



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

# Método Eficiente de Cálculo de Margem de Segurança ao Colapso de Tensão

Autor: Luis Alberto Llacua Zárate  
Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro Jr.

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

## **Comissão Julgadora:**

Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro Jr.	FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. José Aquiles Baesso Grimoni	USP/SP
Prof. Dr. Vivaldo Fernando da Costa	FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. André Luiz Morelato França	FEEC/UNICAMP

Campinas, 26 de Setembro de 2001.

## Agradecimentos

Em momentos como este, ao final de mais um trecho percorrido, cabe-me a oportunidade para ressaltar o inestimável apoio daqueles que contribuíram para o êxito deste importante passo. Assim, gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos:

- A meus pais pela dedicação para com seus filhos e pelos conselhos em toda hora.
- A minha mulher e meu filho, pela compreensão e apoio para levar adiante este projeto.
- A meus irmãos pelo apoio e incentivo moral.
- Ao professor Carlos Alberto de Castro Jr. pela excelente orientação, estímulo, e amizade dispensada na consecução deste trabalho.
- Aos colegas do DSEE, pela amizade e pelo bom ambiente de trabalho.
- A CAPES pelo apoio financeiro.

## Resumo

Este trabalho tem por objetivo propor uma metodologia para a avaliação da distância entre o ponto de operação da rede e o ponto de máximo carregamento. O método, com enfoque estático, baseia-se em realizar um certo número de cálculos de fluxo de carga para diferentes níveis de carga que são incrementadas em uma direção predeterminada, muito próximas ao ponto crítico. Neste caso, o sistema é modelado por equações algébricas não lineares e os incrementos de carga são definidos pela análise de sensibilidade. Realiza-se o cálculo de um fator de carregamento  $\lambda$  a partir de um conjunto de pontos de operação correspondentes a uma região de operação da rede muito próxima do ponto crítico. O fluxo de carga Newton com otimização de passo é usado nos casos em que um ponto de operação infactível seja atingido em função das aproximações consideradas na análise de sensibilidade.

## Abstract

The goal of this research work is to propose a methodology for the computation of the distance from the current operating point to the maximum loading point. The method is based on a static approach and consists of performing a certain number of load flow calculations for different load levels along a predetermined direction, in the vicinity of the critical point. The system is modeled by a set of nonlinear algebraic equations and the load increments are determined by sensitivity analysis. A loading factor  $\lambda$  is computed from a set of operating points very close to the critical point. A special purpose load flow method with step size optimization is used in case an infeasible operating point is reached, due to the approximations assumed in the sensitivity analysis.

# Sumário

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Sumário	iii
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vii
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Estabilidade de tensão</b>	<b>3</b>
2.1 Introdução . . . . .	3
2.2 Ilustração do fenômeno . . . . .	4
2.3 Métodos de análise de estabilidade de tensão . . . . .	8
2.3.1 Abordagens dinâmicas . . . . .	9
2.3.2 Abordagens estáticas . . . . .	9
2.3.3 Índices de proximidade ao colapso de tensão . . . . .	9
2.3.4 Margens de segurança ao colapso de tensão . . . . .	10
<b>3 Algumas ferramentas de análise de estabilidade de tensão</b>	<b>12</b>
3.1 Método de Zeng . . . . .	12
3.1.1 Sensibilidade da tensão para pequenas variações de carga . . . . .	13

3.1.2	Sensibilidade nas proximidades da singularidade da matriz Jacobiana	14
3.1.3	Soluções para pequenos incrementos na injeção de potência . . . . .	15
3.1.4	Distância ao ponto de máximo carregamento . . . . .	17
3.1.5	Estimativa do ponto de máximo carregamento . . . . .	19
3.2	Análise de sensibilidade . . . . .	22
3.2.1	Relações básicas . . . . .	23
3.2.2	Sensibilidade da geração de reativos [12, 13, 14] . . . . .	24
3.3	Fluxo de carga com otimização de passo . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Avaliação do método proposto em [17]</b>	<b>28</b>
4.1	Introdução . . . . .	28
4.2	Questões levantadas . . . . .	28
4.2.1	Distância entre $s_0$ e $s_{cr}$ . . . . .	29
4.2.2	Tamanho do passo . . . . .	33
4.2.3	Controle de potência reativa dos geradores . . . . .	37
4.3	Melhora da eficiência de cálculo de $\lambda$ . . . . .	41
4.4	Resultados . . . . .	44
4.5	Conclusão . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Método Proposto</b>	<b>47</b>
5.1	Introdução . . . . .	47
5.2	Idéia do método . . . . .	47
5.3	Algoritmo do método proposto . . . . .	49
5.4	Resultados de simulações . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>55</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>56</b>

# Lista de Figuras

2.1	Rede elétrica de potência. . . . .	4
2.2	Diagrama fasorial da rede da figura 2.1. . . . .	4
2.3	Curva $[PV]$ . . . . .	6
2.4	Espaço de soluções. . . . .	7
2.5	Tensão como uma função das potências ativa e reativa de carga. . . . .	8
2.6	Margem de segurança. . . . .	10
3.1	Estimação do ponto crítico no espaço de parâmetros. . . . .	13
3.2	Espaços coluna associados ao Jacobiano singular. . . . .	15
3.3	Distância ao ponto de máximo carregamento. . . . .	17
3.4	Ilustração da equação 3.37. . . . .	19
3.5	Ilustração do método proposto. . . . .	22
3.6	Aumento de carga definido pela análise de sensibilidade. . . . .	25
4.1	Potência base e incrementos de carga. . . . .	29
4.2	Detalhes da rede IEEE-14. . . . .	30
4.3	Ponto crítico estimado em função da potência base e dos acréscimos de carga. . . . .	33
4.4	Ponto crítico em função do número de cálculos de fluxo de carga e dos valores de acréscimos de carga. . . . .	36
4.5	Detalhes da Fig. 4.4. . . . .	36
4.6	Curva de capacidade do gerador síncrono de pólos lisos. . . . .	37
4.7	Diferentes escolhas de pontos de operação para a estimativa do máximo carregamento. . . . .	38

4.8	Análise da barra 4 da rede de 14 barras. . . . .	39
4.9	Estimação da potência crítica em função dos setores. . . . .	40
4.10	Máximo carregamento com e sem controle de potência reativa dos geradores. . . . .	40
4.11	Função $f(\lambda)$ . . . . .	41
4.12	Número de iterações para o cálculo de $\lambda$ . . . . .	42
4.13	Relação entre $\lambda$ e $\beta$ e funções de inicialização. . . . .	43
4.14	Número de iterações para o cálculo de $\lambda$ . . . . .	43
5.1	Método proposto. . . . .	48
5.2	Desempenho do método para a barra 4. . . . .	51
5.3	Desempenho do método para a barra 14. . . . .	52
5.4	Evolução do processo iterativo – rede de 14 barras. . . . .	53

# Lista de Tabelas

4.1	Potência crítica estimada na barra 09 , $\Delta P = 10\%$ . . . . .	31
4.2	Potência crítica estimada na barra 09, $\Delta P = 30\%$ . . . . .	32
4.3	Potência crítica estimada na barra 09, $\Delta P = 50\%$ . . . . .	32
4.4	Potência crítica estimada na barra 09, $K = 4$ . . . . .	34
4.5	Potência crítica estimada na barra 09, $K = 5$ . . . . .	35
4.6	Potência crítica estimada na barra 09, $K = 6$ . . . . .	35
4.7	Potência crítica estimada – rede de 14 barras. . . . .	39
4.8	Valor máximo de $\beta$ em função de $K$ . . . . .	41
4.9	Resultados para a rede de 14 barras, caso: $K = 4$ . . . . .	45
4.10	Resultados para a rede de 14 barras, caso: $K = 5$ . . . . .	45
4.11	Resultados para a rede de 904 barras. . . . .	45
5.1	Dados obtidos em cada passo segundo a Fig. 5.2. . . . .	51
5.2	Dados obtidos em cada passo segundo a Fig. 5.3. . . . .	52
5.3	Resultados em barras do sistema 14 barras. . . . .	53
5.4	Margens de segurança – rede de 14 barras . . . . .	54
5.5	Máximos carregamentos – rede de 904 barras . . . . .	54
5.6	Margens de segurança – rede de 904 barras . . . . .	54

# Capítulo 1

## Introdução

A estabilidade de tensão corresponde à capacidade do sistema de energia elétrica de manter tensões aceitáveis para todas as barras do sistema em condições normais de operação e após a ocorrência de um distúrbio. Portanto, é um aspecto muito importante a ser considerado na operação de redes elétricas. Fatores econômicos e o incremento da demanda, associados a interligações cada vez mais complexas que caracterizam os sistemas modernos, resultaram em uma tendência generalizada de operação destas redes em pontos muito próximos de seus limites. Dentre eles encontram-se os limites impostos às tensões nas barras, aos fluxos de potência ativa e reativa nas linhas e transformadores, às injeções de potência reativa nas barras de geração, limites de estabilidade entre outros. Em consequência, os riscos de ocorrência de instabilidade de tensão e eventual colapso de tensão aumentaram consideravelmente, fazendo com que este tópico tenha atraído o interesse das empresas e profissionais da área de energia elétrica nas últimas décadas.

O colapso de tensão caracteriza-se como um fenômeno dinâmico aperiódico, pelo qual as tensões do sistema iniciam uma diminuição monotônica de seus valores, cada vez mais acelerada até a ocorrência de uma queda abrupta em que o sistema não tem mais capacidade para atender a demanda.

Apesar do problema da estabilidade de tensão ser tipicamente dinâmico, vários métodos que utilizam abordagens estáticas são apresentados na literatura. Estes métodos utilizam em geral a formulação clássica de fluxo de carga ou alguma versão modificada dela. É um consenso, que, embora não apresentem a mesma qualidade de resultados que as abordagens dinâmicas, são muito mais eficientes do ponto de vista computacional. São adequados para determinar limites de estabilidade e margens de segurança ao colapso de tensão em ambientes em que as restrições de tempo computacional são muito severas. Exemplos de tais ambientes são a operação em tempo real e o planejamento da operação.

Como o fenômeno configura-se como um fator limitante na operação da rede, em certos casos ações de controle serão imprescindíveis para manter a distância ao colapso de tensão em níveis seguros. No entanto, deve-se considerar que o planejamento de suporte de reativos

permitirá aumentar a reserva do sistema.

Esta tese apresenta uma metodologia para a avaliação da distância entre o ponto de operação da rede e o ponto de máximo carregamento, que, sob certas circunstâncias (ganho infinito do regulador automático de tensão, carga modelada como uma injeção de potência constante, etc.), corresponde ao ponto de colapso de tensão. O sistema é modelado por equações algébricas não lineares cuja solução básica não apresenta maiores complicações. Os incrementos de carga são definidos pela análise de sensibilidade, e formula-se o cálculo de um fator de carregamento  $\lambda$  com base em um conjunto de pontos de operação correspondentes a uma região muito próxima do ponto crítico.

O capítulo 2, apresenta a formulação teórica do problema da instabilidade de tensão, os mecanismos envolvidos na sua ocorrência, as condições e características da rede, enfoques e descrição detalhada de métodos existentes na literatura especializada.

No capítulo 3, é apresentada uma descrição sucinta de alguns métodos de interesse, e relacionados com esta proposta. São descritos o método de Zeng, que baseia-se nas informações de um número de cálculos de fluxos de carga para estimar as condições de máximo carregamento. São descritas também técnicas baseadas em análise de sensibilidade que relaciona alterações em uma certa variável elétrica com alterações em outra variável também elétrica. Nesse contexto, apresenta-se o fluxo de carga com otimização de passo, que permite obter a melhor solução possível para situações de operação infactível.

No capítulo 4, é realizada uma avaliação crítica do método Zeng. Neste caso, tomando por base o estudo de desenvolvimento teórico do método e dos resultados obtidos, são levantadas algumas questões com relação à validade e à eficiência do método. Assim, são feitas discussões detalhadas em relação a esses aspectos e a forma como eles influenciam no rendimento e precisão de cálculo. Na seqüência, são apresentadas conclusões baseadas nas simulações e testes realizados em redes de pequeno e de grande porte.

O capítulo 5 contém o método proposto neste trabalho. São incluídos detalhes de cada passo implementado e mostra-se o algoritmo desenvolvido para sua aplicação utilizando a linguagem Fortran. Finalmente são mostrados os resultados obtidos pelo método proposto quando aplicados a redes de pequeno e de grande porte.

# Capítulo 2

## Estabilidade de tensão

### 2.1 Introdução

A estabilidade de tensão pode ser definida como a habilidade do sistema de potência de manter um nível de tensão aceitável após variações de carga ou topologia. Contingências severas no sistema, como por exemplo: perdas de linhas de transmissão ou geradores, incapacidade local para atender o súbito aumento da demanda, são alguns dos fatores que, sem um tratamento adequado através de ações de controle efetivos, resultam em perda da estabilidade e eventual ocorrência do colapso de tensão.

A essência do fenômeno pode ser explicada como uma sucessão de eventos realimentados, em que as quedas da tensão nas barras são decorrentes de aumentos das correntes na transmissão, de forma a atender o aumento da demanda. Não havendo mais um ponto de operação factível, a tensão sofre uma queda abrupta e o sistema entra em colapso.

Pode-se encontrar na literatura especializada um grande número de trabalhos cujos objetivos básicos são:

- a) aumentar o conhecimento sobre o fenômeno do colapso de tensão e seus mecanismos, incluindo a análise de incidentes ocorridos em redes elétricas de potência reais;
- b) desenvolver metodologias de análise de estabilidade de tensão a fim de avaliar os riscos da ocorrência de colapso de tensão;
- c) propor metodologias para a prevenção do colapso de tensão através de ações de controle que mantenham a distância ao colapso de tensão em níveis seguros.

## 2.2 Ilustração do fenômeno

Para uma melhor compreensão do fenômeno, é analisado um cenário básico, em que uma rede elétrica de potência é representada por uma barra de geração (barra 1), neste caso do tipo *slack*, e uma barra de carga (barra 2), neste caso do tipo PQ, conectadas por uma linha de transmissão modelada por uma impedância igual a  $(R + jX)$ . A Figura 2.1 mostra os detalhes.

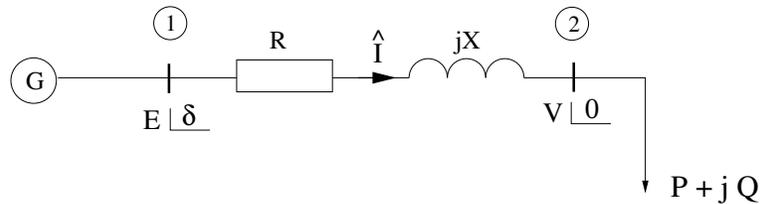


Figura 2.1: Rede elétrica de potência.

Embora o sistema seja de pequeno porte, pode representar um sistema maior, em que o restante da rede é representado por um circuito equivalente de Thévenin visto da carga. O diagrama fasorial das grandezas elétricas é mostrado na Figura 2.2.

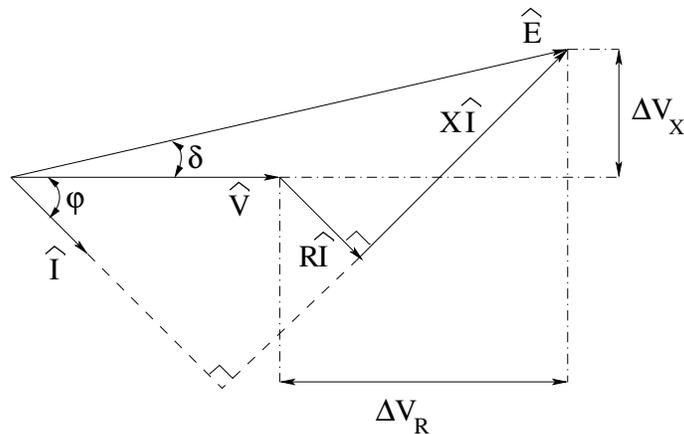


Figura 2.2: Diagrama fasorial da rede da figura 2.1.

