unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

MESTRADO

FLUXO DE CARGA DESACOPLADO RÁPIDO PARAMETRIZADO COM PREDITOR SECANTE

1210001408

ROGÉRIO ROCHA MATARUCCO

Ilha Solteira - SP

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 unesp 12 13 14 15 16 17 18 19

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

FACULDADE DE ENGENHARIA – CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FLUXO DE CARGA DESACOPLADO RÁPIDO PARAMETRIZADO COM PREDITOR SECANTE

Prot. 053/2003-NRD 143

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"
SERVIÇO TÉC. DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO

DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
01.09.03	30.09.03
REGISTRADO POR	TOMBO
Aiza	Te. 1408
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
Doação Autor R$ 10,00	M425f

ROGÉRIO ROCHA MATARUCCO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira / FEIS / UNESP como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

ORIENTADOR: Prof. Dr. DÍLSON AMÂNCIO ALVES

Co
Sys 199653
Sys 55490
30404002

ILHA SOLTEIRA – SP
Julho – 2003

1210001408

BCDIS - FEIS - UNESP

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da FEIS/UNESP

Matarucco, Rogério Rocha

M425f Fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado com preditor secante / Rogério Rocha Matarucco. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2003

xiv, 97 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2003.

Orientador: Dílson Amâncio Alves

Bibliografia: p. 75-79

1. Fluxo de carga. 2. Métodos de continuação. 3. Newton-Raphson, Método. 4. Método desacoplado rápido.

FLUXO DE CARGA DESACOPLADO RÁPIDO PARAMETRIZADO COM PREDITOR SECANTE

Rogério Rocha Matarucco

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Dilson Amancio Alves – orientador

Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

Ilha Solteira-SP, julho de 2003

BCpIS - FEIS - UNESP

"Uma inteligência lúcida e uma razão justa hão de produzir uma vontade inabalável; e uma vontade inabalável, servindo uma inteligência lúcida e uma razão justa, consegue tudo que é possível conseguir-se na situação em que cada indivíduo se encontre".

Eça de Queiroz

Dedico este trabalho à minha esposa Ana Mara e ao meu filho Victor Neto.

BCoIS - FEIS - UNESP



AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Dílson Amâncio Alves, pela orientação, pelo aprendizado, pelo apoio incondicional dado durante a elaboração deste trabalho e pela confiança depositada em mim.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, onde comecei o meu trabalho de mestrado.

Ao professor Dr. Geraldo Roberto Martins da Costa do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, pela indicação junto ao meu orientador.

Ao amigo Antonio Carlos de Carvalho, pelo companheirismo nas iguais horas dificeis.

Ao meu tio Gilbert Raymond Jean Rodrigues que, sem saber, foi o responsável por eu escolher esta formação tão maravilhosa e promissora que é a Engenharia Elétrica, e que, conseqüentemente, me trouxe até aqui.

Ao meu cunhado Márcio Jumpey Crusca Nakano pelo apoio e pela manutenção de meu computador (hardware e software) nos momentos necessários.

Aos meus pais Victor Matarucco e Nair da Rocha Matarucco pela minha formação e constante incentivo.

Ao Grande Arquiteto do Universo, de onde tiramos forças para a caminhada do dia a dia.

BCpIS - FEIS - UNESP

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS viii
LISTA DE TABELAS xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS xii
LISTA DE SÍMBOLOS xiii
RESUMO xiv
ABSTRACT xiv

CAPÍTULO 1 1
Introdução 1

CAPÍTULO 2 6
Estabilidade de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência 6
2.1 Introdução 6
2.2 Estabilidade de Tensão 6
2.3 Objetivos de um Estudo de Estabilidade de Tensão 10
2.4 Análises Dinâmicas 11
2.4.1 Simulações no Domínio de Tempo 11
2.4.2 Análise Modal 11
2.5 Teoria das Bifurcações 13
2.5.1 Bifurcações Sela-Nó 13
2.6 Análises Estáticas 15
2.6.1 Índices de Estabilidade 16
2.6.2 Margem de Carregamento 17
2.6.3 Curvas PV 18
2.6.4 Métodos Utilizados para a Obtenção da Margem de Carregamento 21
2.6.4.1 Fluxo de Carga Convencional 21

BCpIS - FEIS - UNESP

2.6.4.2 Método da Continuação 23
2.6.4.3 Métodos Diretos 24

CAPÍTULO 3 26
Métodos da Continuação 26
3.1 Introdução 26
3.2 Curvas PV - Método da Continuação 26
3.2.1 Método de Newton Parametrizado por λ 28
3.2.2 Método de Newton Parametrizado por V_k e θ_k 34
3.2.3 Método de Newton Parametrizado pela Potência Reativa de uma Barra PV (Q_{PV}) μ 35
3.2.4 Métodos Desacoplados Parametrizados 37
3.2.4.1 Versão BX Parametrizada por V_k 38
3.2.4.2 Versão XB Parametrizada por θ_k 42
3.2.4.3 Versão BX Parametrizada pela Potência Reativa de uma Barra PV (Q_{PV}), μ 43
3.3 Passo Preditor 46
3.3.1 Controle do Tamanho do Passo Preditor (σ) 50
3.3.2 Mudança de Parâmetro 52
3.3.3 Passo Corretor 54

CAPÍTULO 4 55
Resultados da Implementação do Preditor Secante Polinomial de Primeira Ordem 55
4.1 Introdução 55
4.2 Resultados 55
4.2.1 Preditor Secante Polinomial de Primeira Ordem: Influência dos Limites 57
4.2.2 Preditor Secante Polinomial de Primeira Ordem: Influência de σ^0 60
4.2.3 Performance das Versões BX e XB do Método de Fluxo de Carga Desacoplado Rápido Parametrizado 61
4.2.4 Performance da Versão BX do Fluxo de Carga Desacoplado Rápido Usando Potência Reativa de uma Barra PV (Q_{PV}) como Parâmetro 64

BCpIS - FEIS - UNESP

4.2.5 Performance do Preditor Secante Polinomial Modificado de Ordem Zero e do Polinomial de Primeira Ordem 67

4.2.6 Efeito do Chaveamento de Parâmetro no Método de Fluxo de Carga Desacoplado Rápido Parametrizado 69

CAPÍTULO 5 73

Conclusões 73

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 75

APÊNDICE 80

A. Artigos Publicados 80

B. Sistemas Testes IEEE 81

BCpIS - FEIS - UNESP

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Consumo de potência ativa 12

Figura 2.2 - Variação da magnitude de tensão com o carregamento 13

Figura 2.3 - Definição da margem de carregamento segura de pré e pós-contingência 18

Figura 2.4 - Definição do limite de operação segura usando curvas PV 19

Figura 2.5 - Curvas PV de pré e pós-contingência 22

Figura 3.1 - (a) Diagrama unifilar sistema 3 barras, (b) magnitudes de tensão, (c) ângulos de tensão, (d) potência reativa da barra PV, (e) determinantes normalizados 28

Figura 3.2 - Magnitude de tensão em função do fator de carregamento: (a) método convencional de Newton, λ como parâmetro, (b) método convencional de fluxo de carga desacoplado rápido, λ como parâmetro 30

Figura 3.3 - Sistema de três barras 37

Figura 3.4 - Versão BX do método de fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado, usando V_2 como parâmetro: (a) magnitude de tensão em função do fator de carregamento, (b) ângulos de tensão em função do novo parâmetro V_2 40

Figura 3.5 - Versão XB do método de fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado, usando, θ_2 como parâmetro: (a) magnitude de tensão em função do fator de carregamento, (b) ângulos de tensão em função do fator de carregamento 42

Figura 3.6 - Versão BX do método de fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado, usando μ como parâmetro: (a) magnitude de tensão em função do fator de carregamento, (b) potência reativa da barra PV , Q_{PV} em função do fator de carregamento 44

