

TESE

1102

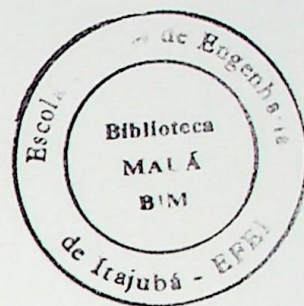
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

**ANÁLISE DE TÉCNICAS PARA DETERMINAÇÃO DO
PONTO DE COLAPSO DE TENSÃO**

FRITZ WALTER MOHN

**ITAJUBÁ
2001**

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**Análise de Técnicas para Determinação do
Ponto de Colapso de Tensão**

Dissertação apresentada à Escola Federal de Engenharia de Itajubá como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Fritz Walter Mohn

Itajubá, Março de 2001

Análise de Técnicas para Determinação do Ponto de Colapso de Tensão

Dissertação apresentada à Escola Federal de Engenharia de Itajubá como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:

Sistemas Elétricos de Potência

Orientador:

Antônio Carlos Zambroni de Souza

Fritz Walter Mohn

Itajubá, Março de 2001

© 2001, Fritz Walter Mohn

Ficha Catalográfica

Mohn, Fritz Walter

Análise de Técnicas para Determinação do Ponto de Colapso de Tensão. Itajubá, 2001.

115p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Estabilidade de tensão I. Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Departamento de Engenharia Elétrica .

Análise de Técnicas para Determinação do Ponto de Colapso de Tensão

Fritz Walter Mohn

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de
Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica,
Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência,
e aprovada pela Banca Examinadora abaixo relacionada:

Prof. Júlio César Stacchini de Souza
1º Examinador - UFF

Prof. Pedro Paulo de Carvalho Mendes
2º Examinador - EFEI

Prof. Antônio Carlos Zambroni de Souza
3º Examinador - EFEI (Orientador)

A Geila, Fábio e João Vitor.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre presente em toda a vida, sempre dando luzes, sustentando-me e
protegiendo-me sempre.

Aos meus pais, pai, mãe, irmãos, amigos, conhecidos e desconhecidos, pelo carinho de
sempre.

A meu irmão, pelo carinho.

A todos os que me ajudaram e me sustentaram.

Ao professor Antonio Carlos Zamboni da Universidade Federal do Rio de Janeiro, por
sua orientação, paciência e dedicação, tornando sempre com
seu amor e sua participação.

Aos amigos, por todos os momentos em nossas reuniões.

Aos funcionários do PFC, em especial a amiga Cássia, pela atenção dispensada.

A todos aqueles que fizeram ou irão fazer parte da história desta
obra.

“Tantas Vezes pensamos ter chegado,

tantas vezes é preciso ir além.”

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

A Deus, que esteve presente em todo o tempo deste trabalho, ajudando-me a vencer os meus limites.

Aos meus avós, pais, tios, irmãos, sogros, cunhados e primos, pelo carinho de sempre.

A avó Violeta, pela ternura.

A minha esposa, Geila, pelo seu amor e tolerância.

Ao professor Antônio Carlos Zambroni de Souza, grande estimulador deste trabalho, fazendo muito mais que uma orientação técnica, marcando sempre com valores éticos a sua participação.

Aos amigos, por todos os incentivos em todas as conquistas.

Aos funcionários da PPG, em especial a amiga Cristina, pela atenção dispensada.

A todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

Sumário

Capítulo 1	1
1. Estabilidade de tensão: aspectos gerais	1
1.1. Introdução	1
1.2. Conceitos, definições e classificações	2
1.2.1. Estabilidade de um sistema	2
1.2.2. Estabilidade angular	2
1.2.3. Estabilidade a pequenos sinais (ou de regime permanente)	3
1.2.4. Estabilidade transitória	3
1.2.5. Estabilidade de frequência	3
1.2.6. Estabilidade de tensão	4
1.2.7. Colapso de tensão	4
1.2.8. Fatores de influência	5
1.3. Histórico de ocorrências	10
1.4. Ocorrências no Brasil	11
1.5. Métodos de análise da estabilidade de tensão	12
1.5.1. A análise dinâmica	12
1.5.2. A análise estática	13
1.6. Proposta de trabalho	14

Capítulo 2	16
2. Técnicas de análise estática	16
2.1. Introdução	16
2.2. Relação entre estabilidade de tensão e estabilidade angular	16
2.3. Colapso de tensão em um sistema de duas barras	18
2.4. Bifurcação tipo sela-nó	22
2.5. Análise por decomposição de matrizes por autovalores e valores singulares	25
2.6. Análise pelo determinante reduzido	27
2.7. Técnica da função de energia	27
2.8. Método direto	28
2.9. Técnicas de otimização	29
2.10. Método da continuação	30
2.10.1. Previsor	31
2.10.2. Parametrização pelo vetor tangente	34
2.10.3. Corretor	34
2.10.4. Síntese do método da continuação	35
2.11. Método do vetor tangente	36
2.12. Quadro resumo das técnicas	38
2.13. Conclusões do capítulo 2	39

Capítulo 3	40
3. Melhoramento do método extrapolado e apresentação do método continuado desacoplado	40
3.1. Introdução	40
3.2. Método extrapolado	40
3.2.1. Introdução	40
3.2.2. Metodologia I – extrapolação da curva do inverso da norma do vetor tangente	41
3.2.3. Metodologia II – extrapolação da curva do inverso da norma do vetor tangente utilizando o passo pelo vetor tangente	44
3.2.4. Metodologia III – extrapolação da curva PV utilizando o passo pelo vetor tangente	45
3.3. Método continuado	48
3.3.1. Introdução	48
3.3.2. Métodos desacoplados	49
3.3.3. Singularidade da matriz J , e a consistência das matrizes H e L	52
3.3.4. Índices de colapso do método desacoplado	53
3.3.5. Resumo dos questionamentos dos métodos desacoplados	54
Capítulo 4	56
4. Resultados	56

4.1.	Introdução	56
4.2.	Método extrapolado utilizando a curva PV e o inverso da maior componente do vetor tangente.	57
4.2.1.	Introdução	57
4.2.2.	Extrapolado sem modificações	58
4.2.3.	Extrapolado com passo dado pelo vetor tangente	60
4.2.4.	Extrapolado da curva PV	63
4.3.	Método continuado utilizando os métodos desacoplados	66
4.3.1.	Introdução	66
4.3.2.	Continuado com duas barras	67
4.3.3.	Continuado com duas barras – caso 2	71
4.3.4.	Conclusões	75
4.3.5.	Resultados dos índices de colapso aplicando o método desacoplado	76
4.3.6.	Conclusões da aplicabilidade do desacoplado	87
4.3.7.	Resultados dos tempos computacionais	88
4.3.8.	Mixagem	93
4.3.9.	Conclusões do capítulo 4	99
Capítulo 5		102
5.	Conclusões	102
5.1.	Problema examinado	102

5.2.	Contribuições	102
5.3.	Sugestões para trabalhos futuros	104
Anexo I		105
I.1.	Comportamento da maior componente do vetor tangente (MCVT)	105
Anexo II		106
II.1	Comportamento do índice de colapso (IC)	106
Referências bibliográficas		109
Tabelas:		
Tabela 4.1	– Resultados do método continuado	57
Tabela 4.2	– Resultados do método extrapolado	58
Tabela 4.3	– Método extrapolado – novos critérios de parada	60
Tabela 4.4	– Resultado do extrapolado – passo vetor tangente	61
Tabela 4.5	– Comparação dos extrapolados – original e passo dado pelo VT	62
Tabela 4.6	– Extrapolação com passo dado com VT – vários valores de k	62
Tabela 4.7	– Extrapolado curva PV	64
Tabela 4.8	– Extrapolado curva PV – vários valores para k	65
Tabela 4.9	– Classificação das barras mais críticas – sistema 14 barras	78

Tabela 4.10 – Classificação das barras mais críticas – sistema 30 barras	79
Tabela 4.11 – Classificação das barras mais críticas – sistema 57 barras	79
Tabela 4.12 – Classificação das barras mais críticas – sistema 118 barras	80
Tabela 4.13 – Método continuado para os sistemas testes – sem os novos critérios de parada e $k=0.5$	90
Tabela 4.14 – Método continuado para os sistemas testes – com os novos critérios de parada e $k = 0.5$	91
Tabela 4.15 – Método continuado para os sistemas testes – sem os novos critérios de parada e $k = 1$	92
Tabela 4.16 – Método continuado para os sistemas testes – com os novos critérios de parada e $k=1$	92
Tabela 4.17 – Método continuado mixado – sem novos critérios de parada	96
Tabela 4.18 – Método continuado mixado – com novos critérios de parada	97
Tabela 4.19 – Método continuado mixado – com novos critérios de parada e passo utilizando o VT da equação 4.5	98
Tabela 4.20 – Método continuado mixado – com novos critérios de parada e passo utilizando o VT da equação 4.5 – variando k	98

Figuras:

Figura 2.1: Exemplo simples mostrando um caso extremo de estabilidade angular	17
Figura 2.2: Exemplo simples mostrando um caso extremo de estabilidade de tensão	17
Figura 2.3: Sistema de duas barras	18

Figura 2.4: Três carregamentos para o sistema de duas barras.	19
Figura 2.5: Sistema de duas barras – tensão x potência para vários fp	21
Figura 2.6: Diagrama de bifurcação de uma sela-nó	23
Figura 2.7: Método continuado	32
Figura 2.8: Processo do método da continuação	36
Figura 3.1: Curva PV de uma barra de carga	45
Figura 3.2: Fluxograma simplificado do método III	48
Figura 4.1: Primeiro sistema à duas barras – caso 1	67
Figura 4.2: Continuado com Newton-Raphson completo – caso 1	67
Figura 4.3: Relação N/H – caso 1 – parte de cima da curva PV	68
Figura 4.4: Relação N/H – caso 1 – parte de baixo da curva PV	69
Figura 4.5: Relação M/L – caso 1 – parte de cima da curva PV	69
Figura 4.6: Relação M/L – caso 1 – parte de baixo da curva PV	70
Figura 4.7: Sistema de duas barras – caso 2	71
Figura 4.8: Continuado com Newton-Raphson completo – caso 2	72
Figura 4.9: Relação N/H – caso 2 – parte de cima da curva PV	72
Figura 4.10: Relação N/H – caso 2 – parte inferior da curva PV	73
Figura 4.11: Relação M/L – caso 2 – parte de cima da curva PV	73
Figura 4.12: Relação M/L – caso 2 – parte de baixo da curva PV	74
Figura 4.13: Menor autovalor no Jacobiano e submatrizes H e L – 14 barras	81

Figura 4.14: Menor valor singular no Jacobiano e submatrizes H e L – 14 barras	81
Figura 4.15: Menor autovalor no Jacobiano e submatrizes H e L – 30 barras	82
Figura 4.16: Menor autovalor no Jacobiano e submatrizes H e L – 57 barras	83
Figura 4.17: Menor autovalor no Jacobiano e submatrizes H e L – 118 barras	83
Figura 4.18: Passo dos vetores tangentes – sistema 14 barras	85
Figura 4.19: Passo dos vetores tangentes – sistema 30 barras	85
Figura 4.20: Passo dos vetores tangentes – sistema 57 barras	86
Figura 4.21: Passo dos vetores tangentes – sistema 118 barras	86
Figura 4.22: Número de iterações no método continuado – aplicando o desacoplado rápido e completo	94
Figura I.1: comportamento da MCVT	105
Figura II.1: comportamento do menor autovalor e IC – sistema de 14 barras	106
Figura II.2: comportamento do menor autovalor e IC – sistema de 30 barras	107
Figura II.3: comportamento do menor autovalor e IC – sistema de 57 barras	107
Figura II.4: comportamento do menor autovalor e IC – sistema de 118 barras	108

Resumo

Este trabalho analisa o fenômeno da estabilidade de tensão com a ajuda de ferramentas estáticas. Estas ferramentas não só determinam o ponto de bifurcação e as classificações das barras mais críticas, como fornecem informações qualitativas a respeito do processo de colapso de tensão. Estas informações são importantes para determinar ações de controle para minimizar as consequências do colapso de tensão.

O método extrapolado utiliza características do vetor tangente para determinar o ponto sela-nó. Este método é investigado e algumas propostas são sugeridas para melhorar o desempenho. Seguindo esta mesma linha (extrapolar uma curva conhecidos alguns pontos de equilíbrio), é testado extrapolar a curva PV, obtendo-se resultados razoáveis.

Num segundo momento, é verificado se os métodos desacoplados de resoluções das equações de fluxo de potência podem ser aplicados no método da continuação. É pesquisado não só a precisão do ponto de colapso mas a classificação das barras críticas. Finalmente, é proposta a combinação dos métodos, de forma a se obter um método continuado desacoplado rápido.

Para os dois métodos de determinação do ponto sela-nó, extrapolado e continuado, são propostos critérios de parada que podem contribuir no desempenho do tempo computacional. Os resultados obtidos qualificam as técnicas propostas como úteis para a análise de colapso de tensão.

Abstract

This work analyzes the phenomenon of the voltage stability with the help of some static tools. The conditions of applicability of these techniques are observed. These tools not only determine the bifurcation point and the most critical buses classification, but also add qualitative analyses of the power system, which are important to determine control actions to minimize the voltage collapse consequences.

“The Extrapolated Method” uses characteristics of the tangent vector to determine the saddle node. This method is investigated here and some proposals are suggested to improve its performance. Following this same strategy, improvements in the PV curve extrapolation is tested, and reasonable results are obtained.

In a second moment, it was verified that the “Uncoupled Methods” of power flow resolutions can be applied to the “Method of the Continuation”. It was studied not only the precision of the collapse point, but also the classification of the critical buses. Finally, a combination of these methods is proposed, in order to obtain a decoupled continuation method.

For each method used to determine the saddle node, extrapolated and continuous, it was proposed some stops criterias that can contribute in the performance of the computational time. The results obtained render the techniques proposed here as useful for voltage collapse analysis.

CAPÍTULO I

1. ESTABILIDADE DE TENSÃO: ASPECTOS GERAIS

1.1. Introdução

Os estudos sobre estabilidade de tensão evoluíram muito nos últimos anos, tanto na parte conceitual como na parte de introdução de novas técnicas para abordagem do problema.

Inicialmente, o termo estabilidade de tensão estava simplesmente associado à variação da tensão em função da variação da carga. Hoje o termo foi ampliado e o fenômeno tem que ser avaliado junto com a propriedade de equilíbrio dinâmico.

Já o termo colapso de tensão era classificado como degradação das tensões em decorrência do bloqueio de motores de indução. Na atualidade o termo colapso de tensão está associado ao fenômeno que ocorre após a ultrapassagem do limite de estabilidade.

Uma das possibilidades de ocorrência de colapso de tensão, na sua concepção atual, verifica-se com o excesso de carregamento de um sistema.

No Brasil, a falta de recursos financeiros para a expansão do sistema elétrico, levou o governo a privatizar as empresas de energia elétrica, e ainda, mesmo as empresas que não forem privatizadas experimentarão o mesmo ambiente competitivo, devido as novas regulamentações implantadas no setor de energia elétrica.

Então, um sistema de transmissão estressado em decorrência do crescimento da carga, crescimento verificado mesmo em períodos recessivos, com poucas obras de suporte, aliado as novas técnicas de otimizações para obter o máximo de sua capacidade, contribuem para que este sistema possa operar próximo ao ponto de colapso de tensão.

Este novo panorama no setor elétrico está modificando o perfil do analista de sistema tanto na operação como no planejamento do setor. A expansão do sistema terá que ser dentro desta nova realidade. Dominar técnicas que determinam outras sensibilidades do sistema passa a ser fundamental para medidas operativas e para decisões de deflagramento de obras, caso contrário corre-se o risco de perder consumidores ou ser severamente punido diante da nova legislação.

Neste capítulo será abordada a parte teórica de estabilidade e colapso de tensão através de conceitos, definições, classificações, históricos. No final do capítulo apresenta-se uma proposta de desenvolvimento para este trabalho.

1.2. Conceitos, definições e classificações

1.2.1. Estabilidade de um sistema

É a capacidade que este sistema tem de alcançar um ponto de equilíbrio e continuar em equilíbrio depois de ter sofrido uma perturbação [1].

A estabilidade de um sistema pode ser analisada diante de diversas grandezas (ângulo, frequência e tensão), dependendo da natureza da perturbação [1, 2].

1.2.2. Estabilidade angular

A estabilidade angular é analisada em um conjunto de máquinas síncronas. Se após um distúrbio houver um equilíbrio entre o torque eletromagnético e o mecânico de cada

máquina o sistema é estável. Caso contrário ocorre um aumento das oscilações em um ou mais geradores, podendo ocasionar a perda de sincronismo e conseqüentemente manifestando a instabilidade.

1.2.3. Estabilidade a pequenos sinais (ou de regime permanente)

É a habilidade do sistema de potência em manter o sincronismo sob pequenos distúrbios. Os distúrbios são considerados suficientemente pequenos, o que permite a linearização do sistema de equações para a análise.

A análise a pequenos sinais usando técnicas lineares depende do ponto de operação do sistema e traz informações valiosas a respeito da característica dinâmica do sistema de potência neste ponto.

A técnica de análise modal da matriz de estado do sistema é apropriada para a análise deste tipo de estabilidade [3, 4].

1.2.4. Estabilidade transitória

É caracterizada por uma perturbação transitória severa. O intervalo de tempo de interesse dos estudos neste tipo de fenômeno varia de 3 a 5 segundos após a perturbação, dependendo da complexidade do sistema este tempo pode ser estendido.

1.2.5. Estabilidade de freqüência

Ocorre quando o sistema consegue se manter dentro de um intervalo próximo a freqüência nominal após uma perturbação.

A técnica de simulação não-linear no domínio do tempo, com modelagens mais aprimoradas para as dinâmicas associadas às severas excursões de parâmetros e intervalos de tempo estendidos, é indicada para esta análise [5, 6].

1.2.6. Estabilidade de tensão

É a capacidade do sistema de potência de manter níveis de tensão aceitáveis em todas as barras, em condições normais ou após uma perturbação [2].

Um sistema sofre instabilidade de tensão quando uma perturbação causa uma progressiva e incontrolável queda ou elevação de tensão [7].

A instabilidade de tensão nem sempre ocorre sozinha, muitas vezes a instabilidade de ângulo e tensão caminham juntas [1].

1.2.7. Colapso de tensão

É o processo através do qual a instabilidade de tensão leva o sistema a perda de tensão em uma parte significativa do sistema [8].

Os problemas de colapso de tensão estão associados a sistemas elétricos que operam em condições estressantes, como por exemplo: linhas de transmissão com carregamentos elevados, fontes locais de potência reativa insuficientes e transmissão de potência através de grandes distâncias.

O colapso de tensão é um fenômeno local que se espalha pela vizinhança [2, 9]. O intervalo de tempo entre o distúrbio inicial e o colapso de tensão pode variar de uma fração de segundo até dezenas de minutos [10].

Observe a distinção entre instabilidade e colapso de tensão. O fenômeno de colapso de tensão está ligado à sequência de eventos que acompanham a instabilidade de tensão. A instabilidade de tensão pode, ao contrário do colapso de tensão, provocar elevação de tensão [1, 11].

1.2.8. Fatores de influência

O principal fator responsável pela instabilidade de tensão é a inabilidade do sistema de potência em manter um apropriado balanço de potência reativa e prover um suporte adequado de tensão através do sistema [1]. Entre os principais fatores que influem na estabilidade de tensão, destacam-se [7, 8, 12, 10, 13, 14, 15, 16, 17]:

Geradores síncronos

A atuação dos limitadores das correntes de campo e armadura dos reguladores de tensão dos geradores pode provocar a redução da potência reativa gerada, embora transitoriamente estes equipamentos possam fornecer potência reativa além desses limites. Para análise de fluxo de carga, um modelo que assume tensão terminal e potência constante tem sido empregado. Isto considera parcialmente os efeitos dos reguladores de tensão e velocidade. Tal efeito só é observado enquanto os limites de geração de potência reativa não são violados. Quando isto ocorre, a máquina tem seu valor de potência reativa fixado no máximo e seu nível de tensão liberado, tornando-se uma barra de carga.

Características das linhas de transmissão

Uma linha de transmissão apresenta um comportamento diferenciado em função de seu carregamento. Ela produz potência reativa proporcionalmente ao quadrado da tensão e consome potência ativa e reativa, proporcionalmente ao quadrado da corrente. Dessa forma, a potência reativa líquida proporcionada por uma linha de transmissão variará com seu ciclo de carga, sendo as condições de carga pesada as mais críticas sob o aspecto de estabilidade de tensão, quando as perdas elétricas e quedas de tensão podem tornar-se elevadas. Nos estudos de fluxo de potência e estabilidade o modelo geralmente utilizado para representar uma linha de transmissão é o modelo π equivalente.

Compensadores de potência reativa

Os bancos de capacitores “shunt”, apesar de melhorarem o suporte local de potência reativa, têm o inconveniente de fornecer essa potência como função do quadrado da tensão. Portanto, podem não produzir bons resultados na operação com baixos perfis de tensão. Mesmo os compensadores estáticos, apesar de proporcionarem maior flexibilidade, ao atingirem seus limites de geração de potência reativa, tornam-se simples capacitores “shunt”.

Os capacitores série têm tradicionalmente sido associados a longas linhas de transmissão para proporcionarem benefícios do ponto de vista da estabilidade angular, reduzindo o ângulo de fase entre os terminais transmissor e receptor. Eles produzem potência reativa proporcionalmente ao quadrado da corrente e independentemente da tensão nas barras, possibilitando reduzir a queda de tensão resultante da reatância da linha. Esta característica de auto-regulação faz com que estes equipamentos encontrem aplicações em linhas de transmissão curtas com o objetivo final de melhorar a estabilidade de tensão, em razão de serem tão mais efetivos quanto mais se necessita de compensação. Entretanto, os capacitores série têm a desvantagem de propiciarem o aparecimento de ressonância subsíncrona e a necessidade da utilização de dispositivos especiais de proteção contra sobretensões decorrentes de curto-circuito na rede elétrica [18]. De forma similar à compensação “shunt”, uma maior flexibilidade pode ser obtida através do uso de compensação série controlável [19, 20].

Característica das cargas

Um modelo de carga é uma representação matemática da relação entre a tensão em uma barra (amplitude e frequência) e a potência (ativa e reativa) ou corrente fluindo para a carga [21]. Existem dois tipos básicos de modelo de carga: o dinâmico e o estático.

Os modelos dinâmicos são representados por equações diferenciais e podem reproduzir o comportamento da carga em regime permanente e em transitórios elétricos.

Um modelo dinâmico genérico para as cargas de potência constante, aplicável aos estudos de estabilidade de tensão, foi proposto por PAL em [22].

Outros trabalhos como o de HILL [23], apresentam diferentes modelos dinâmicos para as cargas de um sistema elétrico.

Os modelos estáticos são expressões algébricas que determinam a potência consumida pela carga a partir da barra que a alimenta naquele instante em função da tensão, desprezando a variação da frequência por ser muito reduzida [24]. Os modelos estáticos representam cargas necessariamente estáticas (resistivas ou iluminação incandescente) ou servir como modelos aproximados para cargas dinâmicas (modelo de potência constante para representar motores de indução, por exemplo). Os programas de fluxo de potência usam modelos estáticos para as cargas. Os modelos estáticos podem ter forma polinomial ou exponencial.

No modelo polinomial, as partes ativa e reativa da potência consumida pela carga são composta por parcelas de potência constante, corrente constante e impedância constante:

$$P = P_0 (a_1 + b_1(V/V_0) + c_1 (V/V_0)^2); \quad (a_1 + b_1 + c_1) = 1 \quad (1.1)$$

$$Q = Q_0 (a_2 + b_2(V/V_0) + c_2 (V/V_0)^2); \quad (a_2 + b_2 + c_2) = 1 \quad (1.2)$$

Onde:

P, Q: potência consumida na barra

P₀, Q₀: potência inicial na barra (ou seja, considerando V=1 p.u.)

- a_1, a_2 : parâmetros que determinam a parcela de potência constante.
- b_1, b_2 : parâmetros que determinam a parcela de corrente constante.
- c_1, c_2 : parâmetros que determinam a parcela de impedância constante.
- V : tensão da barra correspondente a P e Q .
- V_o : tensão da barra correspondente a P_o e Q_o .

Estas parcelas distintas são uma maneira de se tentar reproduzir as características de diferentes tipos de carga.

Uma outra maneira de representar as cargas estáticas é através do modelo exponencial. Considerando apenas as variações com a tensão, são usadas as seguintes expressões para as potências ativa e reativa de uma carga:

$$P = P_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{n_p} \quad (1.2)$$

$$Q = Q_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{n_q}$$

Os expoentes n_p e n_q referem-se às sensibilidades de P e Q às variações em V [24, 25]:

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{P_o}{V_o^{n_p}} n_p (V)^{n_p-1} \quad (1.3)$$

considerando V_o e P_o próximos a 1 p.u. e mais, que as variações em V serão pequenas, tem-se:

$$\frac{\partial P}{\partial V} = n_p \quad (1.4)$$

Existem diversos métodos [24], para a determinação de um modelo global a partir da agregação de diversas cargas expressas na forma exponencial.

O modelo exponencial pode ser transformado em modelo polinomial e, assim, prontamente usado em um programa de fluxo de potência.

Portanto, nas indústrias, a predominância de motores justifica o uso de parcela de potência constante. Nas residências, cargas resistivas como chuveiro, aquecedor, ferro elétrico e lâmpadas incandescentes são a razão para a componente de impedância constante (embora este modelo esteja afastado da realidade devido a presença de pequenos motores: geladeira, máquinas de lavar e ar condicionado). Já as cargas comerciais são geralmente modeladas como corrente constante em função da intensa utilização da iluminação fluorescente. Daí a importância de modelar a carga, nas subestações, ou até mesmo nos ramais, existem diferentes classes de consumidores e a caracterização destas cargas é importante para estudar estabilidade de tensão.

É importante destacar outros tipos de cargas consideradas como potência constante, são as cargas alimentadas através de LTC's ("on load tap changing"), ou transformadores com comutadores de tap sob carga. Quando operam dentro de sua faixa, estes transformadores mantêm constante a tensão no secundário fazendo com que as cargas conectadas neste enrolamento tenham uma característica de potência constante.

Nesta seção foram colocados de maneira sucinta os fatores de influência na estabilidade de tensão, que serão bastante úteis para a compreensão do fenômeno. A seguir serão mostradas algumas ocorrências internacionais e no Brasil associadas ao fenômeno.