Pode-se escrever:

$$E^2 = (V + \Delta V_R)^2 + (\Delta V_X)^2 \quad (2.1)$$

Nota-se que  $\Delta V_R$  e  $\Delta V_X$  mostrados no diagrama fasorial podem ser expressos da seguinte forma:

$$\begin{aligned}\Delta V_R &= RI \cos \varphi + XI \sin \varphi \\ \Delta V_X &= XI \cos \varphi - RI \sin \varphi\end{aligned}\quad (2.2)$$

A potência complexa na barra de carga em termos da tensão, da corrente e do ângulo do fator de potência da carga é dado por:

$$P + jQ = VI \cos \varphi + jVI \sin \varphi \quad (2.3)$$

Substituindo as equações 2.2 e 2.3 na equação 2.1, de forma a incluir termos da potência de carga ativa e reativa, resulta:

$$E^2 = \left( V + \frac{RP + XQ}{V} \right)^2 + \left( \frac{XP - RQ}{V} \right)^2 \quad (2.4)$$

Após manipulações na equação 2.4, chega-se a:

$$E^2 = V^2 + 2(RP + XQ) + (R^2 + X^2) \left( \frac{P^2 + Q^2}{V^2} \right) \quad (2.5)$$

que também pode ser expressa como:

$$V^4 + [2(RP + XQ) - E^2] V^2 + (R^2 + X^2) (P^2 + Q^2) = 0 \quad (2.6)$$

Fazendo  $x = V^2$  e reordenando a equação 2.6, obtém-se uma expressão quadrática da seguinte forma:

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad (2.7)$$

em que:

$$\begin{aligned}a &= 1 \\ b &= 2(RP + XQ) - E^2 \\ c &= (R^2 + X^2) (P^2 + Q^2)\end{aligned}$$

As soluções positivas da equação 2.6 correspondentes às magnitudes da tensão na barra, são chamadas de  $V^H$  e  $V^L$ . Estas representam a solução estável (*alta tensão*) e instável (*baixa tensão*) respectivamente.

$$V^H = \left( \frac{-b + d^{1/2}}{2a} \right)^{1/2} \quad (2.8)$$

$$V^L = \left( \frac{-b - d^{1/2}}{2a} \right)^{1/2} \quad (2.9)$$

em que  $d$  representa o discriminante da equação 2.6 e é dado por:

$$\begin{aligned} d &= b^2 - 4ac \\ d &= E^4 + 4 [2PQRX - E^2 (RP + XQ) - R^2Q^2 - X^2P^2] \end{aligned} \quad (2.10)$$

Para um dado fator de potência, conforme a carga é aumentada,  $V^H$  decresce enquanto que  $V^L$  aumenta. Este processo continua até que  $V^H = V^L$ , o que ocorre quando  $d = 0$ . A potência de carga neste caso é chamada de potência crítica e a tensão correspondente de tensão crítica. Na Figura 2.3, mostra-se o comportamento da magnitude da tensão na barra 2 em função da potência ativa consumida na própria barra, mantendo-se constante a potência reativa  $Q$ . Considera-se para este caso que o fator de potência da barra permaneça constante.

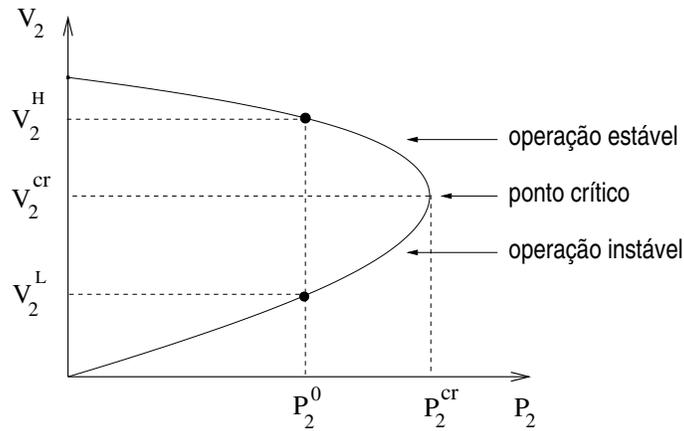


Figura 2.3: Curva  $[PV]$ .

O ponto  $(P_2^{cr}, V_2^{cr})$  corresponde ao ponto crítico, que está localizado na fronteira entre as regiões de operação estável e instável. Este é o ponto de bifurcação sela-nó, que se caracteriza por apresentar o determinante da matriz Jacobiana nulo, ou seja, a partir de um consumo  $P_2^{cr}$  não há mais convergência do fluxo de carga. Neste caso, o valor da potência consumida na barra de carga  $P_2^{cr}$  representa também a máxima potência que pode ser entregue à carga, sendo, por tanto, igual ao máximo carregamento.

À medida que crescem os níveis na transmissão a relação  $R/X$  da linha diminui, de forma que em geral a reatância será sempre muito maior que a resistência. Portanto, a resistência pode ser considerada desprezível ( $R = 0$ ). Assim, a condição para que se tenha pelo menos uma solução na equação 2.6 é que o discriminante  $d$  seja maior ou igual a zero. Neste caso obtém-se a seguinte equação:

$$-P^2 - \frac{E^2}{X}Q + \left(\frac{E^2}{2X}\right)^2 \geq 0 \quad (2.11)$$

Nesta equação fazendo  $Q = 0$ , será obtida uma expressão do limite de potência ativa que pode ser entregue na barra de carga. Da mesma forma, fazendo  $P = 0$ , será obtida uma expressão similar para o caso da potência reativa. Estas duas expressões, mostram que os valores limites da potência ativa e reativa dependem da tensão na barra de referência e da reatância de linha:

$$P \leq \frac{E^2}{2X} \quad (2.12)$$

$$Q \leq \frac{E^2}{4X} \quad (2.13)$$

Nota-se que a equação 2.11 corresponde a uma parábola representada no plano (P,Q), assim, ordenada convenientemente pode ser expressa como:

$$-\frac{QX}{E^2} - \left(\frac{PX}{E^2}\right)^2 + \frac{1}{4} \geq 0 \quad (2.14)$$

Qualquer solução para esta equação poderá ser representada como um ponto que pertence a um espaço em duas dimensões, delimitado pela curva mostrada na Figura 2.4. Nota-se que abaixo da curva tem-se duas soluções, acima nenhuma solução e uma solução sobre própria curva.

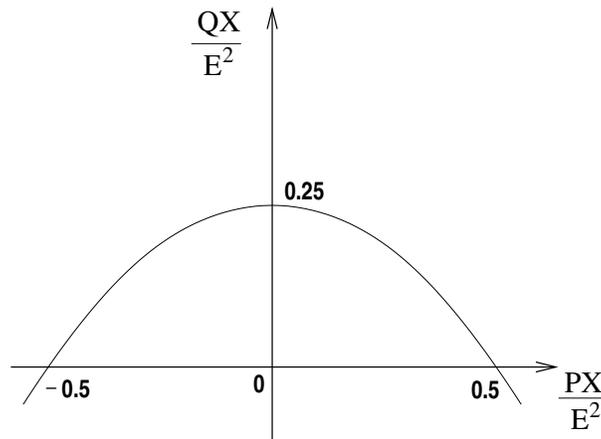


Figura 2.4: Espaço de soluções.

Cabe resaltar que a parábola corresponde ao lugar geométrico de todos os pontos de máximo carregamento. Neste caso pontos com P negativo correspondem a uma geração máxima, enquanto que pontos com P positivo correspondem a uma máxima carga para um dado fator de potência.

No espaço  $(P, V, Q)$ , a equação 2.6 define uma superfície em três dimensões como mostrada na Figura 2.5. As partes superior e inferior desta superfície correspondem às soluções estável e instável respectivamente enquanto que o centro desta superfície ao longo do qual as soluções são iguais corresponde aos pontos de máximo carregamento. A projeção desta linha no plano  $(PQ)$  coincide com a Figura 2.4 e a projeção no plano  $PV$  dos perfis de cada uma das curvas para certos fatores de potência, conforme mostradas, corresponde à curva  $PV$ .

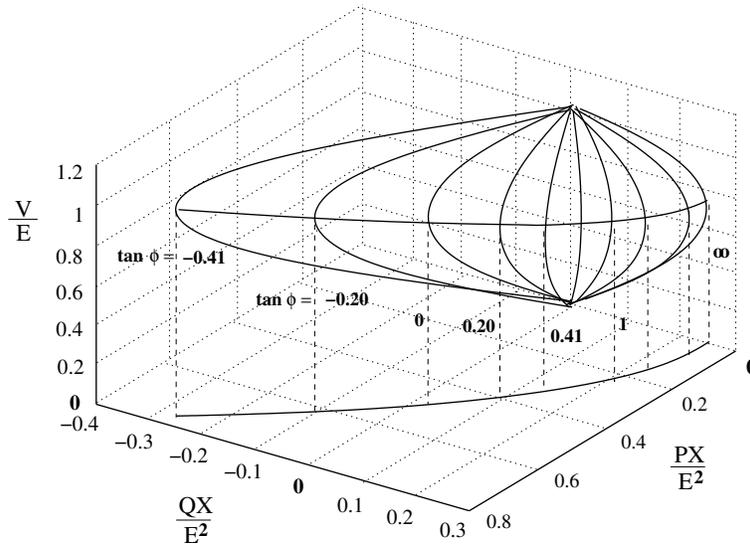


Figura 2.5: Tensão como uma função das potências ativa e reativa de carga.

Desta forma, fica claro que a máxima carga reativa não pode exceder  $E^2/4X$ , enquanto que, qualquer potência ativa poderá ser atendida, desde que a reserva de reativos disponível seja suficiente, sempre levando em conta a capacidade de geração dos geradores, limites dos fluxos nas linhas, etc. Deve-se salientar que, sendo o limite de potência ativa  $E^2/2X$ , esta simples diferença mostrada entre as duas expressões, resulta da natureza do sistema de transmissão e ilustra a dificuldade de transportar grandes quantidades de potência reativa.

## 2.3 Métodos de análise de estabilidade de tensão

Estudos de estabilidade de tensão usando os enfoques estático e dinâmico têm sido realizados, embora o problema de estabilidade seja eminentemente dinâmico. É conhecido que a maior parte dos sistemas que modelam eventos físicos reais são não-lineares. Portanto, a rede elétrica é modelada através de equações diferenciais não lineares. Isto dá uma idéia do comportamento do sistema frente a variação de alguns de seus parâmetros e das condições de operação, de forma que a estabilidade é determinada pelo estudo das equações algébrico-diferenciais, que representam o sistema de potência, em torno do ponto de equilíbrio.

### 2.3.1 Abordagens dinâmicas

Como as abordagens dinâmicas utilizam modelos detalhados do sistema, apresentam resultados mais precisos. É utilizada basicamente a análise não linear, sendo a teoria de bifurcações [1] e a análise de pequenos sinais [2] algumas das mais importantes e mais utilizadas. Vários trabalhos são centrados na discussão da importância de uma modelagem apropriada das cargas [3].

Em geral, os enfoques dinâmicos podem ser subdivididos em três grupos: análises de pequenas perturbações, análises não lineares e análises do modelamento das cargas. O primeiro grupo caracteriza-se por estudar o fenômeno de colapso de tensão através da avaliação da matriz Jacobiana obtida pela linearização das equações dinâmicas do sistema de potência. As análises não lineares (no domínio do tempo) mais significativas são aquelas baseadas na teoria das bifurcações, assim o colapso de tensão pode ser estudado como um fenômeno estático antes da bifurcação e após bifurcação como um fenômeno dinâmico. Análises sobre a importância do modelamento de transformadores com regulação sob carga (OLTC), motores de indução e outros, são encontrados na literatura.

### 2.3.2 Abordagens estáticas

Apesar das abordagens estáticas não levarem em conta a complexa evolução dinâmica do sistema, são muito mais eficientes do ponto de vista computacional. Elas podem se tornar ferramentas importantes para o desenvolvimento de metodologias de avaliação, detecção e prevenção do colapso de tensão, especialmente em ambientes de operação de tempo real, como por exemplo em EMS (*Energy management system*) modernos, em que as restrições de tempo computacional são bastante severas. Abordagens estáticas podem se basear em algum tipo de análise de sensibilidade [4], nas soluções de fluxo de carga [5], e nas soluções de fluxo de carga ótimo [6]. Elas são apropriadas para o cálculo de índices de proximidade ao colapso de tensão e margens de segurança ao colapso de tensão.

Análises com enfoque estático podem ser subdivididas em dois grupos: análises baseadas em sensibilidades e análises baseadas em soluções de fluxos de carga. A primeira estuda, por exemplo, a variação da tensão numa barra em relação a seu consumo de potência reativa, chamada sensibilidade  $Q/V$ . A segunda relaciona a existência do colapso de tensão com a natureza das soluções do fluxo de carga.

### 2.3.3 Índices de proximidade ao colapso de tensão

Os índices são escalares que quantificam a distância de um certo ponto de operação corrente a um ponto crítico para o qual o colapso de tensão ocorre. Esses índices não têm um significado físico definido. Vários índices de proximidade diferentes foram propostos na literatura especializada. Em [7] foi proposto um índice de proximidade baseado no mínimo

valor singular da matriz Jacobiana. Este método foi melhorado mais tarde em [8]. Um índice baseado nas perdas de potência ativa da rede foi apresentado em [9] e [10].

De acordo com o cenário mostrado na seção 2.1, os índices são escalares associados a cada ponto de operação, por exemplo  $(P_2^0, V_2^0)$ . Variações de consumo em torno de  $P_2^0$  implicam em alterações do índice, que indicará uma aproximação ou afastamento do ponto crítico  $(P_2^{cr}, V_2^{cr})$ .

### 2.3.4 Margens de segurança ao colapso de tensão

As margens de segurança são distâncias entre o ponto de operação corrente e o ponto crítico de colapso de tensão, dadas em termos dos parâmetros da rede, como por exemplo MW ou MVar. De acordo com a Figura 2.6, a margem de segurança a ser obtida ( $\Delta P_2$ ) poderia ser:

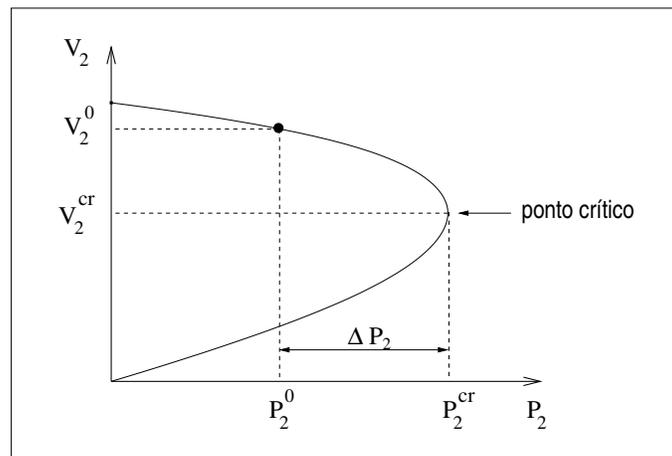


Figura 2.6: Margem de segurança.

$$\Delta P_2 = P_2^{cr} - P_2^0 \quad (2.15)$$

$\Delta P_2$  representa o maior aumento de consumo possível de forma a manter a rede operando ainda na região estável.

Em [11] foi proposto um método para o cálculo do ponto de bifurcação mais próximo. A direção de aumento de carga a partir do ponto de operação corrente é ajustado com base no autovetor esquerdo associado ao autovalor nulo da matriz Jacobiana. Em [12] e [13] a margem de carga para o colapso de tensão é obtida para uma direção de aumento de carga predefinida. É proposto um método iterativo em que os aumentos de carga são definidos através de análise de sensibilidade. Este método foi melhorado em [14]. O carregamento máximo de um sistema

---

pode também ser calculado através do fluxo de carga da continuação [15]. Com a utilização deste método evita-se o mal-condicionamento da matriz Jacobiana nas proximidades do ponto crítico. O fluxo de carga de continuação, que é um método baseado no método de fluxo de carga Newton convencional, baseia-se em passos do tipo preditor-corretor. Ele apresenta as seguintes características: (a) deve-se realizar modificações significativas no método de fluxo de carga de Newton convencional, e (b) a matriz Jacobiana resultante é diferente da matriz utilizada no fluxo de carga de Newton convencional. O cálculo de margens ao colapso de tensão pode também ser feito através de métodos de otimização. Recentemente foi proposta a utilização de métodos de pontos interiores [16]. Embora os métodos de otimização sejam muito confiáveis e precisos, são ainda inapropriados do ponto de vista de aplicações em tempo real. Em [17] é proposto um método para a obtenção do ponto crítico a partir do conhecimento do comportamento da matriz Jacobiana nas proximidades do ponto crítico, que é um ponto de singularidade da matriz Jacobiana das equações de fluxo de carga [18].

# Capítulo 3

## Algumas ferramentas de análise de estabilidade de tensão

### 3.1 Método de Zeng

Zeng e outros [17] propuseram um método que, partindo de um ponto inicial  $s_0$  no espaço de parâmetros (cargas) e seguindo uma certa direção de aumento de carga  $\Delta s$ , permite estimar o ponto de máximo carregamento da rede  $s_{cr}$ :

$$s_{cr} = F(x_{cr}) = s_0 + \lambda^{cr} \cdot \Delta s \quad (3.1)$$

em que  $x_{cr}$  é o vetor das tensões nodais (magnitudes e ângulos de fase) correspondente a  $s_{cr}$ ,  $F$  é o conjunto de equações de fluxo de carga e  $\lambda^{cr}$  é o fator de carregamento crítico. A distância do ponto de operação  $s_0$  ao ponto de singularidade da matriz Jacobiana  $s_{cr}$  é dado por  $\|\lambda^{cr} \cdot \Delta s\|$ , conforme mostra a Figura 3.1.

Define-se uma sequência de pontos (níveis de carga) representados na equação seguinte por  $s_k$ :

$$s_k = s_0 + k \cdot \Delta s \quad k = 0, 1, 2, \dots, K \quad (3.2)$$

para os quais pode-se obter os respectivos estados da rede  $x_k$  através de cálculos de fluxo de carga seguindo uma direção predeterminada. Naturalmente, considera-se que os  $(K + 1)$  pontos considerados correspondam a carregamentos factíveis. O ponto crítico  $s_{cr}$  é estimado em função dos  $(K + 1)$  pontos de operação definidos em 3.2.