Figura 3.7 - Método da continuação com preditor tangente 46

Figura 3.8 - Comparação entre os método da continuação com preditor tangente e secante, parametrizado por λ 49

Figura 3.9 - Curvas PV de pré e pós-contingência..... 51

Figura 4.1 - Sistema IEEE-14: (a) Efeitos dos limites d *tap*'s e de reativos sobre a curva PV, (b) magnitude de tensão da barra crítica, (c) magnitudes de tensão nas barras PV, (d) ângulo de tensão da barra crítica..... 58

Figura 4.2 - Sistema IEEE –57: (a) Iterações Pθ/QV para $\sigma^0 = 0,5$ e passo = 0,01, com V_{31} como parâmetro, (b) Iterações Pθ/QV para $\sigma^0 = 1,0$ e passo = 0,01, com V_{31} como parâmetro, (c) Iterações Pθ/QV para $\sigma^0 = 0,8$ e passo = 0,01, com V_{31} como parâmetro..... 61

Figura 4.3 - Performance da versão XB do método de fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado, usando θ_{31} como parâmetro para o sistema IEEE-57 barras..... 62

Figura 4.4 - Sistema IEEE-57: (a) comparação entre a performance das versões XB do desacoplado rápido convencional usando λ como parâmetro, e a versão XB do desacoplado parametrizado usando θ_{31} como parâmetro, (b) comparação entre a performance das versões BX do desacoplado rápido convencional usando λ como parâmetro e a versão BX do desacoplado parametrizado usando V_{31} como parâmetro..... 63

Figura 4.5 - Performance do parâmetro Q_{PV} – Sistema IEEE-118: (a) preditor polinomial modificado de ordem zero, (b) preditor polinomial modificado de ordem zero versus preditor polinomial de primeira ordem ($\sigma^0 = 0,5$)..... 65

Figura 4.6 - Performance do esquema de parametrização pela potência reativa de uma barra PV – Sistema IEEE-118: (a) magnitude de tensão em função do fator de carregamento λ, (b) magnitude de função em função de k_{Qpv}.. 66

Figura 4.7 - Sistema IEEE – 118: (a) magnitude de tensão da barra crítica, (b) número de iterações *P*θ e *QV*, para V_{53} como parâmetro e $\sigma^0 = 0,5$, (c) tempo CPU normalizado para V_{53} como parâmetro e $\sigma^0 = 0,5$, (d) número de iterações *QV* para V_{53} como parâmetro e $\sigma^0 = 1$, (e) iterações *P*θ para θ_{53} como parâmetro e $\sigma^0 = 0,5$, (f) tempo de CPU normalizado para θ_{53} como parâmetro e $\sigma^0 = 0,5$..... 68

Figura 4.8 - Magnitudes e ângulos da tensão da barra *52* – Sistema IEEE-118..... 69

Figura 4.9 - Efeitos do chaveamento de parâmetros e do preditor secante nos métodos de fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado – Sistema IEEE 118: (a) magnitude de tensão da barra crítica, (b) número de iterações $P\theta$ e QV, (c) númer de iterações $P\theta$ e QV para tamanho dobrado do passo (σ^0_λ=1 e $\sigma^0_{\theta,V}$ = 0.5)..... 72

Figura B.1 - Sistema IEEE – 14 barras..... 81

Figura B.2 - Sistema IEEE – 30 barras..... 84

Figura B.3 - Sistema IEEE – 57 barras..... 88

Figura B.4 - Sistema IEEE – 118 barras..... 96

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Valores de λ para o Ponto de Máximo Carregamento..... 57

Tabela 4.2 - Influência do tamanho do passo nas versões fluxo de carga desacoplado rápido..... 70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPU – *Central Processing Unit*

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

MATLAB – *Matrix Laboratory*

MW – mega watts

MVAr – mega volt-ampère reativo

PMC – ponto de máximo carregamento

pu – por unidade

LISTA DE SÍMBOLOS

V – magnitude de tensão

θ – ângulo de tensão

S – potência aparente

P – potência ativa

Q – potência reativa

PQ – barra de carga

PV – barra de carga com controle de reativos ou barra de geração

λ – parâmetro de carga ou parâmetro de carregamento

J – matriz Jacobiana

σ - tamanho do passo a ser dado na direção do vetor

σ^0 – valor inicial para o tamanho do passo a ser dado na direção do vetor

unesp

RESUMO

Este trabalho apresenta os métodos de fluxo de carga desacoplado rápido continuado utilizando λ, V , θ e Q de uma barra PV como parâmetros associados a um preditor secante polinomial de primeira ordem, uma reta passando através das soluções atual e anterior, para se estimar a próxima. Além disso, é mostrado que estes métodos podem ser comutados durante o processo de traçado da curva PV, de forma a possibilitar a determinação eficiente (com poucas iterações) de todos os pontos. Os desempenhos das versões propostas são comparados entre si com o propósito de evidenciar suas características, bem como a influência dos limites da potência reativa e de *taps* de transformadores. Os resultados obtidos para os sistemas IEEE (14, 30, 57 e 118 barras) mostram que as características do método convencional são melhoradas e a região de convergência ao redor da solução singular é ampliada.

ABSTRACT

This work presents a continuation fast decoupled power flow methods using λ, *V*, θ and the reactive power equation at PV bus as parameters and a secant predictor which uses a first-order polynomial (a straight line) passing through the current and the previous solutions to predict the next solution. Besides, it is shown that these methods can be switched during the tracing process in order to efficiently determine all the PV curve points with few iterations. The performance of the proposed versions are compared to each other with the purpose of pointing out their features, as well as the influence of reactive power and transformer tap limits. The results obtained for the IEEE systems (14, 30, 57 and 118 buses) show that the characteristics of the conventional fast decoupled power flow method are enhanced and the region of convergence around the singular solution is enlarged.

BCpIS - FEIS - UNESP

CAPÍTULO 1

Introdução

A maioria das técnicas de análises utilizadas no planejamento e operação de sistemas de potência envolve cálculos de Fluxo de Carga. Através destas análises pode-se definir as características nominais e o carregamento dos equipamentos, bem como os requisitos de suporte de reativos para a manutenção do perfil de tensão em condições normais e de emergência. O fluxo de carga também forma a base de vários estudos tais como curtos-circuitos, partida de motores, estabilidade de ângulo e, particularmente, análise estática de estabilidade de tensão.

A estabilidade de tensão tem se tornado um assunto crítico pelo fato de aumentos contínuos de carga e restrições econômicas e ambientais impostas à construção de novas linhas de transmissão e usinas de geração, levarem os sistemas a operar próximos de seus limites, com reduzida margem de estabilidade. Com isso, um conhecimento exato da distância em que o ponto de operação do sistema se encontra do limite de estabilidade de tensão é crucial ao operador do sistema. Este operador deve possuir condições de avaliar se o sistema terá ou não um ponto de operação seguro após a ocorrência de um dado distúrbio, tais como: a saída de uma linha de transmissão ou uma súbita mudança no carregamento do sistema. As análises estáticas de estabilidade de tensão de sistemas de potência podem ser avaliadas através da obtenção do perfil de tensão das barras críticas do sistema em função de seus carregamentos (curvas PV, QV e SV). Estas curvas fornecem as condições de operação do sistema para diferentes níveis de carregamento, e têm sido usadas pelas empresas do setor elétrico para avaliar margens de estabilidade de tensão e áreas com propensão ao colapso de tensão [RRWG99]. Entre outras aplicações, estas curvas são usadas para determinar os limites de transferência de potência entre as áreas de um sistema, ajustar margens, observar o comportamento das tensões das barras do sistema em análise e comparar estratégias de planejamento.

