13: Simulação para a rede de 118 barras, situação (7.a).

Utilizando-se das mesmas condições de simulação anteriores mas, alterando-se os limites inferior e superior dos controles para (0,0 e 0,9) pu, respectivamente, obteve-se os resultados mostrados na tabela 5.14.

Iteração	\mathcal{D}	Controle	Situação
0	0,236	$\Delta b_{75}^{sh} = \Delta b_{118}^{sh} = 0,9$ pu	$EC_T = 0,87 \cdot \mathcal{D}$ – controles são ajustados no limite
1	0,074	$\Delta P_{118} = -16,17$ MW	corte de carga
2	0,019	$\Delta P_{118} = -4,32$ MW	corte de carga
3	0,005	$\Delta P_{118} = -1,12$ MW	corte de carga
4	0,001	$\Delta P_{118} = -0,29$ MW	corte de carga
5	<0,001	–	–

Tabela 5.14: Simulação para a rede de 118 barras, situação (7.b).

5.4 Rede de 904 barras

Mostrar-se-á neste item as simulações realizadas com a rede de 904 barras e 1283 ramos com o intuito de mostrar a eficiência do método proposto também para grandes sistemas. Esta rede corresponde a uma versão reduzida do sistema sudoeste dos EUA. Uma situação de infactibilidade foi criada aumentando-se a carga original da barra 805 (179,13 MW , 51,94 MVar) para (1000,00 MW , 51,94 MVar). Considerando fator de potência constante, verificou-se que o carregamento máximo na barra 805 que permite factibilidade é (914,12 MW , 47,48 MVar) isto é, o corte de carga requerido (obtido por ajustes manuais no banco de dados do sistema) para factibilizar o problema é ($\Delta P_{805} = -85,88$ MW , $\Delta Q_{805} = -4,06$ MVar).

Considerando a resolução pela **versão A** do programa e a utilização do método MP, a tabela 5.15 mostra os resultados obtidos pelo algoritmo proposto. Nesta simulação, nota-se que o montante de carga ativa rejeitado ($\Delta P_{805} = -86,08$ MW) no final do processo iterativo foi maior do que o necessário (aproximadamente, 0,23% a mais). Verifica-se, também, que foram necessárias duas iterações para factibilizar o problema. A tabela 5.16 mostra os resultados obtidos utilizando-se de um fator de segurança de 10%.

Iteração	\mathcal{D}	Controle
0	0,481	$\Delta P_{805} = -84,95$ MW
1	$6,21 \times 10^{-3}$	$\Delta P_{805} = -1,13$ MW
2	factível	–

Tabela 5.15: Simulação para a rede de 904 barras.

Usando este artifício o processo converge na primeira iteração. Em alguns casos, o montante rejeitado na segunda situação pode ser mais adequado como por exemplo, quando se deseja conseguir a estabilidade do sistema de uma maneira mais segura.

Iteração	\mathcal{D}	Controle
0	0,481	$\Delta P_{805} = -93,45$ MW
1	factível	–

Tabela 5.16: Simulação para a rede de 904 barras – fator de segurança de 10%.

Utilizando-se das mesmas condições de simulação anteriores mas, considerando um limite superior para o banco de capacitores localizado na barra 805 igual a 4,0 pu, obteve-se os resultados mostrados na tabela 5.17. Vale lembrar que a denominação “valor ajustado” (utilizada na tabela abaixo) corresponde ao valor necessário para factibilizar o problema, obtido por ajustes manuais no banco de dados do sistema.

Valor atual de b_{805}^{sh} (pu)	Valor calculado Δb_{805}^{sh} (pu)	Valor ajustado de Δb_{805}^{sh} (pu)
0,4740	2,0235	1,929

Tabela 5.17: Capacitor *shunt* da barra 805 como controle.

Verifica-se que o método proposto, cujos cálculos baseiam-se em linearizações, resultou em variações mais conservadoras dos controles. Como mencionado em [8], a utilização de fatores de segurança podem ajudar a compensar a perda de exatidão.