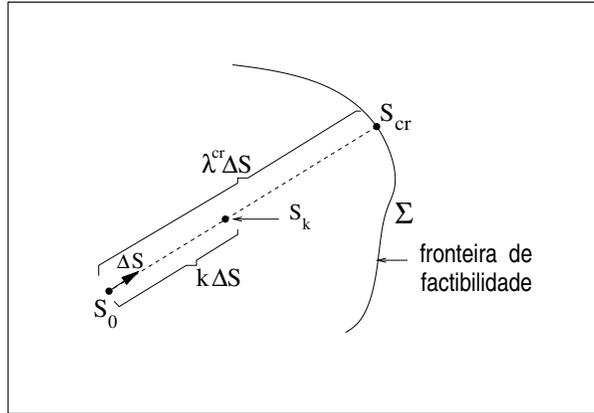


Figura 3.1: Estimação do ponto crítico no espaço de parâmetros.

### 3.1.1 Sensibilidade da tensão para pequenas variações de carga

O conjunto de equações básicas do fluxo de carga pode ser representado pela função vetorial  $F(x)$ :

$$s = F(x) \quad (3.3)$$

em que  $s$  é o vetor de injeções de potência nodais, e  $x$  o vetor de tensões nodais em coordenadas polares ou retangulares. Neste caso, se as injeções de potência forem funções de  $x$ , esta dependência é considerada embutida na função  $F(x)$ , de forma que  $s$  representa somente a componente constante das injeções.

Uma variação de carga resulta em uma variação de estado, conseqüentemente esta variação de estado pode ser escrita como:

$$s + \Delta s = F(x + \Delta x) \quad (3.4)$$

Linearizando a equação acima tem-se:

$$s + \Delta s = F(x) + \frac{\partial}{\partial x} F(x) \cdot \Delta x + \frac{1}{2} \cdot \Delta x^T \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} F(x) \cdot \Delta x + t \quad (3.5)$$

assim, o comportamento da equação 3.3 em torno de um ponto arbitrário de operação  $x_0$ , poderá ser dado por:

$$\Delta s = J(x_0) \Delta x + T(\Delta x) \quad (3.6)$$

A matriz Jacobiana  $J(x_0)$  é definida por:

$$J(x_0) = \frac{\partial F}{\partial x}(x_0) \quad (3.7)$$

$T(\Delta x)$  contém termos em  $\Delta x$  de ordem 2, sendo desconsiderados os termos de ordem maior. Esta equação pode ser escrita como:

$$T_k(\Delta x) = \frac{1}{2} \Delta x^T \left[ \frac{\partial^2 F_k}{\partial x^2} \right] \Delta x \quad k = 1, \dots, n \quad (3.8)$$

Desta maneira, soluções para o fluxo de carga, em que pequenas variações na injeção  $s$  resultaram em pequenas variações nas tensões  $x$ , pode ser expressa em termos de:

$$\Delta x = [J(x_0)]^{-1} \Delta s \quad (3.9)$$

e reflete o comportamento do fluxo de carga em torno do ponto de operação  $x_0$  tal que o Jacobiano é não singular. Neste caso, os termos de ordem 2 e superior foram desprezados, o que é comum nos métodos de cálculo de fluxo de carga convencionais.

### 3.1.2 Sensibilidade nas proximidades da singularidade da matriz Jacobiana

Para pontos  $x_0 = x_{cr}$  em que a matriz Jacobiana é singular, a equação 3.6 pode não apresentar solução utilizando a relação de sensibilidade definida em 3.9, pois não existe inversa para o Jacobiano. No entanto, através de simulações numéricas, verifica-se que pode apresentar solução para alguns casos em que as injeções  $s$  são muito próximas a  $s_{cr}$ .

Por outro lado, lembrando da teoria de espaços vetoriais, o conjunto vetorial de todas as soluções de  $Ax = 0$  é um espaço vetorial. O espaço vetorial de todas as soluções de  $Ax = 0$  chama-se *espaço nulo* de  $A$ . De forma que, se uma matriz  $A$  com dimensão  $(m \times n)$  tem  $r$  colunas linearmente independentes o *espaço nulo* de  $A$  terá dimensão  $(n-r)$ . A dimensão deste *espaço nulo* chama-se *nulidade* de  $A$ .

No caso em que  $J(x_{cr})$  representa um Jacobiano singular com nulidade 1, existem dois vetores  $\alpha$  e  $v$ , diferentes de zero, tais que:

$$J(x_{cr})v = 0 \quad (3.10)$$

$$J(x_{cr})^T \alpha = 0 \quad (3.11)$$

em que o vetor  $v$  representa o espaço nulo do Jacobiano, enquanto que o vetor  $\alpha$  representa o espaço nulo da transposta do Jacobiano.

Associados com  $J(x_{cr})$  e com  $J(x_{cr})^T$  existe um espaço coluna atravessado por  $2n - 1$  vetores independentes perpendiculares a  $\alpha$  e  $v$  respectivamente. A matriz  $W$  representa vetores  $w_k$  perpendiculares a  $v$ . Sendo que a matriz Jacobiana tem dimensão  $(2n \times 2n)$ , o espaço coluna  $W$  será de dimensão  $(2n \times (2n - 1))$ . Mostra-se na Figura 3.2 detalhes desses vetores.

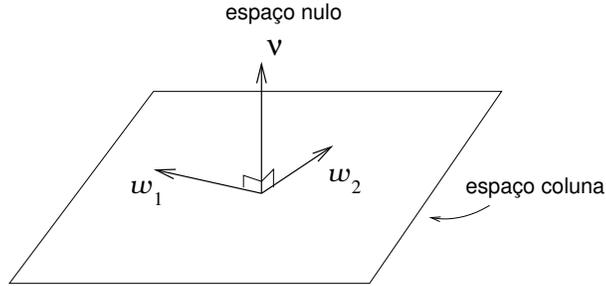


Figura 3.2: Espaços coluna associados ao Jacobiano singular.

### 3.1.3 Soluções para pequenos incrementos na injeção de potência

No caso geral em que  $\Delta s$  não é ortogonal a  $\alpha$ , ou seja,  $\Delta s$  não pertence ao espaço coluna do Jacobiano, fica claro, que o termo linear em 3.6 é insuficiente para obter  $\Delta x$ . De forma que, da equação 3.11 o termo linear pode somente corresponder à componente de  $\Delta s$  ortogonal a  $\alpha$ . Assim, o termo de ordem maior  $T(\Delta x)$  deverá fazer parte da solução. Logo, se as tensões foram representadas em coordenadas polares [20], este termo em função de  $\Delta x$  pode ser representado por:

$$T(\Delta x) = \frac{1}{2} J(\Delta x) \Delta x \quad (3.12)$$

Uma variação no estado da rede pode ser representada em termos de dois componentes, um ao longo do espaço nulo do Jacobiano  $v$  e outro perpendicular a este.

$$\Delta x = v\Delta\sigma + W\Delta\mu \quad (3.13)$$

substituindo 3.12 e 3.13 na equação 3.6, resulta:

$$\Delta s = J(x_s) [v\Delta\sigma + W\Delta\mu] + \frac{1}{2} J(v\Delta\sigma + W\Delta\mu) [v\Delta\sigma + W\Delta\mu] \quad (3.14)$$

utilizando a propriedade  $A(x)y = A(y)x$ , e desprezando termos de ordem maior, a equação fica:

$$\Delta s = J(x_s) W \Delta \mu + \frac{1}{2} J(v) v \Delta \sigma^2 \quad (3.15)$$

Premultiplicando a equação acima por  $\alpha^T$ , resulta:

$$\alpha^T \Delta s = \alpha^T J(x_s) W \Delta \mu + \frac{1}{2} \alpha^T J(v) v \Delta \sigma^2 \quad (3.16)$$

Utilizando 3.11, ter-se-á  $\alpha^T J(x_s) W \Delta \mu = 0$ , de forma que:

$$\alpha^T \Delta s = \frac{1}{2} \alpha^T J(v) v \Delta \sigma^2 \quad (3.17)$$

Desta maneira, chega-se a:

$$\Delta \sigma = \pm \left[ \frac{2 \alpha^T \Delta s}{\alpha^T J(v) v} \right]^{1/2} \quad (3.18)$$

Finalmente substituindo 3.18 em 3.15 e reordenando a equação fica:

$$J(x_s) W \Delta \mu = \Delta s - J(v) v \left[ \frac{\alpha^T \Delta s}{\alpha^T J(v) v} \right] \quad (3.19)$$

Por sua vez, substituindo o lado direito da igualdade por  $\Delta s'$ , a equação fica:

$$J(x_s) W \Delta \mu = \Delta s' \quad (3.20)$$

Premultiplicando ambos lados da equação por  $\alpha^T$  tem-se:

$$\alpha^T J(x_s) W \Delta \mu = \alpha^T \Delta s' \quad (3.21)$$

De acordo com a equação 3.11, tem-se:

$$0 = \alpha^T \Delta s' \quad (3.22)$$

$\Delta \mu$  será obtido premultiplicando 3.20 por  $W^T$ , resultando em:

$$\Delta \mu = \left[ W^T J(x_s) W \right]^{-1} W^T \Delta s' \quad (3.23)$$

### 3.1.4 Distância ao ponto de máximo carregamento

A partir da teoria detalhada anteriormente, deve-se determinar uma equação que representa a variação dos estados correspondentes às injeções  $s$  no sistema. A Figura 3.3 ilustra o problema.

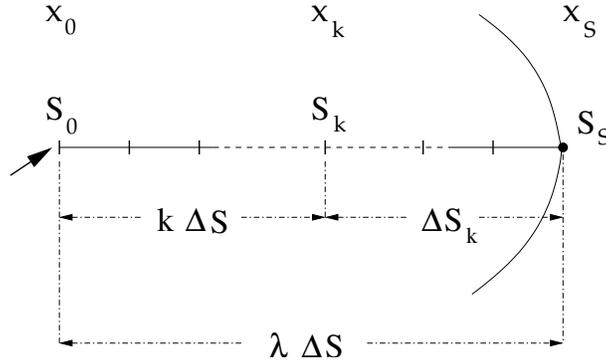


Figura 3.3: Distância ao ponto de máximo carregamento.

Segundo as equações 3.1 e 3.2 o máximo carregamento  $s_{cr}$  e a potência para um certo nível de carga  $s_k$  podem ser dados por:

$$s_{cr} = s_0 + \lambda \Delta s \quad (3.24)$$

$$s_k = s_0 + k \Delta s \quad (3.25)$$

Subtraindo estas equações, obtém-se a distância no espaço de parâmetros  $\Delta s_k$  entre o ponto  $s_k$  e o limite de máximo carregamento  $\Delta s_{cr}$ .

$$\Delta s_k = s_{cr} - s_k = (\lambda - k) \Delta s \quad (3.26)$$

Na Figura 3.3 pode-se observar que para cada injeção  $s_k$  no sistema, tem-se seu correspondente estado solução  $x_k$ . Assim, mostra-se que o ponto de máximo carregamento  $x_{cr} = x_s$  pode ser calculado por:

$$x_{cr} = x_k + \Delta x_k \quad (3.27)$$

A equação 3.13 pode ser reescrita como segue:

$$\Delta x_k = v \Delta \sigma_k + W \Delta \mu_k \quad (3.28)$$

Desta forma, substituindo convenientemente as equações 3.18, 3.23 e 3.19 na equação 3.28, obtém-se:

$$\Delta x_k = v \left[ \frac{2\alpha^T \Delta s_k}{\alpha^T J(v) v} \right]^{1/2} + W \left[ W^T J(x_s) W \right]^{-1} W^T \left[ \Delta s_k - J(v) v \left( \frac{\alpha^T \Delta s_k}{\alpha^T J(v) v} \right) \right] \quad (3.29)$$

Colocando  $\Delta s_k$  segundo a equação 3.26, tem se:

$$v \Delta \sigma_k = v \left[ \frac{2\alpha^T (\lambda - k) \Delta s}{\alpha^T J(v) v} \right]^{1/2} \quad (3.30)$$

$$W \Delta \mu_k = W \left[ W^T J(x_s) W \right]^{-1} W^T \left[ (\lambda - k) \Delta s - J(v) v \left( \frac{\alpha^T (\lambda - k) \Delta s}{\alpha^T J(v) v} \right) \right] \quad (3.31)$$

Fazendo as reduções:

$$v' = v \left[ \frac{2\alpha^T \Delta s}{\alpha^T J(v) v} \right]^{1/2} \quad (3.32)$$

$$w = W \left[ W^T J(x_s) W \right]^{-1} W^T \left[ \Delta s - J(v) v \left( \frac{\alpha^T \Delta s}{\alpha^T J(v) v} \right) \right] \quad (3.33)$$

Finalmente, considerando que o termo  $(\lambda - k)$ , apresentado nas equações 3.30, 3.31 é um escalar, a equação 3.29 fica como:

$$\Delta x_k = v' (\lambda - k)^{1/2} + w (\lambda - k) \quad (3.34)$$

em que o vetor  $v'$  representa o espaço nulo da matriz Jacobiana e  $w$  é um vetor ortogonal a  $v'$  que representa o espaço coluna associado à transposta da matriz Jacobiana. Desta forma  $x_k$  pode ser dado como:

$$x_k = x_{cr} + v' (\lambda - k)^{1/2} + w (\lambda - k) \quad (3.35)$$

O vetor  $v'$  segundo a equação 3.32 é representado multiplicando o vetor  $v$  por um termo escalar constante desconhecido. Será mostrado adiante que para a obtenção do máximo carregamento  $s_{cr}$  não é necessário conhecer  $v'$  e  $w$ . Seus valores podem ser obtidos posteriormente baseados nos cálculos dos fluxos de carga. Na seqüência  $v'$  será representado como  $v$  só por simplicidade.

### 3.1.5 Estimativa do ponto de máximo carregamento

Para estimar o ponto de máximo carregamento e o estado correspondente nesse ponto, seguindo a teoria descrita, é necessário determinar o parâmetro  $\lambda$ . Retomando a equação 3.2, define-se uma sequência de níveis de carga dados por:

$$s_k = s_0 + k \cdot \Delta s \quad k = 0, 1, 2, \dots, K \quad (3.36)$$

Assim, define-se:

$$\Delta_j x_k = \Delta_{j-1} x_k - \Delta_{j-1} x_{k-1} \quad (3.37)$$

em que  $\Delta_0 x_k = x_k$ . A Figura 3.4 mostra um conjunto de pontos (*estados*) que correspondem a um certo número de fluxos de carga executados como resultado de realizar incrementos de carga constante ( $\Delta s$ ) no sistema. Nota-se que para o caso de 5 fluxos de carga é obtido uma sequência de vetores  $\Delta_j x_k$  que por sua vez são resultado da diferença ordenada e sucessiva a partir da diferença entre os estados  $x_{k-i}$ .

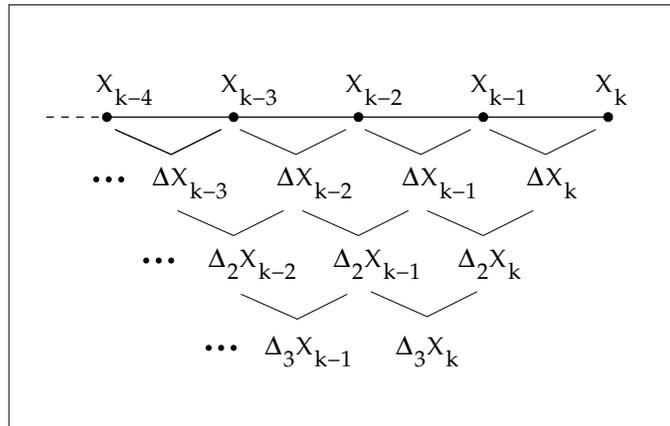


Figura 3.4: Ilustração da equação 3.37.

Formula-se o cálculo de um parâmetro  $\beta$ , de forma que este relacione os estados obtidos com o conhecido parâmetro estimador de estado  $\lambda$ . Para um valor de  $K$  escolhido, a equação seguinte mostra sua definição:

$$\beta_K = \frac{\|\Delta_{K-1} x_K\|}{\|\Delta_{K-1} x_{K-1}\|} \quad (3.38)$$

Definido dessa forma o parâmetro  $\beta$  leva embutido informações acerca da topologia e das características da rede.