Procedimentos automáticos de fluxo de carga utilizando o método convencional de Newton-Raphson foram adotados por muitas empresas para proceder estas análises. As



equações do fluxo de carga são essenciais para tais análises, visto que elas representam um limite para a região de operação. Caso estas equações não apresentem solução para uma condição específica de carregamento, conclui-se que a geração e a rede são fisicamente incapazes de suprir a carga requerida. Para que o suprimento seja possível serão necessárias mudanças no despacho de geração e/ou no sistema de transmissão [Les99]. Para sistemas com cargas que se comportam como de potência constante, o aumento gradual na carga levará a uma bifurcação sela-nó [Cañ93], que corresponde ao ponto de máximo carregamento. Um conjunto de pontos de máximo carregamento definem a fronteira entre as regiões de operação estável e instável do sistema [His95]. O cálculo destes pontos é importante para o conhecimento das margens de estabilidade de tensão, bem como para a análise modal, a qual é usada para identificar áreas do sistema com problemas de estabilidade de tensão e para determinar a estratégia mais adequada para suporte de potência reativa. Com o método convencional de fluxo de carga fica-se restrito à obtenção apenas da parte superior da curva (correspondente à operação estável). No ponto de máximo carregamento a matriz Jacobiana das equações do fluxo de carga torna-se singular e, conseqüentemente, o método convencional apresentará dificuldades numéricas. Estas dificuldades ocorrerão mesmo se forem usados cálculos com dupla precisão ou algoritmos antidivergentes [Chia95, Iwa81]. Além disso, embora o uso destes métodos associados a um bom controle do tamanho do passo permita o cálculo de pontos de operação bem próximos ao ponto de máximo carregamento [Man93], será sempre necessário ponderar se as situações de não convergência se devem a problemas numéricos ou a limitações físicas do sistema, o que nem sempre é obvio.

Os métodos da continuação são ferramentas poderosas e úteis para obtenção das curvas de solução de equações algébricas não lineares, mudando automaticamente o valor de um parâmetro [Sey94]. Ao contrário de programas de fluxo de carga convencional, ele pode calcular soluções do fluxo de carga tanto nas proximidades do ponto de máximo carregamento quanto no próprio ponto, onde programas tradicionais freqüentemente não convergem ou levam muito tempo para alcançar uma solução. Dentre os muitos métodos descritos na literatura, o mais usado consiste de quatro elementos básicos: um passo preditor, um passo corretor, um controle de tamanho de passo e um procedimento de parametrização [Sey94]. A parametrização se faz necessária para remover a singularidade

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

da matriz Jacobiana no ponto de máximo carregamento, a qual causa problemas numéricos no passo preditor ou no passo corretor [Sey94, Ajj92]. Os métodos da continuação foram propostos usando a matriz Jacobiana completa [Cañ93, Ajj92] e a matriz Jacobiana desacoplada [Bij97]. Bijwe e Tare [Bij97] apresentam um método da continuação baseado no desacoplamento da matriz Jacobiana, onde os efeitos das submatrizes não diagonais são levados em conta por meio de subesquemas iterativos. Uma vez que para condições de alto carregamento estas submatrizes não podem ser completamente ignoradas, seus efeitos são transferidos para os seus respectivos *mismatches*. Arya e Verma [Ary96] propuseram um novo método para o traçado da curva PV, através da parametrização da magnitude de tensão de uma barra de carga. Em [Chia95] foi proposto um preditor secante utilizando o comprimento de arco como parâmetro. Uma técnica aplicada com sucesso em vários sistemas [Sey94, Cañ93], consiste em definir um vetor perpendicular ao vetor tangente a um ponto da curva, e que passe pelos pontos previsto subsequente e um outro que se encontra sobre a curva da trajetória de soluções. Com esta técnica evita-se a necessidade de parametrização, entretanto, necessita-se de um bom controle de passo.

O amplo uso do método de fluxo de carga desacoplado rápido convencional para o cálculo de fluxo de carga, deve-se às suas características de velocidade e pequeno espaço de memória requerido. Porém, devido a problemas de convergência em alguns casos, muitos esforços têm sido feito para melhorar sua convergência [Chia95]. Várias pesquisas têm sido dedicadas ao desenvolvimento de algoritmos que exibam boas características de convergência e eficiência computacional. Em [Wan00] foi proposto um fluxo de carga desacoplado rápido robusto que pode ser aplicado a sistemas que apresentem tanto uma alta relação r/x quanto baixos valores de tensão. Além disso, a avaliação da estabilidade de tensão está tornando-se uma tarefa essencial tanto para o planejamento quanto para a operação do sistema. Seu aspecto mais importante é a determinação da margem de estabilidade e as ações de controle de forma a assegurar a estabilidade para um conjunto de diferentes condições de contingência. Isto é realizado por meio do traçado de curvas PV e QV [FTCT99, RRWG99, Fen00]. O RRWG requer que seus membros mantenham pelo menos 5% de margem de MW na curva PV, sob qualquer contingência simples. O cálculo de margens de estabilidade pelo método da continuação é um processo que consome muito tempo, uma vez que, em geral, um elevado número de contingências precisa ser analisado.

unesp

Devido a isso, muitos trabalhos foram direcionados na tentativa de se conseguir um método mais rápido para o cálculo da margem de estabilidade [Wan00, Fen00]. Portanto, qualquer melhoria nestes métodos em relação à redução de tempo de processamento, convergência e aumento da confiabilidade é de grande valor. Conseqüentemente, a idéia do uso do fluxo de carga desacoplado rápido em algoritmos da continuação, objetivando reduzir a carga computacional no traçado da curva PV, é muito atrativa. Em [Alv00] foi proposto o uso do fluxo de carga desacoplado rápido utilizando ou o carregamento (λ), ou a magnitude de tensão de uma determinada barra (V_k), ou o ângulo de fase da tensão de uma determinada barra (θ_k) como parâmetro, e uma técnica de previsão denominada de previsão trivial ou polinomial modificada de ordem zero [Sey94], que usa a solução atual e um incremento fixo no parâmetro (θ_k, V_k, ou λ) como uma estimativa para a próxima solução.

Este trabalho apresenta novos métodos obtidos com simples modificações do método de fluxo de carga desacoplado rápido, para traçar curvas PV de um sistema de potência. Este método de fluxo de carga desacoplado parametrizado usa o carregamento λ, ou a magnitude de tensão V_k, ou o ângulo de fase da tensão θ_k como parâmetro, e um preditor secante que usa um polinômio de primeira ordem (uma reta) passando através da solução atual e da anterior, para predizer a próxima solução. A principal vantagem desta técnica como será visto é a redução do número de iterações do passo corretor. É apresentada também a possibilidade do uso da potência reativa de uma barra PV como parâmetro da continuação no fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado. Deve ser enfatizado que as características dos métodos convencionais não só são preservadas como também melhoradas. A principal vantagem dos preditores secantes é que eles são relativamente simples em termos computacionais e não apresentam problemas relacionados à singularidade das matrizes Jacobianas

Inicialmente, o Capítulo 2 deste texto apresenta definições e conceitos de estabilidade de tensão, bem como os objetivos de um estudo de estabilidade de tensão e as técnicas utilizadas para obtenção de curvas PV de sistemas de potência.

O Capítulo 3 descreve os conceitos gerais do Método da Continuação de Newton e Desacoplado Rápido usados para o traçado das curvas PV. Neste capítulo será usado um sistema simples de 3 barras e 2 ramos para mostrar o potencial desses novos métodos.

unesp

No Capítulo 4 são mostrados os resultados obtidos para os sistemas IEEE 14, 30, 57 barras [Fre68] e 118 barras (http://www.ee.washington.edu/research/pstca/) da aplicação do Método da Continuação usando preditor secante de primeira ordem que é a metodologia alvo deste estudo, comparando com o preditor secante de ordem zero (trivial).

E, finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões deste trabalho de mestrado.

unesp

CAPÍTULO 2

Estabilidade de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência

2.1 Introdução

Atualmente vários fatores têm contribuído para o desequilíbrio entre o aumento da demanda e o crescimento dos sistemas elétricos de potência. Dentre os mais relevantes, pode-se citar as questões ambientais e as restrições econômicas. Esse desequilíbrio tem provocado um elevado carregamento em alguns elementos do sistema, tornando-se necessário um aumento significativo dos requisitos de potência reativa.