1.3. Histórico de ocorrências

A ocorrência de alguns incidentes envolvendo problemas de estabilidade de tensão fez com que o tema ganhasse destaque a nível mundial nos últimos anos. Dentre esses eventos pode-se citar os seguintes [2, 8]:

Japão, 22 de Agosto de 1970

França, 19 de Dezembro de 1978

Dinamarca, 2 de Março de 1979

Bélgica, 4 de Agosto de 1982

Flórida, 2 de Setembro de 1982

Flórida, 26 de Novembro de 1982

Flórida, 28 de Dezembro de 1982

Flórida, 30 de Dezembro de 1982

Suécia, 27 de Dezembro de 1983

Flórida, 17 de Maio de 1985

Checoslováquia, 5 de Julho de 1985

Inglaterra, 20 de Maio de 1986

França, 12 de Janeiro de 1987

Japão, 23 de Julho de 1987

1.4. Ocorrências no Brasil

As ocorrências de instabilidade de tensão no sistema elétrico brasileiro até recentemente estavam restringidas a área RJ/ES, área dependente de geração externa e com carga reativa fortemente influenciada pelas altas temperaturas locais. Entretanto, as ocorrências de Abril de 1997 na Área São Paulo mostraram na prática que este fenômeno pode também ocorrer em uma rede malhada e com um grande parque gerador.

As incertezas, as pressões econômicas e as dificuldades na previsão de carga a médio e longo prazo contribuíram para que os grupos de estudo não apontassem a necessidade de novos equipamentos e reforços no sistema interligado. O estressamento gradativo do sistema e o aumento das cargas reativas, levaram as empresas a buscarem compensação destas cargas de forma a reduzirem as perdas elétricas e garantir uma rápida flexibilidade operativa. Por outro lado, o sistema tornou-se extremamente dependente desta compensação.

As ocorrências de Abril e Novembro de 1997, mostram a dependência do sistema em relação aos recursos de potência reativa e a necessidade urgente de uma otimização destes recursos e do controle de tensão.

No dia 24 de Abril de 1997, uma demanda de carga recorde no sistema e uma combinação de manutenção em importantes equipamentos de controle de tensão, culminaram com uma interrupção de suprimento de cerca de 7600 MW no sistema S/SE/CO brasileiro [26].

O relatório gerado das ocorrências dos dias 24 e 25 de Abril de 1997 [26] mostra que a compreensão do fenômeno de colapso de tensão não está sedimentada no setor elétrico brasileiro. Atualmente, devido ao desenvolvimento de diversas ferramentas teóricas e

computacionais associadas ao tema, a ignorância a respeito do assunto vem diminuindo significativamente.

1.5. Métodos de análise da estabilidade de tensão

A estabilidade de tensão pode ser analisada utilizando-se técnicas com modelos estático ou dinâmico, sendo que a escolha depende basicamente da perturbação envolvida no problema.

Se o sistema sofre uma grande perturbação (como por exemplo: perda de uma linha, gerador ou um grande banco de capacitores) o modelo apropriado para análise é o dinâmico, pois a resposta transitória deste tipo de distúrbio é bastante importante. A análise estática pode ser empregada, no entanto, para pré-selecionar as contingências mais severas sob o ponto de vista de margem de carga até o ponto de colapso [27, 28], com o objetivo de diminuir o tempo de computação, já que apenas as mais severas seriam rigorosamente avaliadas.

O modelo estático para análise de estabilidade de tensão só é apropriado para pequenas perturbações, quando o transitório deste distúrbio não é de interesse. Seria o caso de sucessivos incrementos de cargas que podem levar o sistema ao ponto de colapso.

1.5.1. A Análise dinâmica

A análise dinâmica usa técnicas não-lineares ou linearizadas de simulação no domínio do tempo ou no domínio da frequência. É importante para estudos envolvendo coordenação de controles e proteções, nas análises de ocorrências e como uma base para algumas análises estáticas [7].

As vantagens da análise dinâmica residem na possibilidade de captura e cronologia dos eventos e na reprodução fiel da dinâmica da instabilidade de tensão.

As desvantagens dessa análise residem na necessidade de aquisição de uma quantidade considerável de dados, de longos tempos de simulação e o não fornecimento direto de informações a respeito da margem e área crítica da estabilidade.

Técnicas de simulação com passo de integração variável, processamento paralelo [27] e de simulação quasi-dinâmica [29], vem reduzindo drasticamente o esforço computacional nas análises dinâmicas, tornando possível, inclusive, a utilização deste tipo de análise em tempo real.

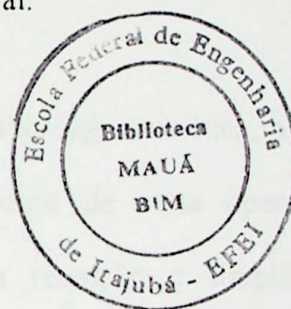
1.5.2. A Análise estática

O modelo dinâmico de um sistema de potência pode ser representado através de um conjunto de equações diferenciais da seguinte forma geral:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (1.5)$$

onde

\mathbf{x} representa as variáveis de estado do sistema



A análise estática considera que, em muitos casos, a dinâmica do sistema com influência na estabilidade de tensão varia lentamente. Assim sendo, as derivadas das variáveis de estado ($\dot{\mathbf{x}}$) em relação ao tempo podem ser consideradas iguais a zero e a equação (1.5) reduz-se a uma equação puramente algébrica para cada ponto de equilíbrio:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = 0 \quad (1.6)$$

permitindo a obtenção, identificação e estudo de instantâneos da operação e que a análise da estabilidade de tensão seja desenvolvida considerando-se apenas o modelo de sistema utilizado nos estudos de fluxo de potência [7].

A referência [8] mostra que, sob certas condições, a análise estática proposta por este modelo pode também ser suficiente para a análise dinâmica do sistema.

A análise estática é recomendada, por seu baixo custo computacional, na análise em tempo real e onde há a necessidade de estudo de uma grande quantidade de condições e/ou contingências no sistema.

As vantagens adicionais da análise estática são: a capacidade de proporcionar informações a respeito da condição de estabilidade do ponto de equilíbrio considerado, o limite de máximo carregamento, a margem de estabilidade de uma determinada condição operativa, as áreas críticas do sistema, a classificação de contingências críticas [28], e a melhor localização e quantidade necessária de potência reativa para compensação ou obtenção de reserva girante. A riqueza de informações que a análise estática pode proporcionar, também qualifica esta técnica para a complementação das análises dinâmicas de estabilidade de tensão.

Uma vez que a trajetória no tempo não é simulada na abordagem estática, os pontos de operação estudados podem não ser viáveis do ponto de vista operativo. Esta consideração somada a necessidade de cautela na retenção e simplificação de mecanismos essenciais para o estudo, são as desvantagens deste tipo de análise [7].

1.6. Proposta de trabalho

Este trabalho será desenvolvido utilizando a análise estática de estabilidade de tensão.

O capítulo 2 apresentará alguns conceitos básicos do problema de colapso de tensão através de um sistema de duas barras. E logo após serão apresentados alguns métodos empregados em estudos de estabilidade de tensão usando ferramentas estáticas, e dentre eles será detalhado o método do vetor tangente que será utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

No capítulo 3 serão apresentadas as duas linhas básicas de pesquisa quando se aplica o vetor tangente:

A. Método extrapolado

Será detalhado o método original e serão propostas algumas variantes para melhorar o desempenho do método. Será desenvolvida, também, uma metodologia para extrapolar a curva PV, cujos principais propósitos são verificar a factibilidade e o seu desempenho.

B. Método continuado

Será investigado o método continuado quando é aplicado o método desacoplado nas soluções das equações do processo de convergência do fluxo de potência. Serão detalhadas as expectativas com relação ao método continuado e quanto a obtenção dos principais índices de colapso: autovalor, barras críticas e outros.

Em outras palavras, no capítulo 3 serão investigadas duas ferramentas estáticas para determinação do ponto de colapso e barras mais críticas: extrapolado e continuado, propondo possíveis melhoras de desempenho.

No capítulo 4 serão apresentados os resultados nos sistemas testes quando aplicadas as técnicas desenvolvidas no capítulo 3.

Finalmente no capítulo 5 serão apresentadas as conclusões e sugestões para desenvolvimentos futuros.

CAPÍTULO 2

2. TÉCNICAS DE ANÁLISE ESTÁTICA

2.1. Introdução

Este capítulo tem por objetivo mostrar os conceitos básicos relacionados com análise estática de estabilidade de tensão, mais especificamente com relação a colapso de tensão, que é o assunto a ser investigado neste trabalho.

Inicialmente apresenta-se o fenômeno através de um sistema simplificado com duas barras. A seguir serão citadas as principais técnicas existentes para abordar a estabilidade de tensão utilizando equações de fluxo de potência. E por fim enumera-se quais das técnicas apresentadas foram escolhidas para desenvolver este trabalho e as razões para estas opções.

2.2. Relação entre estabilidade de tensão e estabilidade angular

A estabilidade de tensão e a estabilidade angular estão interligadas. A estabilidade de tensão transitória está geralmente relacionada com a estabilidade angular transitória e formas mais lentas de estabilidade de tensão estão relacionadas com a estabilidade devido a pequenas perturbações. Frequentemente é difícil separar os mecanismos.

Entretanto, existem casos onde uma forma de instabilidade predomina. A referência [10] apresenta duas situações extremas:

- a) Um gerador síncrono conectado a um grande sistema por uma linha de transmissão: estabilidade puramente angular (problema máquina - barra infinita).

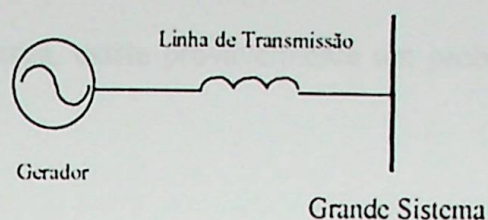


Figura 2.1: Exemplo simples mostrando um caso extremo de estabilidade angular

- b) Um gerador síncrono ou um grande sistema conectado por uma linha de transmissão a uma carga assíncrona: estabilidade puramente de tensão.

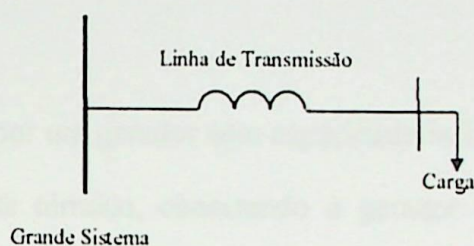


Figura 2.2: Exemplo simples mostrando um caso extremo de estabilidade de tensão

Enquanto a estabilidade de tensão preocupa-se com as áreas de carga e características da carga, a estabilidade angular freqüentemente tem interesse na interligação de usinas com grandes sistemas. Por isso, enquanto na estabilidade angular o objetivo é manter os geradores em sincronismo, a estabilidade de tensão diz respeito às áreas de carga, sendo por isso muitas vezes designada como estabilidade das cargas [10, 30].

As duas formas de estabilidade podem ou não estar presentes em um mesmo distúrbio. É possível detectar colapso de tensão em uma área de um grande sistema interligado sem perda de sincronismo de qualquer dos geradores.

A estabilidade de tensão transitória é usualmente associada com a estabilidade angular transitória, enquanto a estabilidade de tensão de longo termo é menos relacionada com a estabilidade angular, apesar de existirem situações, de longo termo, onde aparecem fortes interações entre estabilidade de tensão e angular.

Pode-se dizer que se a tensão entra em colapso em um ponto do sistema longe de cargas, existe um problema de estabilidade angular. Entretanto, se a tensão entra em

colapso em uma área de carga, existe provavelmente um problema de estabilidade de tensão [10].

2.3. Colapso de tensão em um sistema de duas barras

Para mostrar o problema de estabilidade de tensão será analisado um sistema de duas barras. Tal procedimento apresenta a situação de uma maneira bastante didática, facilitando o entendimento do fenômeno físico que pode ocorrer em um sistema de potência.

Seja o sistema composto por um gerador com capacidade infinita de geração, uma linha de transmissão sem limite térmico, conectando o gerador com uma carga $P + jQ$, conforme figura abaixo:

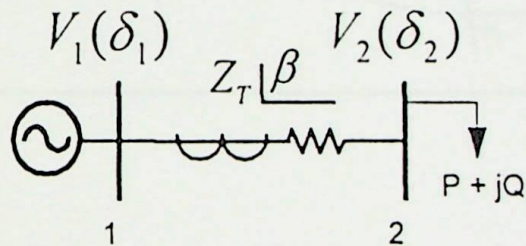


Figura 2.3: Sistema de duas barras

As equações do fluxo de potência são representadas pelas equações de carga abaixo [8]:

$$P_2 = -V_2 \frac{V_1}{Z} \cos(\delta_2 - \delta_1 + \beta) + \frac{V_2^2}{Z} \cos(\beta) \quad (2.1)$$

$$Q_2 = -V_2 \frac{V_1}{Z} \sin(\delta_2 - \delta_1 + \beta) + \frac{V_2^2}{Z} \sin(\beta)$$

Com estas equações, pode-se montar um gráfico plotando a potência da carga para diferentes valores em função de V e δ , tensão e o ângulo na barra 2, respectivamente. A figura a seguir mostra a situação:

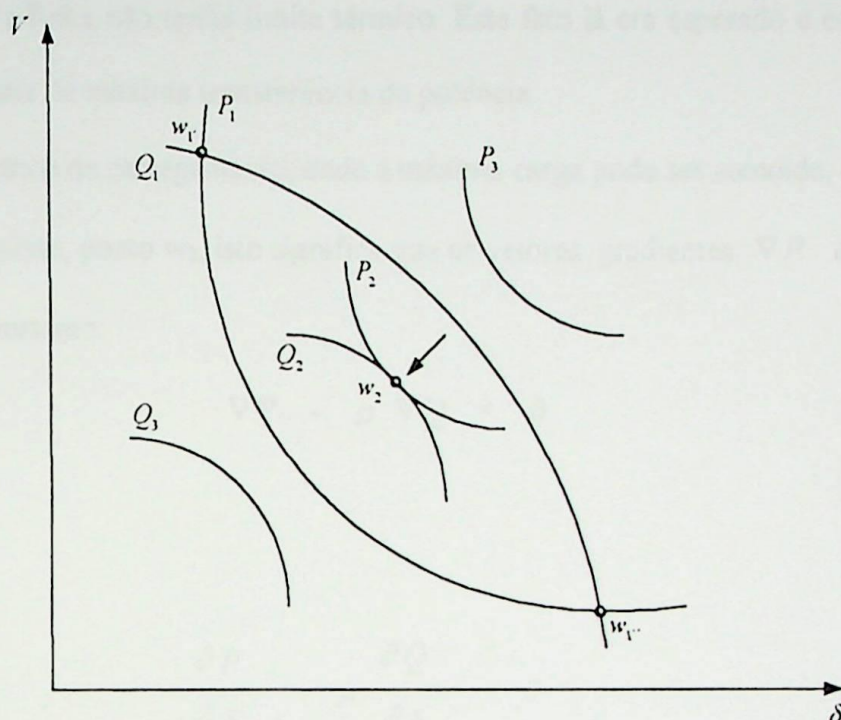


Figura 2.4: Três carregamentos para o sistema de duas barras.

O crescimento do carregamento é de acordo com o crescimento dos índices, ou seja:

$$P_1 < P_2 < P_3 \text{ e } Q_1 < Q_2 < Q_3$$

As interseções definem os pontos de equilíbrio. Dependendo do carregamento o sistema de equações pode apresentar as seguintes soluções:

I O sistema tem duas soluções: interseção de P_1 e Q_1 , pontos w_1 e $w_{1'}$.

II O sistema tem uma solução: P_2 e Q_2 se tangenciam, ponto w_2 .

III O sistema não tem soluções: P_3 e Q_3 não se cruzam e não se tangenciam.

Informações úteis podem ser retiradas a partir destas curvas. Em primeiro lugar, percebe-se que existe um limite de carregamento que pode ser drenado pela rede, mesmo que a linha não tenha limite térmico. Este fato já era esperado e está de acordo com o teorema da máxima transferência de potência.

No ponto crítico de carregamento, onde a máxima carga pode ser atendida, as cargas P e Q se tangenciam, ponto w_2 , isto significa que os vetores gradientes ∇P e ∇Q estão alinhados, portanto:

$$\nabla P - \mu \nabla Q = 0 \quad (2.2)$$

ou

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} - \mu \frac{\partial Q}{\partial \delta} = 0 \quad (2.3)$$

e

$$\frac{\partial P}{\partial V} - \mu \frac{\partial Q}{\partial V} = 0 \quad (2.4)$$

onde μ é um escalar.

A solução das equações acima para μ fornece:

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} \cdot \frac{\partial Q}{\partial V} - \frac{\partial P}{\partial V} \cdot \frac{\partial Q}{\partial \delta} = 0 \quad (2.5)$$

Esta equação nos fornece que o determinante do Jacobiano de fluxo de carga para o ponto crítico é nulo, implicando num autovalor nulo. A singularidade da matriz Jacobiana fornece informações importantes que serão continuamente abordadas neste trabalho.

A figura a seguir mostra a curva PV para a barra de carga do sistema de duas barras. Módulo da tensão da barra de carga em função do carregamento, para diversos fatores de potência:

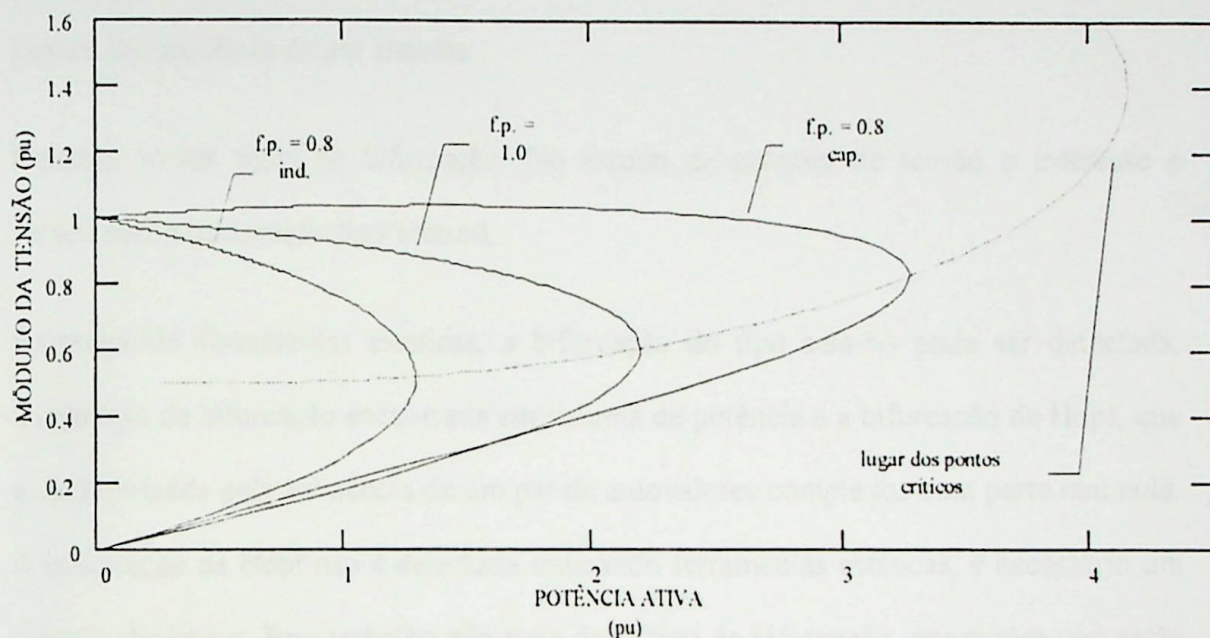


Figura 2.5: Sistema de duas barras – tensão x potência para vários fp

Nesta figura nota-se que até o carregamento máximo (ponto crítico) para cada fator de potência há dois valores de tensão, exceto neste ponto crítico que tem apenas um valor de tensão. Este ponto corresponde ao limite de carregamento.

Outro fato relevante, é que quando o fator de potência se torna capacitivo pode-se carregar mais o sistema, no entanto o ponto crítico pode ocorrer em níveis de tensão normais de operação.

A distância de um determinado ponto de operação de qualquer uma destas curvas até o ponto crítico é denominada margem de carga. A margem de carga é uma informação muito importante, pois, sabendo-se que o sistema perde a estabilidade a partir do ponto

crítico, e conhecendo-se a margem de carga, serão adotadas medidas de controle disponíveis no sistema para evitar o ponto de colapso ou amenizar o corte de carga.

2.4. Bifurcação tipo sela-nó

Um diagrama de bifurcação mostra o comportamento de uma variável de estado em função da variação de um parâmetro. Através da análise dinâmica são plotados os pontos de equilíbrio de um sistema.

Existem vários tipos de bifurcação. No estudo de colapso de tensão o interesse é reconhecer a bifurcação tipo sela-nó.

Empregando ferramentas estáticas, a bifurcação do tipo sela-nó pode ser detectada. Outro tipo de bifurcação encontrada em sistema de potência é a bifurcação de Hopf, que é caracterizada pela existência de um par de autovalores complexos com parte real nula. A bifurcação de Hopf não é detectada utilizando ferramentas estáticas, é necessário um modelo dinâmico. Este trabalho não trata deste tipo de bifurcação, por razões que serão expostas adiante.

Voltando a bifurcação tipo sela-nó, seja a equação retirada de [8]:

$$\dot{x} = \lambda - x^2 \quad (2.6)$$

Que representa um sistema de equações não lineares. Onde λ é o parâmetro que leva o sistema de um ponto de equilíbrio a outro.

O Jacobiano da função acima é:

$$J_x = -2x \quad (2.7)$$

- Para $\lambda < 0$ não existe solução para x .
- Para $\lambda > 0$, duas soluções para $x = \pm\sqrt{\lambda}$
- Para $\lambda > 0$:

➤ Se $x > 0$, o sistema é estável, $Jx < 0$.

➤ Se $x < 0$, o sistema é instável, $Jx > 0$

O sistema possui as seguintes características:

- Duas soluções tornam-se única no ponto de bifurcação.
- Um autovalor nulo é identificado.
- Após o ponto de bifurcação as soluções desaparecem.

Uma outra forma de representar a perda de estabilidade é através do diagrama de bifurcação:

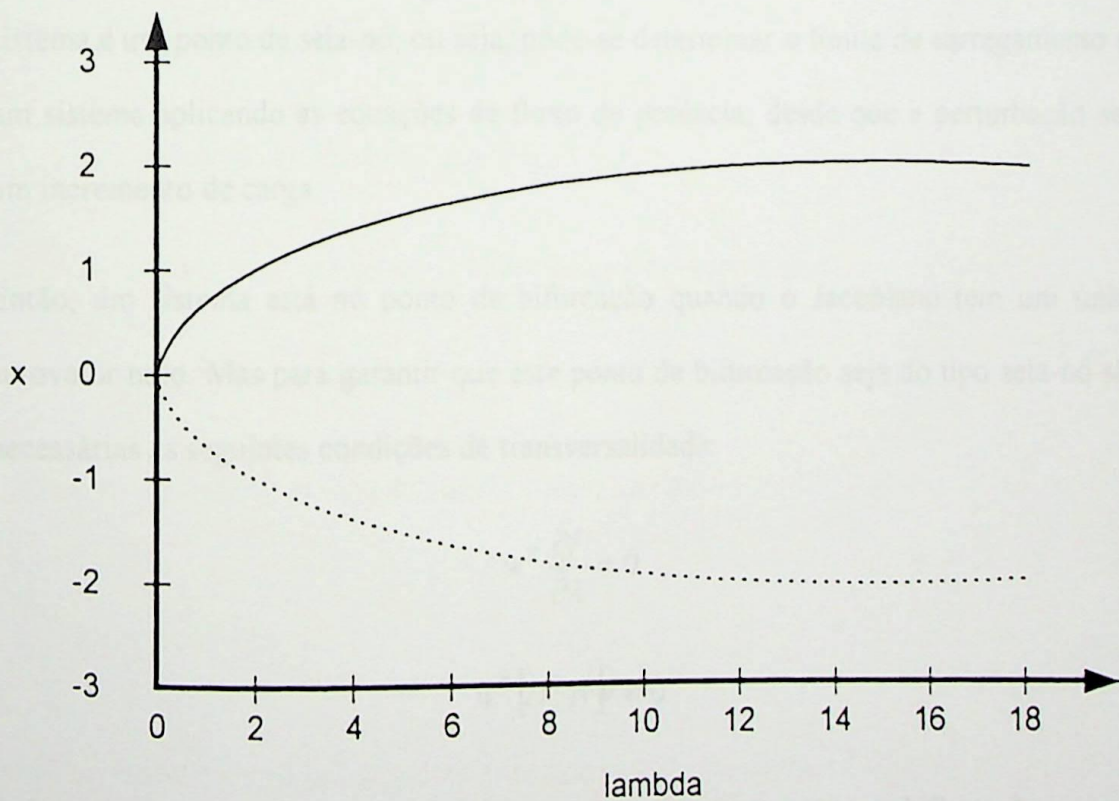


Figura 2.6: Diagrama de bifurcação de uma sela-nó

O diagrama de bifurcação é um gráfico em que uma medida escalar do vetor dos estados x é plotada em função do parâmetro de bifurcação [31].

Pelo diagrama obtém-se as informações:

- Para $\lambda > 0$ há dois pontos de equilíbrio: um estável (linha contínua) e um instável (linha pontilhada).
- Quando λ diminui, os pontos de equilíbrio se aproximam.
- Para $\lambda = 0$ os pontos de equilíbrio coincidem.
- Para $\lambda < 0$ não há ponto de equilíbrio.

Observando as Figuras 2.4, 2.5 e 2.6 nota-se que o ponto de máximo carregamento do sistema é um ponto de sela-nó, ou seja, pode-se determinar o limite de carregamento de um sistema aplicando as equações de fluxo de potência, desde que a perturbação seja um incremento de carga.

Então, um sistema está no ponto de bifurcação quando o Jacobiano tem um único autovalor nulo. Mas para garantir que este ponto de bifurcação seja do tipo sela-nó são necessárias as seguintes condições de transversalidade:

$$w^T \frac{\partial f}{\partial \lambda} \neq 0$$

$$w^T [D_x^2 f] v \neq 0$$

Onde w é autovetor a esquerda e v é o autovetor à direita no ponto de bifurcação.

Portanto, neste trabalho, um ponto de colapso de tensão está associado a uma bifurcação do tipo sela-nó, em função do modelo de sistema escolhido.