**Caso: 5 fluxos de carga ( $K = 4$ )**

Caso  $K$  seja igual a 4, indicando que o ponto crítico será estimado a partir de 5 pontos de operação (e conseqüentemente 5 cálculos de fluxo de carga), tem-se:

$$\beta_4 = \frac{\|\Delta_3 x_K\|}{\|\Delta_3 x_{K-1}\|} \quad (3.39)$$

onde:

$$\begin{aligned} \Delta_3 x_K &= \Delta_2 x_K - \Delta_2 x_{K-1} \\ \Delta_3 x_K &= x_K - 3x_{K-1} + 3x_{K-2} - x_{K-3} \end{aligned} \quad (3.40)$$

e:

$$\begin{aligned} \Delta_3 x_{K-1} &= \Delta_2 x_{K-1} - \Delta_2 x_{K-2} \\ \Delta_3 x_{K-1} &= x_{K-1} - 3x_{K-2} + 3x_{K-3} - x_{K-4} \end{aligned} \quad (3.41)$$

Substituindo 3.35 nas equações acima, tem-se:

$$\Delta_3 x_K = v \left[ (\lambda - K)^{1/2} - 3(\lambda - K + 1)^{1/2} + 3(\lambda - K + 2)^{1/2} - (\lambda - K + 3)^{1/2} \right] \quad (3.42)$$

enquanto que:

$$\Delta_3 x_{K-1} = v \left[ (\lambda - K + 1)^{1/2} - 3(\lambda - K + 2)^{1/2} + 3(\lambda - K + 3)^{1/2} - (\lambda - K + 4)^{1/2} \right] \quad (3.43)$$

Substituindo estas duas equações em 3.39, obtém-se:

$$\beta_K = \frac{(\lambda - K)^{1/2} - 3(\lambda - K + 1)^{1/2} + 3(\lambda - K + 2)^{1/2} - (\lambda - K + 3)^{1/2}}{(\lambda - K + 1)^{1/2} - 3(\lambda - K + 2)^{1/2} + 3(\lambda - K + 3)^{1/2} - (\lambda - K + 4)^{1/2}} \quad (3.44)$$

O fator de carregamento crítico  $\lambda$ , para este caso, corresponde à solução de:

$$f(\lambda) = (\lambda - 4)^{1/2} - (3 + \beta_4)(\lambda - 3)^{1/2} + 3(1 + \beta_4)(\lambda - 2)^{1/2} - (1 + 3\beta_4)(\lambda - 1)^{1/2} + \beta_4 \lambda^{1/2} \quad (3.45)$$

**Caso: 6 fluxos de carga ( $K = 5$ )**

Neste caso, seguindo o mesmo procedimento, para 6 fluxos de carga ( $K = 5$ ), tem-se:

$$\beta_5 = \frac{\|\Delta_4 x_K\|}{\|\Delta_4 x_{K-1}\|} \quad (3.46)$$

de forma que:

$$\beta_5 = \frac{(\lambda - 5)^{1/2} - 4(\lambda - 4)^{1/2} + 6(\lambda - 3)^{1/2} - 4(\lambda - 2)^{1/2} + (\lambda - 1)^{1/2}}{(\lambda - 4)^{1/2} - 4(\lambda - 3)^{1/2} + 6(\lambda - 2)^{1/2} - 4(\lambda - 1)^{1/2} + (\lambda)^{1/2}} \quad (3.47)$$

O fator de carregamento crítico  $\lambda$ , corresponde à solução de:

$$f(\lambda) = (\lambda - 5)^{1/2} - (4 + \beta_5)(\lambda - 4)^{1/2} + (6 + 4\beta_5)(\lambda - 3)^{1/2} - (4 + 6\beta_5)(\lambda - 2)^{1/2} + (1 + 4\beta_5)(\lambda - 1)^{1/2} - \beta_5\lambda^{1/2} \quad (3.48)$$

**Caso: 7 fluxos de carga ( $K = 6$ )**

Neste caso, tem-se:

$$\beta_6 = \frac{\|\Delta_5 x_K\|}{\|\Delta_5 x_{K-1}\|} \quad (3.49)$$

de forma que:

$$\beta_6 = \frac{(\lambda - 6)^{1/2} - 5(\lambda - 5)^{1/2} + 10(\lambda - 4)^{1/2} - 10(\lambda - 3)^{1/2} + 5(\lambda - 2)^{1/2} - (\lambda - 1)^{1/2}}{(\lambda - 5)^{1/2} - 5(\lambda - 4)^{1/2} + 10(\lambda - 3)^{1/2} - 10(\lambda - 2)^{1/2} + 5(\lambda - 1)^{1/2} - (\lambda)^{1/2}} \quad (3.50)$$

O fator de carregamento crítico  $\lambda$ , corresponde à solução de:

$$f(\lambda) = (\lambda - 6)^{1/2} - (5 + \beta_6)(\lambda - 5)^{1/2} + (10 + 5\beta_6)(\lambda - 4)^{1/2} - (10 + 10\beta_6)(\lambda - 3)^{1/2} + (5 + 10\beta_6)(\lambda - 2)^{1/2} - (1 + 5\beta_6)(\lambda - 1)^{1/2} + \beta_6\lambda^{1/2} \quad (3.51)$$

Em cada um dos casos detalhados anteriormente, o cálculo do parâmetro estimador  $\lambda$  será obtido após a resolução da equação  $f(\lambda)$ . Nota-se que esta equação é função unicamente



### 3.2.1 Relações básicas

Resolver o sistema de equações de fluxo de carga levando em consideração métodos de sensibilidade corresponde a resolver [24]:

$$g(x, u, p) = 0 \quad (3.52)$$

em que  $x$  é o vetor de estado (tensões) da rede,  $u$  é o vetor das variáveis de controle e  $p$  representa os parâmetros da rede. Desta forma, variações  $\Delta x$  que resultaram de pequenas mudanças nas variáveis  $\Delta u$  e parâmetros  $\Delta p$ , podem ser relacionadas segundo a série de Taylor. No caso em que só são considerados termos de primeira ordem, tem-se:

$$g(x + \Delta x, u + \Delta u, p + \Delta p) = g(x, u, p) + g_x \Delta x + g_u \Delta u + g_p \Delta p \quad (3.53)$$

este pode ser escrito como:

$$\Delta g = g_x \Delta x + g_u \Delta u + g_p \Delta p = 0 \quad (3.54)$$

As matrizes  $g_x$ ,  $g_u$  e  $g_p$  correspondem às derivadas das equações de fluxo de carga com relação a  $x$ ,  $u$  e  $p$  respectivamente. As alterações no vetor de variáveis de estado podem ser expressas por:

$$\Delta x = S_{xu} \Delta u + S_{xp} \Delta p \quad (3.55)$$

onde:

$$S_{xu} = -g_x^{-1} g_u \quad (3.56)$$

$$S_{xp} = -g_x^{-1} g_p \quad (3.57)$$

$S_{xu}$  e  $S_{xp}$  representam as sensibilidades das variáveis de estado  $x$  para alterações das variáveis de controle  $u$  e dos parâmetros  $p$ , respectivamente.

Variáveis dependentes, como por exemplo fluxos em linhas de transmissão e transformadores, correntes, injeções de potência reativa em barras de geração, etc. são também funções das variáveis de estado  $x$ , variáveis de controle  $u$  e parâmetros  $p$ . Estas podem ser representadas por:

$$w(x, u, p) = 0 \quad (3.58)$$

Expandindo em série de Taylor e considerando só termos de primeira ordem, tem se:

$$\Delta w = w_x \Delta x + w_u \Delta u + w_p \Delta p = 0 \quad (3.59)$$

Como  $w_p = 0$ , a sensibilidade das variáveis dependentes pode ser expressa como:

$$\Delta w = S_{wu} \Delta u + S_{wp} \Delta p \quad (3.60)$$

onde:

$$S_{wu} = -w_x g_x^{-1} g_u + w_u \quad (3.61)$$

$$S_{wp} = -w_x g_x^{-1} g_p \quad (3.62)$$

$S_{wu}$  e  $S_{wp}$  representam sensibilidades das variáveis dependentes  $w$  para alterações na variável de controle  $u$  e parâmetro  $p$  respectivamente.  $w_x, w_u, w_p$  são matrizes constituídas por derivadas parciais do vetor  $g$  em relação àqueles elementos acima indicados.

### 3.2.2 Sensibilidade da geração de reativos [12, 13, 14]

A sensibilidade da geração de potência reativa em relação a alterações de cargas ativas ou reativas para barras especificadas são dadas pela matriz de sensibilidade  $S_{wp}$ . Desconsiderando alterações nas variáveis de controle  $u$ ,  $\Delta u$  será igual a zero, assim as equações 3.55 e 3.60 ficam:

$$\Delta x = S_{xp} \Delta p \quad (3.63)$$

$$\Delta w = S_{wp} \Delta p \quad (3.64)$$

Mostra-se agora, que é possível calcular a alteração da potência reativa gerada por um certo gerador  $j$   $\Delta Q_j$  devido a uma alteração de carga ativa  $\Delta p$  e reativa  $\Delta q$  em uma barra  $i$ :

$$\Delta Q_{ji} = S_{wp}(j, i_p) \Delta p_i + S_{wp}(j, i_q) \Delta q_i \quad (3.65)$$

onde:

$$S_{wp}(j, i_p) = \frac{\partial Q_{ji}}{\partial P_i} \quad (3.66)$$

$$S_{wp}(j, i_q) = \frac{\partial Q_{ji}}{\partial Q_i} \quad (3.67)$$

Caso em que somente alterações de carga ativa na barra  $i$  foram atribuídas ao sistema, a variação de potência reativa gerada na barra  $j$  será calculada por:

$$\Delta Q_{ji} = S_{wp}(j, i_p) \Delta p_i \quad (3.68)$$

De forma que uma alteração de carga atribuída ao sistema ou barra analisada pode levar uma unidade geradora a atingir sua geração máxima de reativos. Neste caso, o cálculo desta alteração de carga poderá ser determinada através de fatores de sensibilidade e dos limites de geração de reativos dos geradores do sistema:

$$\Delta P_i^n = \min_j [(Q_{jmax} - Q_j) / S_{wp}(j, i)] \quad (3.69)$$

Aqui  $Q_{jmax}$  representa o valor da capacidade máxima de geração de MVar da unidade  $j$ ,  $Q_j$  é o valor de operação atual da unidade e  $S_{wp}(j, i)$  é um elemento da matriz de sensibilidade.

A Figura 3.6 mostra o aumento de carga definido por análise de sensibilidade, considerando apenas um aumento de potência ativa em uma certa barra  $i$  de uma rede. Neste caso tem-se:

$$\Delta P_i = P_i^1 - P_i^0 = \frac{\Delta Q_j}{S_{wp}(j, i)} \quad (3.70)$$

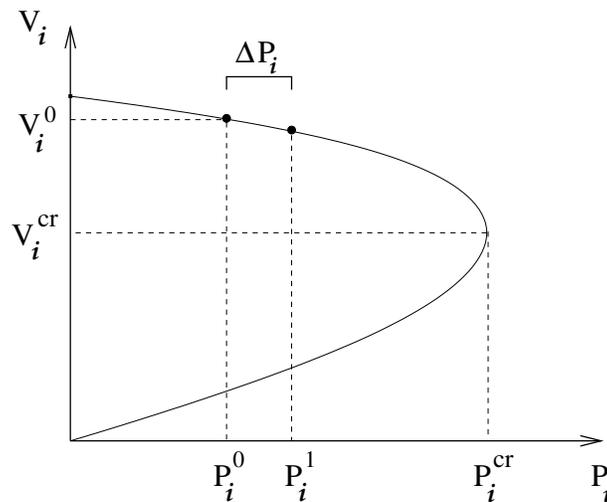


Figura 3.6: Aumento de carga definido pela análise de sensibilidade.

De acordo a relação de sensibilidade, um aumento de carga  $\Delta p_i$  fará com que o limite de geração de potência reativa do gerador  $j$  atinja o seu limite. Se houver um número maior de geradores, escolhe-se o gerador  $j$  cujo limite será atingido em primeiro lugar. Em [12], [13] e [14] são propostos métodos em que o ponto de máximo carregamento é atingido partindo-se de um ponto de operação inicial e aumentando a carga gradativamente em função das sensibilidades dos geradores.

### 3.3 Fluxo de carga com otimização de passo

Dependendo das características próprias do sistema, como topologia, distribuição de cargas, etc, é possível que o cálculo de fluxo de carga apresente um desempenho fraco (grande número de iterações) ou mesmo não convirja para uma solução, mesmo que o sistema esteja operando na região factível. Estas situações também podem ocorrer após distúrbios na rede. Nestes casos, é necessário que sejam introduzidas modificações no cálculo de fluxo de carga convencional de forma que o ponto de operação seja obtido e o bom desempenho do procedimento de cálculo seja restabelecido.

Por outro lado existem situações, tais como aumentos excessivos da carga ou distúrbios severos na rede, que a levam para a região inactível. Nestes casos, o cálculo de fluxo de carga diverge e não se consegue extrair informações sobre a situação da rede a partir dos resultados numéricos (*mismatches* de potência, tensões, etc). Modificações no procedimento de cálculo de fluxo de carga tais que o cálculo de fluxo de carga convirja para uma solução são desejáveis. Esta solução, embora não corresponda ao ponto de operação da rede, pode fornecer informações importantes sobre a rede, causas da não convergência e eventualmente sobre maneiras de se levar o sistema de volta à região factível através de ações de controle apropriadas.

Dessa forma introduz-se um fator de otimização  $\mu$  (multiplicador ótimo) nas equações de fluxo de carga, de forma que não se alteram os procedimentos convencionais de solução [20, 21]. Assim, o problema de fluxo de carga, expandido em série de Taylor, considerando até os termos de segunda ordem e representando os vetores de estado em componentes retangulares ( $e + jf$ ) fica [20]:

$$\Delta s(x + \mu\Delta x) = s^{esp} - s(x) - \mu J\Delta x - \mu^2 s(\Delta x) = 0 \quad (3.71)$$

onde:

$$x^j = x^{j-1} + \mu\Delta x^{j-1} \quad (3.72)$$

e:

$$\Delta x^{j-1} = J(x^j)^{-1} \Delta s^j \quad (3.73)$$

de maneira que o vetor de estado da rede em uma iteração  $j$  é dado por:

$$x^j = x^{j-1} + \mu J(x^j)^{-1} \Delta s^j \quad (3.74)$$

em que  $\Delta s^j$  é o vetor de mismatches de potência e  $J(x^j)$  é a matriz Jacobiana.

O fator de otimização passo ou multiplicador ótimo ( $\mu$ ) será calculado de forma a minimizar uma função quadrática baseada nos *mismatches* de potência:

$$F(x^j) = \frac{1}{2} [\Delta s(x^j)]^T [\Delta s(x^j)] \quad (3.75)$$

Substituindo  $\Delta s^j$  em  $F(x_j)$  e aplicando condição de otimalidade  $(\partial F/\partial \mu) = 0$ , obtém-se a seguinte equação :

$$g_0 + g_1\mu + g_2\mu^2 + g_3\mu^3 = 0 \quad (3.76)$$

em que:

$$g_0 = \sum_{i=1}^{2n} (a_i b_i)$$

$$\begin{aligned}
g_1 &= \sum_{i=1}^{2n} (b_i^2 + 2a_i c_i) \\
g_2 &= 3 \sum_{i=1}^{2n} (b_i c_i) \\
g_3 &= 2 \sum_{i=1}^{2n} (c_i^2)
\end{aligned} \tag{3.77}$$

Da equação 3.71 os vetores  $a$ ,  $b$  e  $c$  ficam [20] :

$$\begin{aligned}
a &= s^{esp} - s(x) \\
b &= -J\Delta x = -a \\
c &= -s(\Delta x)
\end{aligned} \tag{3.78}$$

No caso que os vetores de estado são representados em termos de coordenadas polares, procedendo da mesma maneira, pode-se escrever [21]:

$$\Delta s(x + \mu\Delta x) = \begin{bmatrix} a_P \\ a_Q \end{bmatrix} + \mu \begin{bmatrix} b_P \\ b_Q \end{bmatrix} + \mu^2 \begin{bmatrix} c_P \\ c_Q \end{bmatrix} = 0 \tag{3.79}$$

os vetores  $a_P$ ,  $b_P$  e  $c_P$  constituem elementos dos mismatches de potência ativa enquanto que  $a_Q$ ,  $b_Q$  e  $c_Q$  são de potência reativa. Estes, para o caso da potência ativa são dados por:

$$\begin{aligned}
a_P &= \Delta P(x) \\
b_P &= -a_P \\
c_P &= T_P(x)
\end{aligned} \tag{3.80}$$

Para o caso da potência reativa:

$$\begin{aligned}
a_Q &= \Delta Q(x) \\
b_Q &= -a_Q \\
c_Q &= T_Q(x)
\end{aligned} \tag{3.81}$$

onde  $T_P$  e  $T_Q$  para uma barra  $i$  são:

$$\begin{aligned}
T_i^P &= \frac{1}{2} \cdot \left[ \sum_{jek} \left( \Delta\theta_j \cdot \frac{\partial}{\partial\theta_j} \right) + \sum_{jek} \left( \Delta V_j \cdot \frac{\partial}{\partial V_j} \right) \right]^2 \cdot \Delta P_i \\
T_i^Q &= \frac{1}{2} \cdot \left[ \sum_{jek} \left( \Delta\theta_j \cdot \frac{\partial}{\partial\theta_j} \right) + \sum_{jek} \left( \Delta V_j \cdot \frac{\partial}{\partial V_j} \right) \right]^2 \cdot \Delta Q_i
\end{aligned} \tag{3.82}$$

# Capítulo 4

## Avaliação do método proposto em [17]

### 4.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é realizar uma avaliação detalhada do método proposto em [17], de forma que se possa explorar as suas características e eliminar as suas limitações. Uma descrição deste método foi apresentada no Capítulo 3, seção 3.1.

Considera-se três etapas para este propósito. Na primeira serão discutidos aspectos relacionados com a precisão e eficiência do método proposto. Tais aspectos a serem analisados envolverão testes em redes de forma a acompanhar os resultados em cada caso. No segundo momento, será apresentado um conjunto de medidas e recomendações de forma a constituir uma base para a aplicação do método a fim de melhorar sua performance e precisão. Finalmente, serão realizados testes em redes de pequeno e grande porte para avaliar os resultados finais.