A nova legislação para o setor elétrico enfatiza o aumento dos investimentos através da concorrência entre as empresas do setor elétrico, seja na geração ou na comercialização da energia elétrica. Essa competitividade torna a configuração do sistema muito dinâmica, aumentando a complexidade das análises técnicas, tanto para a operação quanto para o planejamento.

As restrições econômicas e ambientais e a desregulamentação do setor elétrico podem, portanto, levar os sistemas elétricos a operar em situações de riscos de instabilidade de tensão com maior freqüência. Nesta perspectiva, os estudos sobre a estabilidade de tensão vêm recebendo grande atenção por parte dos meios acadêmicos, empresariais e de pesquisas. Somente com o conhecimento do fenômeno, com o desenvolvimento de ferramentas computacionais robustas e com a elaboração de critérios para análise do mesmo, será possível operar e expandir os sistemas de energia elétrica, de maneira segura e a um custo viável para as empresas e para a sociedade.

2.2 Estabilidade de Tensão

A estabilidade de sistemas de potência é definida como uma característica do sistema permanecer em um estado de equilíbrio para condições normais de operação e adquirir um aceitável estado de equilíbrio após uma perturbação [Cut98].



Historicamente a estabilidade do sistema de potência era baseada na manutenção do sincronismo entre os geradores síncronos, condição necessária para a operação estável. Este tipo de estabilidade, denominada recentemente por estabilidade de ângulo [Tay94], é regido pela dinâmica dos rotores das máquinas síncronas. Neste caso, a estabilidade pode ser definida em função do nível de perturbação grande ou pequena, sendo conhecida por estabilidade transitória ou estabilidade de pequenas perturbações [Kun93-1], respectivamente.

A partir da década de 70 muitos incidentes ocorridos nos sistemas de potência evidenciaram que a tensão também poderia afetar a estabilidade do sistema. Dentre estes incidentes podemos destacar:

- ⇨ França 1978 [Tay94]. O aumento de carga foi de 1600 MW maior que no dia anterior entre 7 e 8 h. A tensão na linha de transmissão de 400 kV esteve entre 342 e 374 kV por volta das 08:20 h. A baixa tensão reduziu algumas gerações térmicas e causou uma sobrecarga às 08:26 h. Durante o processo de restabelecimento um outro colapso ocorreu. A interrupção de carga foi de 29 GW e 100 GWh. O restabelecimento completo terminou às 12:30 h.
- ⇨ Bélgica 1982 [Tay94]. Um colapso total ocorreu por cerca de 4 minutos devido à desconexão de uma unidade de 700 MW durante um teste de comissionamento.
- ⇨ Suécia 1983 [Lof95a]. A perda de uma subestação de 400/220 kV devido a uma falta causou o desligamento de linhas em cascata e a saída de algumas unidades nucleares por proteção de sobrecorrente, conduzindo à isolação da região e um *blackout* por cerca de 1 minuto.
- ⇨ Flórida 1985 [Tay94]. Um incêndio causou a saída de 3 linhas de 500 kV e resultou em um colapso de tensão em uns poucos segundos.
- ⇨ WSCC USA 1996 [Tay97]. Um curto-circuito em uma linha de 345 kV iniciou uma cadeia de eventos levando a uma paralisação do sistema ocidental norte americano. A razão da paralisação foi rápida sobrecarga, colapso de tensão e instabilidade angular.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

Em muitos casos o fenômeno apresenta uma dinâmica relativamente lenta (até 30 minutos) e ocorre em conseqüência de uma pequena perturbação, como por exemplo:

- ⇨ Japão 1987 [Tay94]. Houve um aumento súbito de carga de um montante relativamente pequeno num sistema que já se encontrava altamente carregado (região não linear de operação). As tensões no sistema de 500 kV chegaram a 370 kV (0,72 pu), apesar da conexão de todos os capacitores *shunt* disponíveis.
- ⇨ Nos dias 24 e 25 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 [GOP99].
- ⇨ No dia 13 de novembro de 1997, a coincidência de temperaturas elevadas na região sudeste provocou um rápido esgotamento dos recursos de potência reativa e um afundamento generalizado da tensão do sistema. O desligamento automático de uma linha de transmissão em 230 kV, com cerca de 160 MW, provocou um colapso de tensão, e rejeição de 1210 MW na Área Rio de Janeiro/Espírito Santo [GOP99].
- ⇨ Sistema Sul do Brasil [Soa97]. Um estudo recente do sistema Sul do Brasil (RS e SC) mostrou que os recursos de geração e transmissão estão próximos de seus limites e as margens têm diminuído nos últimos anos. A experiência com a operação deste sistema, mostrou algumas perturbações em que o fenômeno da instabilidade de tensão se manifestou. A análise mostrou os mecanismos envolvidos nos afundamentos de tensão sem distúrbio prévio, observados no Sul, e deu uma idéia da proximidade dos limites de estabilidade do Sistema Sul atual. Também mostrou que, mesmo sem um grande distúrbio, há registro de ocorrências de afundamento de tensão durante o crescimento da carga na ponta, logo após o horário de verão, e algumas vezes nas rampas de carga, entre 9 e 16 h, nos meses de verão. Em 1996 ocorreu a menor tensão no sistema de 525 kV em SC: em Blumenau 0,757 pu, em Xanxerê 0,823 pu e em Palhoça 0,80 pu, às 19 h. Verificou-se, dos

unesp

> estudos realizados, que, de acordo com a estimativa de limite pela curva VQ, nesta ocasião operava-se com margem de estabilidade muito pequena, já que para valores em torno de 0,70 – 0,71 pu o comportamento da tensão em relação ao reativo começa a ser contrário ao esperado. A conclusão sobre os afundamentos foi a de que tem ocorrido muitas vezes uma estabilização da tensão num valor bem baixo. Alguns chamam de colapso parcial de tensão, no qual o desempenho do sistema é inaceitável porque o risco de *blackout* é grande, já que as tensões estão muito baixas e as correntes, muito altas. Nos geradores, usualmente, a tensão terminal está muito baixa; já estão sem reserva de reativos; só um corte de carga melhora as condições. Um colapso a zero é mais difícil de ocorrer.

Com a ocorrência desses eventos, a análise da estabilidade de tensão ganhou destaque, aumentando o interesse por parte dos engenheiros e das empresas ligadas ao setor de energia elétrica, visto que os sistemas de potência estão sendo operados mais freqüentemente em situações altamente estressadas e portanto têm se tornado mais complicados de se administrar.

Um sistema de potência é estável em tensão se após um distúrbio as tensões estiverem próximas das condições normais de operação. A instabilidade de tensão de um sistema de potência, na maioria dos casos, tem se caracterizado por um declínio progressivo e incontrolável da magnitude das tensões das barras de carga do sistema. Várias alterações nas condições de operação do sistema de potência contribuem para o mesmo tornar-se instável:

- ⇨ acréscimo no carregamento;
- ⇨ geradores, condensadores síncronos e controladores estáticos de reativos atingindo seus limites de potência reativa;
- ⇨ saídas de linhas de transmissão ou geradores;
- ⇨ comportamento de cargas face às variações de tensão;
- ⇨ variação automática de *taps* de transformadores;

unesp

- ⇨ sistemas de potência estressados, devido à falta de reforço de transmissão e falta de investimentos em geração;
- ⇨ uso excessivo de bancos de capacitores para compensação de potência reativa que, embora estendam os limites de transferência de potência, tornam o sistema mais inclinado a sofrer problemas de instabilidade de tensão.

O principal fator responsável pela instabilidade de tensão é a incapacidade do sistema em atender a demanda de potência reativa [Kun93-1].

O colapso de tensão é o resultado catastrófico de uma seqüência de eventos que levam para um perfil repentino de baixa tensão em uma parte significativa do sistema de potência.