2.5. Análise por decomposição de matrizes por autovalores e valores singulares

Como no ponto de colapso a matriz Jacobiana do fluxo de potência é singular, pode-se utilizar esta característica para determinar o ponto de sela-nó. A decomposição da matriz Jacobiana em autovalores ou valores singulares permite acompanhamento do comportamento destes índices, pois, à medida que o sistema vai aproximando do ponto de colapso um autovalor (e um valor singular) aproxima de zero. A análise da instabilidade de tensão através desses índices são propostas em [31, 32, 33, 34, 35].

A matriz Jacobiana pode ser decomposta em:

$$J = W \Lambda V^T \quad (2.8)$$

W : Matriz de autovetores à direita

V : Matriz de autovetores à esquerda

Λ : Matriz diagonal cujos elementos são autovalores de J

E ainda, as equações de fluxo de potência linearizadas:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Desenvolvendo chega-se na seguinte expressão, próximo ao ponto de colapso:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \approx w_n \lambda_n^{-1} v_n^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

onde:

λ_n : Mínimo autovalor

Na equação (2.9) pode-se determinar o ponto crítico, bastando para isso, determinar o ponto de operação cuja matriz Jacobiana apresenta um autovalor bem próximo de zero. Além desta informação esta equação revela outras propriedades. O autovetor à direita relativo ao mínimo autovalor indica as barras sensíveis as variações de tensão e ângulo, e o autovetor a esquerda relativo ao mínimo autovalor indica as barras sensíveis as variações de injeção de potência. Desta maneira, os maiores elementos de w_n irão indicar as barras onde a tensão irá cair mais pronunciadamente quando o sistema estiver próximo ao ponto de colapso.

De maneira semelhante, pode-se desenvolver para a decomposição da matriz Jacobiana em valores singulares, chegando em:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \sigma_i^{-1} r_i s_i^T \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

onde:

r_i : Vetor singular à direita relativo ao i-ésimo valor singular.

s_i : Vetor singular à esquerda relativo ao i-ésimo valor singular.

σ_i : i-ésimo valor singular.

Portanto, a análise consiste em analisar o autovetor (vetor singular) de interesse associado ao menor autovalor (valor singular), para cada ponto de operação, em uma determinada direção de crescimento de carga, até chegar próximo ao ponto de colapso.

No entanto, em [36] mostrou-se que estes índices sofrem variações bruscas perto do ponto crítico. Isto significa que a barra crítica só será conhecida quando o sistema estiver praticamente na bifurcação sela-nó, dificultando ações de controle.

2.6. Análise pelo determinante reduzido

Este método consiste em reduzir a matriz Jacobiana em uma matriz 2×2 , através da regra de Shur, para mensurar a sensibilidade de tensão e ângulo com relação a injeção de potência em cada barra de carga [37, 38]. A barra que apresentar o menor determinante desta matriz reduzida é a barra mais crítica para o ponto de operação em análise. Entretanto, com o crescimento da carga pode haver alteração na indicação da barra crítica, o que torna difícil a aplicação deste método.

Se forem desprezados os limites de geração de potência reativa, o determinante reduzido, calculado com relação a barra crítica, apresenta um comportamento quadrático. No entanto, se esses limites forem considerados é observada uma descontinuidade [36], embora menor do que a descontinuidade encontrada pelo método dos autovalores e valores singulares.

Portanto, além do alto custo computacional do método os resultados não são satisfatórios.

2.7. Técnica da função de energia

Funções de energia foram inicialmente empregadas em sistemas de potência para estudos de estabilidade transitória [39]. O método consiste em avaliar a energia total (cinética e potencial) de um sistema de potência durante um distúrbio (curto-circuito, por exemplo) no mesmo. Para o sistema operar estável, a energia máxima que este pode

vir a ter durante o tempo de distúrbio deve ser igual a um nível de energia associado a uma condição pós-falta. Esta metodologia determina o tempo crítico de abertura para o qual o sistema se mantém estável.

O método pode também produzir resultados interessantes para a análise de estabilidade de tensão. Nesta aplicação, somente a energia potencial do sistema é necessária, dispensando a inclusão de amortecimento e modelos complexos de geradores. As referências [40, 41] mostram que a variação de função de energia pode ter um comportamento linear em função de um aumento de carga, possibilitando uma medida relativa no índice de colapso de tensão para qualquer ponto de operação. Como a distância até o ponto de colapso pode ser estimada, informações a respeito da margem de carga podem ser obtidas para qualquer ponto de operação, o que é um aspecto importante a ser considerado.

A aplicação da função de energia à análise de estabilidade de tensão baseia-se na medida da distância entre os pontos de equilíbrio estável e instável de um sistema. Como um sistema elétrico de n barras tem 2^{n-1} possíveis soluções de fluxo de carga, a determinação da solução instável de interesse não é trivial, como relatado nas referências [40, 41]. Na medida em que aumenta-se o carregamento do sistema, o número possível de soluções diminui, até que somente uma solução exista, com nível de energia zero (ponto de bifurcação). Note que uma vez que o objetivo é determinar a margem de carga do sistema, deve-se considerar a inclusão de perdas, de forma que a função de energia não é estritamente relacionada com a função de Lyapunov.

2.8. Método direto

Em um programa de fluxo de potência tradicional o ponto de colapso não pode ser identificado, já que no ponto de bifurcação a matriz Jacobiana é singular, e o fluxo de

potência não apresenta solução. E também próximo a este ponto crítico o método pode divergir devido ao mal condicionamento da matriz Jacobiana.

Para resolver o problema, é necessário modificar o método de Newton-Raphson, permitindo a busca direta do ponto de colapso sem calcular uma série de soluções. A modificação para permitir a solução consiste no acréscimo, ao conjunto de equações do fluxo de potência, de equações que caracterizam o ponto de bifurcação.

$$f(x,\lambda)=0 \quad (2.12)$$

$$J^T W=0 \text{ ou } J V=0 \quad (2.13)$$

$$\|w\| \neq 0 \text{ ou } \|V\| \neq 0 \quad (2.14)$$

A equação (2.12) garante que a solução será um ponto de operação do sistema.

A equação (2.13) assegura a singularidade da matriz.

A equação (2.14) garante que o autovetor obtido na equação (2.13) seja não nulo, isto é, não seja uma solução trivial.

A referência [42] emprega outro método para a obtenção do ponto de sela-nó através do método de Newton-Raphson modificado – método direto.

O método direto acha corretamente o ponto de colapso, mas pode falhar se os limites de geração de potência reativa forem considerados e problemas de convergência podem também ocorrer se a estimativa inicial estiver distante da solução [8].

2.9. Técnicas de otimização

Empregada inicialmente em [43], onde a matriz Jacobiana é reduzida às equações de potência reativa em função do nível de tensão. Na proposição do problema, o

incremento de carga é a função objetivo, cargas não otimizadas são restrições de igualdade e limites de geração de potência reativa são as restrições de desigualdade. É assumido que a carga tenha um fator de potência constante durante o processo de carregamento do sistema.

As referências [44, 45] propõem o método de pontos interiores como técnica de otimização. A primeira referência busca, a partir de um ponto de operação não factível, o ponto de bifurcação, enquanto a segunda se propõe a achar o ponto de máximo carregamento do sistema.

2.10. Método da continuação

O método da continuação consiste em traçar a curva PV de uma ou várias barras do sistema. Levantada a curva PV obtêm-se as informações necessárias para a análise de estabilidade de tensão: margem de carga e o ponto de colapso.

A partir de um determinado ponto de operação conhecido X_0 , através de sucessivos incrementos de carga traça-se a curva PV, que em termos específicos, equivale ao diagrama de bifurcação. Para levantar esta curva utilizando um fluxo de carga convencional sérios problemas de convergência seriam encontrados, pois, como já mencionado, no ponto de colapso a matriz Jacobiana é singular, e próximo a este ponto a matriz é mal condicionada.

Em [46] é detalhado o método da continuação e sua aplicação em sistemas não-lineares genéricos. Vários autores já utilizaram diferentes implementações do método para traçar curvas PV [47, 48, 49, 50].

O método da continuação é capaz de traçar toda a curva PV, inclusive a parte de baixo da curva, porque utiliza técnicas que evitam a singularidade da matriz Jacobiana. Para tanto o método é dividido em três fases:

- ◆ Previsor
- ◆ Corretor
- ◆ Parametrização

Considerando as variáveis de estado X de um fluxo de potência e o parâmetro λ que leva o sistema de um ponto de equilíbrio a outro, a equação que representa o sistema de equações do fluxo de potência dadas estas modificações é:

$$f(x, \lambda) = 0 \quad (2.15)$$

Portanto, até chegar próximo ao ponto sela-nó são necessários dois passos:

- a) Previsor: Dada uma direção de crescimento de carga ($\Delta\lambda$) acha-se as novas variáveis de estado (ΔX).
- b) Corretor: Corrige-se os novos valores das variáveis de estado, obtidas em a, resolvendo $f(x, \lambda) = 0$, garantindo o novo ponto de equilíbrio.

Quando o sistema estiver perto do ponto de bifurcação o sistema de equações pode não convergir. Então, para obter uma solução é necessário fazer a parametrização, que é a utilização de outra incógnita como parâmetro de solução, removendo a singularidade da matriz Jacobiana.

2.10.1. Previsor

Dado que o sistema esteja num ponto da curva PV, ponto X_0 na figura a seguir:

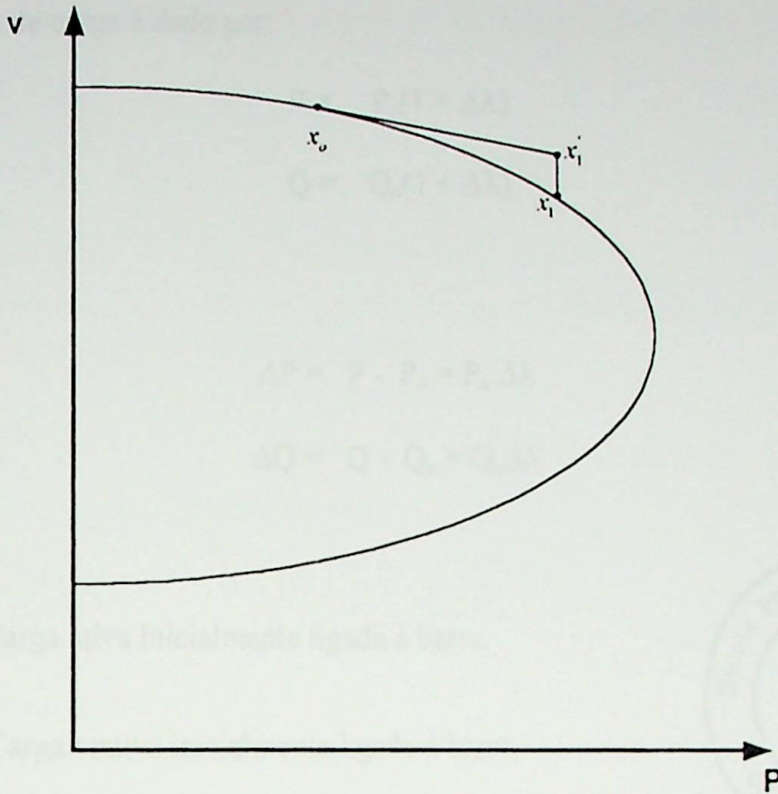


Figura 2.7: Método continuado

Para obter x_1' o previsor pode utilizar uma extrapolação polinomial ou utilizar a tangente à curva no ponto x_0 . O previsor tipo polinomial de ordem 1 necessita das duas últimas soluções para indicar a estimativa da subsequente.

Previsor de ordem superior necessita de um número maior de soluções no ponto que se quer calcular [51].

Um previsor do tipo tangente necessita do cálculo da tangente no ponto precedente ao que se quer calcular.

O previsor adotado com sucesso no método da continuação é o previsor pelo vetor tangente, detalhado a seguir.

Novamente assumindo as equações do fluxo de potência:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

O incremento de carga é dado por:

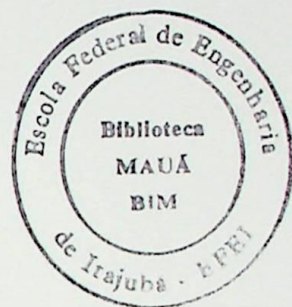
$$\begin{aligned} P &= P_0(1 + \Delta\lambda) \\ Q &= Q_0(1 + \Delta\lambda) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Portanto:

$$\begin{aligned} \Delta P &= P - P_0 = P_0 \Delta\lambda \\ \Delta Q &= Q - Q_0 = Q_0 \Delta\lambda \end{aligned} \quad (2.18)$$

P_0 = Carga ativa inicialmente ligada à barra.

Q_0 = Carga reativa inicialmente ligada à barra.



Substituindo na equação (2.15) e desenvolvendo:

$$\begin{bmatrix} \Delta Q \\ \Delta V \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \Delta\lambda \quad (2.19)$$

O vetor tangente $\Delta V/\Delta\lambda$ é finalmente obtido:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta Q}{\Delta\lambda} \\ \frac{\Delta V}{\Delta\lambda} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

O vetor tangente é diretamente obtido pelo produto da inversa da matriz Jacobiana do fluxo de carga pelo vetor carga inicial de cada barra de carga.

Chamando $\frac{\Delta x_i}{\Delta \lambda_i} = t_i$, pode-se regular o tamanho do passo através de:

$$\Delta \lambda_i = \frac{k}{\|t_i\|} \quad (2.21)$$

onde k é uma constante e $\|t_i\|$ é a norma de t_i . Desta forma, o tamanho do passo é dado por:

$$\Delta x_i = k \frac{t_i}{\|t_i\|} \quad (2.22)$$

Portanto, quanto mais inclinada for a curva, menor o tamanho do passo. A velocidade do processo depende de k na seguinte forma:

$$k \begin{cases} =1 \Rightarrow \textit{normal} \\ >1 \Rightarrow \textit{acelerado} \\ <1 \Rightarrow \textit{lento} \end{cases}$$

2.10.2. Parametrização pelo vetor tangente

A referência [52] mostra que o vetor tangente converge para o autovetor à direita associado ao autovalor nulo. A referência [53] mostra que a maior componente no autovetor à direita indica a variável mais sensível no ponto de singularidade.

Portanto, quando utiliza-se o vetor tangente para o passo predictor a parametrização é feita através da substituição da variável associada ao maior componente em t_i por λ :

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \lambda \\ x_n \end{bmatrix} \quad p = \lambda = x_i \quad (2.23)$$

2.10.3. Corretor

Observando a figura 2.7, o passo predictor leva o processo de x_0 até x_1' . Então, o objetivo do passo corretor é estabelecer uma solução para o sistema a partir do ponto x_1' , esta solução procurada é um ponto próximo a x_1' mas que esteja na curva PV, na figura seria o ponto x_1 .

O método a ser utilizado no passo corretor é o Newton-Raphson. Para garantir que não haja problemas de convergência na determinação de x_1 uma nova equação é acrescentada às equações de fluxo de potência.

$$\begin{aligned} f(x, \lambda) &= 0 \\ \rho(x, \lambda) &= 0 \end{aligned} \tag{2.24}$$

A segunda equação acima é uma equação extra e pode ser obtida através da interseção perpendicular entre os vetores previsor e corretor, obtendo:

$$\rho(x, \lambda) = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta \lambda_1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x - x_1 - \Delta x_1 \\ \lambda - \lambda_1 - \Delta \lambda_1 \end{bmatrix} = 0 \tag{2.25}$$

$$\rho(x, \lambda) = \Delta x_1 (x - x_1 - \Delta x_1) + \lambda_1 (\lambda - \Delta \lambda_1 - \lambda_1) = 0 \tag{2.26}$$

Iniciando o processo em $(x_1 + \Delta x_1, \lambda_1 + \Delta \lambda_1)$, esta solução converge para (x_2, λ_2) .

A desvantagem deste método consiste no alto esforço computacional exigido para sistemas de potência de grande porte.

Outra maneira bastante prática é fazer o passo corretor utilizando um fluxo de potência, com as condições iniciais do ponto x_0 . Para tanto o passo previsor não pode ser muito longo senão pode-se passar do ponto ideal para fazer a parametrização.

2.10.4. Síntese do método da continuação

A Figura 2.8 ilustra o significado dos passos previsor e corretor, cuja descrição matemática foi realizada. Considerando-se um determinado ponto de operação (x^i, λ^i) conhecido, pode-se estimar no passo previsor um novo ponto $(x^i + \Delta x^i, \lambda^i + \Delta \lambda^i)$.

Entretanto esse ponto não é solução de $f(x, \lambda) = 0$, a qual será determinada no passo corretor e corresponderá ao ponto (x^{i+1}, λ^{i+1}) :

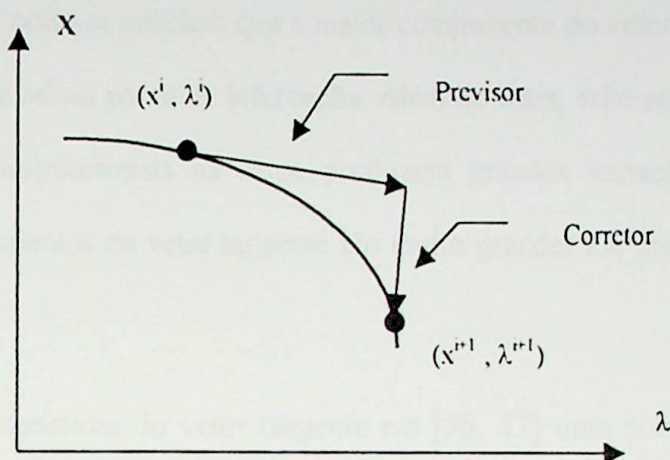


Figura 2.8: Processo do método da continuação

O resultado de repetidas execuções dos passos previsor e corretor é um conjunto de pontos que formam o diagrama de bifurcação, onde a margem de carga será dada pela parcela de carregamento que ao ser adicionada à carga inicial fará com que o sistema atinja o ponto crítico (“nariz” da curva P-V).

A robustez e os resultados precisos fornecidos pelo método da continuação fazem com que essa técnica seja usada em diversas referências [50, 54, 55].

2.11. Método do vetor tangente

Na seção anterior foi mostrada a utilização do vetor tangente para determinar o passo previsor no método da continuação. Também foi demonstrado como explicitar o vetor tangente, equação (2.19). Nesta seção serão mostradas outras técnicas, utilizando o vetor tangente, para determinar o ponto de bifurcação tipo sela-nó e a margem de carga.

Sabe-se que o vetor tangente converge para o autovetor à direita associado ao autovalor nulo [52]. Portanto, a sensibilidade do vetor tangente está também associada as variações de tensão e ângulo. E pela mesma razão, convergência do vetor tangente com autovetor à direita, pode-se concluir que a maior componente do vetor tangente indica a variável mais sensível no ponto de bifurcação. Além do mais, sabe-se que no ponto de colapso variações infinitesimais na carga produzem grandes variações de tensão e ângulo, logo, os elementos do vetor tangente são muito grandes e o inverso de cada um tende para zero.

Diante dessas características do vetor tangente em [56, 57] uma nova metodologia é apresentada, com um significativo ganho de custo computacional, com relação ao método da continuação. O ponto de sela-nó é determinado por extrapolação, admitindo que o inverso da maior componente do vetor tangente tem um comportamento quadrático. Isto será detalhado no próximo capítulo.

Outra facilidade, da utilização do vetor tangente, é o fato da maior componente deste vetor indicar a barra mais sensível, isto é, uma pequena variação de carregamento provoca grandes variações de tensões e ângulos, caracterizando a barra mais susceptível ao colapso de tensão, em um determinado ponto de operação. E mais ainda, em [58] a barra crítica no ponto de colapso é identificada com uma certa antecedência com relação ao ponto sela-nó, comparando com as metodologias apresentadas (menor autovalor, menor valor singular, determinante reduzido).

Um aspecto bastante saliente desta metodologia é a sua aplicação em sistemas de potência considerando os limites de geração reativa das barras PV. E isto é fundamental porque é uma característica de sistemas reais. E como mostrado em [8] essa consideração altera não só o cálculo do ponto crítico como também a classificação das barras mais sensíveis.

2.12. Quadro resumo das técnicas

O quadro a seguir apresenta as principais vantagens e desvantagens das ferramentas estáticas contidas neste capítulo:

Método	Vantagens	Desvantagens
Autovalor e valor singular	Detecta o ponto de colapso.	Mudança brusca de comportamento. Não determina a barra crítica com antecedência.
Otimização	Resposta precisa. Limites de geração reativa são considerados.	Não traça a curva PV e problemas de convergência.
Método direto	Determina o ponto crítico diretamente.	Convergência depende dos valores iniciais e tende a falhar quando os limites de geração reativa são considerados.
Determinante reduzido	Comportamento melhor do que autovalor e valor singular.	Requer conhecimento da barra crítica. Alto custo computacional.
Técnica da função de energia	Comportamento linear para alguns sistemas.	Limitação na modelagem de carga que não pode variar com a tensão.
Vetor tangente	Extrapolação possível e identificação da barra crítica com antecedência. Baixo custo computacional.	Comportamento não previsível.
Método da continuação	Precisão na resposta – Diagrama de bifurcação traçado	Alto tempo computacional

2.13. Conclusões do capítulo 2

Neste capítulo foi apresentado o problema da instabilidade de tensão. A abordagem teórica utilizando um sistema com duas barras ajuda a entender o fenômeno com bastante propriedade.

É bastante importante entender o tipo de bifurcação que se pretende encontrar utilizando técnicas de análise estática. Neste enfoque é bastante promissor a análise da bifurcação tipo sela-nó, os pontos de equilíbrio estáveis e instáveis, e ponto limite de equilíbrio, denominado ponto crítico.

Quanto as ferramentas de análise estática, apesar de todas serem fundamentadas matematicamente, demonstram eficiência variadas.

Poucos métodos apresentam resultados satisfatórios quando os limites de geração reativa das barras PV são considerados: continuação, vetor tangente e otimização.

O método da continuação apesar de mostrar-se eficaz quanto à determinação do ponto de colapso e da margem de carga, apresenta um tempo computacional elevado.

O método da otimização foge do escopo deste trabalho.

O método do vetor tangente será o alvo do desenvolvimento desta pesquisa, não só melhorando sua performance, como utilizando-o para desenvolvimento de outras técnicas de análise e de ações de controle.

CAPÍTULO 3

3. MELHORAMENTO DO MÉTODO EXTRAPOLADO E APRESENTAÇÃO DO MÉTODO CONTINUADO DESACOPLADO

3.1. Introdução

Neste capítulo serão investigados dois assuntos sobre colapso de tensão: melhoria e alternativas para determinar o ponto de colapso utilizando o método extrapolado e verificar qual o comportamento do método continuado utilizando Newton-Raphson desacoplado.

Com relação ao primeiro assunto, serão propostas algumas alterações para melhorar a eficiência da metodologia da extrapolação quadrática, apresentada em [56, 57].

Com relação ao segundo assunto, o método continuado, apresentado no capítulo anterior, é executado utilizando o método de Newton-Raphson para resolver as equações de fluxo de potência. Será utilizado o método continuado aplicando Newton-Raphson desacoplado, com algumas expectativas que serão descritas em uma seção deste capítulo.

3.2. Método extrapolado

3.2.1. Introdução

No capítulo anterior foi visto que o vetor tangente é calculado por:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta\lambda \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} P_o \\ Q_o \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

E o passo de crescimento pode ser determinado pelo vetor tangente da seguinte maneira:

$$\Delta \lambda_t = \frac{k}{\|t\|}, \text{ sendo } t = \frac{\Delta x}{\Delta \lambda} \quad (3.2)$$

onde k é uma constante e $\|t\|$ é a norma euclidiana de t .

Então, utilizando estas equações e suas características, serão desenvolvidos métodos para determinar o ponto de colapso e as barras críticas.

Serão apresentadas as seguintes metodologias para calcular o ponto sela-nó através de extrapolação:

- Metodologia I – Algoritmo originalmente apresentado em [56, 57]. Este algoritmo será repetido adiante, por conveniência.
- Metodologia II – É uma variação do caso anterior. Para determinar o segundo ponto para fazer a extrapolação, o passo será determinado pela norma do vetor tangente.
- Metodologia III – Alteração das metodologias anteriores. Para fazer a extrapolação serão utilizados três pontos com o passo do vetor tangente, e a curva a ser extrapolada será uma curva PV de uma barra crítica PQ, e não a curva do inverso da maior componente do vetor tangente. Esta proposta será mostrada aqui, e está detalhada em [59].

Essas metodologias serão detalhadas nas próximas seções.

3.2.2. Metodologia I – extrapolação da curva do inverso da norma do vetor tangente

Como já mencionado, esta metodologia foi apresentada em [56, 57] e explicada no capítulo anterior. Possui como vantagens um baixo esforço computacional quando comparada com o método continuado, determina o ponto de colapso com precisão e classifica as barras críticas do sistema no início do processo. Logo nas primeiras

interações, mesmo que a barra melhor classificada não seja realmente a barra crítica, esta barra estará sempre bem classificada entre as mais críticas.

A metodologia consiste em extrapolar o ponto de colapso através de dois pontos de operação, que determinarão as constantes de uma curva quadrática. E esta curva no ponto de colapso tem o inverso da maior componente do vetor tangente tendendo para zero, visto que neste ponto o vetor tangente tende para infinito. Entretanto, a curva extrapolada também apresenta descontinuidade devido a ultrapassagem dos limites de geração de reativos nas barras PV. Mas como o cálculo do vetor tangente é bastante rápido pode-se repetir o processo até determinar o ponto de colapso.

Paralelamente a este processo pode-se determinar as barras mais críticas. Já que o vetor tangente converge para o autovetor à direita associado ao autovalor nulo, verifica-se quais as barras que mais contribuem para a bifurcação. Como mostrado no capítulo anterior, o vetor tangente identifica a barra crítica para pontos anteriores ao colapso.

O algoritmo para utilizar a extrapolação da curva do inverso da norma do vetor tangente para determinar o ponto crítico, é apresentado a seguir:

1. Determinar um ponto de operação inicial (caso base). Guardar a maior componente do vetor tangente associada ao carregamento inicial λ_0 ($v\tau_0, \lambda_0$).
2. Incrementar a carga com uma pequena variação, e, dado que seja um ponto de operação, guarde novamente a maior componente do vetor tangente e o carregamento λ_1 ($v\tau_1, \lambda_1$).
3. Com os valores dos passos 1 e 2, monta-se um sistema de equações para os dois pontos encontrados, utilizando a seguinte equação quadrática:

$$1/||vt|| = a\lambda^2 + c \quad (3.3)$$

Determinando os valores das constantes a e c .