### 4.2 Questões levantadas

Uma contribuição crítica é sintetizada em um conjunto de questões levantadas e propostas neste trabalho. Estas questões surgem como resultado de uma análise e estudo do desenvolvimento teórico e resultados obtidos no método apresentado em [17]. Cabe notar que elas guardam relação com a validade e a eficiência deste método. Estas são:

a) Deve-se realizar uma verificação de como a precisão do método se relaciona com: (1) a distância entre os pontos para os quais são realizados cálculos de fluxos de carga e o ponto crítico a ser estimado, e (2) o tamanho do passo de acréscimo de carga para os cálculos de fluxo de carga. Acredita-se que os resultados devam ser menos precisos se essa distância for grande e o tamanho de passo for pequeno.

b) Quanto ao número de fluxos de carga, é necessário ter uma idéia mais precisa desse número em função dos vários sistemas, incluindo redes de grande porte. Acredita-se que o número requerido pode ser menor quando os fluxos de carga foram executados perto do ponto crítico.

c) Quanto às não linearidades do sistema, esse aspecto não é discutido em [17]. Sabe-se que, com o aumento da carga, certos controles e limites devem ser considerados e eles introduzem descontinuidades no comportamento de certas variáveis do sistema. Por exemplo, os limites de geração de potência reativa dos geradores afetam a precisão do método. Acredita-se que se os cálculos de fluxos de carga não levarem tais limites em consideração, o método pode levar a resultados demasiado otimistas, ou seja, pode fornecer uma margem de segurança ao colapso de tensão maior que a real.

d) Quanto à eficiência, é importante conhecer o desempenho geral do método, explorar suas características a fim de estabelecer possíveis estratégias para conseguir economia de tempo computacional sem prejudicar a precisão dos resultados.

Serão discutidos a seguir os aspectos levantados acima. Cada aspecto será acompanhado por resultados obtidos através de simulações.

#### 4.2.1 Distância entre $s_0$ e $s_{cr}$

Considerar que o caso base  $s_0$  corresponda ao primeiro ponto do conjunto selecionado para a estimativa. Além disso, o menor ou maior afastamento deste ponto em relação ao ponto de máximo carregamento  $s_{cr}$  é determinado pelas condições de operação da própria rede, informação esta que não é conhecida *a priori*. A Fig. 4.1 mostra duas situações, em que  $s_0$  está próximo e longe de  $s_{cr}$ .

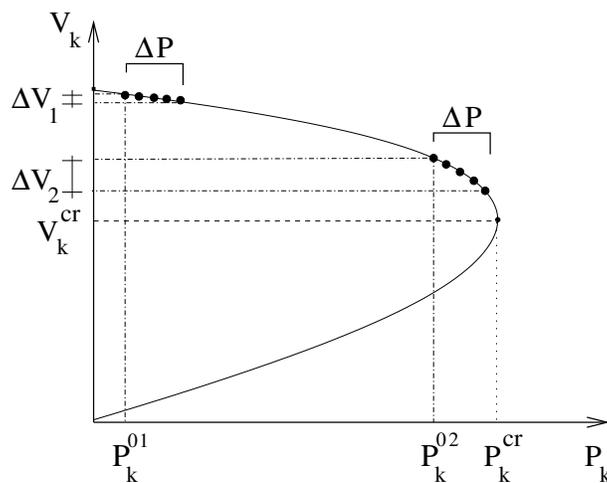


Figura 4.1: Potência base e incrementos de carga.

Observa-se na Figura 4.1 que incrementos iguais de carga  $\Delta P$  não resultam necessariamente em incrementos iguais de tensão  $\Delta V$ . No caso, nota-se que  $\Delta V_1 < \Delta V_2$ . Porém, deve-se lembrar que  $\beta_k$  da equação 3.38 é calculado em função das normas de vetores que por sua vez são resultados de diferenças sucessivas de vetores de estado. Esta diferença entre as tensões pode afetar significativamente os cálculos numéricos, constituindo uma fonte de erro para o método. Outro aspecto a ressaltar é que o perfil da curva naquelas regiões da curva PV onde estão indicados os casos base  $P_k^{01}$  e  $P_k^{02}$  são marcadamente diferentes. Isto tem muita importância uma vez que o ponto estimado (ponto crítico) é resultado de uma extrapolação matemática realizada pelo método, que na verdade segue o perfil da curva definida nessas regiões pelos pontos selecionados para a estimativa. Desta forma espera-se que a imprecisão seja maior quando o ponto base esteja mais afastado do ponto de máximo carregamento.

Foram realizadas simulações com a rede de 14 barras e 20 ramos [19]. Detalhes desta rede são mostrados na Figura 4.2. A tolerância adotada para convergência em todos os casos foi de 0,1 MW/MVar. Os dados base do sistema foram considerados conforme a referência indicada. Nesta parte, não está considerado o controle de potência reativa em barras PV. O número de fluxos de carga selecionado para as simulações foi 5, ou seja,  $K=4$ .

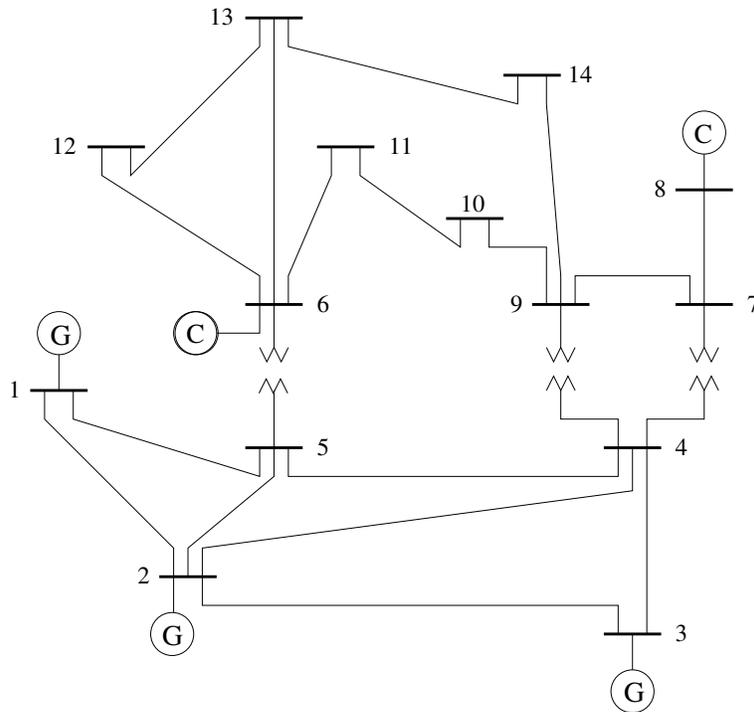


Figura 4.2: Detalhes da rede IEEE-14.

Três grupos de simulações serão apresentadas, cada um considerando um acréscimo de carga diferente. Em cada caso o processo iniciou-se com a definição do conjunto de injeções potências de carga  $P$ , obtidos mediante incrementos de carga  $\Delta P$  a partir de uma dada

potência base. Logo, o estado da rede correspondente para esses pontos será calculado utilizando fluxo de carga pelo método de Newton. Na sequência, conforme a equação 3.37 e segundo o esquema mostrado na Figura 3.4, são calculados dois vetores cuja norma por sua vez permitirá o cálculo de  $\beta$  na equação 3.39. Com este resultado o parâmetro estimador  $\lambda^{cr}$  ou fator de carregamento crítico poderá ser calculado sem maior dificuldade após resolver a equação 3.45. Finalmente, substituído  $\lambda^{cr}$  na equação 3.1 o ponto crítico será estimado.

A Tabela 4.1 mostra os resultados obtidos para a estimativa do máximo carregamento considerando somente aumento da potência ativa na barra 9, que é uma barra  $PQ$ . Os incrementos de carga foram definidos como acréscimos constantes e com uma magnitude igual a 10 % da potência base. Nota-se que para todos os casos  $P_0$  constitui a magnitude da potência base e cujos valores nas simulações foram escolhidos arbitrariamente.

Tabela 4.1: Potência crítica estimada na barra 09 ,  $\Delta P = 10\%$ .

$P_0$ [MW]	$\beta$	$\lambda$	$P_9^{cr}$ [MW]
29,50	1,4009	9,550	57,674
40,00	2,5415	5,038	60,153
60,00	0,0777	502,951	3077,715
80,00	0,9982	81,546	732,370
100,00	1,2051	15,605	256,053
120,00	1,1442	21,529	378,348
140,00	1,1935	16,153	366,142
160,00	1,2550	13,147	370,352
180,00	1,3404	10,818	374,719
200,00	1,4918	8,410	368,207
220,00	1,9531	5,993	351,840
240,00	2,3072	5,312	367,478
250,00	3,4041	4,513	362,815

Como se pode notar pela Tabela 4.1, os valores de  $\beta$  e  $\lambda$  resultantes de potências base entre 29,50 MW e 120 MW, assumem valores sem aparente ordem e coerência. Isto se reflete na potência crítica estimada conforme mostrada. Para potências base maiores que 120 MW nota-se um incremento de  $\beta$  e decréscimo de  $\lambda$ , e neste caso os valores obtidos para  $P^{cr}$  estão em uma pequena faixa de valores próximos entre si. Desta forma torna-se evidente que melhores soluções serão conseguidas a partir de uma potência base cada vez maior. Através de sucessivos cálculos de fluxo de carga utilizando o método de Newton convencional, verificou-se que o ponto de máximo carregamento corresponde a aproximadamente 359,2 MW. Na realidade, este valor corresponde à máxima carga na barra 9 para a qual o cálculo de fluxo de carga converge, e é suficiente em termos de precisão para a maioria das análises e aplicações práticas.

No caso das Tabelas 4.2 e 4.3 são mostrados resultados obtidos para as mesmas condições exceto os acréscimos de carga, cujos valores foram definidos iguais a 30% e 50% da potência base respectivamente. Mostra-se em todas elas os valores correspondentes de  $\beta$  e  $\lambda$ .

Tabela 4.2: Potência crítica estimada na barra 09,  $\Delta P = 30\%$ .

$P_0$ [MW]	$\beta$	$\lambda$	$P_9^{cr}$ [MW]
29,50	5,8415	4,113	65,904
40,00	1,6065	7,457	129,483
60,00	1,0622	35,527	699,481
80,00	1,2675	12,736	385,665
100,00	1,4257	9,186	375,565
120,00	1,6824	7,005	372,196
140,00	2,2856	5,342	364,378
160,00	4,9306	4,199	361,575

Tabela 4.3: Potência crítica estimada na barra 09,  $\Delta P = 50\%$ .

$P_0$ [MW]	$\beta$	$\lambda$	$P_9^{cr}$ [MW]
29,50	1,4157	9,329	167,102
40,00	0,9705	106,890	2177,798
60,00	1,3347	10,950	388,497
80,00	1,6167	7,391	375,633
100,00	2,2455	5,402	370,100
115,00	4,1410	4,311	362,894

Das tabelas mostradas, nota-se que  $\beta$  e  $\lambda$  mantém uma relação inversa, ou seja, quando o primeiro decresce o outro aumenta seu valor. Por sua vez este incremento de  $\lambda$  será bem maior no caso que os valores de  $\beta$  sejam menores que 1. Nessa faixa a sensibilidade do parâmetro  $\lambda$  em relação a alterações de  $\beta$  aumenta consideravelmente. Esta situação tem grande influência na estimação da potência crítica, pois de acordo com a equação 3.1 os resultados para estes casos serão extremamente altos. Os dados obtidos confirmaram esta previsão.

A Figura 4.3 resume os resultados apresentados nas 3 tabelas. Os pontos no gráfico correspondem a valores da potência crítica estimada correspondentes à potência base escolhida, para os três casos de incremento de carga considerados. Nota-se que independentemente do tamanho de passo escolhido, os erros serão mais significativos na medida que a distância entre  $s_0$  e  $s_{cr}$  seja maior. De forma que para certos valores da potência base não se espera

solução nenhuma ainda que para grandes incrementos de carga. Da mesma forma melhores resultados serão obtidos no caso da potência base estar perto do ponto crítico.

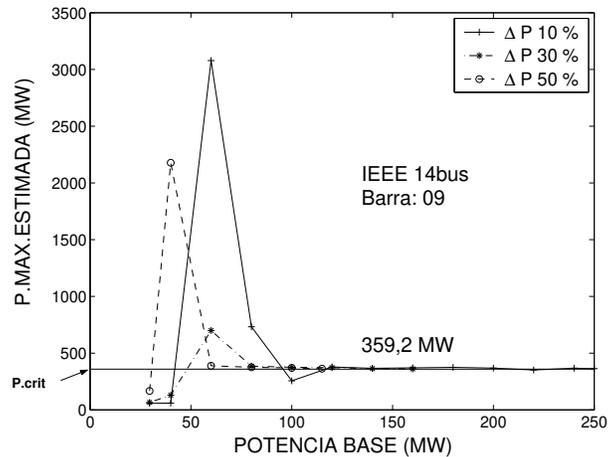


Figura 4.3: Ponto crítico estimado em função da potência base e dos acréscimos de carga.

#### 4.2.2 Tamanho do passo

O tamanho de passo é a distância que corresponde a um acréscimo de carga definido, neste caso em termos da potência base, para determinar o novo ponto em que será executado um fluxo de carga. Assim é preciso conhecer a influência nos resultados finais do tamanho de passo e do número de fluxos de carga selecionados para estimar o ponto crítico.

Do ponto de vista da aplicação do método, acredita-se que o tamanho de passo está relacionado com o ponto de operação da rede (caso base) e com o número de fluxos de carga selecionados. Pequenos tamanhos de passo corresponderão a pontos de operação próximos do ponto crítico, sempre que o número de fluxos de carga selecionado não ultrapasse o ponto de máximo carregamento.

Desta forma, tomando como referência os resultados obtidos na seção anterior, maiores erros são esperados nas situações em que o caso base esteja mais afastado da fronteira de factibilidade, ainda que para grandes tamanhos de passo. Esta conclusão inicial leva de maneira natural à idéia de realizar testes considerando situações extremas como por exemplo o descrito a seguir.

Foram realizadas simulações com a rede de 14 barras e 20 ramos [19]. A tolerância adotada para convergência em cada caso foi de 0,1 MW/MVar. Não foram considerados os limites de potência reativa em barras PV. Foram consideradas simulações para 5, 6 e 7 cálculos de fluxos de carga, todos eles partindo do ponto  $s_0$ . Os acréscimos de carga (tamanho de passo) utilizados em cada caso foram definidos arbitrariamente como uma porcentagem

da potência base.

Resultados obtidos para a estimativa do máximo carregamento correspondente à barra 09, considerando em todos os casos seu valor base de  $s_0 = 29,5$  MW e diferentes tamanhos de passo, são apresentados nas Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6. Essas terminaram por reafirmar o comportamento de  $\lambda$  frente a  $\beta$ . Além disso nota-se neste caso, a presença de valores muito elevados para  $\lambda$ . Se bem que para estes casos a solução obtida é descartada imediatamente, precisa-se determinar a partir de que valor  $\beta$  pode-se considerar que a solução apresenta utilidade.

Tabela 4.4: Potência crítica estimada na barra 09,  $K = 4$ .

$\Delta P\%$	$\beta$	$\lambda$	$P_9^{cr}$ [MW]
20	0,8339	351,560	2103,715
40	1,5437	7,934	123,120
60	0,9359	100,580	1809,841
80	1,1465	19,870	498,437
100	1,2608	12,936	411,115
120	1,3688	10,190	390,242
140	1,4767	8,567	383,306
160	1,6104	7,431	380,242
180	1,7787	6,562	377,948
200	2,0015	5,891	377,083
220	2,3139	5,303	373,634
240	2,8307	4,802	369,508
260	3,7815	4,394	366,483
280	8,8563	4,009	360,677

À medida que se aumenta o tamanho de passo ( $\Delta P$ ) a solução melhora, ou seja, o valor calculado aproxima-se do valor do ponto crítico, lembrando que ele foi calculado como sendo 359,2 MW. Além disso, nota-se uma forte dependência de  $\lambda$  frente pequenas variações de  $\beta$ . Neste caso  $\lambda$  decresce rapidamente para pequenas variações de  $\beta$ , principalmente quando  $\beta \leq 1$ , que por sua vez corresponde a menores tamanhos de passo. Porém, uma análise mais detalhada deste comportamento será realizado nas próximas seções.

A Figura 4.4 ilustra os resultados das Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6. Neste caso cada ponto no gráfico corresponde ao ponto de máximo carregamento obtido para um dado acréscimo de carga utilizando o método em questão e considerando um certo número de fluxos de carga. Nota-se que pequenos acréscimos de carga não resultam boa solução mesmo que o número de fluxos de carga seja maior. Com ajuda da Figura 4.5, que é uma ampliação da Figura 4.4 e mostra detalhes da região de convergência, pode-se estabelecer que o ganho de precisão é ligeiramente maior para um maior número de fluxos de carga. Só que, de forma objetiva

Tabela 4.5: Potência crítica estimada na barra 09,  $K = 5$  .

$\Delta P\%$	$\beta$	$\lambda$	$P_9^{cr}$ [MW]
20	1,1526	26,298	184,657
40	0,8999	43,179	593,007
60	0,3171	285,372	5080,585
80	0,5025	354,734	8401,212
100	0,9600	36,502	1106,300
120	1,6508	9,712	373,313
140	1,8973	8,256	370,211
160	2,2366	7,211	369,854
180	2,7849	6,473	373,201
200	3,9802	5,677	364,449
220	8,0565	5,105	360,828

Tabela 4.6: Potência crítica estimada na barra 09,  $K = 6$  .