O problema de estabilidade de tensão, assim como o da estabilidade de ângulo, pode ser analisado segundo dois aspectos: estabilidade de grandes e pequenas perturbações [Kun93-1].

2.3 Objetivos de um Estudo de Estabilidade de Tensão

A grande questão em torno do fenômeno da instabilidade de tensão é a determinação da margem (de estabilidade de tensão) dos sistemas elétricos, isto é, o quão longe um ponto de operação estável se encontra da instabilidade, além de identificar os pontos fracos do sistema de transmissão em relação à tensão do mesmo. Estas são questões extremamente complexas, as quais as empresas do setor elétrico nacional e internacional têm buscado responder.

As áreas de planejamento e de operação das empresas do setor estão investigando o fenômeno, procurando estabelecer procedimentos e critérios para servir de base para os estudos de estabilidade de tensão.

O estudo de estabilidade de tensão pode basicamente ser classificado em duas categorias: análises dinâmicas e análises estáticas. O principal objetivo da análise dinâmica é esclarecer os mecanismos envolvidos no fenômeno da instabilidade de tensão, através do detalhamento dos efeitos de todos os equipamentos de controle. Já a análise estática destina-se a avaliar a margem de estabilidade de tensão.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

2.4 Análises Dinâmicas

2.4.1 Simulações no Domínio de Tempo [Kun93-1, Cut98, PSP98]

O fenômeno da instabilidade de tensão é um processo dinâmico, que envolve a interação de vários componentes do sistema. As simulações não lineares no domínio do tempo propiciam a reprodução mais precisa possível do fenômeno da instabilidade de tensão. Elas são imprescindíveis para o estudo da coordenação dos dispositivos de controle, bem como da proteção. Porém, estas simulações requerem ferramentas apropriadas e um número elevado de dados, acarretando um alto custo computacional. Além disso, ela não propicia informações sobre o grau de estabilidade do sistema (margens). A sua aplicação é restrita à investigação de situações especificas de colapso de tensão [Gao92]. Estas limitações tornam o uso da abordagem dinâmica inviável tanto para a monitoração *on-line* do sistema quanto para a análise de grandes sistemas para os quais se necessita avaliar um grande número de condições e contingências.

2.4.2 Análise Modal [Sil97]

Um sistema de energia elétrica pode ser escrito por um conjunto de equações diferenciais e algébricas não lineares da seguinte forma:

$$\dot{x} = f(x, y, \lambda) \tag{2.1}$$

$$0 = g(x, y, \lambda) \tag{2.2}$$

onde f é uma função que descreve a dinâmica das cargas e dos geradores síncronos; g é uma função que representa a rede do sistema; x representa o vetor das variáveis de estado; y é um vetor que representa as variáveis algébricas (p. ex. as variáveis do fluxo de carga, ângulos e tensões das barras); e λ é um vetor de variáveis de entrada, ou seja, o parâmetro ou conjunto de parâmetros que conduzirá o sistema ao colapso de tensão (p. ex. carga total do sistema).

unesp

Para pequenas variações em torno do ponto de operação (x_0, y_0, λ_0), as formas linearizadas das equações (2.1) e (2.2) tornam-se:

$$\Delta \dot{x} = J_1 \Delta x + J_2 \Delta y + B_1 \Delta \lambda_1 \tag{2.3}$$

$$0 = J_3 \Delta x + J_4 \Delta y + B_2 \Delta \lambda_2 \tag{2.4}$$

onde $\mathbf{J_1}$, $\mathbf{J_2}$, $\mathbf{J_3}$ e $\mathbf{J_4}$ são as matrizes Jacobianas das funções *f* e *g* com relação às variáveis de estado e variáveis algébricas, respectivamente. As matrizes $\mathbf{B_1}$ e $\mathbf{B_2}$ são os jacobianos relacionados às variáveis de entrada λ_1 e λ_2, respectivamente.

Se a matriz Jacobiana $\mathbf{J_4}$ for não singular, a equação (2.4) poderá ser escrita da seguinte forma:

$$\Delta y = -J_4^{-1} J_3 \Delta x - J_4^{-1} B_2 \Delta \lambda_2 \tag{2.5}$$

Substituindo o valor de Δy na equação (2.3) tem-se:

$$\Delta \dot{x} = J_1 \Delta x + J_2 \left(- J_4^{-1} J_3 \Delta x - J_4^{-1} B_2 \Delta \lambda_2 \right) + B_1 \Delta \lambda_1 \tag{2.6}$$

Logo:

$$\Delta \dot{x} = \left(J_1 - J_2 J_4^{-1} J_3 \right) \Delta x + B_1 \Delta \lambda_1 - J_2 J_4^{-1} B_2 \Delta \lambda_2 \tag{2.7}$$

Ou:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + \overline{B_1} \Delta \lambda_1 + \overline{B_2} \Delta \lambda_2 \tag{2.8}$$

Onde $A = J_1 - J_2 J_4^{-1} J_3$, $\overline{B_1} = B_1$ e $\overline{B_2} = -J_2 J_4^{-1} B_2$. A matriz A e as matrizes B são, respectivamente, as matrizes de estado e de entrada do sistema.



2.5 Teoria das Bifurcações

Através da teoria da bifurcação pode-se predizer como um sistema se torna instável, estudando-o no limiar dessa instabilidade. Independentemente do tamanho ou da complexidade do modelo do sistema, existem poucas formas pelas quais o sistema se torna instável. A teoria da bifurcação descreve essas formas e os cálculos associados. As análises de bifurcação requerem que o modelo do sistema de potência seja especificado na forma de equações que contenham dois tipos de variáveis, de estado e parâmetros.

A bifurcação descreve mudanças qualitativas no comportamento do sistema como, por ex., perda de estabilidade [Cut98].

As bifurcações sela-nó e de Hopf são reconhecidas como as principais responsáveis pela instabilidade de tensão de sistemas de potência. Quando a matriz Jacobiana apresenta um autovalor simples igual a zero tem-se a bifurcação sela-nó, que é a mais comum em sistemas de potência, correspondendo ao desaparecimento de um equilíbrio estável do sistema. Quando a matriz tem um simples par de autovalores complexos que atravessam o eixo imaginário do plano complexo, tem-se a bifurcação de Hopf [Sey94, Cañ95-1]. Neste caso, o comportamento dinâmico do sistema muda, passa do equilíbrio a uma oscilação.

2.5.1 Bifurcações Sela-Nó

A bifurcação sela-nó é um fenômeno não linear e está relacionada a um modelo não linear como uma equação quadrática. Existem, no modelo de um sistema elétrico de potência, variáveis que se relacionam através de equações quadráticas. Estas relações tornam o modelo não linear. Com isso, o sistema está sujeito à ocorrência de bifurcações sela-nó.