4. Conhecidos os valores de a e c , determina-se o valor de λ para qual $1/\|vt\|$ tende para zero. Isto é equivalente a assumir um comportamento quadrático para a inversa do maior componente do vetor tangente.
5. Aplica-se o valor de λ nas cargas e gerações.
6. Se convergir, o λ calculado em (4) está aquém do ponto de bifurcação. Vá para (2) e considere os valores encontrados em (5) como iniciais (passo 1) e recomece o processo.
7. Se o carregamento calculado em (4) não convergir é por que está além do ponto de colapso. Calcule então, um novo carregamento com a seguinte expressão:

$$\lambda_{\text{novo}} = (\lambda_c - \lambda_u)/2 + \lambda_c \quad (3.4)$$

Onde: λ_u = Último carregamento cujo fluxo de potência convergiu.

λ_c = Último carregamento calculado (passo 4 ou 7).

Observe que ao aplicar a equação (3.4) e o fluxo não convergir é necessário aplicá-la novamente até obter a convergência.

Quando convergir assuma os valores deste passo como do item 1 e vá para o passo 2.

8. O ponto sela-nó é encontrado quando a diferença entre o último fluxo convergido e o não convergido for menor que uma determinada tolerância.

Outra vantagem do método é a possibilidade de incluir dentro do processo descrito, com pouco esforço computacional, a classificação das barras críticas de cada ponto de

operação até chegar no ponto de colapso. Este fato é bastante relevante, pois, o conhecimento da barra crítica ou área crítica ajuda a analisar o sistema dentro da ótica de instabilidade de tensão, já que este é um fenômeno local que se espalha pela redondeza da barra crítica. A classificação mencionada é facilmente obtida através do vetor tangente, cujos maiores componentes indicam as barras mais sensíveis para um determinado ponto de operação.

3.2.3. Metodologia II – extrapolação da curva do inverso da norma do vetor tangente utilizando o passo pelo vetor tangente

Esta metodologia difere muito pouco da anterior. No passo 2, quando for determinar o segundo ponto para calcular o valor da extrapolação, ao invés de submeter o sistema a uma pequena variação de carga com relação ao primeiro ponto de equilíbrio, determina-se o acréscimo de carga pela direção de crescimento do vetor tangente. Utilizando na verdade um passo previsor do método da continuação.

Essa tentativa é para acelerar o processo. Se o sistema estiver longe do ponto de colapso o inverso da norma do vetor tangente apontará um passo maior. O contrário também é de interesse, se o ponto de equilíbrio estiver perto do ponto de colapso o passo será menor, já que o inverso da norma do vetor tangente tende para zero no ponto de colapso. Este procedimento pode fazer com que o processo sempre caminhe na região em que o fluxo de potência é convergente, diminuindo o esforço computacional.

3.2.4. Metodologia III – extrapolação da curva PV utilizando o passo pelo vetor tangente

Observando a curva PV de uma barra de carga (Figura 3.1) nota-se que a mesma tem um comportamento quadrático. A idéia é usar esta característica para determinar o ponto de colapso do sistema.

Este método já foi utilizado para análise de contingências [59]. O resultado obtido, como mostrado naquela referência, não é preciso, mas pode ser encarado como uma boa estimativa para o ponto de colapso. O método baseia-se em estimar o ponto de colapso, através de uma extrapolação de três pontos de equilíbrio.

O fato de extrapolar utilizando três pontos de equilíbrio cria a expectativa de que este método possa ser mais rápido do que o extrapolado original.

Seja a figura a seguir:

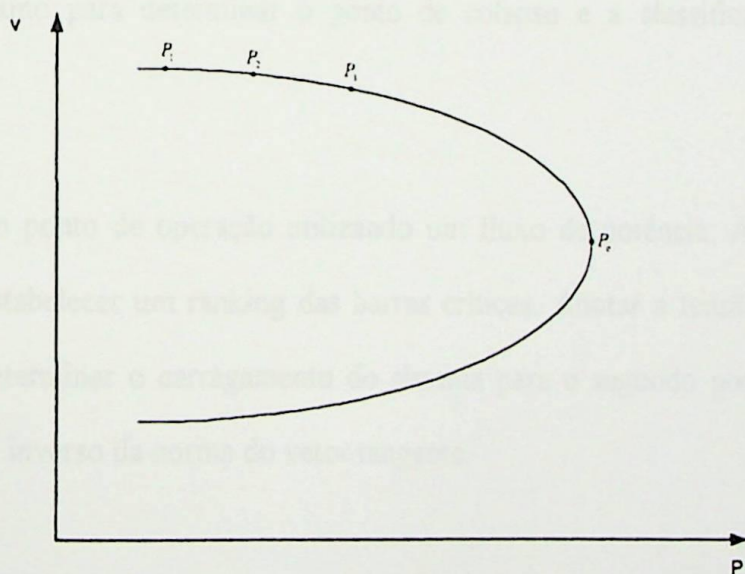


Figura 3.1: Curva PV de uma barra de carga

A equação que deseja-se extrapolar é:

$$\lambda = ay^2 + by + c \quad (3.5)$$

Para determinar os valores de a , b e c são necessários conhecer três pontos de equilíbrio P_1 , P_2 e P_3 .

Na curva, para cada ponto de carregamento há dois valores distintos de tensão, exceto no ponto de bifurcação (ponto P_c) que existe apenas um valor de tensão, ou dois pontos de valores iguais. Portanto, o valor de y no ponto de colapso é:

$$y_c = -\frac{b}{2a} \quad (3.6)$$

Para determinar o valor de λ no ponto de colapso basta substituir os valores encontrados na equação (3.5):

$$\lambda_c = -\frac{b^2}{4a} + c \quad (3.7)$$

Baseado nestes conhecimentos, e mesclando com as metodologias I e II, montou-se o seguinte algoritmo para determinar o ponto de colapso e a classificação das barras críticas:

1. Calcular um ponto de operação utilizando um fluxo de potência. Através do vetor tangente, estabelecer um ranking das barras críticas. Anotar a tensão da barra mais crítica, e determinar o carregamento do sistema para o segundo ponto de operação utilizando o inverso da norma do vetor tangente.
2. Submeter o sistema ao carregamento calculado no item anterior, anotar a tensão da barra crítica determinada no item anterior (note que para determinar os três pontos para calcular a extrapolação é necessário manter a barra crítica do item 1, mesmo que o ranking mude para os dois pontos seguintes). Determinar novamente o carregamento para o próximo ponto utilizando o vetor tangente.

3. Achar o terceiro ponto de equilíbrio. Anotar o valor da tensão na barra crítica determinada no item 1.
4. Com os pontos determinados nos itens de 1 a 3 aplicar na equação 3.5 e resolver o sistema de equações. Determina-se então os valores de a, b e c.
5. Determinar o carregamento no ponto de colapso aplicando a equação 3.7.
6. Processar este carregamento.
7. Prosseguir, submetendo o sistema a um carregamento de acordo com o inverso da norma do vetor tangente, até achar o ponto de colapso.

A figura a seguir mostra um fluxograma simplificado do processo:

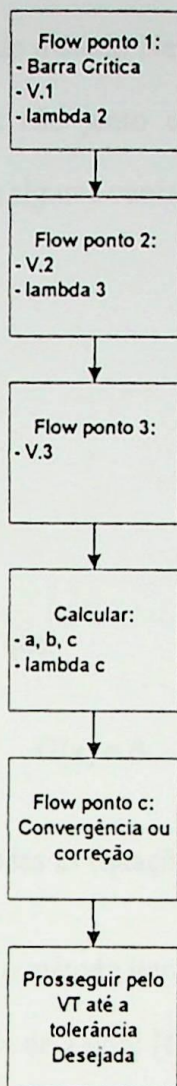


Figura 3.2: Fluxograma simplificado do método III

3.3. Método continuado

3.3.1. Introdução

O método continuado, como já mencionado, utiliza o método de Newton-Raphson no seu processo de convergência na determinação de cada ponto de equilíbrio da curva PV. Além dos passos predictor e corretor é necessário fazer a parametrização para continuar a curva quando o carregamento chega no ponto sela-nó.

A razão para pesquisar a utilização do método Newton-Raphson desacoplado é verificar se o método pode ser aplicado ou não junto com o método continuado. Em caso afirmativo, deve-se verificar se existe alguma vantagem da sua utilização.

3.3.2. Métodos desacoplados

Seja o seguinte problema:

Dado um conjunto de equações G tal que:

$$G(x) = 0 \quad (3.8)$$

determinar o valor de x para anular todas as equações de G .

Para resolver este problema utilizando o método iterativo de Newton-Raphson é necessário linearizar $G(x)$ por intermédio da série de Taylor [60]:

$$G(x^v + \Delta x^v) \cong G(x^v) + J(x^v)\Delta x^v \quad (3.9)$$

Onde J é matriz jacobiana dada por:

$$J = \frac{\partial G}{\partial x} \quad (3.10)$$

Resolver o problema linearizado:

$$G(x^v) + J(x^v)\Delta x^v = 0 \quad (3.11)$$

Logo:

$$\Delta x^v = -J^{-1}(x^v) \cdot G(x^v) \quad (3.12)$$

E a nova solução:

$$\mathbf{x}^{v+1} = \mathbf{x}^v + \Delta\mathbf{x}^v \quad (3.13)$$

É necessário então, para determinar a solução, um valor inicial arbitrado para \mathbf{x} e um critério de convergência.

Aplicando o método em fluxo de potência seria resolver o seguinte problema:

$$\begin{bmatrix} \Delta\mathbf{P} \\ \Delta\mathbf{Q} \end{bmatrix} = -\mathbf{J} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta\mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Esta equação já é uma forma adiantada de representar as equações de fluxo de potência. A origem desta equação é o balanceamento das injeções de potência em cada barra do sistema, obedecendo a primeira lei de Kirchhoff. Por conseguinte o critério de parada do processo iterativo de Newton-Raphson em fluxo de potência é justamente o *mismatch* de potência.

Voltando a equação acima, a matriz jacobiana é dada por:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Onde:

$$H = \frac{\partial P}{\partial \theta}; N = \frac{\partial P}{\partial V}; M = \frac{\partial Q}{\partial \theta}; L = \frac{\partial Q}{\partial V} \quad (3.16)$$

Resolvendo a equação (3.14)

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta\mathbf{V} \end{bmatrix} = -\mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{P} \\ \Delta\mathbf{Q} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

A nova solução será então:

$$\theta^{v+1} = \theta^v + \Delta\theta^v \quad (3.18)$$

e

$$V^{v-1} = V^v + \Delta V^v \quad (3.19)$$

O método desacoplado consistem desprezar as submatrizes N e M . Esta consideração é devido ao fato das sensibilidades $\partial P/\partial \theta$ e $\partial Q/\partial V$ serem mais intensas que as sensibilidades $\partial P/\partial V$ e $\partial Q/\partial \theta$, principalmente em redes de extra-alta tensão e ultra-alta tensão [60].

Portanto:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$\Delta P = -H \cdot \Delta \theta \quad (3.21)$$

e

$$\Delta Q = -L \cdot \Delta V \quad (3.22)$$

O desacoplamento das equações do fluxo de potência não traz soluções diferentes em comparação com o método completo. O que determina a solução são as injeções de potência em cada barra dentro de uma tolerância especificada. Como as equações algébricas das injeções de potências são as mesmas para os dois métodos o resultado não se altera. Logo, o método desacoplado altera o processo de convergência das equações e não a solução do problema [60].

Já o método desacoplado rápido simplifica ainda mais as equações do algoritmo de convergência, chegando as seguintes expressões:

$$\Delta P/V = -B' \cdot \Delta \theta \quad (3.23)$$

e

$$\Delta Q/V = - \mathbf{B}'' \cdot \Delta V \quad (3.24)$$

Onde \mathbf{B}' e \mathbf{B}'' são obtidas das simplificações citadas e possuem como características serem simétricas e constantes no processo de convergência.

A matriz \mathbf{B}' não muda de dimensão durante a convergência. A matriz \mathbf{B}'' muda de dimensão toda vez que uma determinada barra PV exceder os limites de geração reativa passando a ser considerada como PQ. A referência [60] mostra um artifício de montar \mathbf{B}'' de maneira que seja constante, mesmo quando viola o limite de geração reativa.

3.3.3. Singularidade da matriz J, e a consistência das matrizes H e L

Como foi visto no capítulo 2, a matriz Jacobiana J no ponto de bifurcação é singular. Então, no método da continuação, quando o conjunto de equações não consegue mais convergir é porque o sistema está perto do ponto de bifurcação, sendo necessário executar a parametrização para determinar o ponto sela-nó, e daí continuar a traçar o lado de baixo da curva PV.

Ao fazer o desacoplamento das equações do fluxo de potência as submatrizes H e L são consistentes no ponto de bifurcação, pois se:

$$J = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$L' = L - MH^{-1}N \quad (3.26)$$

$$\text{Det}(J) = \text{Det}(L') \cdot \text{Det}(H) \quad (3.27)$$

Onde: Det → Determinante

Portanto, pela teoria de autovetores [36] o $\text{Det}(\mathbf{H})$ tem que ser diferente de zero.

No ponto de bifurcação em que \mathbf{J} é singular as submatrizes \mathbf{H} e \mathbf{L} não apresentam singularidade.

Diante da não singularidade das matrizes \mathbf{H} e \mathbf{L} no ponto sela-nó é que se pensou em estudar o método desacoplado. Se essas matrizes são inversíveis no ponto de bifurcação, então, não seria necessário fazer a parametrização. Portanto, o último ponto convergido no continuado desacoplado seria o ponto sela-nó.

No entanto, o acoplamento entre as submatrizes \mathbf{H} , \mathbf{N} , \mathbf{M} e \mathbf{L} vai aumentando com o carregamento. O que é teoricamente possível, talvez computacionalmente não o seja, devido a instabilidade numérica.

Uma maneira de testar se é possível é processar o continuado com os dois métodos, completo e o desacoplado. Se sempre o desacoplado convergir depois do método completo é porque o método é consistente.

3.3.4. Índices de colapso do método desacoplado

É importante salientar que esta pesquisa tem o intuito de testar o método desacoplado no método continuado, averiguar o comportamento e comparar com o método continuado utilizando Newton-Raphson completo.

Antecipadamente, já se sabe que os índices conhecidos de colapso (menor valor singular, menor autovalor) serão pobres, já que as submatrizes \mathbf{H} e \mathbf{L} não são singulares no ponto de bifurcação.

Os índices fornecidos pelo vetor tangente também sofrem alterações já que o vetor tangente perde informações, e conseqüentemente não possuirá a característica de ter a mesma direção do autovetor à direita associado ao menor autovalor.

No capítulo seguinte, onde serão apresentados os resultados dos testes, será feita uma plotagem dos índices de colapso e conseqüentemente se fará uma comparação dos dois métodos.

3.3.5. Resumo dos questionamentos dos métodos desacoplados

A aplicação do método desacoplado nas soluções das equações de fluxo de potência dentro do método continuado, suscita as seguintes questões:

- O método consegue traçar toda a curva PV? Em caso afirmativo, em qual tempo?
- O último ponto convergido sempre será após o último ponto convergido do método utilizando Newton-Raphson completo ?
- Os índices de colapso são realmente pobres ?
- Como se comportam os índices em relação ao vetor tangente (ranking, passo previsor) ?
- Caso o método consiga traçar a curva, existe alguma vantagem em utilizá-lo ?

No capítulo a seguir serão apresentados os resultados dos processamentos executados para as duas propostas deste trabalho:

- Melhoria do método extrapolado.

CAPÍTULO 4

- Comportamento do método continuado utilizando o desacoplado para soluções das equações de fluxo de potência.

4. RESULTADOS

4.1. Introdução

No presente capítulo serão apresentados os resultados das testes dos algoritmos propostos para investigação do capítulo anterior. A primeira parte trata acerca do melhoramento da eficiência computacional do método interpolado e também a aplicação da curva PV neste método. A segunda parte abordará, dentro do mesmo contexto, a aplicação do método desacoplado no processo de convergência do fluxo de potência. Estes dois assuntos são independentes entre si.

Com relação ao primeiro tema, a ideia inicial era implementar apenas a interpolação da curva PV como técnica para determinar o ponto de estallo. Entretanto, esta técnica que melhorava o desempenho deste método também era aplicada ao método de interpolação da curva do fluxo de carga comparando de valor absoluto (ou proporcional) um aumento da eficiência do método original, gerando propostas para melhorar a eficiência da metodologia de interpolação quadrática, apresentada [16, 17].

Com relação ao segundo tema, o objetivo das pesquisas é verificar o comportamento do método continuado quando se utiliza o método desacoplado nas equações de fluxo de potência. Nesse aspecto, algumas características associadas ao método serão estudadas.

Todos os testes computacionais apresentados neste trabalho foram executados em um microcomputador Pentium I - 166 MHz - 32 MB de memória RAM.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

4.1. Introdução

No presente capítulo serão apresentados os resultados dos testes dos assuntos propostos para investigação no capítulo anterior. A primeira parte tratará do melhoramento da eficiência computacional do método extrapolado e também a utilização da curva PV neste método. A segunda parte abordará, dentro do método continuado, a aplicação do método desacoplado no processo de convergência do fluxo de potência. Estes dois assuntos são independentes entre si.

Com relação ao primeiro tema, a idéia inicial era simplesmente propor a extrapolação da curva PV como técnica para determinar o ponto de colapso. Entretanto, cada novidade que melhorava o desempenho deste método também era aplicada no método da extrapolação da curva do inverso da maior componente do vetor tangente. Isto proporcionou um aumento da eficiência do método original, gerando propostas para melhorar a eficiência da metodologia da extrapolação quadrática, apresentada [56, 57].

Com relação ao segundo tema, o objetivo das pesquisas é verificar o comportamento do método continuado quando se utiliza o método desacoplado nas equações de fluxo de potência. Neste aspecto, algumas características associadas ao método serão estudadas.

Todos os testes computacionais apresentados neste trabalho foram processados em um microcomputador *Pentium I – 166 MHz – 32 MB de memória RAM*.

4.2. Método extrapolado utilizando a curva PV e o inverso da maior componente do vetor tangente.

4.2.1. Introdução

Para executar os testes foram utilizados quatro sistemas: 14 barras, 30 barras, 57 barras e 118 barras do IEEE com algumas modificações. As principais modificações foram equivaler os ramos em paralelo e modificar as cargas negativas no sistema de 118 barras.

Inicialmente foram determinados para cada sistema teste o ponto de colapso e o tempo computacional quando se aplica o método continuado, adotando o fator k igual a 0.5, lembrando que k é o fator multiplicador que é utilizado para determinar o passo previsor através do vetor tangente. A tabela a seguir mostra os valores encontrados.

Tabela 4.1 – Resultados do método continuado

SISTEMA	Ponto de Colapso	Tempo
14 BARRAS	1.897	22.00
30 BARRAS	1.530	27.00
57 BARRAS	1.655	28.00
118 BARRAS	1.785	89.00

Onde o ponto de colapso é o fator de multiplicação em relação ao carregamento inicial, e o tempo computacional em segundos. Estas unidades se repetirão nas tabelas seguintes.

Estes valores serão referenciais para os próximos testes, dado que este é o método que determina com maior precisão o ponto de colapso. Isto é evidente, já que no método continuado avança-se de um ponto de equilíbrio para outro de uma maneira controlada. Isto permite a incorporação de limites (potência reativa, taps, etc) sem a implicação de problemas numéricos. Ressalta-se que o tempo computacional das tabelas representa o tempo gasto entre o caso base e o ponto de colapso. Logo, não é computado o tempo de traçar a parte de baixo da curva PV, já que a mesma não é de interesse nesse estudo.

4.2.2. Extrapolado sem modificações

O método extrapolado como proposto em [56, 57] determina o ponto de colapso com a mesma precisão que o método da continuação em um tempo computacional menor. Entretanto, a curva PV não é traçada.

Inicialmente processou-se os casos testes com os seguintes critérios de parada do método extrapolado:

- Diferença de carregamento entre o último fluxo de potência convergido e não convergido menor do que 10^{-2} pu.
- Diferença de carregamento entre dois fluxos de potência convergidos menor do que 10^{-2} pu.

Os resultados são mostrados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resultados do método extrapolado

SISTEMA	Continuado (1)		Extrapolado (2)		Diferença (3) %	
	Ponto de Colapso	Tempo	Ponto de Colapso	Tempo	Ponto %	Tempo %
14 BARRAS	1.897	22.00	1.885	15.00	0.601	31.82
30 BARRAS	1.530	27.00	1.529	10.93	0.091	59.52
57 BARRAS	1.655	28.00	1.597	20.93	3.475	25.25
118 BARRAS	1.785	89.00	1.594	51.00	10.696	42.70

Observando a Tabela 4.2 nota-se que aplicando o algoritmo do extrapolado o tempo computacional melhora de 25% a 59% em relação ao método continuado. Com respeito ao ponto de colapso há uma diferença de 0.1% a 11% entre os dois métodos.

Sem alterar o algoritmo do extrapolado, adotou-se mais dois critérios de parada para o método extrapolado:

- Quando a maior componente do vetor tangente for maior, de agora em diante chamada de **MCVT**, do que um determinado limite. Explicação no Anexo I.
- Quando o índice indicador de colapso: $IC = V_T' J V_T'$, de agora em diante denominado sempre de **IC**, for menor do que um determinado valor. O IC tende para zero quando se aproxima do ponto de colapso. Relembrando que V_T é o vetor tangente e J é a matriz Jacobiana, explicação no Anexo II.

A justificativa para testar estes critérios é simples. Se no decorrer do processo iterativo, em algum ponto de equilíbrio, os limites estabelecidos forem ultrapassados, talvez não seja compensador continuar o processo de determinação do ponto exato de colapso, já que a MCVT tende para infinito e o IC tende para zero quando o sistema se aproxima do ponto de colapso.

Os valores estabelecidos de IC e MCVT são seguros para os sistemas testes (Anexos I e II). Entretanto, não se investigou qual seria o valor ideal a ser considerado, já que o intuito é apenas testar os critérios, e maiores investigações fogem do objetivo principal da dissertação.

Fica então estabelecida a seguinte nomenclatura para os critérios de parada acompanhados pelos seus valores limites aplicados neste trabalho.

1. **DCNC**: Diferença de carregamento entre o último fluxo de potência convergido e não convergido, o processo pára quando este valor for menor do que 10^{-2} pu.
2. **DCC**: Diferença de carregamento entre dois fluxos de potência convergidos, o processo pára quando este valor for menor do que 10^{-2} pu.
3. **MCVT**, o processo pára quando este valor for maior do que 4.

4. IC: o processo pára quando este valor for menor do que 0.03.

A tabela seguinte mostra os resultados com a inclusão dos novos critérios de parada, note que a última coluna discrimina o critério que parou o processamento.

Tabela 4.3 – Método extrapolado - novos critérios de parada

SISTEMA	Extrapolado (1)		Extrapolado (2) - Novo Critério		Diferença (3) %		Critério
	Ponto de Colapso	Tempo	Ponto	Tempo	Ponto %	Tempo %	
14 BARRAS	1.885	15.00	1.885	9.00	0.000	40.00	MCVT
30 BARRAS	1.529	10.93	1.521	7.20	0.497	34.13	MCVT e IC
57 BARRAS	1.597	20.93	1.597	8.10	0.000	61.30	MCVT e IC
118 BARRAS	1.594	51.00	1.594	51.00	0.000	0.00	MCVT e DCC

A Tabela 4.3 mostra claramente que os novos critérios não interferem de maneira significativa na solução do extrapolado original. Quando não contribui para melhorar o tempo computacional pelo menos não atrapalha. E era esperado este resultado, já que as vezes dentro do processo iterativo, o ponto de equilíbrio está muito próximo do ponto de colapso, evitando esforços sem grandes ganhos de resultados.

A adoção dos novos critérios de parada melhorou o tempo computacional dos sistemas de 14, 30 e 57 barras. No sistema de 118 barras não alterou em nada o resultado anterior.

Nas próximas seções serão testados os novos critérios de parada em novas situações para verificar a sua validação.

4.2.3. Extrapolado com passo dado pelo vetor tangente

No algoritmo original, ao achar o primeiro ponto de operação, e em seguida, para determinar o segundo ponto de equilíbrio, é aplicado um percentual de incremento de

carga, para depois determinar o valor da extrapolação da curva da maior componente do vetor tangente. Todavia, este incremento pode ser muito pequeno ou muito grande, dependendo da margem de carga para o colapso do sistema considerado.

Uma maneira de controlar o tamanho do passo é aplicar a mesma formulação do passo previsor no método continuado:

$$\Delta\lambda = \frac{k}{\|t\|} \quad (4.1)$$

Portanto, a única alteração que se fará no algoritmo do extrapolado é aplicar a equação acima para determinar o tamanho do passo, quando o algoritmo exigir o segundo ponto de equilíbrio para executar a extrapolação.

A Tabela 4.4 mostra os resultados obtidos aplicando esta técnica. Nesta tabela não está considerada a parada do extrapolado pelos novos critérios.

Tabela 4.4 – Resultado do extrapolado – passo vetor tangente

SISTEMA	Continuado (1)		Extrapolado - Passo VT (2)		Diferença (3) %	
	Ponto de Colapso	Tempo	Ponto de Colapso	Tempo	Ponto %	Tempo %
14 BARRAS	1.897	22.00	1.896	10.10	0.037	54.09
30 BARRAS	1.530	27.00	1.528	8.62	0.176	68.07
57 BARRAS	1.655	28.00	1.597	8.68	3.511	69.00
118 BARRAS	1.785	89.00	1.789	60.00	-0.230	32.58

Houve uma economia de tempo de até 70% em relação ao método continuado. Ressalta-se que foi utilizado o mesmo fator k , fórmula 4.1, para ambos os métodos.

Comparando o método extrapolado original com o extrapolado com passo dado pelo vetor tangente, forma-se a tabela a seguir:

Tabela 4.5 – Comparação dos extrapolados – original e passo dado pelo VT

SISTEMA	Extrapolado Original (1)		Extrapolado passo VT(2)		Diferença (3) %	
	Ponto de Colapso	Tempo	Ponto de Colapso	Tempo	Ponto %	Tempo %
14 BARRAS	1.885	15.00	1.896	10.10	-0.564	48.51
30 BARRAS	1.529	10.93	1.528	8.62	0.085	26.80
57 BARRAS	1.597	20.93	1.597	8.68	0.038	141.13
118 BARRAS	1.594	51.00	1.789	60.00	-10.901	-15.00

Nos sistemas de 14, 30 e 57 barras o tempo computacional foi melhorado e praticamente não existem diferenças com relação ao ponto de colapso.