$\Delta P\%$	$\beta$	$\lambda$	$P_9^{cr}$ [MW]
20	11,8585	6,070	65,314
40	0,6216	1957,440	23127,292
60	0,2191	1406,861	24930,939
80	0,2623	315,529	7475,993
100	0,5159	150,634	4473,212
120	2,0710	9,646	370,974
140	2,6112	8,193	367,861
160	3,9713	7,073	363,334
180	8,0900	6,226	360,080

nem sempre a melhoria obtida justifica o maior esforço computacional desenvolvido para um maior número de fluxos de carga.

Por certo, com uma simples análise dos resultados mostrados nas tabelas e figuras, fica evidente que a magnitude dos acréscimos de carga (tamanhos de passo) em pontos perto do máximo carregamento não constituíram maiores problemas enquanto não ultrapasse a fronteira de factibilidade. Embora melhores resultados são conseguidos quanto maior for o tamanho de passo, o problema seguinte será determinar quão maior ele pode ser sem que haja o risco de constituir-se em prejuízo para a solução. Este problema deverá ser resolvido por qualquer proposta que se proponha utilizar este método.

Finalmente, no caso em que o ponto de operação correspondente ao caso base esteja bem

perto do ponto crítico, os resultados da estimativa, serão obtidos sempre com boa precisão, ainda que para valores pequenos dos acréscimos de carga e qualquer número de fluxos de carga escolhidos.

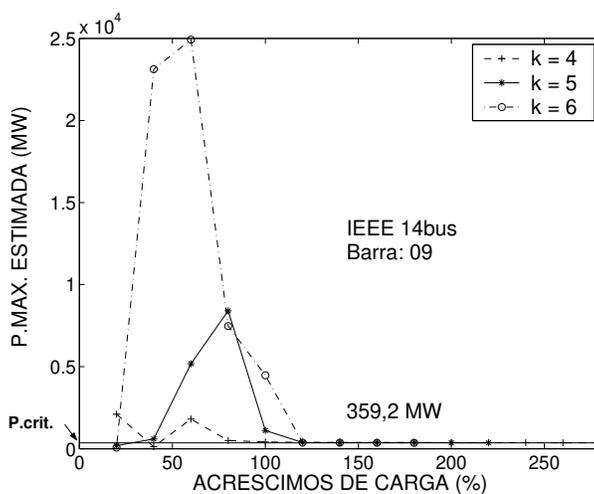


Figura 4.4: Ponto crítico em função do número de cálculos de fluxo de carga e dos valores de acréscimos de carga.

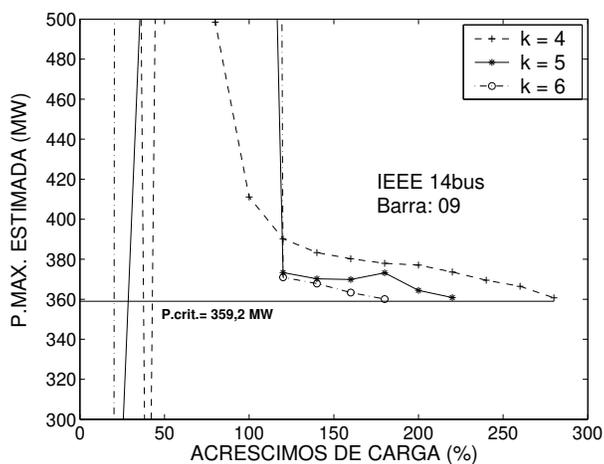


Figura 4.5: Detalhes da Fig. 4.4.

### 4.2.3 Controle de potência reativa dos geradores

Outro aspecto importante a ser considerado é a não linearidade imposta pelo limite de geração de potência reativa dos geradores. Em problemas de fluxo de carga formula-se a resolução das equações básicas de balanço de potências ativa para as barras de carga (PQ) e geração (PV), e de potência reativa para as barras de carga (PQ). Além das equações básicas existe um conjunto adicional de inequações/equações que representam as restrições de operação da rede, entre eles, os limites máximo e mínimo na geração de potência reativa em barras *PV*. Dessa forma, são especificadas normalmente as tensões desejadas para a operação do gerador e calculadas as injeções de potência reativa. Esses valores calculados devem obedecer limites máximos e mínimos de geração de potência reativa. Os limites reativos considerados dependem do nível atual de geração de potência ativa. A figura 4.6 mostra esses limites através da curva de capacidade (*capability*) do gerador síncrono.

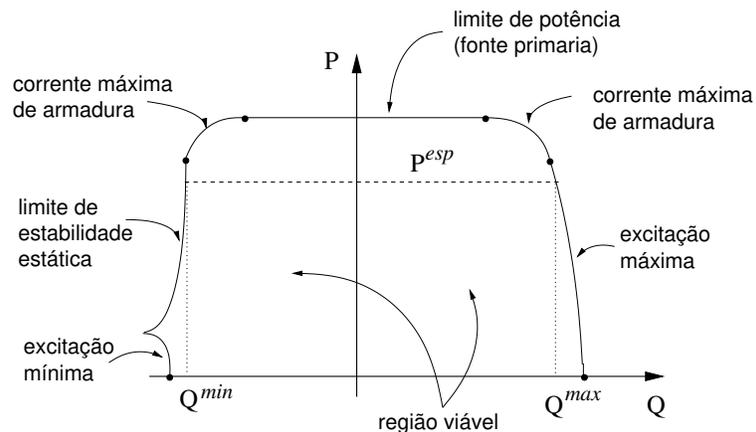


Figura 4.6: Curva de capacidade do gerador síncrono de pólos lisos.

Deve-se salientar que esta curva corresponde à região de operação viável do gerador, e é resultado da análise de um conjunto de limites que envolvem a operação da máquina síncrona, entre eles: limite de aquecimento da armadura e do enrolamento de campo, limite de potência primaria, limite de estabilidade estática, limite de excitação mínima.

Considerar que em uma barra *PV*, a cada iteração aumente a injeção de reativos  $Q_k^{cal}$  necessária para manter a tensão no valor especificado até que o limite  $Q_k^{max}$  seja atingido. A partir desse momento a tensão  $V_k$  tenderá a cair por insuficiência de reativos. Dessa forma a injeção de potência reativa deverá ser recalculada para determinar ou não redefinição como barra PQ. Na seqüência deve-se testar a cada iteração a possibilidade de essa barra de voltar a seu tipo original.

Neste contexto, fica claro que o limite da potência reativa do gerador afeta o limite da potência ativa que pode ser entregue à carga. Conseqüentemente uma alteração do ponto crítico será produzida na forma de diminuição do máximo carregamento.

Um tratamento detalhado da influência do controle de potência reativa dos geradores na aplicação do método em análise foi realizado. Nota-se na Figura 4.7 que a descontinuidade ocorre para um certo carregamento  $P_k^G$ . Neste ponto um gerador da rede atinge seu limite de geração de potência reativa. A consequência direta desta descontinuidade na curva PV é a diminuição do máximo carregamento ( $P_k^{cr1} < P_k^{cr0}$ ) como já foi visto. Levando em conta esta nova possibilidade e os aspectos tratados na seção 3.2 do Capítulo 3, pode-se estabelecer três possíveis casos em que o método poderia ser aplicado (ver Figura 4.7).

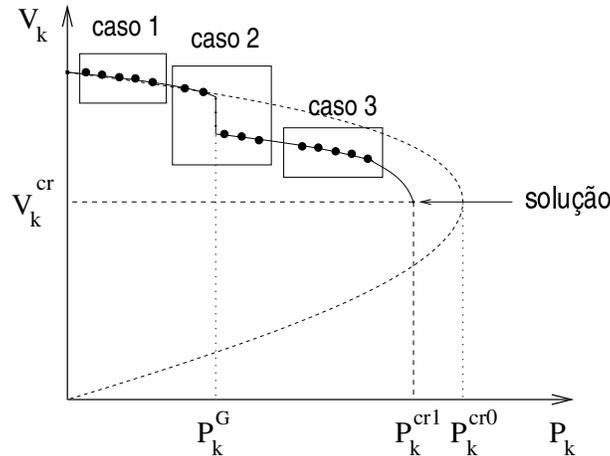


Figura 4.7: Diferentes escolhas de pontos de operação para a estimativa do máximo carregamento.

A Figura 4.8 mostra de maneira ilustrativa o comportamento da tensão da barra 4 (tipo  $PQ$ ), da rede de 14 barras em função do aumento da carga na própria barra, mantendo-se as demais cargas constantes. Da mesma forma, os dados base do sistema não sofreram alterações, com exceção do limite superior de reativos do gerador da barra 6, que foi alterado para 84 MVar. Esta alteração foi feita de forma que, no ponto de máximo carregamento, ainda houvesse algum gerador operando dentro de seus limites de geração de potência reativa.

A rede possui 4 geradores (além da barra *slack*), cujos limites de geração de potência reativa permitem que se divida a curva PV em *setores*. No setor I todos os geradores operam dentro dos seus limites. No setor II o gerador da barra 2 está no seu limite, no setor III o gerador da barra 2 e o gerador da barra 3 estão no seus limites, e assim por diante. É possível obter uma correspondência entre os casos mostrados na Figura 4.7 e os setores mostrados na Figura 4.8. Por exemplo, o caso 1 corresponderia à situação em que todos os pontos utilizados estariam só dentro de um setor, exceto aqueles que estariam no setor V que corresponderia ao caso 3. O caso 2 corresponderia a pontos nos setores II e III entre outros. A Tabela 4.7 mostra de forma resumida alguns dos resultados de simulações em que os pontos escolhidos pertencem aos diversos setores.

Foram utilizados 5 pontos ( $K = 4$ ), igualmente espaçados no intervalo mostrado. Nota-

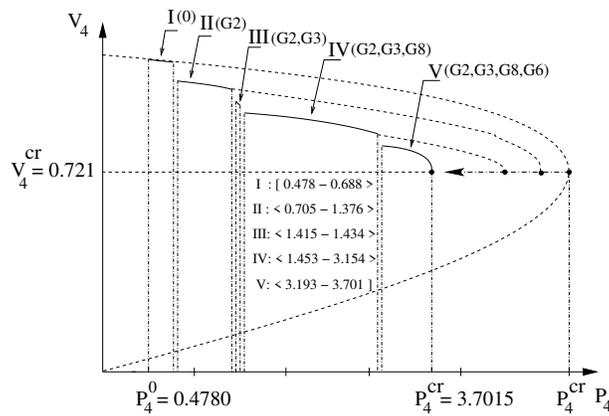


Figura 4.8: Análise da barra 4 da rede de 14 barras.

Tabela 4.7: Potência crítica estimada – rede de 14 barras.

Intervalo [MW]	$P_4^{cr}$ [MW]	Setores	caso
47,80 - 68,83	601,65	I	1
47,80 - 124,34	6009,33	I II	2
47,80 - 143,40	4159,07	I II III	2
47,80 - 239,00	8601,42	I II III IV	2
47,80 - 334,60	335,82	I II III IV V	2
70,50 - 126,90	133,47	II	1
70,50 - 143,82	143,82	II III	2
70,50 - 296,10	2370,23	II III IV	2
70,50 - 352,50	352,58	II III IV V	2
145,31 - 313,87	387,43	IV	1
145,31 - 360,37	360,37	IV V	2
319,30 - 362,72	370,93	V	3
360 - 365,76	369,03	V	3

se que quando o conjunto de pontos considerados pertence ao caso 1, a estimativa do ponto de máximo carregamento apresenta erro. As estimativas envolvendo conjuntos de pontos pertencentes ao caso 2 também apresentam erros, neste caso, alguns dos valores obtidos são extremamente elevados, o que tem explicação em seus correspondentes valores de  $\lambda$  que por sua vez tem como origem um valor inadequado de  $\beta$ . Os resultados parecem melhorar quando o último ponto do intervalo se aproxima do ponto de máximo carregamento, que neste caso corresponde a 370,15 MW. Porém, como o máximo carregamento não é conhecido *a priori*, não há garantia de obtenção de resultados corretos. Além disso nota-se na Tabela 4.7, que para os intervalos (70,50-352,50) e (145,31-360,37),  $P_4^{cr}$  estimado é praticamente igual ao último ponto desses intervalos, e menor que seu valor correto. Esta situação pode conduzir a

erro na aplicação do método caso não seja feita uma análise mais detalhada dos parâmetros  $\beta$  e  $\lambda$ . Os valores de  $\beta$  nestes casos foram: 10,07 e 22,17 respectivamente, sendo este último muito elevado conforme foi visto na seção anterior. As situações correspondentes ao caso 3, em que o conjunto de pontos pertence ao setor V, resultaram em boa precisão, ainda que para um intervalo pequeno (que corresponde a um tamanho de passo pequeno). A Figura 4.9 ilustra os testes realizados e os resultados mostrados na Tabela 4.7.

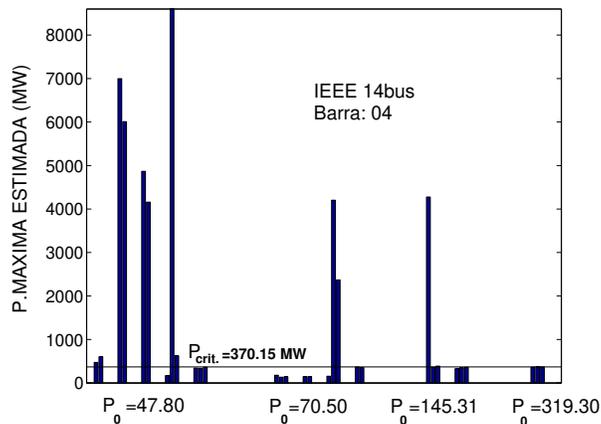


Figura 4.9: Estimação da potência crítica em função dos setores.

A Figura 4.10 mostra a curva PV da barra 4 (tipo  $PQ$ ) com e sem controle de potência reativa dos geradores. Em ambos os casos a curva foi obtida mediante simulações realizando acréscimos de carga constantes até que as equações de fluxo de carga não apresentem mais convergência para uma dada carga. Nota-se a descontinuidade na tensão para um mesmo valor de potência e duas soluções para o máximo carregamento.

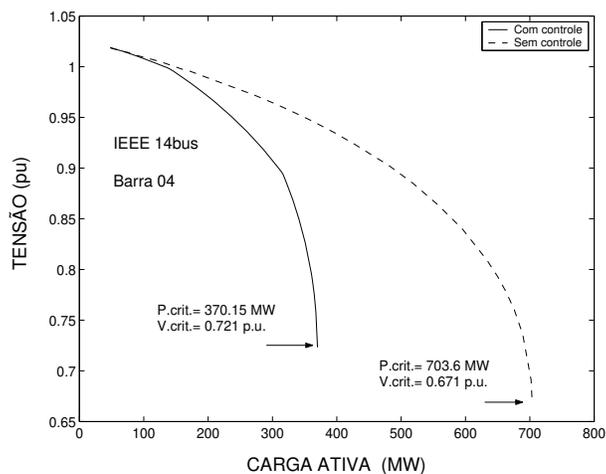


Figura 4.10: Máximo carregamento com e sem controle de potência reativa dos geradores.

### 4.3 Melhora da eficiência de cálculo de $\lambda$

O fator de carregamento crítico  $\lambda$  corresponde à solução, por exemplo, da equação 3.45, cuja resolução merece uma atenção especial. A Figura 4.11 mostra a característica da função  $f(\lambda)$  para o caso em que  $K = 4$  (5 cálculos de fluxo de carga), e para  $0 < \beta_4 < 11$ .

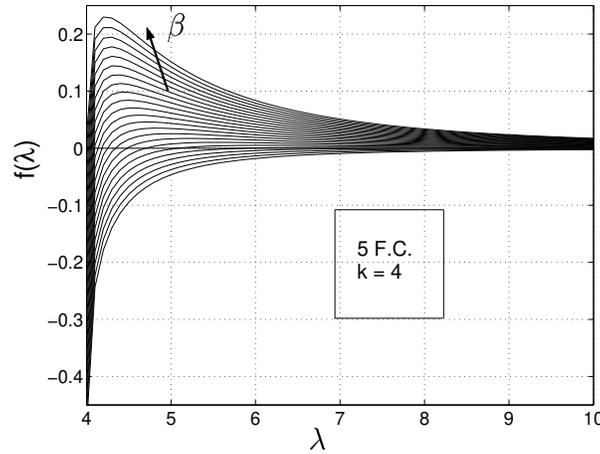


Figura 4.11: Função  $f(\lambda)$ .

Pode-se verificar que a equação 3.45 não apresentará solução real para valores de  $\beta$  acima de um determinado valor. A Tabela 4.8 mostra esses valores máximos para alguns valores de  $K$ . Deve-se lembrar que tem-se sempre  $\lambda \geq K$ .

Tabela 4.8: Valor máximo de  $\beta$  em função de  $K$ .