Capítulo 6

Conclusões

Neste trabalho foi proposto um método que lida com situações inactíveis de sistemas de potência. O método apresentado aqui permite quantificar o *grau de inactibilidade* do sistema e, baseando-se nas sensibilidades deste em relação às variáveis de controle disponíveis (bancos de capacitores, transformadores com *taps* variáveis e corte de carga), determinar estratégias de controle corretivo para levar o sistema de volta à região de operação factível.

As ações de controle foram definidas através do algoritmo proposto, que define quais serão os controles a serem utilizados de uma maneira sistemática. A obtenção dos controles corretivos pode ser resumida da seguinte forma: (a) calcula-se S^m e, conseqüentemente, \mathcal{D} ; (b) calculam-se as sensibilidades de \mathcal{D} em relação às variáveis de controle disponíveis; (c) calculam-se os *coeficientes de eficiência* de cada controle, o que permite identificar a disponibilidade de cada controle envolvido no processo; (d) obtém-se a participação de cada controle utilizando o *método das proporcionalidades* (MP) ou o *método baseado em programação não-linear* (MPNL) e; (e) executa-se o FCOP para verificar se o ponto de operação inactível voltou à região factível através das ações de controle definidas. Vale lembrar que no MP os controles com maiores capacidades sofrerão maiores mudanças e que no MPNL os controles com maiores sensibilidades terão uma maior variação.

Neste trabalho foram consideradas duas versões possíveis para o algoritmo implementado – **versões A e B**. Na **versão A** todos os controles disponíveis no sistema são identificados. O intuito é restabelecer a factibilidade sem se preocupar com a restrição de tempo (condição necessária para utilização em tempo real). Na **versão B** foi acrescentada a idéia de localização adaptativa na busca dos controles a serem utilizados. O intuito é realizar a busca por vizinhança evitando-se, com isto, o cálculo dos valores de todo o sistema e o maior tempo computacional necessário.

Nos testes realizados, constatou-se que a idéia de restauração da factibilidade dos algoritmos propostos é bastante viável podendo ser utilizada como um ferramental em estudos de planejamento da operação, particularmente na análise da estabilidade de tensão.

Como sugestão para trabalhos futuros relacionam-se:

- verificar mais detalhadamente o comportamento do método para sistemas de grande porte, incluindo o sistema brasileiro;
- melhorar o código fonte do programa a fim de possibilitar a medição de tempos de CPU e permitir uma melhor comparação das **versões A e B**;
- incluir outros controles, tais como: tensão de geradores, capacitores série, compensadores estáticos, reguladores de tensão, etc.

Referências Bibliográficas

- [1] BALU e outros: **On-line power system security analysis**, *Proceedings of the IEEE*, vol.80, no.2, February 1992, p.260-280.
- [2] DY LIACCO T.E.: **The adaptive reliability control system**, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol.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, May 1970.
- [4] STTOT B., ALSAÇ O., MONTICELLI A.J., **Security analysis and optimization**, *Proceedings of the IEEE*, vol.75, no.12, December 1987, p.1623-1644.
- [5] OVERBYE T.J., **A power flow measure for unsolvable cases**, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.9, 1994, p.1359-1365.
- [6] CASTRO C.A., BOSE A., **Correctability of voltage violations in on-line contingency analysis**, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.9, no.3, August 1994, p.1651-1657.
- [7] CASTRO C.A., BOSE A., **Correctability in on-line contingency analysis**, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.8, no.3, August 1993, p.807-814.
- [8] OVERBYE T.J., **Computation of a practical method to restore power flow solvability**, paper 94 WM 245-1 PWRs, IEEE/PES Winter Meeting, New York, NY, 1994.
- [9] GRANVILLE S., MELLO J.C.O., MELO A.C.G., **Application of interior point methods to power flow unsolvability**, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.11, n.2, 1996, p.1096-1103.
- [10] SALGADO R., BARBOZA L.V., **Restauração da solução das equações da rede elétrica: Uma abordagem baseada na mínima distância**, XIII Congresso Brasileiro de Automática, 11-14 Setembro de 2000, Florianópolis, SC, p.169-174.
- [11] IBA K., SUZUKI H., EGAWA M., WATANABE T., **Calculation of critical loading condition with nose curve using homotopy continuation method**, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.6, 1991, p.584-593.