Já no sistema de 118 barras o tempo computacional piorou por falta de um critério de parada mais eficiente.

Quando o passo foi dado pelo vetor tangente, coluna 2, o valor do ponto de colapso mais se aproxima do valor encontrado no método continuado, que é o método tomado como referência.

A próxima tabela mostra os resultados obtidos quando se aplicam os novos critérios de parada e variando o valor do fator k (fórmula 4.1).

Tabela 4.6 – Extrapolação com passo dado com VT – vários valores de k

SISTEMA	Continuado (1)		Extrapolado - Passo VT (2)		Diferença (2 e 1) %		Valor de k
	Ponto de Colapso	Tempo	Ponto de Colapso	Tempo	Ponto %	Tempo %	
14 BARRAS	1.897	22.00	1.889	7.42	0.390	66.27	0.5
30 BARRAS	1.530	27.00	1.519	7.14	0.725	73.56	
57 BARRAS	1.655	28.00	1.594	7.41	3.699	73.54	
118 BARRAS	1.785	89.00	1.777	15.93	0.426	82.10	
14 BARRAS			1.822	17.91	3.949	18.59	5
30 BARRAS			1.519	5.11	0.719	81.07	
57 BARRAS			1.582	21.75	4.412	22.32	
118 BARRAS			1.800	26.42	-0.829	70.31	
14 BARRAS			1.886	5.27	0.575	76.05	Início $k=5$ outras $k=0.5$
30 BARRAS			1.526	6.70	0.268	75.19	
57 BARRAS			1.592	13.79	3.783	50.75	
118 BARRAS			1.763	12.91	1.210	85.49	

Observa-se que:

- Comparando as Tabelas 4.5 e 4.6, para $k=0.5$, que os tempos de processamento melhoram quando se aplicam os novos critérios de parada.
- O melhor valor de k depende de cada sistema.
- Comparando as Tabelas 4.2 e 4.6, o passo dado pelo vetor tangente, equação (4.1), e os novos critérios de parada melhoram o desempenho computacional.
- No método extrapolado aumentar o fator k não implica necessariamente em diminuir o tempo computacional.

4.2.4. Extrapolado da curva PV

O objetivo dos testes desta seção é verificar se extrapolar a curva PV traz resultados tão satisfatórios quanto os obtidos na seção anterior. O algoritmo do método foi explicado no capítulo 3. A característica principal deste método é a necessidade de obter três pontos de equilíbrio para fazer a extrapolação. Então, foram executados os seguintes testes:

- Com e sem os novos critérios de parada, maior componente do vetor tangente e IC.
- Diversos valores para k , no uso da equação (4.1).
- Todo o processo extrapolando apenas a curva PV.
- Mixar as metodologias, a primeira extrapolação utilizando a curva PV, e as curvas seguintes utilizando o inverso da maior componente do vetor tangente.

Inicialmente testou-se a metodologia de extrapolar a curva PV, sem mixar os métodos com e sem a aplicação dos novos critérios de parada. A tabela a seguir mostra estas situações. Observe que os critérios de parada da última coluna são os mesmos da seção anterior.

Tabela 4.7 – Extrapolado curva PV

SISTEMA	Continuado (1)		Extrapolado - Curva PV (2)		Diferença (2 e 1) %		Extrapolado - Curva PV (3)		Diferença (3 e 1) %		CRITÉRIO DE PARADA
	Ponto de Colapso	Tempo	Ponto de Colapso	Tempo	Ponto %	Tempo %	Ponto de Colapso	Tempo	Ponto %	Tempo %	
14 BARRAS	1.897	22.00	1.896	16.43	0.042	25.32	1.883	10.11	0.70	54.05	MCVT
30 BARRAS	1.530	27.00	1.528	14.67	0.131	45.67	1.518	7.97	0.79	70.48	MCVT e IC
57 BARRAS	1.655	28.00	1.580	19.94	4.490	28.79	1.580	19.94	4.49	28.79	DCC
118 BARRAS	1.785	89.00	1.544	52.40	13.504	41.12	1.544	52.40	13.50	41.12	DCC
k=0.5						k=0.5					
Sem Novos Critérios de Parada						Com Novos Critérios de Parada					

Observando a tabela acima, destaca-se :

- A extrapolação sem os novos critérios de parada, MCVT e IC, apesar de determinar o ponto de colapso, não tem um tempo computacional significativo, muito embora, o tempo computacional aproxime-se do extrapolado sem o passo com vetor tangente.
- Quando adotam-se os novos critérios de parada, os tempos computacionais dos sistemas de 14 e 30 barras têm uma melhora acentuada.

Executou-se ainda os seguintes testes:

- Mixando as técnicas, a primeira extrapolação utilizando a curva PV, e em seguida extrapolando a curva do inverso do maior componente do vetor tangente.
- Adotando o critério de parada de acordo com o valor da maior componente do vetor tangente (MCVT) e do índice de colapso (IC).

- Variando os valores do fator k da equação 4.1.

O quadro a seguir mostra os resultados:

Tabela 4.8 – Extrapolado curva PV – vários valores para k

SISTEMA	Continuado (1)		Extrapolado - Tensão (2)		Diferença (2 e 1) %		Valor de k
	Ponto de Colapso	Tempo	Ponto de Colapso	Tempo	Ponto %	Tempo %	
14 BARRAS	1.897	22.00	1.893	8.57	0.195	61.05	inicio k=1 outras k=0.5
30 BARRAS	1.530	27.00	1.511	7.20	1.261	73.33	
57 BARRAS	1.655	28.00	1.586	7.96	4.128	71.57	
118 BARRAS	1.785	89.00	1.797	15.00	-0.661	83.15	
14 BARRAS			1.892	17.91	0.253	18.59	k=3
30 BARRAS			1.515	5.93	0.993	78.04	
57 BARRAS			1.460	27.52	11.760	1.71	
118 BARRAS			1.753	22.90	1.765	74.27	
14 BARRAS			1.885	6.75	0.585	69.32	inicio k=3 outras k=0.5
30 BARRAS			1.520	7.08	0.660	73.78	
57 BARRAS			1.509	29.60	8.817	-5.71	
118 BARRAS			1.639	47.13	8.164	47.04	

Sobre esta tabela pode-se comentar:

- O desempenho do método também depende do fator k, equação 4.1.
- Comparando com a Tabela 4.7 o melhor resultado foi mixando as metodologias.
- Quando da mixagem das técnicas, o melhor resultado foi obtido com valores de k distintos.

Conclusões até aqui:

- Extrapolar a curva PV também encontra o ponto de colapso.
- A extrapolação da curva PV pode ter um desempenho satisfatório.

- Mixar as técnicas pode trazer bons resultados.
- Passo dado pela equação 4.1 melhora a performance do extrapolado.
- O método extrapolado com o passo dado pelo vetor tangente apresentou ótimos resultados.
- A sensibilidade para determinar o melhor k a ser aplicado é diferente para as duas técnicas.
- A determinação de k é empírica.
- Os novos critérios de paradas, MCVT e IC, trazem ganhos computacionais expressivos em alguns casos, em outros não. Como a inclusão destes critérios não altera de maneira significativa os resultados finais a adoção dos mesmos é perfeitamente válida.

4.3. Método continuado utilizando os métodos desacoplados

4.3.1. Introdução

Esta pesquisa visa verificar a aplicabilidade de utilizar o método desacoplado no processo de solução das equações de fluxo de potência no método continuado.

Como exposto no capítulo 3, existe uma expectativa de que o método desacoplado forneça a solução de fluxo de carga no ponto de colapso, já que as submatrizes envolvidas não são singulares. Isto evitaria a necessidade de parametrização observada quando o método de Newton-Raphson completo é empregado.

Também serão investigadas as características do vetor tangente durante a aplicação do método desacoplado, já que várias características são perdidas quando se despreza as submatrizes N e M . No final dos testes será feita uma comparação de resultados aplicando o Newton-Raphson completo, desacoplado e desacoplado rápido.

Inicialmente será feito um estudo com duas barras. Apesar de simples, permitirá um enriquecimento conceitual e prático.

4.3.2. Continuado com duas barras

4.3.2.1. Continuado com duas barras – caso 1

No primeiro teste com duas barras foi utilizado uma relação x/r da linha de conexão bastante elevada, conforme figura a seguir:

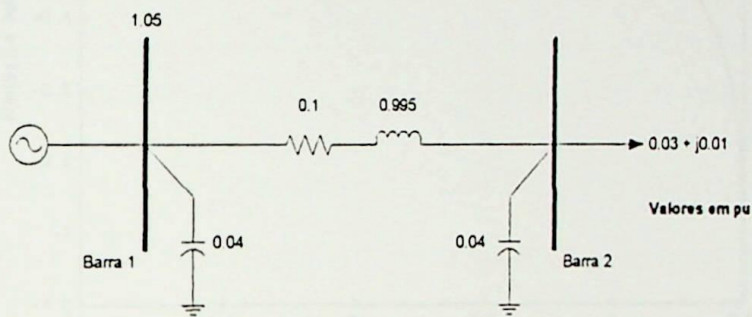


Figura 4.1: Primeiro sistema à duas barras – caso 1

Observa-se que a barra 1 é a swing e a barra 2 é do tipo PQ.

4.3.2.2. Resultados do continuado aplicando Newton-Raphson completo:

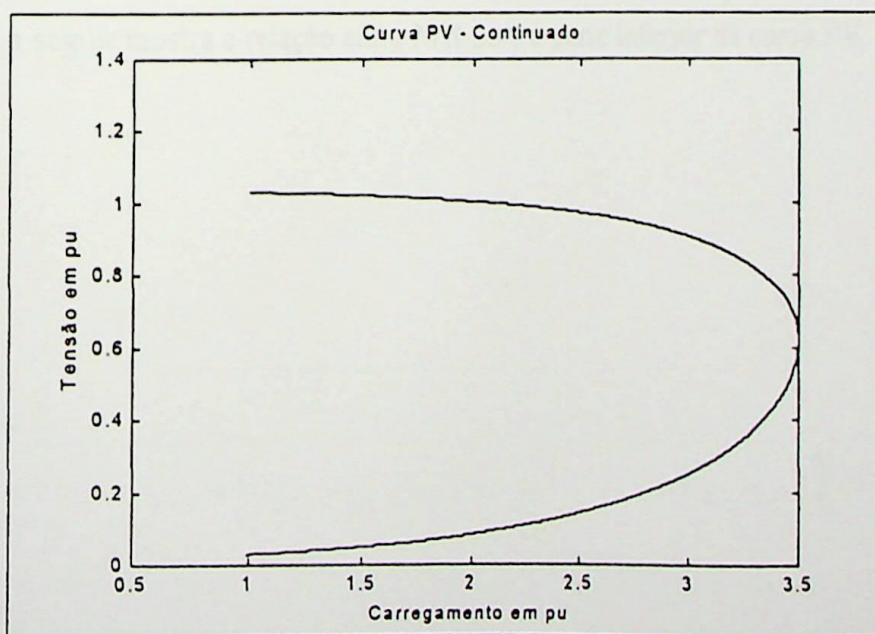


Figura 4.2: Continuado com Newton-Raphson completo – caso 1

Ponto de colapso: 3.4991 pu do carregamento inicial.

Como a matriz jacobiana neste caso é 2×2 , é fácil relacionar suas submatrizes, pois cada uma será de apenas um elemento. As figuras a seguir mostrarão duas relações: N/H e M/L . Estas relações mostram a intensidade do acoplamento que não está sendo considerado no processo de convergência quando se aplica o método desacoplado.

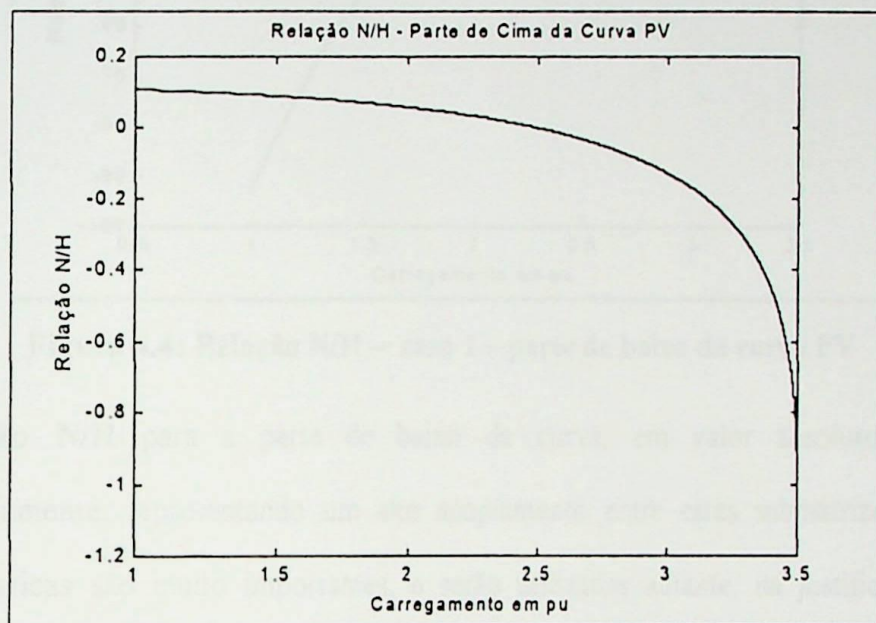


Figura 4.3: Relação N/H – caso 1 – parte de cima da curva PV

Note que até o ponto de colapso a relação vai aumentando gradativamente, em valores absolutos.

A figura a seguir mostra a relação entre N/H para a parte inferior da curva PV.

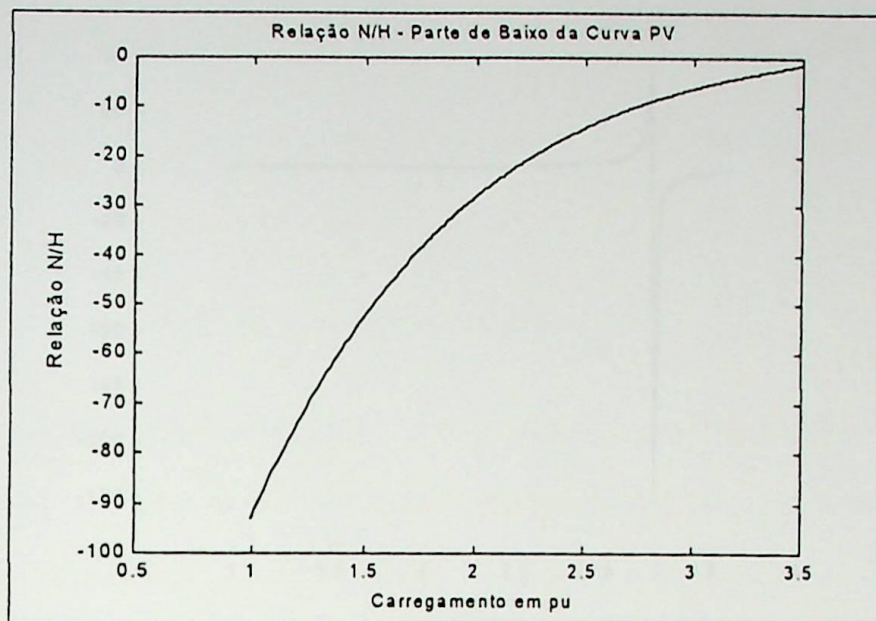


Figura 4.4: Relação N/H – caso 1 – parte de baixo da curva PV

A relação N/H para a parte de baixo da curva, em valor absoluto, cresce acentuadamente, representando um alto acoplamento entre estas submatrizes. Estas características são muito importantes, e serão utilizadas adiante, na justificativa de alguns resultados.

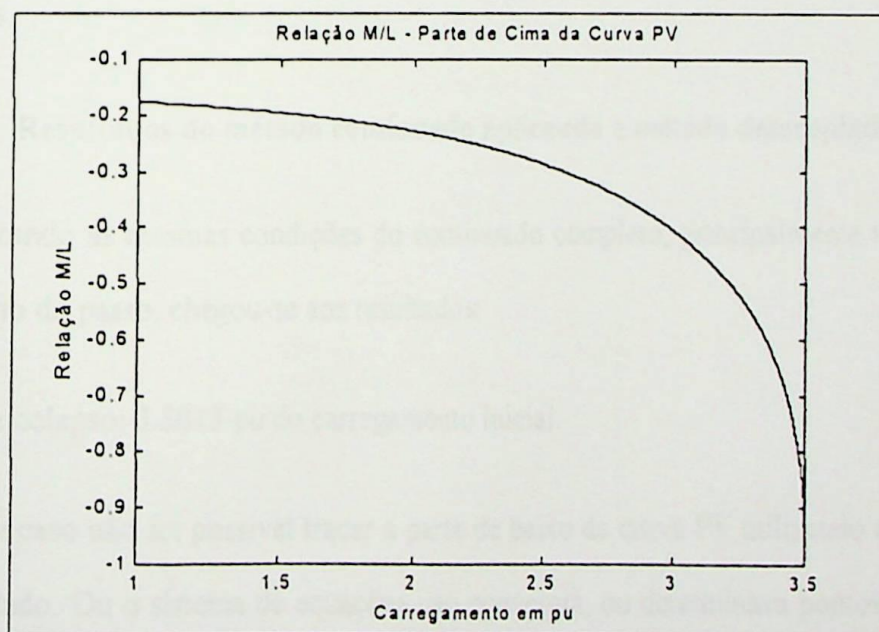


Figura 4.5: Relação M/L – caso 1 – parte de cima da curva PV

Observa-se que o acoplamento entre as matrizes, em valor absoluto, aumenta na medida em que o sistema se aproxima do ponto de colapso.

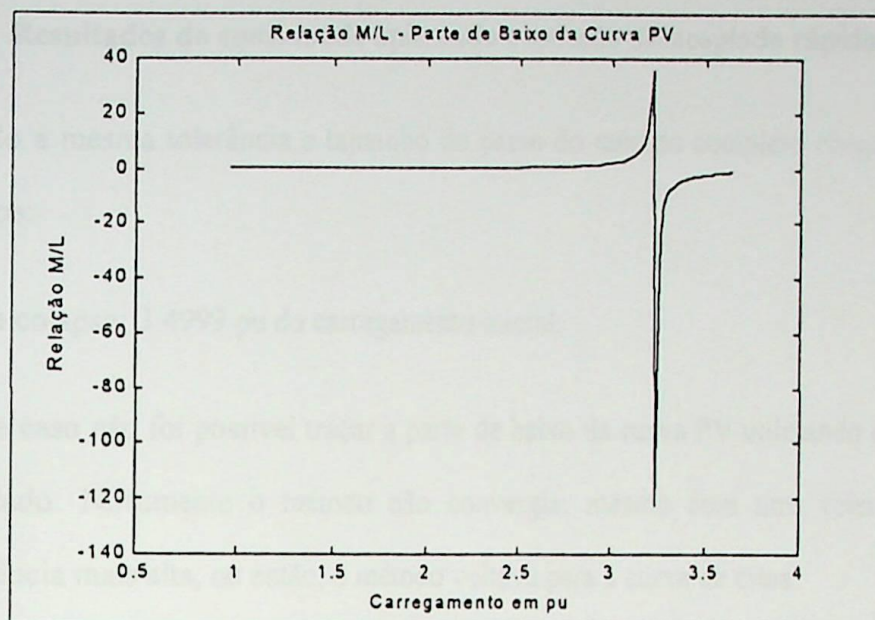


Figura 4.6: Relação M/L – caso 1– parte de baixo da curva PV

A relação entre M e L na parte inferior apresenta um comportamento crescente, em módulo, até apresentar uma descontinuidade, e em seguida a relação M/H decresce. Como os valores de máximo e mínimo são elevados a visualização fica prejudicada. De qualquer maneira são encontrados pontos onde a relação M/L apresenta valores elevados.

4.3.2.3. Resultados do método continuado aplicando o método desacoplado

Considerando as mesmas condições do continuado completo, principalmente tolerância e tamanho do passo, chegou-se aos resultados:

Ponto de colapso: 3.5013 pu do carregamento inicial.

Para este caso não foi possível traçar a parte de baixo da curva PV utilizando o método desacoplado. Ou o sistema de equações não convergia, ou determinava pontos na parte superior da curva, isto é, voltava traçando a mesma curva.

No entanto, na parte superior da curva PV, para uma determinada tolerância (10^{-5}), a maior diferença entre as tensões ou entre os ângulos dos pontos de equilíbrio utilizando os dois métodos, Newton-Raphson completo e desacoplado, foi menor do que 0,5%.



4.3.2.4. Resultados do continuado aplicando o método desacoplado rápido

Adotando a mesma tolerância e tamanho do passo do método completo chegou-se nos resultados:

Ponto de colapso: 3.4999 pu do carregamento inicial.

Para este caso não foi possível traçar a parte de baixo da curva PV utilizando o método desacoplado. Novamente o método não convergia, mesmo com uma tolerância de convergência mais alta, ou então, o método voltava para a curva de cima.

Na parte superior da curva PV, para uma determinada tolerância (10^{-5}), a maior diferença entre as tensões ou entre os ângulos dos pontos de equilíbrio utilizando os dois métodos, Newton-Raphson completo e desacoplado rápido, foi menor do que 0,5%.

4.3.3. Continuado com duas barras – caso 2

Em seguida, repetiu-se os testes alterando os parâmetros da linha de conexão entre as duas barras, diminuindo a relação x/r da referida linha, conforme figura abaixo:

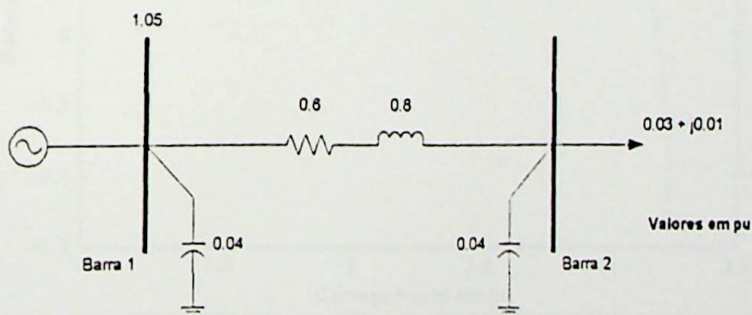


Figura 4.7: Sistema de duas barras – caso 2

4.3.3.1. Resultados do continuado com Newton-Raphson completo

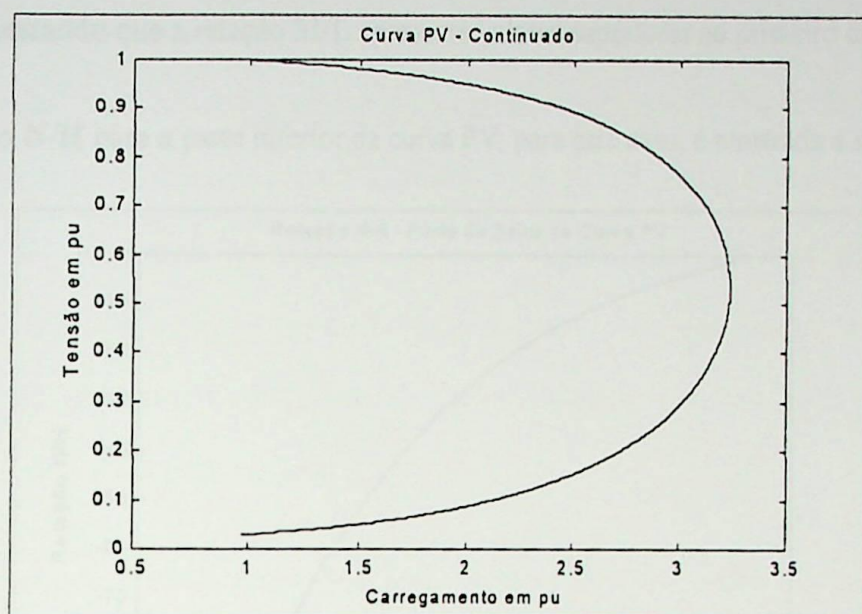


Figura 4.8: Continuado com Newton-Raphson completo – caso 2

Ponto de colapso: 3.2372 pu do carregamento inicial.

Os gráficos a seguir mostram as relações das submatrizes do Jacobiano.

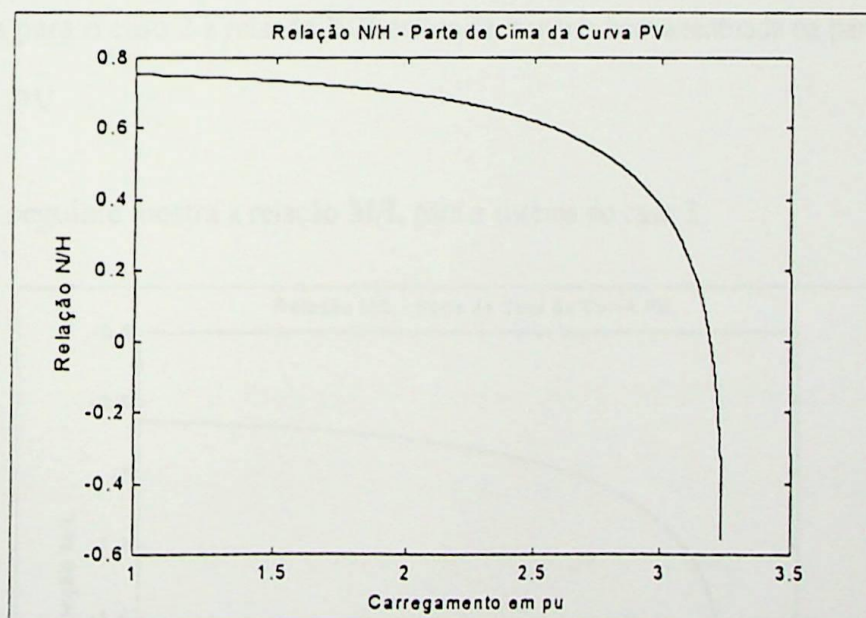


Figura 4.9: Relação N/H – caso 2 – parte de cima da curva PV

Em módulo, a relação diminui e depois de certo ponto começa a crescer. Próximo ao ponto de colapso o crescimento é mais acentuado.

Como neste caso a relação x/r é menor do que no caso 1, esperava-se um acoplamento maior. Restando que a relação M/L apresente valores superiores ao primeiro caso.