$K$	Número de cálculos de fluxo de carga	$\beta^{\max}$
4	5	10,5
5	6	15,5
6	7	21,0

A equação 3.45 é resolvida a partir de um processo iterativo, como por exemplo o método de Newton. Como tem-se sempre  $\lambda \geq K$ , pode-se inicializar o processo iterativo com  $\lambda^0 = K + \varepsilon$ . Por exemplo, para  $K = 4$  pode-se ter  $\lambda^0 = 4,001$ . Este problema é mal condicionado, no sentido de que os métodos de resolução apresentam dificuldades numéricas para chegar à solução. O número de iterações é em geral grande. Uma possibilidade de se resolver esse problema de mal condicionamento numérico é utilizar a otimização de passo, cuja idéia básica já foi utilizada para resolver problemas de fluxo de carga [20, 21]. Neste

caso, em uma certa iteração  $\zeta$ , o valor de  $\lambda$  é calculado por:

$$\lambda_\zeta = \lambda_{\zeta-1} + \mu \Delta\lambda = \lambda_{\zeta-1} - \mu \frac{f(\lambda_{\zeta-1})}{f'(\lambda_{\zeta-1})} \quad (4.1)$$

em que  $\mu$  é um *multiplicador ótimo* calculado de forma a minimizar a função quadrática:

$$F(\mu) = \frac{1}{2} f^2(\lambda_{\zeta-1} + \mu \Delta\lambda) \quad (4.2)$$

A Figura 4.12 mostra como o número de iterações e o condicionamento do problema são afetados pelo uso do multiplicador no cálculo de  $\lambda$ .

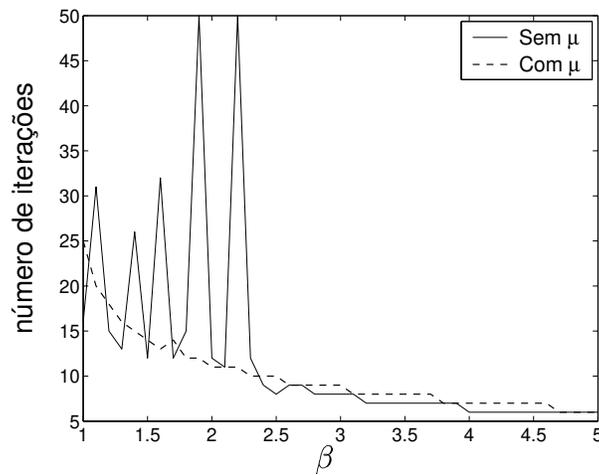


Figura 4.12: Número de iterações para o cálculo de  $\lambda$ .

Observa-se que sem o uso do multiplicador tem-se problemas de convergência e um maior número de iterações. A utilização do multiplicador ótimo resolve os problemas de condicionamento, porém, sem reduzir o número de iterações requeridas. Em ambos casos  $\lambda$  foi inicializado com um valor um pouco maior que  $K$ , como discutido anteriormente.

Como a função  $f(\lambda)$  é sempre a mesma independentemente da rede, e que os diferentes pontos de operação selecionados contribuem somente para o valor de  $\beta$ , conhece-se sempre a relação entre  $\lambda$  e  $\beta$ , como mostra a Figura 4.13.

É possível inicializar o processo de cálculo de  $\lambda$  com valores muito próximos da solução definindo-se *funções de aproximação*. Neste caso em particular, foram definidas 3 destas funções, cada uma delas sendo válida para uma certa faixa de variação de  $\beta$  (ver Figura 4.13). Estas funções de aproximação para o caso de 5 fluxos de carga são:

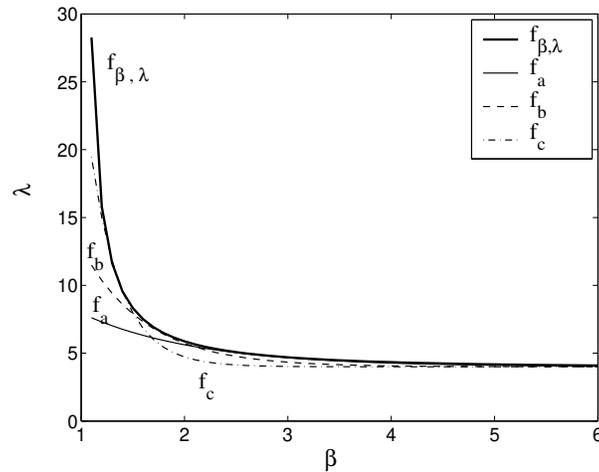


Figura 4.13: Relação entre  $\lambda$  e  $\beta$  e funções de inicialização.

$$\begin{aligned}
 f_a(\beta) &= 4 + 9,61\epsilon^{-0,89\beta} & \beta \geq 2 \\
 f_b(\beta) &= 4 + 45\epsilon^{-1,63\beta} & 1,5 \leq \beta < 2 \\
 f_c(\beta) &= 4 + 650\epsilon^{-3,40\beta} & \beta < 1,5
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

A Figura 4.14 mostra a redução significativa do número de iterações quando se utiliza as funções definidas em (4.3).

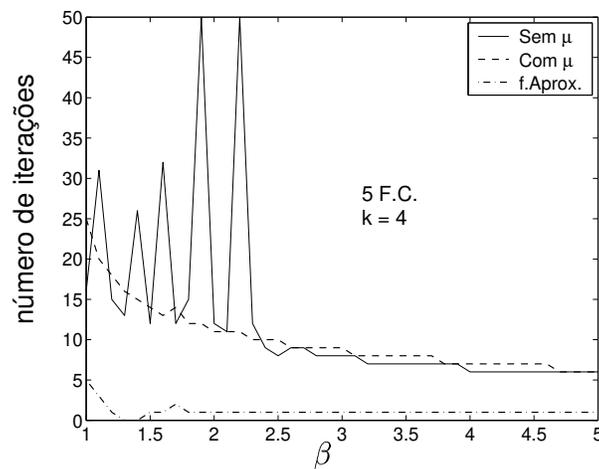


Figura 4.14: Número de iterações para o cálculo de  $\lambda$ .

Simulações realizadas para os casos de 6 e 7 cálculos de fluxo de carga forneceram resultados semelhantes para as funções de aproximação determinadas para esses casos.

## 4.4 Resultados

Da análise realizada, discutidas cada uma das questões levantadas e dos resultados apresentados pode-se estabelecer um conjunto de observações sobre o desempenho do método de cálculo do ponto de máximo carregamento:

- (a) São obtidos melhores resultados nos casos em que o ponto de operação esteja perto do ponto crítico.
- (b) O conjunto de pontos de operação escolhidos devem apresentar o mesmo número de geradores que estejam operando nos seus limites de geração de potência reativa.
- (c) Nem sempre mais que cinco cálculos de fluxo de carga resultam em melhores valores para o máximo carregamento. Portanto, este número é aceitável.
- (d) Deve-se verificar se o valor de  $\beta$  é maior que um certo valor tal que não haja solução real para  $f(\lambda)$ .
- (e) A utilização das funções de aproximação resultam em uma diminuição drástica do número de iterações.

Levando em consideração todas as observações citadas anteriormente, foram realizados testes para a rede de 14 barras e 20 ramos [19]. Assim, para cada barra analisada foi selecionado um valor de potência base, de forma que incrementos de carga definidos para elas não violassem a recomendação (b), além de cumprir a recomendação (a). De igual forma, de acordo com (c) foram selecionados 5 fluxos de carga ( $K = 4$ ). Em todos os casos a tolerância adotada para convergência foi de 0,1 MW/MVAr. Os acréscimos de carga (tamanhos de passo) foram definidos como 1% da potência base escolhida. Cabe notar que estes incrementos de carga são feitos só na barra analisada. À exceção das alterações de carga já indicadas, o demais dados do sistema foram considerados iguais ao caso base. O controle de potência reativa em barras PV foi considerado.

Os resultados são mostrados na Tabela 4.9.  $P^{crit}$  refere-se ao valor da potência crítica estimada utilizando o método analisado, enquanto que  $P^{New}$  é a potência crítica calculada através de testes utilizando o método de Newton. Pode-se verificar que para todas as barras, obteve-se uma boa aproximação dos valores estimados frente àqueles obtidos pelo método de Newton. Os valores de  $\beta$  e  $\lambda$  obtidos guardam concordância com aqueles mostrados na Tabela 4.8.

A Tabela 4.10 mostra resultados de simulações considerando 6 fluxos de carga ( $K=5$ ). Mantém-se neste caso as mesmas considerações estabelecidas para as simulações do caso anterior. Nota-se que, além de executar mais um fluxo de carga, porém mais perto do ponto crítico, não foi conseguido um melhor ganho na precisão. Isto reafirma resultados já antes obtidos e discutidos na seção anterior.

Da mesma forma, levando em consideração todas as observações citadas anteriormente, foram realizados testes com uma rede de 904 barras e 1283 ramos, correspondente a uma

Tabela 4.9: Resultados para a rede de 14 barras, caso:  $K = 4$ 

barra	4	5	7	9
$P^0$ [MW]	340,00	350,00	185,00	195,00
$\Delta P$ %	1	1	1	1
$\beta$	1,342	1,441	2,335	2,149
$\lambda$	10,779	8,975	5,273	5,563
$P^{\text{crit}}$ [MW]	376,65	381,41	194,75	205,85
$P^{\text{New}}$ [MW]	370,15	381,75	194,35	205,94

Tabela 4.10: Resultados para a rede de 14 barras, caso:  $K = 5$ .

barra	4	5	7	9
$P^0$ [MW]	340,00	350,00	185,00	195,00
$\Delta P$ %	1	1	1	1
$\beta$	1,982	1,852	11,091	3,842
$\lambda$	7,932	8,458	5,025	5,741
$P^{\text{crit}}$ [MW]	366,96	379,60	194,29	206,19
$P^{\text{New}}$ [MW]	370,15	381,75	194,35	205,94

versão reduzida do sistema Sudoeste dos EUA. Os resultados são mostrados na Tabela 4.11, em que os aumentos de carga foram realizados somente para cada barra individualmente. Nestes casos foram considerados 5 fluxos de carga ( $K=4$ ).

Tabela 4.11: Resultados para a rede de 904 barras.

barra	19	230	326	772
$P^0$ [MW]	280,00	287,00	1165,00	368,00
$\Delta P$ %	1	1	1	1
$\beta$	2,250	2,786	2,148	2,766
$\lambda$	5,395	4,833	5,566	4,484
$P^{\text{crit}}$ [MW]	295,11	300,87	1229,84	385,84
$P^{\text{cont}}$ [MW]	296,70	299,50	1230,00	386,10

$P^{\text{cont}}$  refere-se ao ponto de máximo carregamento calculado pelo método de fluxo de carga da continuação proposto em [23]. Os erros entre as estimativas obtidas pelo método proposto e pelo fluxo de carga da continuação são muito pequenos.

## 4.5 Conclusão

Apresentou-se um conjunto de recomendações que, aplicadas ao método proposto em [17], resultam em um melhor desempenho geral. Em particular, a análise e simulações realizadas em função dos pontos levantados terminaram por confirmar as previsões iniciais. Assim, a distância do ponto de operação ao ponto crítico, o tamanho de passo, a consideração dos limites de potência reativa dos geradores, o método de obtenção de  $\lambda$ , entre outros, constituem aspectos sensíveis que afetam a solução final. Porém, a eficácia e precisão do método, atendidas as medidas propostas, estarão plenamente garantidas, tanto para redes de pequeno como de grande porte.

Assim, tem-se uma ferramenta simples e clara, como suporte ao método analisado. Na seqüência deste trabalho, pretende-se desenvolver um método robusto e confiável que, partindo do ponto caso base, leve à vizinhança do ponto crítico. A partir daí, pode-se integrar o método analisado neste trabalho. Esta, sem dúvida, constituir-se-á uma ferramenta de extrema utilidade para cálculos de margem de segurança ao colapso de tensão.

# Capítulo 5

## Método Proposto

### 5.1 Introdução

Nos estudos de análise de segurança necessita-se de métodos eficientes e rápidos que forneçam resultados com aceitável precisão. Assim, um dos aspectos a que se deve maior atenção nos métodos de análise propostos relaciona-se com o compromisso entre a precisão e a rapidez. Soluções de alta precisão nem sempre são rápidas e vice-versa. Estudos e propostas orientadas a melhorar o desempenho dos métodos de análise justificam-se através de discussões que englobam modelagens apropriadas e algoritmos de solução rápidos e eficientes. Este trabalho apresenta um método simples, eficiente e confiável para determinar a distância no espaço de parâmetros (cargas) entre o ponto de operação corrente e o ponto crítico para o qual ocorre o colapso de tensão. O método, com enfoque estático, baseia-se em realizar um certo número de cálculos de fluxo de carga para diferentes níveis de carga que são incrementadas em uma direção predeterminada, muito próximas do ponto crítico. Análise de sensibilidade é utilizada com a finalidade de levar ao sistema a esta região de operação. Caso um ponto de operação inactível seja atingido em função das aproximações consideradas na análise de sensibilidade, um método de cálculo de fluxo de carga Newton com otimização de passo (FCOP) é utilizado para proporcionar o ponto de operação mais próximo possível da região factível e informações necessárias na tentativa de recuperação da factibilidade. A vantagem desta abordagem é que a solução é passível de ser obtida com baixo custo computacional.

### 5.2 Idéia do método

A idéia do método proposto neste trabalho é explorar as principais características dos métodos propostos em [14] e [17] para obter a margem de carregamento da rede de forma eficiente e precisa. O método proposto em [14] mostra-se apropriado para rapidamente levar

a rede do ponto de operação corrente (caso base) à vizinhança do ponto crítico. A partir daí, o método proposto em [17] é apropriado para uma estimação precisa do ponto crítico. O método utilizado neste trabalho é descrito com detalhe a seguir, com a ajuda da Figura 5.1. Deve-se lembrar que neste trabalho somente são considerados aumentos de carga em uma barra, seja de potência ativa, reativa ou ambas, mantendo o fator de potência constante.

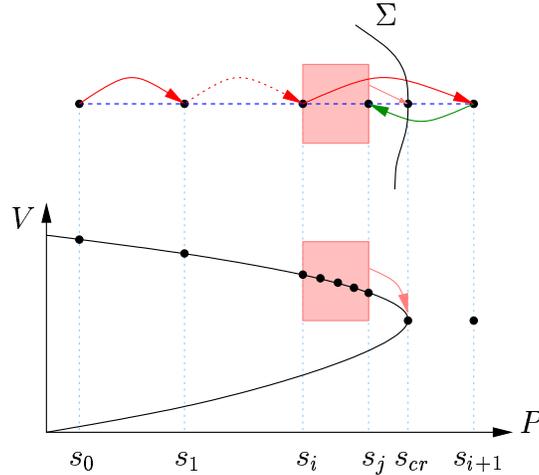


Figura 5.1: Método proposto.

- (a) A partir do ponto de operação inicial (caso base)  $s_0$ , novos pontos de operação são determinados ao longo de uma direção predeterminada de aumento de carga:  $s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow \dots \rightarrow s_i$ . Os aumentos de carga são determinados por análise de sensibilidade, conforme descrito no Capítulo 3 e em [14].

Em uma certa iteração, o novo ponto de operação obtido por análise de sensibilidade estará além do máxima capacidade de carregamento da rede ( $s_i \rightarrow s_{i+1}$ ), ou seja, fora da região de factibilidade definida pela fronteira  $\Sigma$ . Esta é a situação encontrada para redes reais, embora teoricamente seja possível que todos os geradores atinjam seus limites de geração de potência reativa antes que o máximo carregamento seja atingido. Neste caso, o procedimento baseado na equação (3.69) não poderia ser utilizado.

- (b) Dado o ponto de operação  $s_{i+1}$ , o FCOP converge para um certo ponto  $s^*$  sobre a fronteira  $\Sigma$  ( $\mu$  tende a zero), e os *mismatches* de potência ( $s_{i+1} - s^*$ ) fornecem informações sobre a distância aproximada entre  $s^*$  e  $s_{cr}$ . Utilizando essas informações, determina-se o ponto  $s_j$  dentro da região de factibilidade, realizando um corte de carga um pouco maior que o valor indicado pelos *mismatches* de potência de FCOP. Não há a necessidade de se procurar um ponto exatamente sobre  $\Sigma$ , mas apenas na vizinhança dela. A determinação do corte de carga adequado depende da rede considerada e deve ser ajustada apropriadamente.

- (c) Obter um ponto de operação  $s'_i$  tal que o número de geradores que atingiram os seus

limites de geração de potência reativa seja igual ao de  $s_j$ . Em geral espera-se que  $s'_i = s_i$ . Porém, erros resultantes da linearização feita na análise de sensibilidade, de forma especial para barras com grandes margens, podem levar  $s'_i$  a ser maior que  $s_i$ . O valor de  $s'_i$  para cada caso é obtido através de:

$$s'_i = \left[ 1 - \xi \frac{(\psi + 1) K}{2\psi + 1} \right] s_j \quad \psi = 0, 1, 2, \dots \quad (5.1)$$

onde  $\psi$  é um contador cujo valor se atualiza cada vez que um novo ponto  $s'_i$  é calculado utilizando a equação (5.1),  $\xi = 0,01$  é uma constante obtida experimentalmente de forma que as aproximações em torno do ponto  $s_j$  não apresentem os problemas de convergência discutidos no Capítulo 4, além de garantir uma rápida solução.

- (d) Dividir o intervalo  $[s'_i, s_j]$  em trechos iguais dependendo do número de cálculos de fluxo de carga definidos ( $K$ ) e utilizar o método proposto em [17] com as modificações propostas no Capítulo 4 para obter  $s_{cr}$ .