Seja o sistema de duas barras mostrado na figura 2.1:

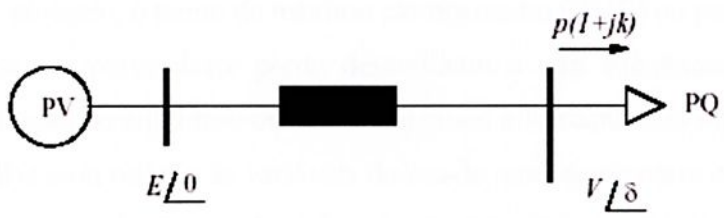


Figura 2.1 – Consumo de potência ativa

Foi escolhida a potência ativa p como parâmetro para o sistema. O vetor de estados do sistema, $\mathbf{z} = (V, \delta)$, especifica o fasor de tensão para a carga. A variação da magnitude de tensão V com o carregamento p é mostrado na Figura 2.2:

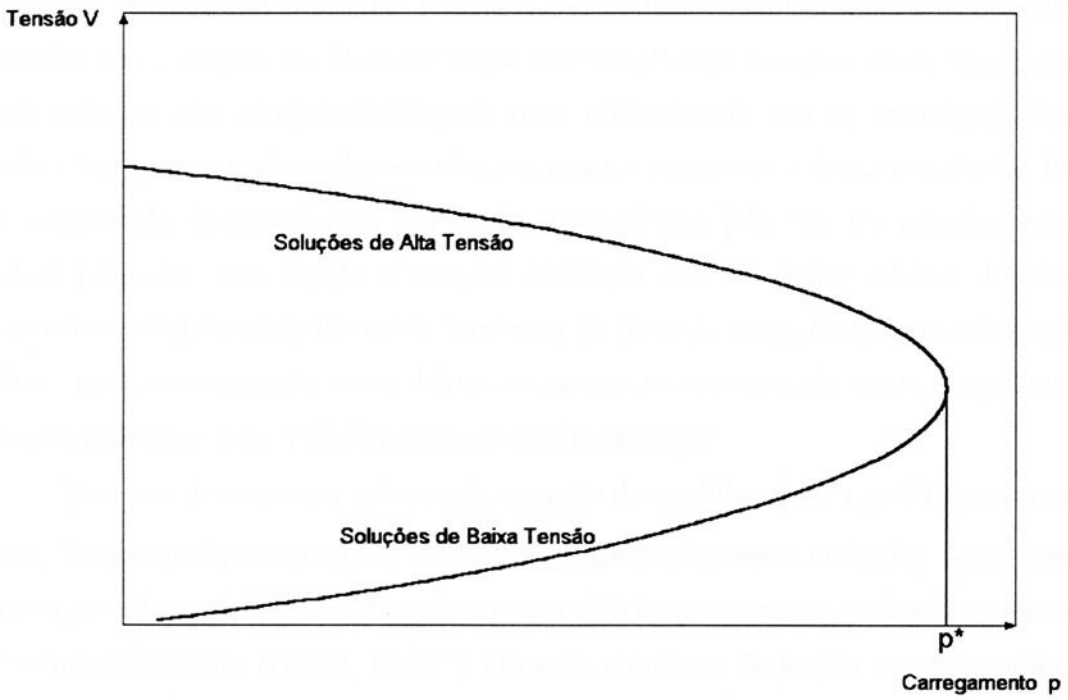


Figura 2.2 – Variação da magnitude de tensão com o carregamento

Para um baixo valor de carregamento existem duas soluções de equilíbrio, uma solução de alta tensão e outra de baixa tensão. Para a solução de alta tensão, tem-se valores inferiores de corrente em comparação à solução de baixa tensão. Na prática, as soluções de alta tensão são estáveis enquanto as de baixa tensão são instáveis. Com o acréscimo do carregamento, estas soluções se aproximam uma da outra até se tornarem uma única solução. Tem-se, portanto, o ponto de máximo carregamento (PMC) ou ponto de colapso de tensão. Acréscimos a partir deste ponto determinam a não existência de soluções de equilíbrio. As soluções de equilíbrio desaparecem numa bifurcação sela-nó no ponto $p*$.

Uma análise com relação às variáveis de estado que representam os ângulos de fase do sistema indica que a solução angular inferior corresponde à solução de alta tensão.

unesp

As extremidades da curva pV sinalizam o mesmo evento de equilíbrio instável e estável e, portanto, ocorrem para um mesmo carregamento p_*.

2.6 Análises Estáticas

Os métodos estáticos de análise da estabilidade de tensão são essencialmente baseados nas equações do fluxo de carga. Por envolverem somente equações algébricas, esses métodos são computacionalmente mais eficientes do que os métodos dinâmicos, sendo ideais para a maioria dos estudos nos quais é necessária a determinação dos limites de estabilidade de tensão para pré e pós-contingências [Gao92]. Os métodos estáticos podem propiciar uma rápida e simples avaliação das condições críticas do sistema, associadas à singularidade da matriz Jacobiana do fluxo de carga, bem como a definição de índices para a comparação entre diferentes pontos de operação de modo a se obter uma seleção qualitativa das condições mais críticas de operação.

Para um determinado valor de λ, o ponto de equilíbrio $\left(x(\lambda^*), y(\lambda^*)\right)$ para o qual a matriz Jacobiana do sistema (2.1) é singular, é matematicamente conhecido como ponto de bifurcação sela-nó (bifurcação singular), e tem sido freqüentemente associado ao fenômeno de colapso de tensão [PSP98, Dob89]. Ou seja, o colapso de tensão acontece como uma conseqüência dinâmica da bifurcação sela-nó e portanto, assumindo que os parâmetros do sistema estão variando lentamente, pode-se usar um modelo estático durante o período que precede o instante no qual a bifurcação ocorre.

A compreensão da bifurcação sela-nó requer um modelo dinâmico para explicar porque as tensões decrescem dinamicamente. Entretanto, é possível estimar o ponto de bifurcação sela-nó através da utilização de um modelo estático. As referências [Dob89, Sau90, Mor93, Cañ95-2] mostram que, sob certas condições, a análise do colapso de tensão pela abordagem dinâmica e estática conduz a resultados similares.

Todas as indicações seguintes ocorrem em um ponto de bifurcação sela-nó e podem ser usadas para caracterizar ou detectar uma bifurcação sela-nó:

⇨ dois pontos de equilíbrio unidos (um destes pontos deve ser instável);

unesp

- ⇨ a sensibilidade em relação ao parâmetro de carregamento de uma variável de estado típica é infinita. Isto resulta em uma inclinação infinita no diagrama de bifurcação no ponto de bifurcação ("nariz"da curva);
- ⇨ a matriz Jacobiana do sistema tem um autovalor nulo;
- ⇨ a matriz Jacobiana do sistema tem um valor singular nulo;
- ⇨ o determinante da matriz Jacobiana do sistema é nulo;
- ⇨ as dinâmicas do colapso, na bifurcação, são tais que o estado do sistema muda monotonicamente, a taxa de mudança é lenta inicialmente e rápida posteriormente.

Um aspecto importante que deve ser ressaltado é que, dependendo do modelo estático utilizado para representar a carga agregada do sistema, a localização do ponto de sela-nó muda significamente. No caso de um modelo de carga do tipo PQ constante, a bifurcação sela-nó indicará o ponto de máxima transferência de potência ou ponto de máximo carregamento, correspondendo ao "nariz" da curva PV [Cañ95-1, Cañ95-2]. Estes pontos pertencem à superfície que define a fronteira da região de solubilidade do fluxo de carga. Fora desta região, o fluxo de carga não tem solução real. Observa-se que cargas que exibem características de impedância ou corrente constantes não causam a instabilidade de tensão [Pal92].

Segundo Kundur [Kun93-1]: "*Um sistema é instável em tensão se, em pelo menos uma barra do sistema, a magnitude de tensão (V) decresce quando a injeção de potência reativa (Q) desta barra aumenta*" , ou ainda: *"Um sistema é estável em tensão se a sensibilidade V-Q é positiva para todas as barras do sistema e instável se esta sensibilidade V-Q é negativa para, pelo menos uma barra do sistema".*

2.6.1 Índices de Estabilidade

Estando o sistema de potência estressado, onde a instabilidade de tensão pode ocorrer quando a carga total sofre um aumento súbito e relativamente pequeno, é de grande valia, que o operador tenha em mãos, um índice que lhe mostre a condição do sistema em relação à instabilidade de tensão e a margem, ou seja, o valor máximo que a demanda total pode ter, sem causar a instabilidade de tensão. Este índice determina o grau de segurança de um sistema em relação a um possível colapso de tensão.

unesp

Diversas técnicas para obtenção de índices foram propostas, onde se destacam: múltiplas soluções do fluxo de carga, sensibilidade, autovalor, mínimo valor singular e determinante da matriz Jacobiana do fluxo de carga.