-
- [12] AJJARAPU V., CHRISTIE C., **The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis**, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.7, no.1, February 1992, p.416-423.
- [13] WALLASH Y., **Gradient methods for load flow problems**, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol.PAS-87, 1968, p.1314-1318.
- [14] SASSON A.M., **Non-linear programming solutions for the load flow, minimum-loss, and economic dispatching problems**, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol.PAS-88, 1969, p.399-409.
- [15] SASSON A.M., TREVINO C., ABOYTES F., **Improved Newton's load flow through a minimization technique**, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol.PAS-90, 1971, p.1974-1981.
- [16] IWAMOTO S., TAMURA Y., **A fast load flow method retaining nonlinearity**, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol.PAS-97, 1978, p.1586-1599.
- [17] IWAMOTO S., TAMURA Y., **A load flow calculation method for ill-conditioned power systems**, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol.PAS-100, 1981, p.1736-1743.
- [18] SCUDDER J.M., **Step size optimization in a polar Newton power flow**, University of Wisconsin, Madison, EUA.
- [19] SCUDDER J.M., ALVARADO F.L., discussão de [18].
- [20] DEHNEL M., DOMMEL H.W., **A method for identifying weak nodes in nonconvergent load flows**, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.4, 1989, p.801-807.
- [21] BRAZ L.M.C., **Um novo método de solução para o fluxo de carga com otimização de passo**, tese de Mestrado, UNICAMP, 1997.
- [22] CASTRO C.A., BRAZ L.M.C., **Uma nova abordagem para a solução do problema de fluxo de carga pelo método de Newton com otimização de passo**, revista Controle & Automação, SBA, vol.8, no.3, Setembro-Dezembro 1997, p.121-133.
- [23] CASTRO C.A., BRAZ L.M.C., **A new approach to the polar newton power flow using step size optimization**, *Proceedings of the 29th North American Power Symposium*, Laramie, WY, EUA, October 1997, p.113-120.
- [24] Y. TAMURA, K. IBA, S. IWAMOTO, **A method for finding multiple load-flow solutions for general power systems**, IEEE/PES Winter Meeting, A80 043-0, New York, February 1980.
- [25] T.H. JUNG, K.J. KIM, F.L. ALVARADO, **A marginal analysis of voltage stability with load variations**, 10th PSCC, Graz, Austria, August 1990.
- [26] I. DOBSON, **Observations on the geometry of saddle node bifurcation and voltage collapse in electrical power systems**, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol.39, p.240-243, March 1992.

-
- [27] I. DOBSON, L. LU, **New methods for computing a closest saddle node bifurcation and worst case load power margin for voltage collapse**, *IEEE Summer Meeting*, SM 587-6, Seattle, WA, July 1992.
- [28] I. DOBSON, L. LU, **Computing an optimum direction in control space to avoid saddle node bifurcation and voltage collapse in electric power systems**, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol.37, p.1616-1620, October 1992.
- [29] MONTICELLI A. J., **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**, Edgard Blücher, São Paulo, SP, 1983.
- [30] **Working group on a common format for exchange of solved load flow data, Common format for exchange of solved load flow data**, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-92, no. 6, p. 1916-1925, 1973.
- [31] **Working group on voltage stability, Suggested techniques for voltage stability analysis**, 93TH0 620-5 PWR, 1993, p. 75-86.
- [32] MURTAGH B.A., SAUNDERS M.A., **Minos 5.1 user's guide**, Stanford University, 1987.
- [33] PEREIRA F.A.T., **Programação linear aplicada ao problema de minimização de perdas em redes de energia elétrica**, tese de Mestrado, UNICAMP, 1997.
- [34] FRERIS L.L., SASSON A.M., **Investigation of the load-flow problem**, *Proceedings of the IEE*, vol.15, no.10, 1968, p.1459-1470.
- [35] D.G. LUENBERGER, **Linear and Nonlinear Programming**, Addison-Wesley, Reading, MA, 1984.

Apêndice A

Publicações

Artigo submetido e aceito no **IV CONGRESSO LATINO AMERICANO – “Generacion y Transporte de Energia Electrica”**, 09-12 Novembro 2000, Viña del Mar, Chile.