### 5.3 Algoritmo do método proposto

O máximo carregamento e a margem de segurança, segundo o método proposto poderão ser obtidos seguindo os detalhes do método acima indicados. Desta forma mostra-se o algoritmo a seguir:

- 1.- Definir a barra de carga  $j$  do sistema a ser analisada.
- 2.- Definir a estrutura de armazenamento dos vetores em cada caso.
- 3.- Selecionar geradores de interesse na vizinhança da barra escolhida.
- 4.- Calcular as sensibilidades  $S_{wp}$  dos geradores selecionados utilizando a equação 3.62.
- 5.- Determinar o incremento de carga  $\Delta P_j$  que adicionado à carga base, faz que um gerador atinga seu limite de geração (equação 3.69).
- 6.- Obter estado de operação para a nova carga. Executa-se um fluxo de carga levando em conta os limites de geração de potência reativa das barras PV.
- 7.- Se houver convergência, então o ponto de operação é factível. Voltar para o passo 3 e repetir o processo. Caso contrário, uma melhor solução será obtida.
- 8.- Comparar se o *mismatch* de potência neste estágio com uma certa tolerância pre-estabelecida. Se for menor, parar. O ponto corrente está em uma vizinhança tal que pode-se considerar como solução. Se for maior, continuar.
- 9.- Atualizar a potência da carga utilizando a informação dos *mismatches*.

10.- Verificar convergência executando um fluxo de carga. Por sua vez este passo permite atualizar todas variáveis.

11.- Se não houver convergência voltar para o passo 7 e repetir o processo. Caso contrário seguir.

12.- Um ponto factível foi encontrado, neste caso. Determinar também o número de geradores que atingiram seu limite.

13.- Procura-se um novo ponto factível utilizando a equação 5.1. Levar em consideração que ele deve ser igual número de geradores que atingiram seus limites.

14.- Determinar o tamanho do passo (incremento de carga) dividindo o intervalo definido pelos dois pontos factíveis anteriores em trechos iguais.

15.- Executar um número de fluxos de carga e determinar o conjunto de vetores de estado correspondentes a cada ponto. Esses vetores deverão estar em coordenadas retangulares  $v = e + jf$ .

16.- Calcular a norma dos *mismatches* de estado  $\Delta_{k-1}x_k$  e  $\Delta_{k-1}x_{k-1}$ . A forma de obtenção desses *mismatches* é mostrada na Figura 3.4.

17.- Determinar o parâmetro  $\beta$  segundo a equação 3.38.

18.- Calcular o estimador de estado  $\lambda$ .

19.- Determinar o máximo carregamento utilizando a equação 3.1.

## 5.4 Resultados de simulações

Com a finalidade de avaliar o desempenho do método proposto, serão apresentados a seguir resultados obtidos através de simulações realizadas com os sistemas de 14 [19] e 904 barras. Cada passo do processo foi realizado segundo cada ponto do algoritmo acima detalhado. Foram considerados em todas as simulações: 5 fluxos de carga ( $K = 4$ ), controle de limite de geração de reativos dos geradores, incrementos de carga ativa somente na barra submetida a análise. A tolerância utilizada em todos os casos foi 0,1 MW/MVAr.

No caso do sistema de 14 barras, o limite superior de reativos do gerador 6 foi ajustado em 84 MVAr. Isto foi feito de forma a guardar concordância com as condições em que foram feitas todas as simulações ao longo do trabalho.

A Figura 5.2 e a Tabela 5.1 mostram detalhes e permitem avaliar o desempenho do método para o cálculo do máximo carregamento para a barra 4. Nota-se que  $P^0$  corresponde ao ponto de operação corrente da rede.  $\Delta P^1$ ,  $\Delta P^2$  e  $\Delta P^3$  são incrementos de carga calculados pela análise de sensibilidade, enquanto que  $\Delta P^4$  e  $\Delta P^5$  correspondem aos *mismatches* de potência que serão utilizadas na tentativa de voltar a região factível.  $\Delta P^6$  é uma alteração

de carga de forma de encontrar um novo ponto factível utilizando a equação 5.1. Finalmente  $\Delta P^7$ ,  $\Delta P^8$  e  $\Delta P^9$  são incrementos de carga constantes no intervalo  $P^5 - P^6$  definidos pelo método para calcular o parâmetro estimador  $\lambda$ . Desta maneira são obtidos o conjunto de pontos mostrados na figura e dados correspondentes mostrados na Tabela 5.1. Por sua vez o resultado da estimativa do ponto de máximo carregamento e os valores obtidos para  $\beta$  e  $\lambda$  são também mostrados.

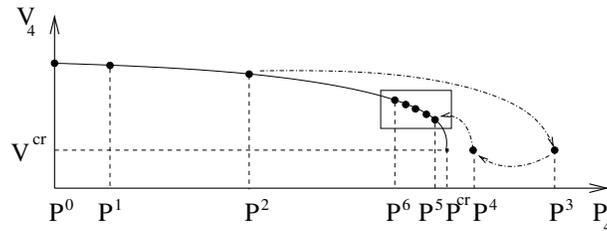


Figura 5.2: Desempenho do método para a barra 4.

Tabela 5.1: Dados obtidos em cada passo segundo a Fig. 5.2.

Iter (i)	$\Delta P^i$ [MW]	$P^i$ [MW]
0	0,0000	47,800
1	23,9093	71,709
2	74,7582	146,468
3	255,0879	401,555
4	-20,8914	372,307
5	- 2,2607	369,142
6	-14,7650	354,377
7	3,6912	358,068
8	3,6912	361,759
9	3,6912	365,450

$\beta$	$\lambda$	$P^{cr}$ [MW]
4,00792	4,339	370,393

Com relação aos *mismatches* de potência utilizados para retomar a convergência, no caso, aqueles correspondentes aos passos 4 e 5, poderão ser multiplicados por uma constante com a finalidade de "acelerar" o retorno até um ponto factível. Esta medida sempre será útil desde que por heurísticas seja determinado um valor adequado para ela, que não seja simplesmente algum valor só válido para uma barra em particular. No caso, para todas as

simulações foi utilizado 0,4 como valor desta constante de ajuste de convergência.

Da mesma forma, a Figura 5.3 e a Tabela 5.2 mostram em detalhe o processo e resultados obtidos para a barra 14.

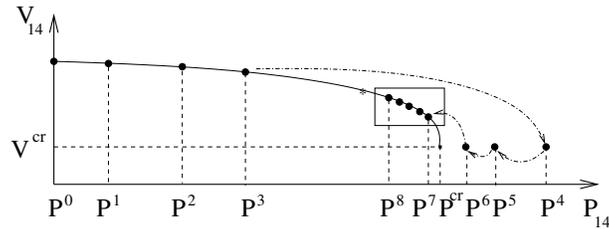


Figura 5.3: Desempenho do método para a barra 14.

Tabela 5.2: Dados obtidos em cada passo segundo a Fig. 5.3.

Iter (i)	$\Delta P^i$ [MW]	$P^i$ [MW]
0	0,0000	14,900
1	21,2641	36,164
2	32,7054	68,869
3	14,1070	82,976
4	56,1358	139,112
5	- 5,6390	131,218
6	- 2,7270	127,400
7	- 0,9239	126,106
8	- 3,3620	122,744
9	0,8405	123,584
10	0,8405	124,425
11	0,8405	125,265

$\beta$	$\lambda$	$P^{cr}$ [MW]
10,3659	4,001	126,107

Neste caso nada novo relevante foi incorporado ao processo, sendo válidas todas as observações feitas no exemplo anterior. A exceção fica com relação ao ponto marcado com (\*) sobre a curva PV. Nota-se que ele está fora do conjunto de pontos selecionados para calcular o estimador  $\lambda$ . Este ponto, obtido pela equação 5.1, foi descartado já que entre ele e  $P^7$  apresenta-se violação do limite de geração de reativos de um gerador a mais do sistema.

A Tabela 5.3 mostra os resultados obtidos para o máximo carregamento de algumas barras da rede de 14 barras, inclui-se valores de  $\beta$  e  $\lambda$  em cada caso. De igual forma são considerados 5 fluxos de carga, controle de limite de geração de reativos dos geradores do sistema, acréscimos de carga ativa somente na barra submetida à análise.

Tabela 5.3: Resultados em barras do sistema 14 barras.

barra	$\beta$	$\lambda$	$P^{cr}$ [MW]
4	4,00792	4,339	370,393
5	6,69292	4,058	381,907
7	5,39415	4,159	194,416
9	5,32331	4,168	206,074
10	5,06156	4,190	161,162
14	10,36590	4,001	126,107

Análise para as barras de carga 11, 12 e 13 mostraram limitações para calcular o máximo carregamento, nestes casos devido à impossibilidade para determinar novos incrementos de carga utilizando a análise de sensibilidade quando todos os geradores do sistema já atingiram seus correspondentes limites.

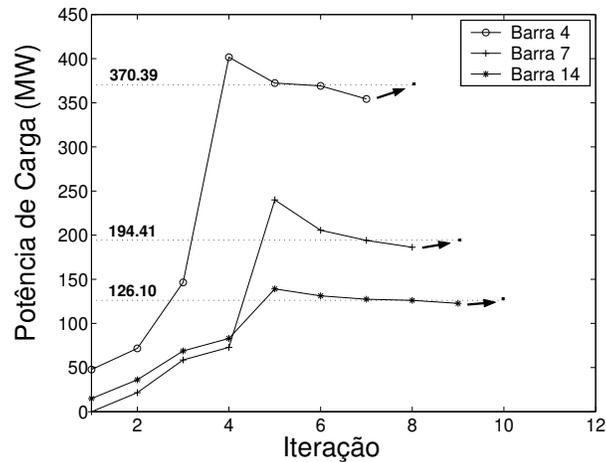


Figura 5.4: Evolução do processo iterativo – rede de 14 barras.

O desempenho do método proposto em termos de número de iterações é mostrado para algumas barras na Figura 5.4. Nota-se em geral um reduzido número de iterações, situação que constitui uma característica importante deste método.

A Tabela 5.4 mostra os resultados obtidos para as margens de segurança ao colapso de tensão de algumas barras da rede de 14 barras. As margens estimadas pelo método proposto

são comparadas com as determinadas pelo método da continuação apresentado em [23].

Tabela 5.4: Margens de segurança – rede de 14 barras

barra	método [23] [MW]	proposto [MW]
4	339,17	322,59
7	196,42	194,41
9	176,86	176,57
14	109,38	111,21

Observa-se que os valores obtidos pelo método proposto são precisos. Além disso, o número de cálculos de fluxo de carga é relativamente pequeno, conforme mostra a Figura 5.4. Esta é uma característica importante do método proposto, permitindo sua utilização em ambientes com restrições de tempo computacional.

A Tabela 5.5 mostra o máximo carregamento para algumas barras da rede de 904 barras. Verifica-se que o método proposto apresenta um bom desempenho.

Tabela 5.5: Máximos carregamentos – rede de 904 barras

barra	proposto [MW]	iterações
20	2473,66	7
230	299,78	9
654	277,57	7

A Tabela 5.6 mostra margens de segurança para algumas barras da rede de 904 barras obtidas pelo método proposto e as margens obtidas através de simulações utilizando o fluxo de carga pelo método de Newton convencional. Verifica-se que o valor estimado pelo método proposto é bastante próximo do esperado.

Tabela 5.6: Margens de segurança – rede de 904 barras

barra	proposto [MW]	esperado [MW]
654	248,73	248,82
772	316,08	315,90
449	418,63	418,81
759	584,90	583,98
555	594,58	594,66

# Capítulo 6

## Conclusões

O método apresentado resolve de maneira consistente situações envolvidas nos estudos e simulações, tais como: descontinuidades impostas pelos limites de geração de potência reativa dos geradores, melhor solução para uma demanda maior que o máximo carregamento possível e recuperação da factibilidade do ponto de vista de operação da rede. Além disso, o estado de operação da rede pode ser fornecido a qualquer instante. O sistema é modelado por equações algébricas não lineares cuja solução básica não apresenta maiores complicações. Os incrementos de carga são definidos pela análise de sensibilidade, e formula-se o cálculo de um parâmetro estimador de estado  $\lambda$  sobre a base de um conjunto de *mismatches* de potência para pontos correspondentes a uma região de operação da rede muito próxima do ponto crítico

O desempenho do método foi testado com sucesso, em redes de pequeno e grande portes, mediante simulações que consideram incremento da potência ativa em qualquer barra. No entanto, é possível realizar incrementos de potência reativa ou incrementos tais que mantenham o fator de potência da carga constante.

Conseqüentemente, o método proposto neste trabalho apresenta vantagens em relação aos métodos já existentes na literatura em relação a: robustez, precisão e esforço computacional (um reduzido número de cálculos de fluxo de carga são necessários para a estimativa da margem de segurança). O método apresenta potencial para ser aplicado em ambientes de tempo real.

Espera-se no futuro abordar tópicos que tornem o procedimento mais flexível e robusto. Deve-se obter formas de levar o sistema do caso base até a vizinhança do ponto crítico segundo qualquer direção de aumento de carga. Pretende-se obter formas mais apuradas de volta à região factível nas situações em que a análise de sensibilidade define aumentos de carga maiores que os necessários. Pretende-se também investigar novos fatores de sensibilidade a fim de adicionar maior robustez ao processo e evitar que a região infactível seja atingida.

# Referências Bibliográficas

- [1] Chiang H.-D., Dobson I., Thomas R.J., Thorp J.S., Fekin-Ahmed L. (1990). On voltage collapse in electric power system. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.5, n.2, pp. 601-611.
- [2] Rajagopalan C., Lesieutre B., Sauer P.W., Pai M.A. (1992). Dinamic aspects of voltage/power characteristics. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.7, n.3, pp. 990-1000.
- [3] Sekine Y., Ohtsuki H. (1990). Cascaded voltage collapse. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.5, n.1, pp. 250-256.
- [4] Gao B., Morison G.K., Kundur P. (1991). Voltage stability evaluation using modal analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.7, n.4, pp. 1529-1542.
- [5] Sekine Y., Yokoyama A., Takenaka K., Kumano T. (1989). Mode transition of multiple load flow solutions, In: Bulk Power System Voltage Phenomena - Voltage Stability and Security. *EPRI - EL 6183*.
- [6] Lu J., Liu C.-W., Thorp J.S. (1995). New methods for computing a saddle-node bifurcation point for voltage stability analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.10, n.2, pp. 978-989.
- [7] Lof P.-A., Andersson G., Hill D.J. (1992). Voltage stability indices for stressed power systems. *IEEE PES Winter Meeting*, aper VM 101-6 PWRS.
- [8] Barquín J., Gomez T., Pagola F.L. (1995). Estimating the loading limit margin taking into account voltage collapse areas. *IEEE PES Winter Meeting*.
- [9] Nema O.M.S., Castro C.A. (1996). Identificação de barras/áreas sujeitas ao colapso de tensão através de índice baseado em perdas de potência. *XI Congresso Brasileiro de Automática*.
- [10] Nema O.M.S., Castro C.A. (1996). Índice de proximidade ao colapso de tensão baseado em perdas de potência ativa - potencial de utilização na operação em tempo real. *III Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos*.
- [11] Alvarado F., Dobson I., Hu Y. (1994). Computation of closest bifurcations in power system. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.9, n.2, pp. 918-928.

- [12] Flatabø, N., Ognedal, R., Carlsen, T. (1990). Voltage stability condition in a power transmission system calculated by sensitivity methods. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.5, n.4, pp.1286-1293.
- [13] Flatabø, N., Ognedal, R., Carlsen, T., Heggland K.R. (1993). A method for calculation of margins to voltage instability applied on the Norwegian system for maintaining required security level. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.8, n.3, pp. 920-928.
- [14] Tognete A.L., Castro C.A. (1997). An efficient method for calculating load margins to voltage collapse. *29<sup>th</sup> North American Power Symposium*.
- [15] Ajarapu V., Christy C. (1992). The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.7, n.1, pp. 416-423.
- [16] Irisari G.D., Wang X., Tong J., Mokhtari S. (1997). Maximum loadability of power systems using interior point non-linear optimization method. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.12, n.1, pp. 162-172.
- [17] Zeng, Z.C., Galiana, F.D., Ooi, B.T., Yorino, N. (1993). A simplified approach to estimate maximum loading conditions. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.8, n.2 pp.646-654.
- [18] Galiana, F.D., Zeng, Z.C. (1992). Analysis of the load flow behavior near a Jacobian singularity. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.7, n.3, pp.1362-1369.
- [19] Freris L.L., Sasson A.M. (1968). Investigation of the load-flow problem, *Proc. of the IEE*, vol.115, n.10.
- [20] Iwamoto, S., Tamura, Y. (1981). A load flow calculation method for ill-conditioned power system. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol.PAS-100, pp.1736-1743.
- [21] Castro, C.A., Braz, L.M.C. (1997). A new approach to the polar Newton power flow using step size optimization. *29th North American Power Symposium*, Laramie, WY, USA.
- [22] Cañizares, C.A., Souza, A.C.Z., Quintana, V.H. (1996). Comparison of performance indices for detection of proximity to voltage collapse. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.11, n.3, pp.1441-1450.
- [23] Alves, D.A., da Silva, L.C.P., Castro, C.A., da Costa, V.F. (1999). Parameterized Fast Decoupled Load Flow for Tracing the Power System Bifurcation Diagrams. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Edmonton, Canada, pp.708-713.
- [24] Monticelli, Alcir José. (1983). Fluxo de carga em redes de energia elétrica. *Editora Edgard Blücher Ltda.*, SP, Brasil.