O objetivo destes índices é definir uma magnitude escalar que possa ser monitorada à medida que os parâmetros do sistema sofram variações. Estes índices deveriam apresentar um modelo previsível, sem sofrerem variações, de modo que previsões aceitáveis pudessem ser feitas. Entretanto, muitos desses índices apresentam um comportamento com variações muito pequenas numa ampla faixa de carregamento até que uma brusca variação é observada muito próxima ao ponto de colapso. Este comportamento é perigoso pois não mostra qualquer sinal de alerta para que em tempo real seja praticada uma ação.

2.6.2 Margem de Carregamento

Para um ponto de operação particular, a quantidade adicional de carga que causaria um colapso de tensão, em um modelo específico de acréscimo da mesma, é denominada margem de carregamento para o colapso de tensão. A margem de carregamento é o mais básico e amplo índice aceito de colapso de tensão. Esta margem é função da diferença entre o valor de um parâmetro correspondente a um evento e o seu valor atual. Existem várias escolhas para medir a mudança no carregamento, sendo uma delas a soma das variações absolutas na potência da carga. Freqüentemente as cargas são consideradas como tendo fator de potência constante e, assim, a variação no carregamento pode ser medida somente pelas mudanças na potência ativa.

Se a carga de um sistema é escolhida para ser o parâmetro de carregamento, pode-se traçar uma curva PV para o sistema. Neste caso, a margem de carregamento para o colapso de tensão é a variação de carga entre o ponto de operação e o "nariz"da curva PV.

Algumas vantagens do uso da margem de carregamento como índice de colapso de tensão são [PSP98]:

- ⇨ é direta, bem aceita e facilmente entendida;
- ⇨ não é baseada em um modelo particular do sistema, requerendo apenas um modelo estático do sistema;
- ⇨ é um índice preciso que leva plenamente em conta as não linearidades e limites (limites de potência reativa e de *tap*) do sistema;

unesp

- ⇨ uma vez obtida a margem de carregamento, é fácil calcular sua sensibilidade com relação a qualquer parâmetro ou controle do sistema de potência.

Como desvantagens da margem de carregamento como índice de colapso de tensão, destacamos:

- ⇨ ela requer cálculos em pontos além do ponto de operação atual, por isso, é computacionalmente mais problemática que índices que utilizam somente informações do ponto de operação;
- ⇨ ela requer a consideração de uma direção para o acréscimo de carga. Algumas vezes, esta informação não é avaliada corretamente.

A margem de carregamento pode ser calculada fazendo-se pequenos incrementos na carga e recalculando os fluxos de carga em cada novo valor pós-incremento até o "nariz" da curva ser atingido. Na prática, elaborações desta idéia são utilizadas com os métodos diretos e da continuação.

2.6.3 Curvas PV

Os primeiros estudos e a primeira preocupação relacionados ao colapso de tensão consistiam em se conhecer a máxima potência que podia ser suprida a uma carga, mantendo níveis de tensão operacionais aceitáveis. Com isso, era fundamental se conhecer uma relação entre a potência e a tensão nas barras de carga. As pesquisas levaram à tradicional e já conhecida curva PV, que representa uma relação quadrática entre a potência e a tensão, numa determinada barra da rede. Esta curva tem sido extensivamente utilizada nos estudos operacionais e de planejamento de sistemas de potência de diversos paises, se tornando, por isso, alvo de muitos estudos até os dias atuais [FTCT99, RRWG99].

Na figura 2.3 estão apresentadas as curvas PV e alguns critérios preventivos de avaliação do colapso de tensão utilizados em diversas concessionárias.

unesp

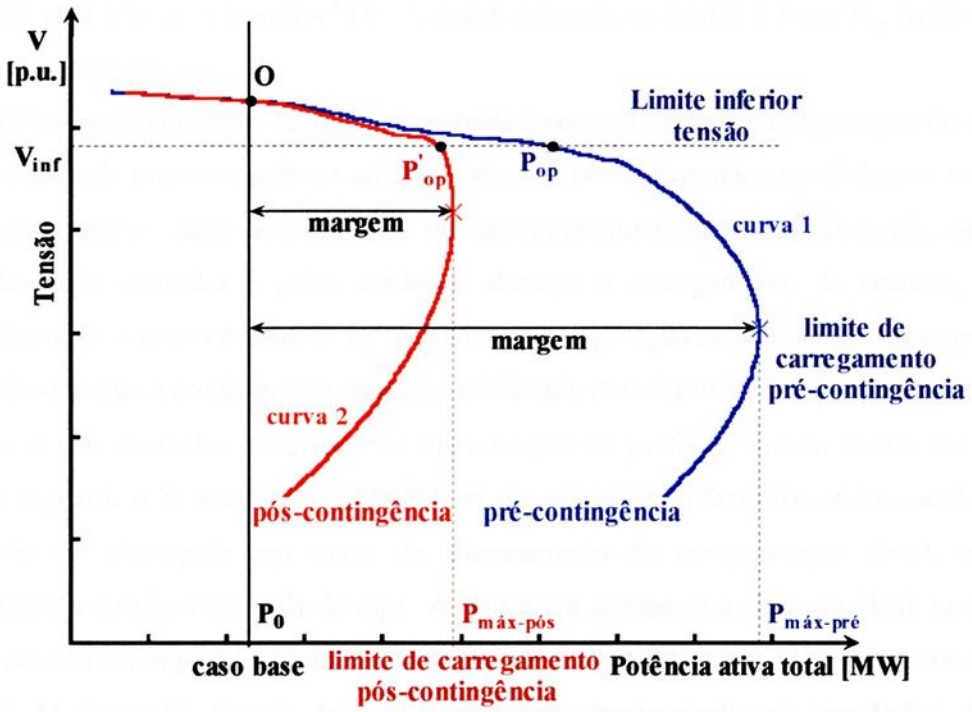


Figura 2.3 – Definição da margem de carregamento segura de pré e pós-contingência

Considere um ponto de operação estável (O) denominado caso base. Este ponto pode ter sido obtido através do estimador de estado ou por meio de um programa de fluxo de carga. O método da curva PV determinará a capacidade do sistema através do aumento gradual da carga total do sistema. Geralmente, com o aumento da carga, a tensão do sistema tenderá a diminuir, como mostrado na figura 2.3. Existe um limite para este aumento de carga após o qual o sistema entrará em colapso. Este limite corresponde ao limite de carregamento de pré-contingência ($P_{máx-pré}$) ou também denominado ponto de máximo carregamento. Entendem-se como carregamento, não somente um aumento da carga, mas também um aumento da transferência de potência entre áreas, ou um aumento da carga de determinadas áreas ou ainda um aumento da carga de barras específicas. Este aumento pode ser definido em termos de potência ativa (P), potência reativa (Q) ou potência aparente (S) [Xu93, Cut98]. Por exemplo, se este aumento for em termos de Q, obtém-se a curva VQ.

O mais usual dos limites é o denominado limite de carregamento de pós-contingência ($P_{máx-pós}$), utilizado para medir a robustez do sistema após contingências [CIGRÉ98]. Em alguns casos costuma-se usar o critério de mínima tensão (V_{inf} = 0,9 pu) [GRID98]. Neste caso, a máxima carga operacional admitida será aquela onde o nível de

tensão cai para um valor aceitável (V_{inf}), como indicado na figura 2.3 por P_{op} (caso base) e P'_{op} (para contingência).

O limite de operação segura corresponde à restrição para o carregamento do sistema nas condições de pré-contingência tal que o sistema possa suportar uma dada contingência. Mais precisamente, dada uma direção de carregamento previamente definida, as ações realizadas pelo operador e pelos controles durante o carregamento do sistema, e uma contingência, o objetivo é determinar o quanto a configuração de pré-contingência pode ser carregada sem que a contingência cause instabilidade [CIGRÉ98]. Usualmente, as ações do operador e dos controles consistem na manutenção do perfil de tensão dentro de limites e/ou em maximizar as reservas rápidas de reativos objetivando fazer frente aos incidentes, o que pode ser alcançado por meio de chaveamento de compensação *shunt*, controle secundário de tensão e controle de *taps*. A figura 2.4 apresenta a situação ideal, na qual as ações manteriam um perfil de tensão pré-contingência perfeitamente plano. O ponto C seria o limite de operação segura, isto é, o máximo carregamento nas condições de pré-contingência para o qual ainda existe um ponto de operação de pós-contingência.