A relação N/H para a parte inferior da curva PV, para este caso, é mostrada a seguir.

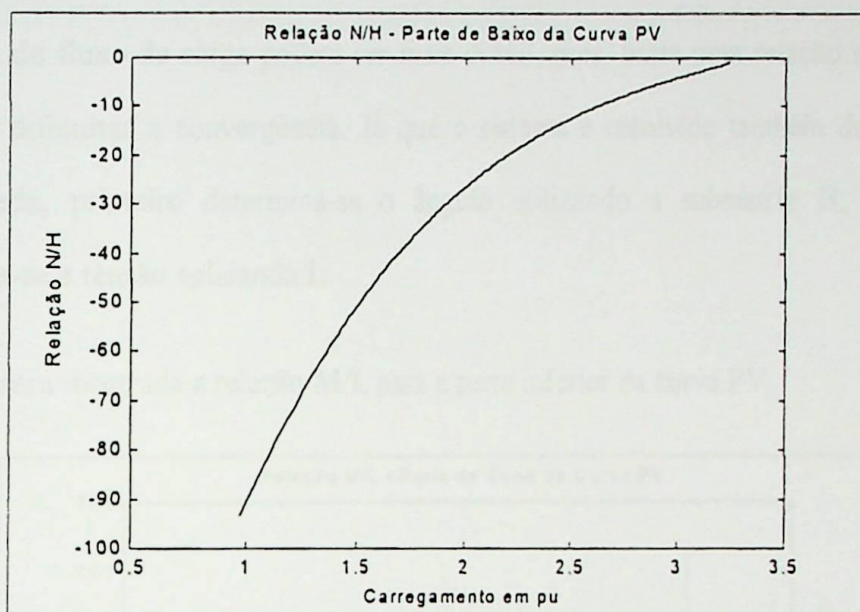


Figura 4.10: Relação N/H – caso 2 – parte inferior da curva PV

Também para o caso 2 a relação N/H cresce de maneira bem acentuada na parte inferior da curva PV.

A figura seguinte mostra a relação M/L para o sistema do caso 2.

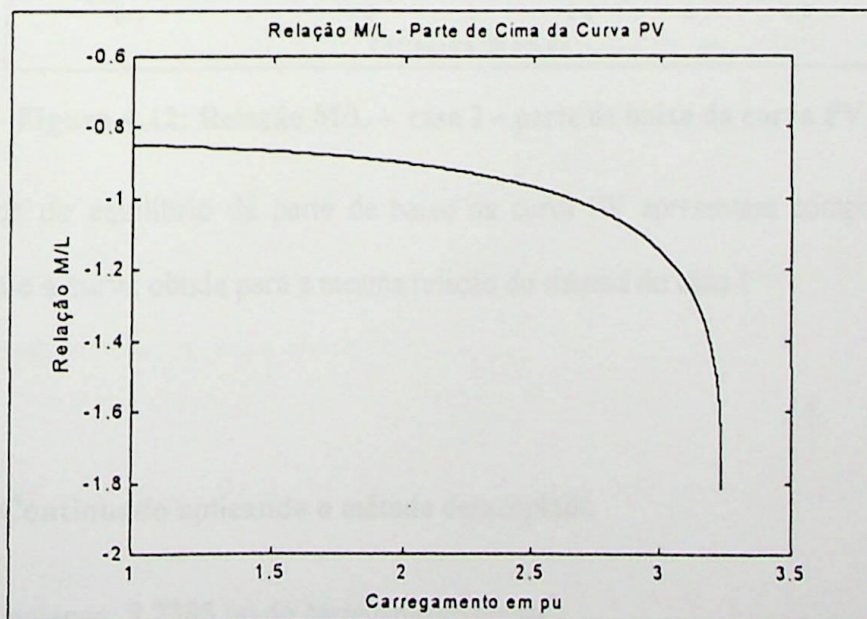


Figura 4.11: Relação M/L – caso 2 – parte de cima da curva PV

Observa-se que, em valor absoluto, a relação M/L é sempre crescente e assume valores superiores ao sistema do caso 1. Confirmando que ao diminuir a relação x/r aumenta o acoplamento das submatrizes, dificultando a aplicação do método desacoplado. Apesar da relação N/H no sistema do caso 2 ser menor do que no caso 1, a convergência das equações do fluxo de carga poderá ser mais difícil, pois, basta uma relação apresentar alta para dificultar a convergência. Já que o sistema é resolvido também de maneira desacoplada, primeiro determina-se o ângulo utilizando a submatriz H , e depois determina-se a tensão aplicando L .

A seguir será mostrada a relação M/L para a parte inferior da curva PV.

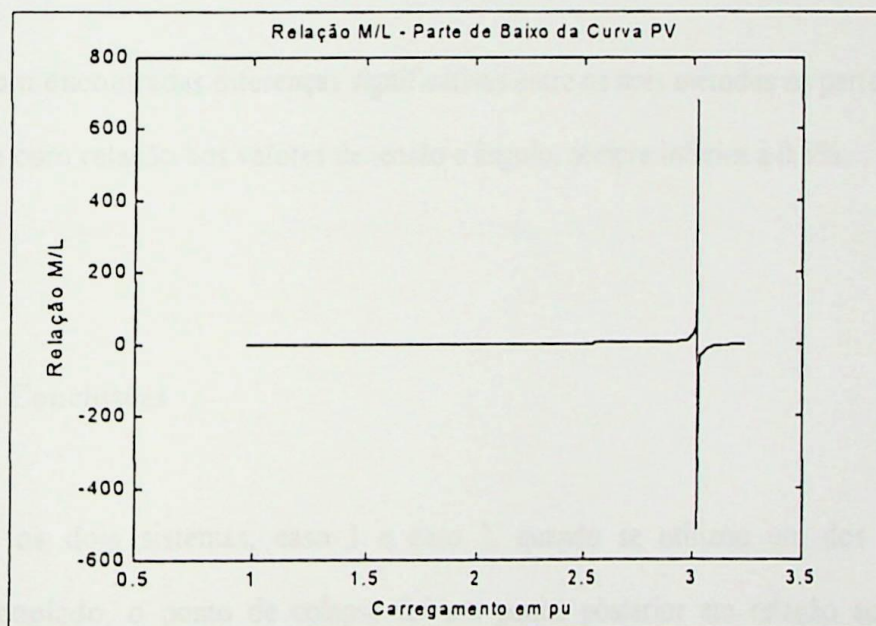


Figura 4.12: Relação M/L – caso 2 – parte de baixo da curva PV

Os pontos de equilíbrio da parte de baixo da curva PV apresentam comportamento semelhante à curva obtida para a mesma relação do sistema do caso 1.

4.3.3.2. Continuado aplicando o método desacoplado

Ponto de colapso: 3.2385 pu do carregamento inicial.

Novamente não foi possível traçar a parte inferior da curva PV aplicando o método desacoplado.

Não foram encontradas diferenças significativas entre os dois métodos na parte superior da curva com relação aos valores de tensão e ângulo, sempre inferior a 0.5%.

4.3.3.3. Continuado aplicando o método desacoplado rápido

Ponto de colapso: 3.2374 pu do carregamento inicial.

Novamente, não foi possível traçar a parte inferior da curva PV aplicando o método desacoplado rápido.

Não foram encontradas diferenças significativas entre os dois métodos na parte superior da curva com relação aos valores de tensão e ângulo, sempre inferior a 0.5%.

4.3.4. Conclusões

- Para os dois sistemas, caso 1 e caso 2, quando se utilizou um dos métodos desacoplado, o ponto de colapso foi um pouco posterior em relação ao método completo, atendendo as expectativas. Entretanto, observou-se que próximo ao ponto de colapso o acoplamento entre as submatrizes do jacobiano aumenta de maneira considerável. Em sistemas maiores, dependendo do acoplamento destas submatrizes, este comportamento pode não se verificar.
- Os métodos desacoplados mostraram-se inconsistentes para determinar a parte inferior da curva PV.

- Fazer uma relação entre as submatrizes do jacobiano é simples somente quando as mesmas possuem apenas um elemento. Porém, as relações N/H e M/L mostraram porque o acoplamento entre as submatrizes é importante no processo de convergência na parte inferior da curva. As relações obtidas foram bastante elevadas na parte inferior da curva PV.
- Os métodos se equivalem para determinar a parte superior da curva e o ponto de colapso. Observe que foram utilizados dois sistemas, sendo um com relação x/r baixa e outro com relação alta.
- Felizmente, a parte de interesse da curva PV é justamente a superior. Então, na próxima seção se investigará as características do vetor tangente utilizando o método desacoplado e o desempenho computacional dos métodos na parte superior da curva.

4.3.5. Resultados dos índices de colapso aplicando o método desacoplado

4.3.5.1. Introdução

Esta seção mostrará o comportamento dos índices de colapso de tensão durante o método continuado, quando se aplica o método desacoplado para resolver as equações de fluxo de potência.

No método continuado completo ou extrapolado, além de utilizar a matriz jacobiana no processo de convergência na solução das equações de fluxo de potência, utiliza-a para fornecer o passo previsor e na classificação das barras mais críticas do sistema, através do vetor tangente.

Na verdade, esta seção só fará um acompanhamento dos índices em cada ponto de operação estabelecido pelo método continuado completo, caso se utilizasse o método desacoplado. Desta maneira se faz uma comparação justa, pois rigorosamente o ponto de operação é o mesmo. Quanto a verdadeira eficiência do método desacoplado será mostrada posteriormente.

4.3.5.2. Classificação das barras mais críticas

Como abordado no capítulo 2, o vetor tangente converge para o autovetor à direita associado ao autovalor nulo [52]. Estudos [58] mostram que a maior componente do vetor tangente indica a barra mais crítica do sistema, e que a aplicação do vetor tangente para classificação das barras mais críticas, mostrou-se eficiente desde o início do processo do método continuado. Portanto, a classificação das barras críticas será feita através do vetor tangente.

Abre-se um parêntese aqui para explicar o que é denominado nesta dissertação de vetor tangente do Jacobiano de \mathbf{H} e de \mathbf{L} .

Como foi visto no capítulo 3, o vetor tangente é dado por:

$$VT = \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \frac{1}{\Delta\lambda} = J^{-1} \begin{bmatrix} P_o \\ Q_o \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Considerando \mathbf{M} e \mathbf{N} iguais a zero no método desacoplado, chega-se nas expressões:

$$VT_H = \begin{bmatrix} \Delta\theta \end{bmatrix} \frac{1}{\Delta\lambda} = H^{-1} P_o \quad (4.3)$$

$$VT_L = \begin{bmatrix} \Delta V \end{bmatrix} \frac{1}{\Delta\lambda} = L^{-1} Q_o \quad (4.4)$$

Portanto, VT representa o vetor tangente do Jacobiano completo, VT_H esta associado ao vetor tangente de \mathbf{H} e VT_L representa o vetor tangente de \mathbf{L} .

Como foi mencionado, o vetor tangente converge para o autovetor à direita no ponto sela-nó. E ainda, mesmo bem antes do ponto de colapso a classificação das barras mais críticas é bem eficiente quando se utiliza o vetor tangente. Deseja-se então saber qual o comportamento dos vetores tangentes VT_H e VT_L quando utiliza-os para classificar as barras mais críticas.

Portanto, nas tabelas 4.9-4.12 mostram as classificações das barras mais críticas em ordem decrescente, no caso base e no último ponto de equilíbrio antes do sistema de equações divergirem (colunas “colapso” nas tabelas), para os seguintes vetores tangentes:

- VT – Vetor tangente aplicando o Jacobiano completo.
- VT_H – Vetor tangente aplicando a submatriz H .
- VT_L – Vetor tangente aplicando a submatriz L .

Tabela 4.9 – Classificação das barras mais críticas – sistema 14 barras

Vetor tangente do jacobiano		Vetor tangente da submatriz H		Vetor tangente da submatriz L	
Base	Colapso	Base	Colapso	Base	Colapso
14	14	10	14	14	14
13	14	11	13	9	13
12	13	4	12	10	10
10	13	12	10	11	11
11	12	13	9	7	12
9	10	14	11	13	9
7	12	9	6	12	6
4	9	5	7	4	7
5	11	7	8	5	8
14	10	-	3	-	3

Tabela 4.10 – Classificação das barras mais críticas – sistema 30 barras

Vetor tangente do jacobiano		Vetor tangente da submatriz H		Vetor tangente da submatriz L	
Base	Colapso	Base	Colapso	Base	Colapso
30	30	14	30	26	26
29	30	15	29	24	24
19	29	18	26	30	23
26	26	23	19	25	19
18	29	19	24	21	21
20	26	16	18	29	22
24	25	20	20	22	30
23	24	24	23	23	20
25	19	17	25	19	18
21	27	21	21	20	25

Tabela 4.11 – Classificação das barras mais críticas – sistema 57 barras

Vetor tangente do jacobiano		Vetor tangente da submatriz H		Vetor tangente da submatriz L	
Base	Colapso	Base	Colapso	Base	Colapso
31	31	31	31	31	31
33	31	33	33	30	33
32	30	32	32	33	32
30	33	30	30	32	30
25	32	25	25	25	25
57	33	57	57	42	57
56	32	34	56	34	56
42	25	56	34	56	34
41	30	35	42	35	42
34	25	42	35	24	35

Tabela 4.12 – Classificação das barras mais críticas – sistema 118 barras

Vetor tangente do jacobiano		Vetor tangente da submatriz H		Vetor tangente da submatriz L	
Base	Colapso	Base	Colapso	Base	Colapso
88	89	11	65	84	95
92	91	85	10	86	83
102	88	30	89	79	82
85	92	45	64	83	96
93	102	7	63	78	94
101	85	58	67	85	84
86	93	47	60	117	97
84	83	115	68	82	101
94	84	13	24	21	93
109	101	9	23	88	79

Observando as tabelas 4.9 a 4.12 destaca-se:

- Quando se utiliza o jacobiano completo, uma mesma barra pode ocupar duas posições diferentes na classificação. Isto acontece porque a mesma barra concorre com variação de tensão e ângulo.
- Tomando o Jacobiano completo como referência, as outras classificações não conseguiram reproduzir exatamente o mesmo resultado. Portanto, a utilização dos vetores tangentes VT_H e VT_L pode não indicar corretamente as barras críticas do sistema.

4.3.5.3. Acompanhamento dos índices

- Utilizando as mesmas matrizes analisadas anteriormente (J, H e L), monitorou-se os menores autovalor e valor singular. Isto foi feito para diversos pontos de operação entre o caso base e o ponto de colapso. O passo precursor nos gráficos será denominado de λ .

Só será mostrado o gráfico do menor valor singular para o sistema de 14 barras. Como o jacobiano é quasi-simétrico, o menor autovalor e o menor valor singular são próximos. Já as submatrizes H e L são simétricas, portanto possuindo estes dois valores iguais.

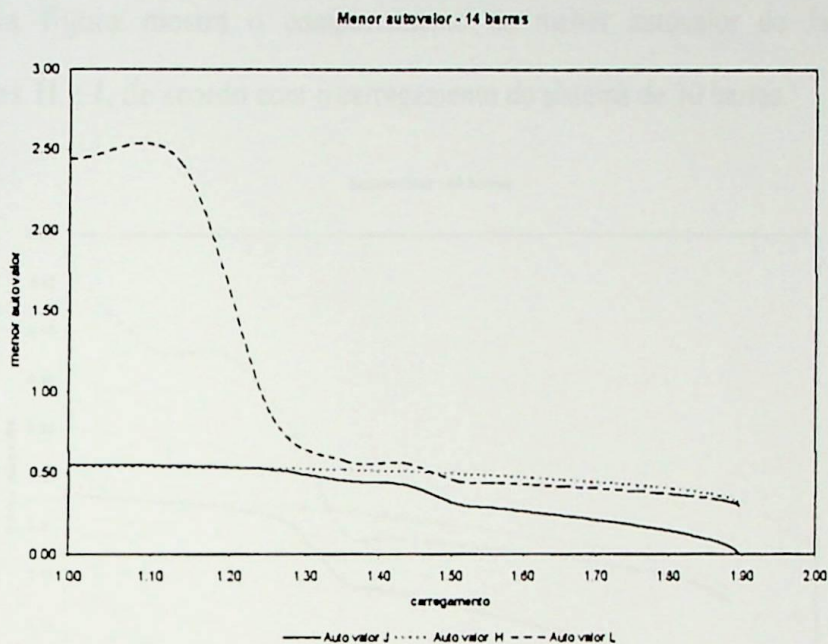


Figura 4.13: Menor autovalor no Jacobiano e submatrizes H e L – 14 barras

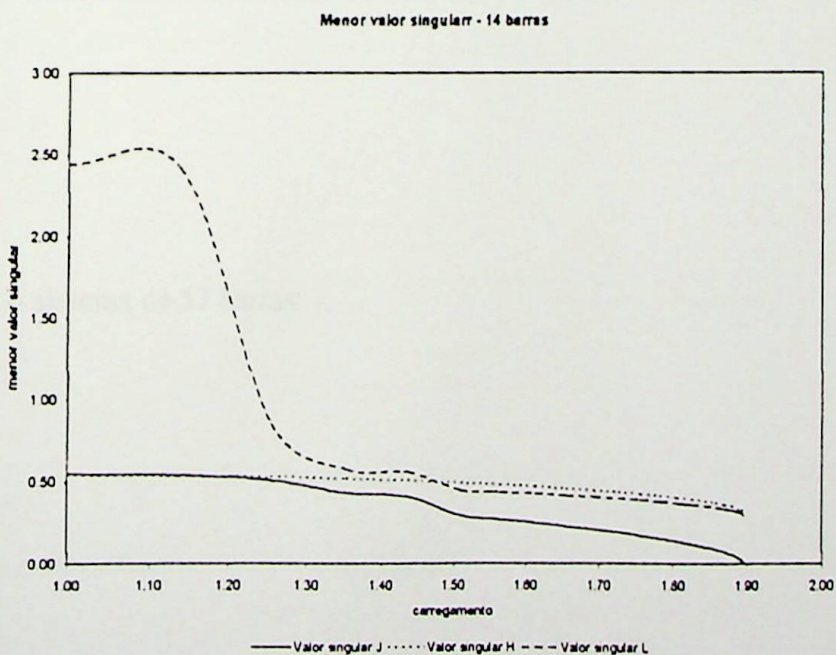


Figura 4.14: Menor valor singular no Jacobiano e submatrizes H e L – 14 barras

Observando as figuras 4.13 e 4.14 constata-se que são idênticas. Desta forma, não será apresentado o gráfico do menor valor singular durante o carregamento do sistema, já que o menor autovalor fornecerá a mesma informação.

A próxima figura mostra o comportamento do menor autovalor do Jacobiano e submatrizes **H** e **L** de acordo com o carregamento do sistema de 30 barras.

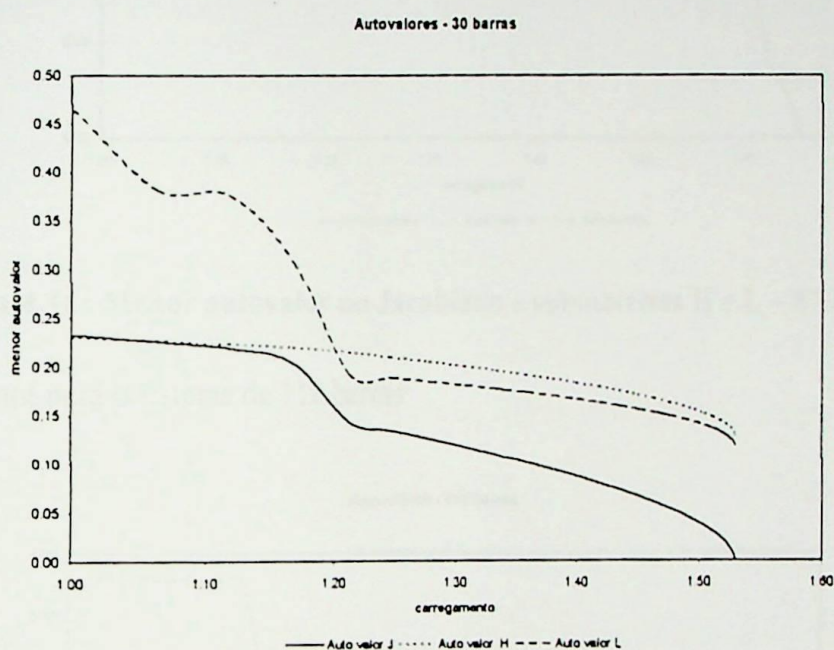


Figura 4.15: Menor autovalor no Jacobiano e submatrizes H e L – 30 barras

Idem para o sistema de 57 barras:

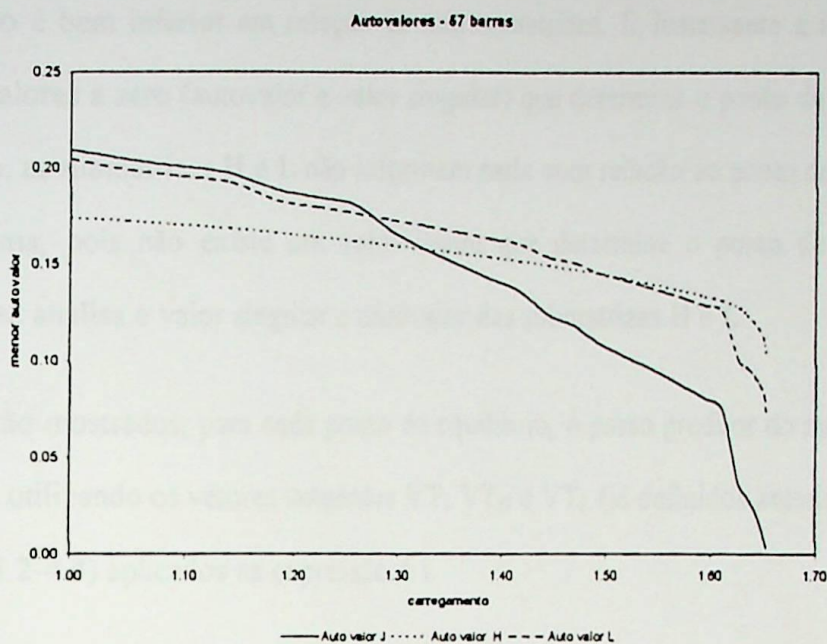


Figura 4.16: Menor autovalor no Jacobiano e submatrizes H e L – 57 barras

E finalmente para o sistema de 118 barras:

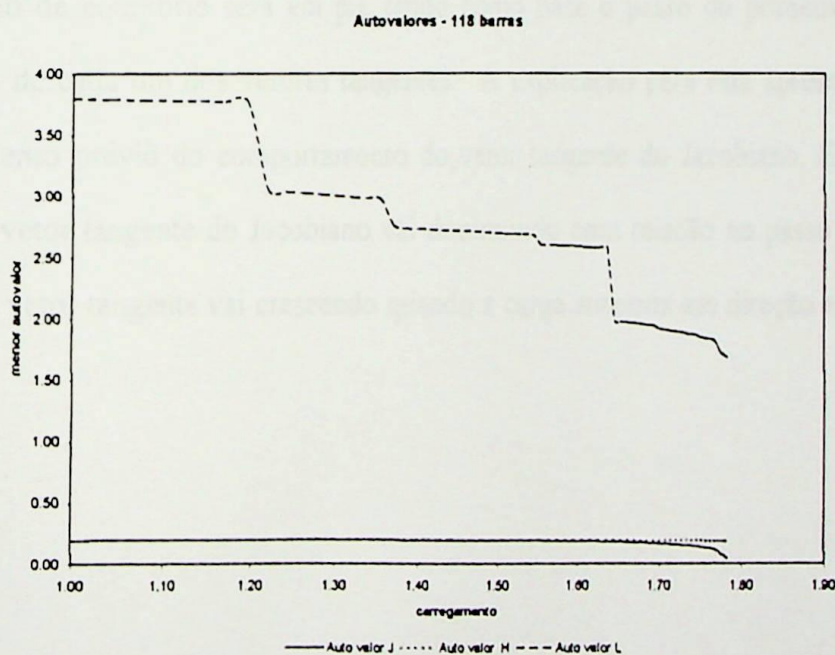


Figura 4.17: Menor autovalor no Jacobiano e submatrizes H e L – 118 barras

Analisando as figuras 4.13 até 4.17 destaca-se:

- As submatrizes **H** e **L** não tendem para a singularidade como a matriz do Jacobiano completo. No ponto de colapso, o autovalor e o valor singular do Jacobiano

completo é bem inferior em relação as outras matrizes. É Justamente a tendência destes valores a zero (autovalor e valor singular) que determina o ponto de colapso. Portanto, as submatrizes **H** e **L** não informam nada com relação ao ponto de colapso do sistema, pois não existe um valor limite que determine o ponto de colapso quando se analisa o valor singular e autovalor das submatrizes **H** e **L**.

A seguir serão mostrados, para cada ponto de equilíbrio, o passo predictor do método da continuação utilizando os vetores tangentes VT , VT_H e VT_L (já definidos anteriormente, expressões 4.2-4.4) aplicados na expressão 4.1.

Os passo predictores serão mostrados em forma de figura para cada sistema teste. Como o valor da norma de cada vetor tangente pode ser discrepante, a visualização gráfica pode não ser conclusiva. Portanto, para evitar este problema, o passo calculado para cada ponto de equilíbrio será em pu , tendo como base o passo do primeiro ponto de equilíbrio de cada um dos vetores tangentes. A explicação para esta apresentação é o conhecimento prévio do comportamento do vetor tangente do Jacobiano. Em geral, o passo do vetor tangente do Jacobiano vai diminuindo com relação ao passo anterior, a norma do vetor tangente vai crescendo quando a carga aumenta em direção ao ponto de colapso.

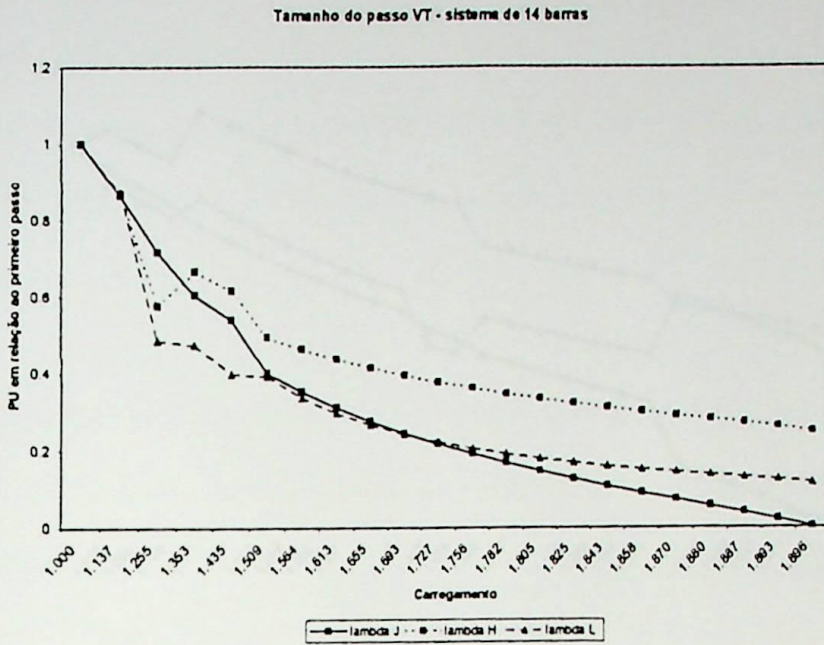


Figura 4.18: Passo dos vetores tangentes – sistema 14 barras

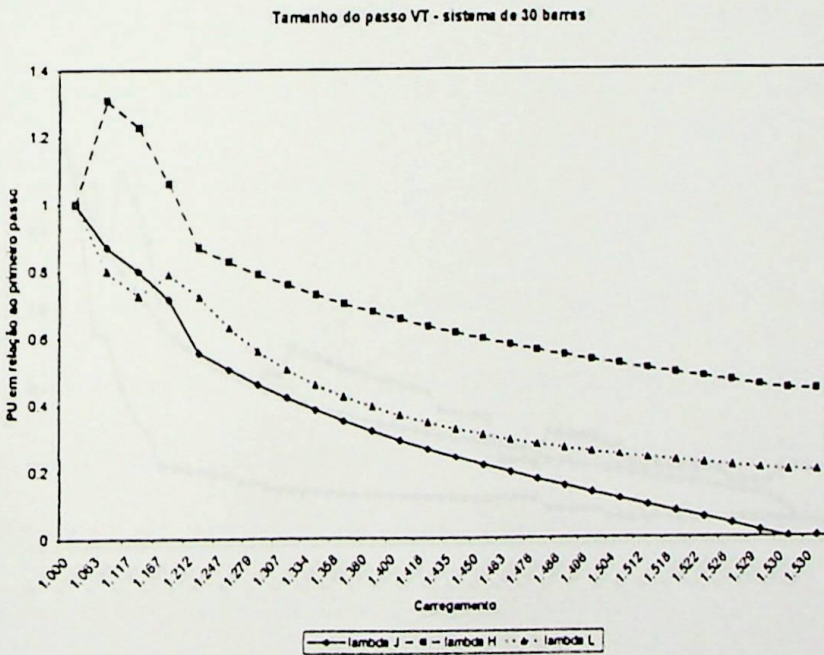


Figura 4.19: Passo dos vetores tangentes – sistema 30 barras

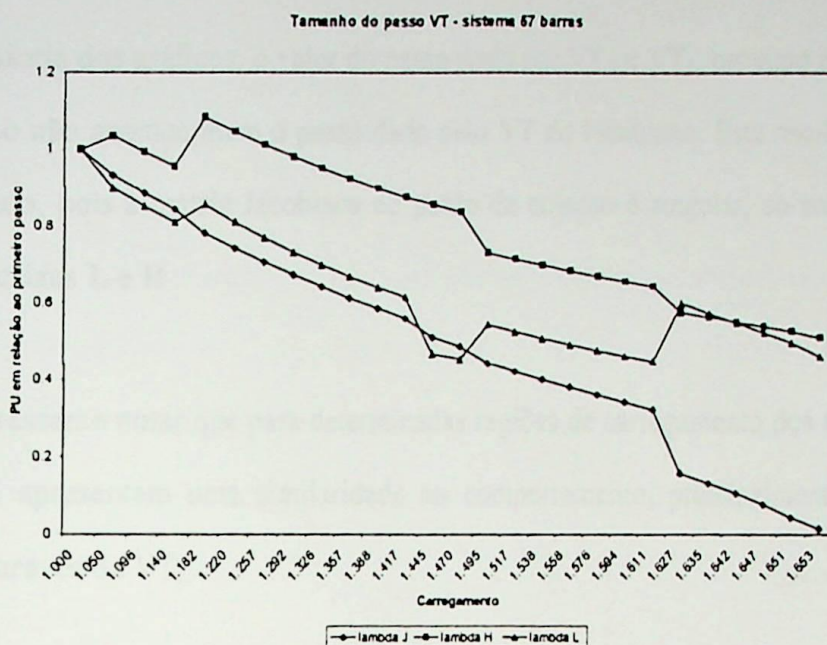


Figura 4.20: Passo dos vetores tangentes – sistema 57 barras

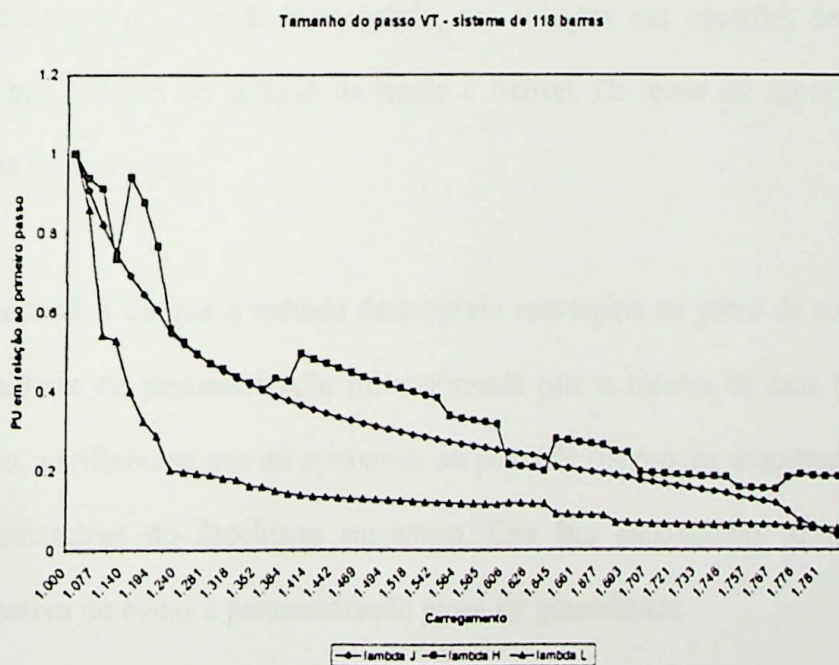


Figura 4.21: Passo dos vetores tangentes – sistema 118 barras

Analisando as figuras 4.18 até 4.21 destaca-se:

- Na maioria dos gráficos, o valor do passo dado por VT_H e VT_L , próximo ao ponto de colapso não acompanham o passo dado pelo VT do Jacobiano. Este resultado já era esperado, pois a matriz Jacobiana no ponto de colapso é singular, ao contrário das submatrizes L e H .
- É interessante notar que para determinadas regiões de carregamento dos sistemas as curvas apresentam uma similaridade no comportamento, principalmente o passo dado através de VT_L .

4.3.6. Conclusões da aplicabilidade do desacoplado

A aplicabilidade do método desacoplado, nas soluções das equações de fluxo de potência, em estudos de colapso de tensão é factível. Os testes até agora revelaram conclusões importantes:

- A expectativa de que o método desacoplado convergiria no ponto de colapso sem necessidade de parametrização foi confirmada para o sistema de duas barras. No entanto, verificou-se que ao aproximar do ponto de colapso, os acoplamentos entre as submatrizes do Jacobiano aumentam. Este fato impossibilita afirmar que a expectativa de evitar a parametrização possa ser generalizada.
- Verificou-se que o método desacoplado terá dificuldade em determinar os pontos da parte de baixo da curva PV , por apresentar elevados acoplamentos entre as submatrizes do Jacobiano. Contudo, como geralmente em estudos de colapso de tensão a parte de interesse da curva PV é justamente a superior, a aplicabilidade do desacoplado não é descartada.

- Constatou-se que, ao desprezar as submatrizes M e N no desacoplado, perde-se informações importantes para o estudo de colapso de tensão. O passo predictor não pode ser dado com a mesma propriedade quando é considerado o método completo. Além disto, a classificação das barras pode ficar prejudicada, muito embora isto não seja significativo, pois o primeiro ponto de equilíbrio pode ser determinado aplicando Newton-Raphson completo, o que fornece uma melhor classificação das barras. Os pontos subsequentes ao primeiro seriam então determinados pelo método desacoplado.
- E ainda, as informações perdidas não inviabilizam o uso do desacoplado. O Jacobiano completo pode ser montado com facilidade depois que o fluxo de carga convergir. Ou então, pode-se misturar as técnicas, partindo com o desacoplado (rápido ou não) e depois passar para o método completo. Na próxima seção será apresentado o desempenho do continuado aplicando estas variações nos sistemas testes, obtendo resultados que justifiquem ou não a aplicação do desacoplado em estudo de colapso de tensão.

4.3.7. Resultados dos tempos computacionais

Nesta seção serão mostrados os resultados das simulações nos sistemas testes 14, 30, 57 e 118 barras. Serão utilizados os métodos desacoplados no método da continuação, e estes resultados serão comparados com o método continuado convencional. Será experimentada uma composição entre o método desacoplado rápido e o método completo nas soluções das equações de fluxo de potência dentro da metodologia do continuado.



Na metodologia original o método da continuação traça toda a curva PV, e faz a parametrização quando as equações de fluxo de potência divergem. A desvantagem desta metodologia é o tempo computacional requerido.

Foram testados, em seções anteriores, os novos critérios de parada, que são muito importantes em metodologias que procuram dar um passo previsor maior, como é o caso do método extrapolado, já que a ultrapassagem do máximo ponto de equilíbrio, ponto sela-nó, não é a única razão para divergência do conjunto de equações de fluxo de potência.

A exemplo dos testes anteriores, os critérios de parada MCVT e IC (Anexos I e II), serão utilizados.

Todos estes esforços são para melhorar o tempo computacional do método continuado, pois é um método que determina com precisão o ponto de colapso. Utilizar os novos critérios de parada é interessante, porque o método da continuação tem como característica diminuir o passo previsor na medida que o sistema vai aproximando do ponto de colapso, o que implica em um número maior de pontos de equilíbrio calculados, aumentando o esforço computacional.

Inicialmente será apresentada a determinação do ponto de colapso e o tempo computacional utilizando o método continuado aplicando três metodologias nas soluções das equações do fluxo de potência:

- Newton-Raphson completo.
- Desacoplado
- Desacoplado rápido

Em todas as simulações que serão mostradas, o tempo computacional referido será para determinar a parte de cima da curva PV.

A tabela a seguir mostra o resultados para os sistemas testes, sem critério de parada, e com fator k igual a 0.5 (fórmula 4.1).

Tabela 4.13 – Método continuado para os sistemas testes – sem os novos critérios de parada e $k=0.5$

SISTEMA	COMPLETO		DESACOPLADO		DESACOPLADO RÁPIDO	
	PONTO	TEMPO	PONTO	TEMPO	PONTO	TEMPO
14 BARRAS	1.897	22.00	1.926	27.40	1.905	16.25
30 BARRAS	1.530	27.00	1.552	31.40	1.518	16.50
57 BARRAS	1.655	28.00	1.639	34.70	1.645	20.20
118 BARRAS	1.785	89.00	1.812	114.70	1.779	115.20
$k=0.5$						

Observa-se:

- A expectativa de que no desacoplado a divergência sempre ocorra depois do que no método completo não ocorreu no sistema de 57 barras.
- No desacoplado rápido apenas o sistema de 14 barras divergiu num valor posterior ao encontrado no método completo.
- Os valores do método desacoplado rápido aproximam-se mais do método completo do que o método desacoplado. Foi visto anteriormente que quando o sistema aproxima-se do ponto sela-nó, o acoplamento entre as submatrizes do Jacobiano vai

aumentando. O método desacoplado rápido não leva este acoplamento para o algoritmo de solução, já que as submatrizes são constantes. No método desacoplado as submatrizes não são constantes. Portanto, as diferenças encontradas são consequência do acoplamento das submatrizes do Jacobiano próximo ao ponto de colapso.

- Os métodos desacoplados são mais demorados no método continuado devido ao fato de gastarem mais iterações para convergir quando aproximam-se do ponto de bifurcação, justamente porque aumentam os acoplamentos entre as submatrizes do Jacobiano. Em uma seção adiante este fato será detalhado.

São os seguintes os critérios de parada aplicados nesta seção:

1. Maior componente do vetor tangente (MCVT) for maior do que 4.
2. Índice indicador de colapso (IC) for menor do que 0.03
3. Divergência do sistema de equações de fluxo de potência.

A próxima tabela mostrará os resultados considerando os critérios de parada.

Tabela 4.14 – Método continuado para os sistemas testes – com os novos critérios de parada e $k = 0.5$

SISTEMA	COMPLETO			DESACOPLADO			DESACOPLADO RÁPIDO		
	PONTO	TEMPO	CRITÉRIO	PONTO	TEMPO	CRITÉRIO	PONTO	TEMPO	CRITÉRIO
14 BARRAS	1.882	16	MCVT	1.8848	18.3	MCVT	1.8948	14.66	MCVT
30 BARRAS	1.514	17	MCVT	1.5199	20.1	IC	1.5175	15.65	IC
57 BARRAS	1.641	22	MCVT, IC	1.6325	27.2	MCVT, IC	1.6451	18.7	MCVT, IC
118 BARRAS	1.751	72	MCVT	1.7617	83.2	MCVT	1.6828	74.4	MCVT
K=0.5									

MCVT - Maior Componente do Vetor Tangente
 IC - Índice de Colapso
 DIV - divergência do caso

Os tempos computacionais melhoraram bastante, principalmente nos métodos desacoplados, onde são mais lentos próximo ao ponto de colapso, devido ao número elevado de iterações para convergir.

As próximas tabelas, 4.15 e 4.16, mostram as simulações para $k=1$.

Tabela 4.15 – Método continuado para os sistemas testes – sem os novos critérios de parada e $k = 1$

SISTEMA	COMPLETO		DESACOPLADO		DESACOPLADO RÁPIDO	
	PONTO	TEMPO	PONTO	TEMPO	PONTO	TEMPO
14 BARRAS	1.8962	10.55	1.9441	15.1	1.9111	11.2
30 BARRAS	1.5299	12.36	1.5683	17.6	1.5391	11.9
57 BARRAS	1.6540	15.6	1.6776	20.1	1.6357	12.68
118 BARRAS	1.7845	52.6	1.8294	75.4	1.7283	55.86
$k=1$						

Tabela 4.16 – Método continuado para os sistemas testes – com os novos critérios de parada e $k=1$

SISTEMA	COMPLETO			DESACOPLADO			DESACOPLADO RÁPIDO		
	PONTO	TEMPO	CRITÉRIO	PONTO	TEMPO	CRITÉRIO	PONTO	TEMPO	CRITÉRIO
14 BARRAS	1.887	7.2	MCVT	1.9049	9.05	MCVT	1.8944	9.29	MCVT
30 BARRAS	1.512	7.96	IC	1.5295	10.22	IC	1.5217	10.11	IC
57 BARRAS	1.642	11.1	MCVT, IC	1.6544	14.1	MCVT	1.6357	12.8	DIV
118 BARRAS	1.751	42	MCVT	1.7704	49.77	MCVT	1.6877	46.7	MCVT
$K=1$									

MCVT - Maior Componente do Vector Tangente

IC - Índice de Colapso

DIV - divergência do caso

Comentários:

- Comparando as tabelas 4.15 e 4.16 nota-se que os novos critérios de parada melhoram bastante o desempenho do tempo computacional sem perda significativa na precisão do ponto de colapso.
- Comparando as tabelas 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16 observa-se que ao aumentar o valor de k , a precisão do valor de ponto de colapso vai se distanciando nos métodos desacoplados.

Nos métodos desacoplados também o passo previsor é dado de acordo com a fórmula 4.1, isto é, sempre é necessário calcular o vetor tangente depois de achar as soluções para o sistema de equações. E para isto, é necessário montar o Jacobiano completo depois de achada a solução para o sistema de equações.

4.3.8. Mixagem

Mixar o método completo com um dos desacoplados é uma tentativa de melhorar o tempo computacional e manter a precisão dos resultados. Escolheu-se o desacoplado rápido pelas seguintes razões:

- Foi o método que em geral apresentou melhores resultados.
- Como o continuado mixado vai começar com o método desacoplado rápido, e depois passar para o método completo, através de critérios que serão expostos adiante, o passo pode ser constante. O que significa que neste período não é necessário calcular o vetor tangente para dar o passo previsor, procedimento que pode melhorar o tempo do desacoplado rápido.

O gráfico a seguir mostra o comportamento do desacoplado rápido e do método completo com relação ao número de iterações necessárias para convergir as equações de fluxo de potência para cada ponto de equilíbrio. Para esta demonstração foi utilizado o sistema de 118 barras.

São mostradas três curvas:

- ◆ Desacoplado rápido calculando o passo previsor para todos os pontos de equilíbrio através do vetor tangente, conforme equação 4.1.
- ◆ Desacoplado rápido com passo constante, calculado pelo vetor tangente, apenas no primeiro ponto de equilíbrio.
- ◆ Continuado utilizando Newton-Raphson completo.

Todas estas curvas simulam o continuado até o sistema de equações divergir.

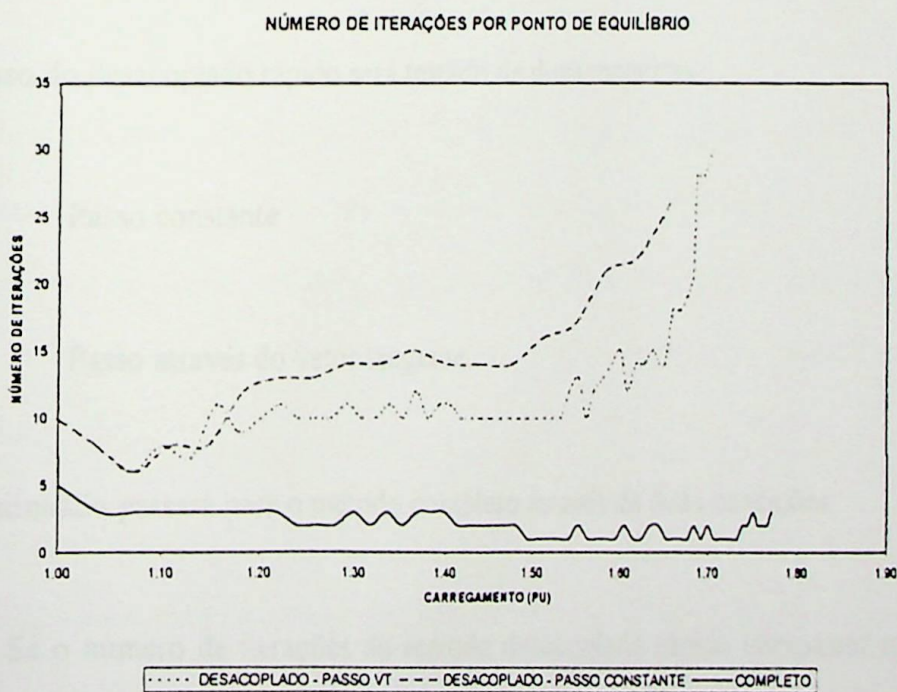


Figura 4.22: Número de iterações no método continuado – aplicando o desacoplado rápido e completo

No método desacoplado:

- Na medida que o sistema é carregado, o número de iterações para convergir cada ponto de equilíbrio tende a aumentar.
- Quando o passo é dado pelo vetor tangente exige-se menos iterações para convergir o sistema de equações de fluxo de potência.

Por outro lado, quando se aplica Newton-Raphson completo, o número de iterações para convergir o sistema de equações foi sempre pequeno.

A síntese do algoritmo de mixagem é a seguinte:

- Começar com o desacoplado rápido.
- Passo do desacoplado rápido será testado de duas maneiras:
 1. Passo constante
 2. Passo através do vetor tangente.
- continuado passará para o método completo através de duas condições:
 1. Se o número de iterações do método desacoplado rápido ultrapassar um limite pré-definido (20, por exemplo).
 2. Se o sistema de equações não convergir quando se aplicar o desacoplado rápido.

- Finalmente, será avaliado o tempo computacional com e sem os novos critérios de parada, IC e MCVT.

A próxima tabela faz a comparação entre usar o passo constante ou calculá-lo através do vetor tangente no continuado mixado, enquanto o processo estiver utilizando o método desacoplado rápido para resolver as equações de fluxo de potência.

Tabela 4.17 – Método continuado mixado – sem novos critérios de parada

SISTEMA	Passo Constante		Passo VT	
	PONTO	TEMPO	PONTO	TEMPO
14 BARRAS	1.8964	9	1.8955	12
30 BARRAS	1.5302	9.4	1.5413	14.9
57 BARRAS	1.6605	11.1	1.6357	16.09
118 BARRAS	1.7845	40	1.7837	60.25
k=1				

Pela tabela acima conclui-se que o passo constante gasta menos tempo de processamento. Como o desacoplado rápido com passo constante necessita de mais iterações para convergir, conclui-se que o cálculo do vetor tangente para determinar o passo é mais demorado do que esse número a mais de iterações quando o passo é constante.

A tabela abaixo mostra o resultado do continuado mixado aplicando os novos critérios de parada, com o passo constante enquanto o processo estiver aplicando o desacoplado rápido.

Tabela 4.18 – Método continuado mixado – com novos critérios de parada

SISTEMA	PONTO	TEMPO	CRITÉRIO
14 BARRAS	1.8855	5.27	MCVT
30 BARRAS	1.5205	5.44	IC, MCVT
57 BARRAS	1.6605	11.75	DIV
118 BARRAS	1.7529	32.3	MCVT
K=1			

MCVT - Maior Componente do Vetor Tangente
 IC - Índice de Colapso
 DIV - Divergência do caso

Comparando os resultados da tabela 4.17 com a tabela 4.18 verifica-se que apenas o tempo computacional do sistema de 57 barras não melhorou.

Outra tentativa para melhorar os tempos foi aproveitar o fato do desacoplado rápido utilizar matrizes constantes, B' e B'' , no seu processo iterativo. Para tanto definiu-se o vetor tangente:

$$v_{T_{L'}} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta V}{\Delta \lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}'' \end{bmatrix}^{-1} [Q_0 * v] \quad (4.5)$$

Como já foi visto neste trabalho desacoplar o vetor tangente não é útil para classificar as barras críticas. Entretanto, utilizar a equação 4.5 para o cálculo do passo previsor pode fornecer bons resultados. Assim, propõe-se durante o cálculo pelo desacoplado rápido, utilizar esta expressão para o cálculo do passo previsor, com resultados mostrados na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Método continuado mixado – com novos critérios de parada e passo utilizando o VT da equação 4.5

SISTEMA	PONTO	TEMPO	CRITÉRIO
14 BARRAS	1.8929	8.02	IC, MCVT
30 BARRAS	1.5353	13.79	DIV
57 BARRAS	1.6454	13.12	IC, MCVT
118 BARRAS	1.7543	26.63	MCVT
K=1			

MCVT - Maior Componente do Vetor Tangente
 IC - Índice de Colapso
 DIV - Divergência do caso

Observa-se que para os sistemas de 30 e 57 barras os tempos não melhoraram, mas para o sistema de 118 barras o tempo computacional teve um ganho significativo.

Em seguida foi feita a tentativa de acelerar ainda mais o processo enquanto o método continuado estivesse aplicando o desacoplado rápido, fazendo k igual a dois. Observar a tabela a seguir:

Tabela 4.20 – Método continuado mixado – com novos critérios de parada e passo utilizando o VT da equação 4.5 – variando k

SISTEMA	PONTO	TEMPO	CRITÉRIO
14 BARRAS	1.8898	5.6	MCVT
30 BARRAS	1.5211	9	DIV
57 BARRAS	1.6494	12.4	DIV
118 BARRAS	1.759	16.5	MCVT
K (DR)=2 e k(NR C)=1			

MCVT - Maior Componente do Vetor Tangente
 IC - Índice de Colapso
 DIV - Divergência do caso

O interessante nesta tabela é que ganhou-se rapidez sem perder precisão quanto ao valor do ponto de colapso.

Analisando as tabelas do método mixado:

- Mixar os métodos traz bons resultados computacionais sem perder a precisão.
- Os critérios de chaveamento do desacoplado rápido para o método completo nas soluções de equações de fluxo de potência mostraram-se eficientes.

Portanto, os resultados anteriores qualificam a proposta de análise de colapso de tensão estudada aqui, como efetiva. Note que os resultados obtidos nas tabelas 4.19-4.21 competem com aqueles obtidos pelo método extrapolado. No entanto, além de fornecer o mesmo ponto e classificar as barras críticas corretamente (no último ponto convergido o vetor tangente completo é calculado), o método continuado desacoplado rápido fornece as curvas PV para as barras de interesse.

4.3.9. Conclusões do capítulo 4

A seguir estão sintetizadas as principais conclusões sobre os testes efetuados neste capítulo:

A) Método extrapolado:

- Constatou-se que no método extrapolado, que para determinar os pontos de equilíbrio para executar a extrapolação, ao invés de aplicar um pequeno passo percentual de incremento de carga, torna-se mais eficiente determinar este incremento calculado pelo vetor tangente.
- Verificou-se que extrapolar a curva PV, fornece resultados razoáveis.

- Combinar os métodos extrapolados apresentados, curva PV e inverso da maior componente do vetor tangente, também produzem bons resultados.

B) Método da continuação:

Verificou-se que ao aplicar o método desacoplado nas equações de fluxo de potência, para determinação dos pontos de equilíbrio dentro do método da continuação, pode-se obter bons resultados, destacando as seguintes observações quanto aos sistemas testes:

- Próximo ao ponto de colapso o método desacoplado pode não funcionar, devido o aumento dos acoplamentos das submatrizes da matriz Jacobiana.
- A combinação dos métodos foi vantajosa, enquanto os acoplamentos entre as submatrizes do Jacobiano não eram altos (medição através do número de iterações para convergência) aplica-se o desacoplado rápido, quando o contrário utiliza-se o método Newton-Raphson completo.
- Enquanto o método da continuação estiver utilizando o desacoplado rápido, aplicar o passo calculado pelo VT_L (4.5), fornece bons resultados.
- Constatou-se que a classificação das barras utilizando somente informações das submatrizes pode levar a conclusões erradas, isto é, a classificação das barras críticas deve ser feita utilizando a matriz Jacobiana completa. Isto não inviabiliza a combinação das metodologias, Newton completo e desacoplado, pode-se aplicar Newton completo no primeiro ponto de equilíbrio e classificar as barras, conforme

foi demonstrado na literatura, a barra crítica já estará bem posicionada, e em seguida continua-se o processo com o desacoplado rápido.

- No exercício com duas barras, constatou-se que dificilmente o método desacoplado funcionaria para obter a parte de baixo da curva PV, por sorte são pontos de equilíbrio instáveis, que geralmente não são objetos de estudos.

C) Extrapolado e continuado:

Tanto para o método extrapolado como para o método da continuação, verificou-se que elaborar critérios de parada, baseados nas características do vetor tangente quando a matriz jacobiana aproxima-se da singularidade, pode melhorar o desempenho do tempo computacional com pequenas perdas de precisão.

Capítulo 5

5. CONCLUSÕES

5.1. Problema Examinado

No início deste trabalho foi descrito o fenômeno de colapso de tensão, um problema de estabilidade já verificado em várias partes do mundo. A abordagem deste fenômeno é feita com ajuda dos conceitos de estabilidade estrutural, devido as dinâmicas envolvidas.

No entanto, sob certas condições, pode-se utilizar ferramentas estáticas para estudar colapso de tensão.

É grande o interesse de estudar estabilidade de tensão, pois os problemas causados quando um sistema atinge o ponto de colapso são sérios. O fenômeno é caracterizado por ocorrer em uma barra ou área do sistema e tende a se manifestar nas proximidades, geralmente desligando grandes áreas devido ao efeito cascata.

O tempo computacional para análise do problema é considerável, mesmo utilizando ferramentas estáticas. Então, este trabalho avalia diversas técnicas aplicadas na determinação da margem de carga e classificação das barras críticas, sugerindo algumas modificações para melhorar o desempenho computacional.

5.2. Contribuições

Foram investigados dois métodos: extrapolado e continuado. Com relação a cada um dos métodos as principais contribuições foram:

- **Critérios de parada**

A MCVT pode não ser um critério de parada que possa ser estendido para todos os sistemas, quanto a determinação do valor a ser considerado, mas é um bom referencial para avaliar o ponto de equilíbrio, principalmente porque o seu custo computacional é insignificante dentro de processos que aplicam o vetor tangente.

Quanto ao IC é um excelente critério de parada, pois necessariamente este índice é sempre próximo de zero nas proximidades do ponto de colapso. O esforço computacional para determinar este índice não é significativo.

- **Metodologia para combinar desacoplado rápido com Newton-Raphson**

A metodologia proposta para combinar os dois métodos obteve bons resultados. O processo inicia com o desacoplado rápido, com o passo preditor calculado através do vetor tangente que considera apenas as cargas reativas, e quando o número de iterações para convergir os sistemas de equações do fluxo de potência tornar-se elevado, o processo é chaveado, e a partir de então, os novos pontos de equilíbrio são calculados através do método Newton-Raphson clássico.

- **Extrapolação da curva PV**

Verificou-se que extrapolar a curva PV traz bons resultados. O método consiste na suposição que a curva PV tem um comportamento quadrático. Calcula-se três pontos de equilíbrio e determina-se o vértice da curva PV.

- **Melhoria do extrapolado original**

Incrementos de carga determinados com auxílio do vetor tangente, inclusão de novos critérios de parada, MCVT e IC, melhoraram o desempenho do método extrapolado.

- **Método desacoplado não evita a parametrização no continuado**

Foi verificado que a expectativa de que a utilização do método desacoplado, nas soluções das equações de fluxo de potência, evitaria a parametrização não foi confirmada.

5.3. Sugestões para Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros sugere-se que as metodologias apresentadas sejam aplicadas em sistemas reais, com possível aplicação em análise de contingências.

Já que neste trabalho foi proposto um método combinando os métodos Newton clássico com desacoplado rápido, sugere-se que seja realizada alguma investigação combinando com o método desacoplado.

Uma outra proposta atraente de estudo refere-se à possibilidade de reduzir o tempo computacional de tal forma a permitir o emprego desta técnica na análise de contingências. Isto permitiria determinar as contingências mais severas do sistema sob o ponto de vista de colapso de tensão. Esta proposta, no entanto, deve ser melhor formulada, já que a mesma requer uma melhoria ainda maior no desempenho computacional.

ANEXO I

I.1. COMPORTAMENTO DA MAIOR COMPONENTE DO VETOR TANGENTE (MCVT)

Na referência [61] é mostrado o comportamento do inverso da norma do vetor tangente. Quando o sistema aproxima-se do ponto sela-nó, a norma do vetor tende para zero. Portanto, espera-se que a maior componente do vetor tangente tenda para infinito quando o sistema aproximar do ponto de colapso.

A figura a seguir mostra o comportamento da maior componente do vetor tangente (MCVT) para cada ponto de equilíbrio, obtido pelo método continuado para todos os sistemas testes deste trabalho.

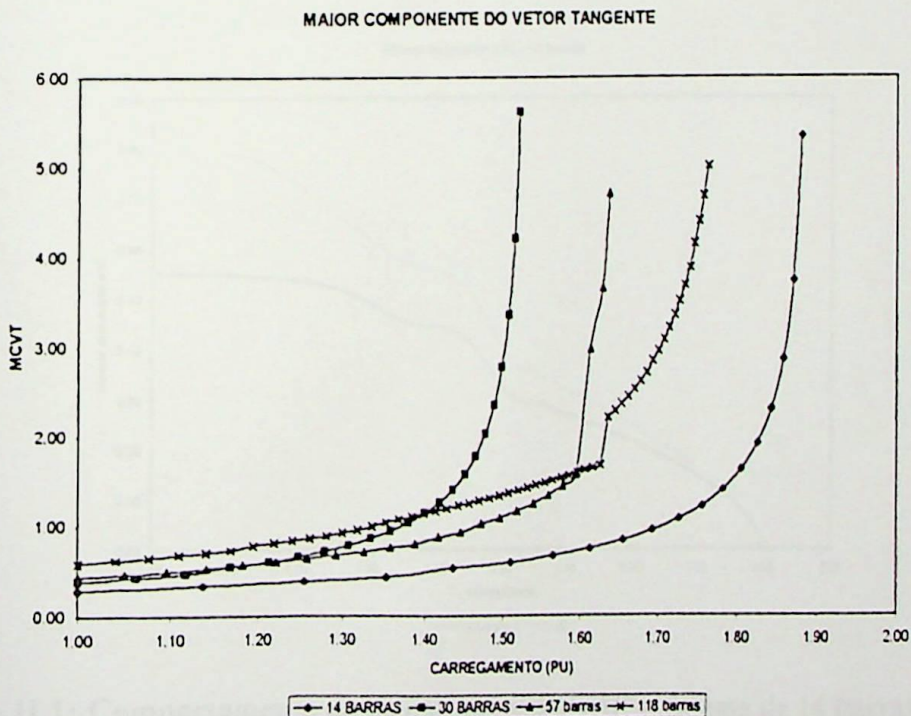


Figura I.1: Comportamento da MCVT

Para não prejudicar a visualização, quando a MCVT ultrapassou o valor quatro foram truncados os pontos seguintes, já que os mesmos atingem valores elevados.

ANEXO II

II.1 COMPORTAMENTO DO ÍNDICE DE COLAPSO (IC)

A referência [61] mostra que o índice de colapso, dado por:

$$IC = IC = V_T' J V_T \quad (AII-1)$$

Tende ao menor autovalor de interesse. Logo, o índice de colapso (equação AII-1) aproxima-se de zero quando o sistema estiver próximo do ponto sela-nó.

As figuras a seguir mostram o índice IC e o menor autovalor para cada ponto de equilíbrio de cada sistema teste, calculados durante o método continuado.

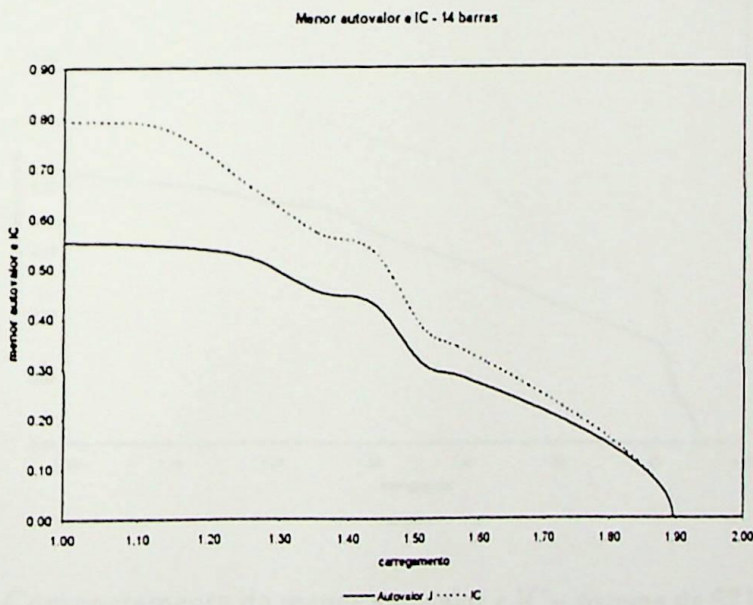


Figura II.1: Comportamento do menor autovalor e IC – sistema de 14 barras

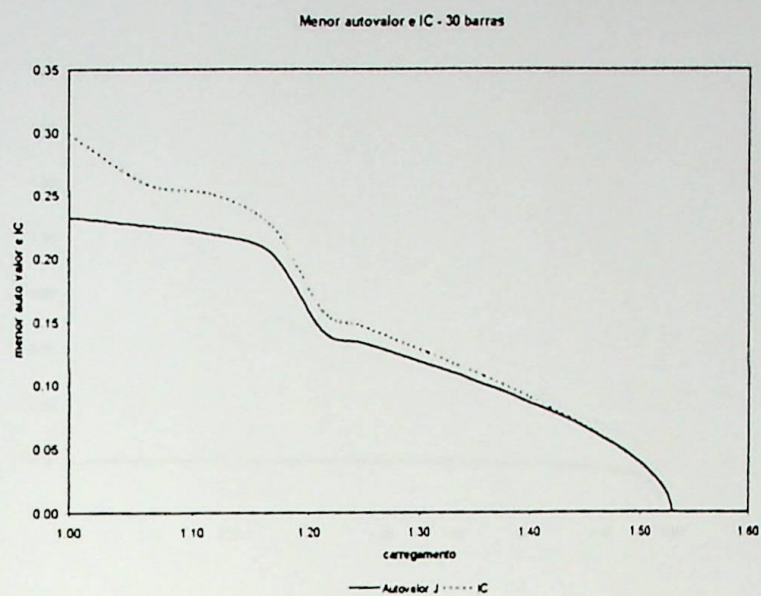


Figura II.2: Comportamento do menor autovalor e IC – sistema de 30 barras

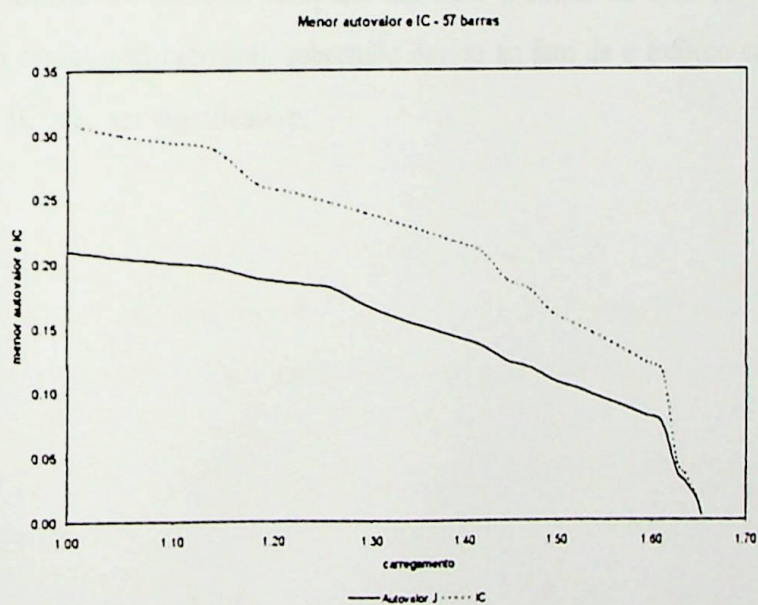


Figura II.3: Comportamento do menor autovalor e IC – sistema de 57 barras

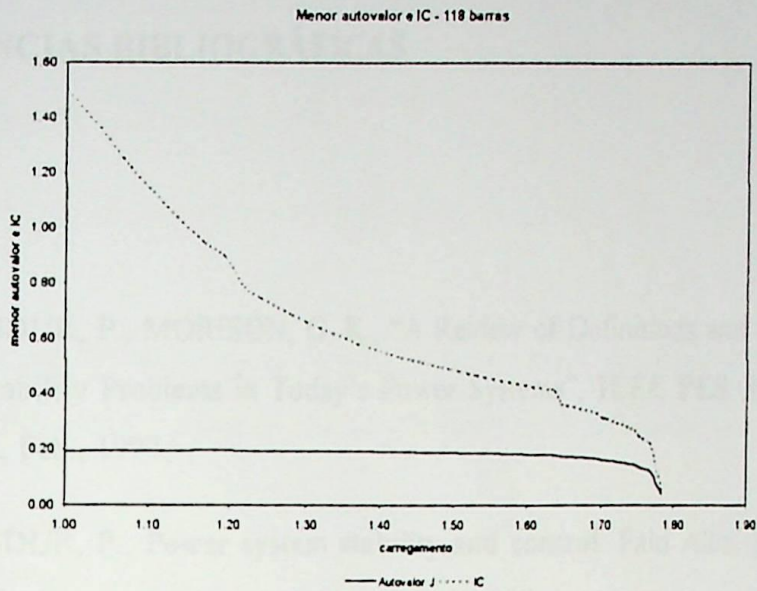


Figura II.4: Comportamento do menor autovalor e IC – sistema de 118 barras

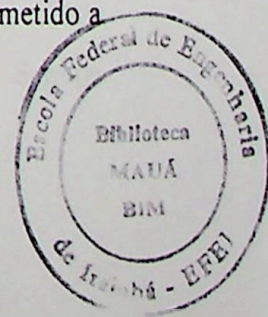
De acordo com as Figuras II.1 a II.4, o índice IC tende a zero quando o sistema se aproxima do ponto de colapso. Estipular um valor próximo de zero como critério de parada é uma conclusão razoável, sobretudo devido ao fato de o esforço computacional para calcular IC não ser significativo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KUNDUR, P., MORISON, G. K., "A Review of Definitions and Classification of Stability Problems in Today's Power Systems", **IEEE PES Meeting**, New York, Feb., 1997.
- [2] KUNDUR, P., **Power system stability and control**. Palo Alto: McGraw-Hill, 1994.
- [3] KUNDUR, P., ROGERS, G. J., WONG, D. Y., WANG, L., LAUBY, M. G., "A Comprehensive Computer Program Package for Small Signal Stability Analysis of Power Systems", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.5, n.4, pp. 1076-1083, 1990.
- [4] MARTINS, N., "Efficient Eigenvalue and Frequency Response Methods Applied to Power System Small-Signal Stability Studies", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. PWRS-1, pp. 217-225, 1986.
- [5] STRUBBE, M., BIHAIN, A., DEUSE, J., BAADER, J. C., "STAG - A New Unified Software Program for the Study of the Dynamic Behavior of Electrical Power Systems", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.4, n.1, 1989.
- [6] EPRI Report EL-6627, **Long-Term Dynamics Simulation: Modeling Requirements**, Final Report of Project 2473-22, prepared by Ontario Hydro, 1989.
- [7] KUNDUR, P., "General Introduction and Basic Concepts of Voltage Stability Analysis", In: **IEEE PES Summer Meeting, IEEE Special Tutorial Course: Voltage Stability**, San Diego, 1998.
- [8] SOUZA, A. C. Z., **Estabilidade de Tensão**, Apostila de Curso, CESE, Itajubá, 1999.

- [9] SOUZA, A. C. Z., BRITO, N. H. M. N. Ações de controle para prevenção de colapso de tensão: efeitos e restrições. **Anais do XI Congresso Brasileiro de Automática**. São Paulo, 1996.
- [10] TAYLOR, C. W. **Power system voltage stability**. Palo Alto: McGraw-Hill, 1994.
- [11] TAYLOR, C. W., "Maybe I Can't Define Stability, but I Know It When I See It", **IEEE/PES – panel on Stability Terms and Definitions**, New York, 1997.
- [12] TAYLOR, C. W. et al., Modelling of voltage collapse including dynamic phenomena, CIGRE Task Force 38-02-10, 1992.
- [13] CLARK, H. K., "New challenge: Voltage Stability", **IEEE Power Engineering Review**, 1990.
- [14] KUNDUR, P., GAO, B., "Practical considerations in voltage stability assessment", **Proceedings of IV Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning**, Foz do Iguaçu, May 1994.
- [15] GCOI - Grupo Coordenador para Operação Interligada, **Modelos de carga para estudos de estabilidade e fluxo de carga**, Relatório SCEL-GTEE-001/89, 1989.
- [16] PRICE, W. W. et al., "Load representation for dynamic performance analysis", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.8, n.2, pp. 472-482, 1993.
- [17] BRITO, N. H. M. N., **Ações de Controle Aplicadas à Análise de Estabilidade de Tensão**, Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI, Minas Gerais, 1996.
- [18] D' AJUZ, A. et al., **Equipamentos elétricos - especificação e aplicação em subestações de alta tensão**, Niterói, FURNAS -: Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987.
- [19] TARANTO, G. N., PINTO, L. M. V. G., PEREIRA, M. V. F., "Representation of Facts Devices in Power System Economic Dispatch", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.7, n.2, pp. 572-576, May 1992.

- [20] FAUR, Z. T., CAÑIZARES, C. A., "Effects of FACTS Devices on Systems Loadability", *North American Power Symposium*, June 1995.
- [21] PRICE, W. W. (Chairman) – IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Load Representation for Dynamic Performance Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 2, May 1993, pp. 472-482.
- [22] PAL, M. K. Voltage Instability Considering Load Characteristics. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. PWRS 7, No. 1, February 1992, pp. 243-249.
- [23] HILL, D. J. Nonlinear Dynamic Load Models with Recovery for Voltage Stability Studies. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 8, No. 1, February 1993, pp. 166-176.
- [24] PINTO, D. P. Representação das Cargas nos Estudos de Estabilidade. *Dissertação de Mestrado*, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1988.
- [25] OHIMA, T. et alli. Voltage Dependence of Composite Loads in Power Systems, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-104, No. 11, November 1985, pp. 3064-3073.
- [26] GCOI - Grupo Coordenador para Operação Interligada, *Análise das perturbações dos dias 24 e 25/04/97 no sistema interligado S/SE/CO*, Relatório SCO/SCEL-01/97, 1997.
- [27] JARDIM, J. L. A., SILVA NETO, C. A., SOUZA, A. C. Z., ALVES da SILVA, A. P., FALCÃO, D. M., BORGES, C. L. T., TARANTO, G. N., "A New On-Line Dynamic Security Assessment System", *VI Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning*, Salvador, 1998.
- [28] SOUZA, A. C. Z., JARDIM, J. L. A., SILVA NETO, C. A., ALVES da SILVA, A. P., TORRES, G. L., FERREIRA, C., FERREIRA, L. C. A., "A New Contingency Analysis Approach for Voltage Collapse Assessment," submetido a *Electric Power Systems Research*, 1998.



- [29] VAN CUTSEM, T., VOURNAS, C. D., "Voltage Stability Analysis in Transient and Mid-Term Time Scales", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, n. 1, pp. 146-154, February 1992.
- [30] WEEDY, B. M. *Sistemas elétricos de potência*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1973.
- [31] GAO, B., MORISON, G. K., KUNDUR, P. Voltage stability evaluation using modal analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.7, n.4, p.1529-1542, nov. 1992.
- [32] MARANNINO, P., BRESESTI, P., DELFANTI, M., GRANELLI, G. P., MONTAGNA, M., "Voltage collapse proximity indicators for very short term security assessment", *Proc. Bulk Power System Voltage Phenomena III- Voltage Stability and Security*, ECC Inc. , Switzerland, August 1994.
- [33] LÖFF, P. A., SMED, T., ANDERSON, G., HILL, D. J., "Fast Calculation of a Voltage Stability Index", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.7, n.1, pp. 54-64, February 1992.
- [34] BARQUIN, J., GÓMEZ, T., PAGOLA, F. L., "Estimating the loading limit margin taking into account voltage collapse areas", *IEEE/PES Winter Meeting - Paper 95 WM 183-4 PWRS*, 1990.
- [35] H. J. C. Pinto, N. Martins, X. V. Filho, A. Bianco, P. Gomes, M. G. Santos, "Modal Analysis for Voltage Stability: Application at Base Case and Point of Collapse", *Proceedings of Bulk Power System Voltage Phenomena – III Voltage Stability, Security and Control*, Davos, Switzerland, August 1994.
- [36] CAÑIZARES, C. A., SOUZA, A. C. Z., QUINTANA, V. H., "Comparison of performance indices for detection of proximity to voltage collapse", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.11, n.3, pp. 1441-1447, August 1996.
- [37] R. B. Prada, A. C. Zambroni, X. V. Filho, A. G. Massaud and J. C. Oliveira, "Voltage stability: phenomena characterization based on reactive control effects and system critical areas identification", *Proceedings of the third Sepope meeting*, Belo Horizonte, 1991, SP-14.

- [38] C. Zambroni de Souza, C. A. Cañizares and V. H. Quintana, "Comparison of performance indices for detection of proximity to voltage collapse", **IEEE Transactions on Power systems**, vol. 11, no. 3, August 1996, pp. 1441-1447.
- [39] CHIANG, H. D., "Study of the existence of energy functions for power systems with losses", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.36, n.11, pp. 1423-1429, November 1989.
- [40] OVERBYE, T., Application of an energy based security method to voltage instability in electrical power systems, **PhD thesis**, University of Wisconsin, Madison, 1991.
- [41] OVERBYE, T. J., MARCO, C. L., "Voltage security enhancement using energy based sensitivities", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.6, n.3, pp. 1196-1202, August 1991.
- [42] CAÑIZARES, C. A., Voltage Collapse and Transient Energy Function Analyses of AC/DC Systems, **PhD thesis**, University of Wisconsin-Madison, 1991.
- [43] T. Van Cutsem, "A method to compute reactive power margins with respect to voltage collapse", **IEEE /PES 90 VM 097-6 PWRS**, February 1990.
- [44] S. Granville, J. C. O. Mello and A. C. G. Mello, "Application of interior point methods to power flow unsolvability", **IEEE/PES Summer Meeting – Paper 95 SM 599-1 PWRS**, July 1995, Portland, Oregon.
- [45] G. D. Irisarri, X. Wang, T. Jong and S. Mokhtari, "Maximum loadability of power systems using interior point non-linear optimization method", **IEEE Transactions on power systems**, vol.12, no. 1, February 1997, pp. 162-172
- [46] SEYDEL, R. From Equilibrium to Chaos – Practical Bifurcation and Stability Analysis. Elsevier, New York, 1988.
- [47] IBA, K., SUZIKI, H., EGAWA, M., WATANABE, T. Calculation of Critical Loading Condition with Nose Curve Using Homotopy Continuation Method. **IEEE Transactions on Power Sistem**, Vol. 6, No. 2, May 1991, pp. 584-593.

- [48] AJJARAPU, V., CHRISTY, C. The continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis. **IEEE Transactions on Power System**, Vol. 7, No. 1, February 1992, pp. 416-423.
- [49] CHIANG, H. D., SHAH, K. S., BALU, N. CPFLOW: A Practical Tool for Tracing Power System Steady-State Stationary Behavior Due to Load and Generator Variations. **IEEE Transactions on Power System**, Vol. 10, No. 2, May 1995, pp. 623-634.
- [50] CAÑIZARES, C. A., ALVORADO, F. L., **Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC Systems**. **IEEE Transactions on Power System**, Vol. 8, No. 1, February 1993, pp. 1-8.
- [51] LOBATO, M. V. C., Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica: Estudo do Fenômeno e de Métodos para Análise Estática. **Dissertação de Mestrado**, UFMG, Minas Gerais, 1998.
- [52] A. Canizares, "Voltage Collapse and Transient Energy Function Analyses of AC/DC Systems", **PhD thesis**, University of Wisconsin-Madison, 1991.
- [53] Scott W. Hadley, Brian L. Mark and Anthony Vannelli, "An efficient eigenvector approach for finding netlist partition", **IEEE Transaction on CAD/ICAS**, vol.11, no. 7, July 1992, pp. 885-892.
- [54] AJJARAPU, V., "Identification of steady state voltage stability in power systems," **Proc. of International Conference on High Technology in the Power Industry**, pp. 244-247, March 1988.
- [55] ALVARADO, F. L., JUNG, T. H., "Direct detection of voltage collapse conditions," **Proc. Bulk Power System Voltage Phenomena - Voltage Stability and Security**, EL-6183, EPRI, pp. 5.23-5.38, January 1989.
- [56] Antônio Carlos Zambroni de Souza, Determinação da Barra Crítica e do Ponto de Colapso pelo Vetor Tangente, **XI CBA**, São Paulo, Setembro de 1996, vol. 3, pags 1393-1398.

- [57] C. Zambroni de Souza, C. A. Cañizares and V. H. Quintana, "Critical bus and point of collapse determination using tangent vectors", **28th North American Power Symposium**, Cambridge, USA, November 10-12 1996, pp. 329-333.
- [58] C. Zambroni de Souza, C. A. Cañizares and V. H. Quintana, "New techniques to speed up voltage collapse computations using tangent vectors ", **IEEE/PES Summer meeting, paper PE-219 – PWRS-0-11-1996**, Berlin, July 1997.
- [59] Ejebe G. C., Irisarri G. D., Mokhtari S., Obadina O., Ristanovic P., Tong J., "Methods for Contingency Screening and Ranking for Voltage Stability Analysis of Power Systems". **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.11, n.1, pp. 350-356, February 1996.
- [60] Monticelli, Alcir José, "Fluxo de carga em redes de energia elétrica", **Editora Edgard Blücher Ltda**, 1983.
- [61] A . C. Zambroni de Souza, "Discussions on Some Voltage Collapse Indices", **Electric Power Systems Research**, vol.53, No.1, January 2000, pp. 53-58.