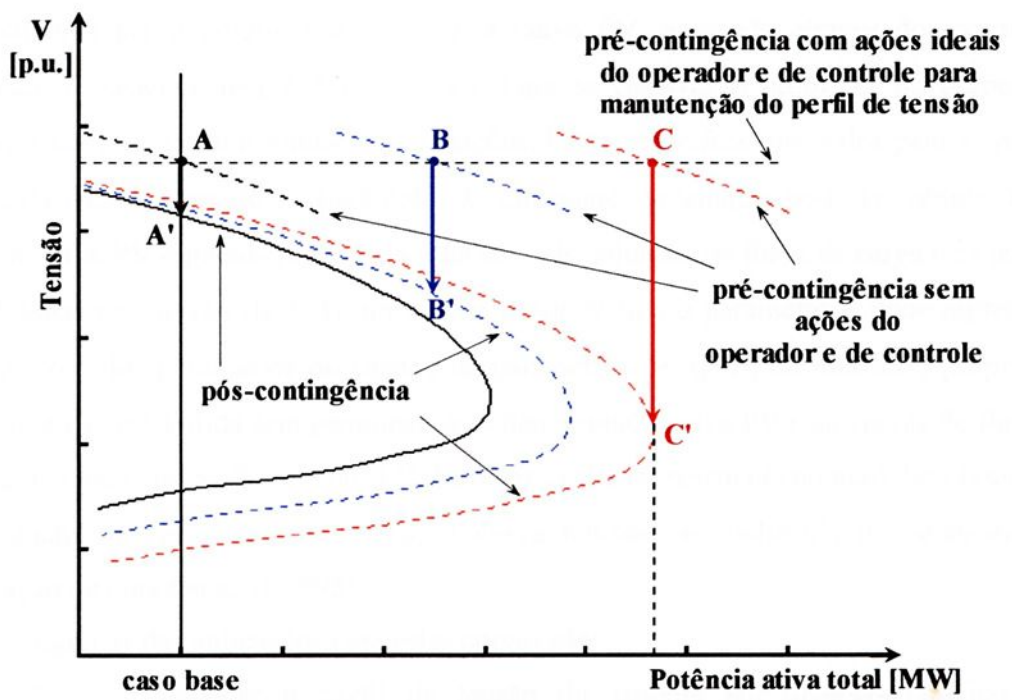


Figura 2.4 – Definição do limite de operação segura usando curvas PV

2.6.4 Métodos Utilizados para a Obtenção da Margem de Carregamento

2.6.4.1 Fluxo de Carga Convencional

Dentre os métodos propostos para a obtenção da margem de carregamento de um sistema de potência, o uso das técnicas de fluxo de carga convencional é a idéia mais natural e imediata, visto que elas estão sempre disponíveis e são fáceis de usar. Considere as equações do fluxo de carga na sua forma mais geral:

$$G(x,\lambda)=0 \qquad x\in\Re^n, G\in\Re^n, \lambda\in\Re \tag{2.9}$$

onde x representa o vetor correspondente aos módulos (V) e os ângulos de fase (θ) das tensões das barras do sistema e λ representa o fator de carregamento do sistema. Na formulação usual do fluxo de carga, G e x possuem as mesmas dimensões. Com a inclusão do parâmetro λ o sistema de equações passa a ter n equações com $n+1$ variáveis que definem uma curva unidimensional $x(\lambda)$, a curva PV, passando através dos pontos de operação do sistema de potência (x_i , λ_i). Para se resolver o problema do número de variáveis ser maior que o número de equações, basta especificar um valor para λ. Assim, para cada valor fornecido ao parâmetro λ, um ponto de solução pode ser obtido. Desta forma a curva PV é gerada realizando uma série de soluções de fluxo de carga e as tensões são plotadas em função de λ. É importante observar que o parâmetro λ pode representar qualquer um dos parâmetros do espaço de parâmetros (P, Q, S, ou mesmo o próprio λ), sendo que a curva obtida será genericamente denominada curva PV (ou curvas do fluxo de carga), ou ainda curva QV, SV ou λV. Se a variável é representada no eixo das abscissas e o parâmetro no eixo das ordenadas, a curva também é conhecida por diagrama de bifurcação ou curva *nose* [PSP98].

Algumas das aplicações para estas curvas são:

- ⇨ levantar o perfil de tensão do sistema em diversas condições de carregamento;
- ⇨ investigar a sensibilidade do estado do sistema com relação à variação do parâmetro;

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

- ⇨ encontrar o ponto de máximo carregamento numa direção particular;
- ⇨ encontrar pontos de múltiplas soluções.

O método de Newton Raphson é o processo iterativo mais utilizado para a solução das equações algébricas não lineares (2.9), cuja i-ésima iteração, para um dado valor de $\lambda = \lambda_0$ é dada por:

$$\begin{aligned} \Delta \boldsymbol{x}_i &= -\left(\boldsymbol{J}(\boldsymbol{x}_{i-1})\right)^{-1} \boldsymbol{G}(\boldsymbol{x}_{i-1}, \lambda_0) \\ \boldsymbol{x}_i &= \boldsymbol{x}_{i-1} + \mu_i \Delta \boldsymbol{x}_i \end{aligned} \tag{2.10}$$

onde $\boldsymbol{J}$ é a matriz Jacobiana do fluxo de carga $\left(\boldsymbol{J} = \partial \boldsymbol{G} / \partial \boldsymbol{x}\right)$ e μ_i é um multiplicador escalar usado para controlar a atualização das variáveis a cada iteração. Para o método de Newton μ_i é mantido constante e igual a 1 durante todo processo iterativo. Se for usada uma técnica de controle de passo no fluxo de carga, μ_i será reduzido, para assegurar que a atualização das variáveis a cada iteração convirja de maneira ótima para a solução.

É habitual nas análises de sistema de potência, a obtenção das informações de sensibilidade em torno de um ponto de operação, efetuando a variação dos parâmetros manualmente. Este procedimento também é usado para se obter o ponto de máximo carregamento. Enquanto o sistema é progressivamente carregado, as soluções (pontos da curva PV) são obtidas pelo algoritmo (2.10) até que ocorra a divergência do fluxo de carga. Neste ponto a matriz Jacobiana é singular e, conseqüentemente, o ponto corresponde ao ponto de máximo carregamento. Acontece que esta divergência pode também ocorrer em conseqüência de uma má condição inicial, devido ao algoritmo, ou à própria condição de operação da rede.

Outros métodos que usam técnicas antidivergentes [Chao95] ou técnicas de otimização [Iwa81], utilizados para melhorar a convergência na região mais não linear (de maior carregamento), também não eliminam a singularidade. Estes métodos permitem o cálculo de pontos muito próximos ao ponto de máximo carregamento [Man93], porém será necessário ponderar se a divergência se deu em conseqüência de problemas numéricos ou da limitação física do sistema. Isto não significa que o ponto não é bem definido ou

unesp

calculável, mas que este simplesmente requer que se acrescente por meio de uma equação, a informação perdida com a redução do *rank* da matriz Jacobiana.

Para se obter resultados confiáveis próximos ao ponto de máximo carregamento, o método convencional de Newton precisa ser modificado para se eliminar a singularidade da matriz Jacobiana. Dois métodos têm sido aplicados a sistemas de potência com esse objetivo: o método da continuação e o método direto.

2.6.4.2 Método da Continuação

Através da curva PV da figura 2.5 observa-se que não se deve monitorar apenas a variação da tensão para se detectar a proximidade do colapso, ou os efeitos dos limites ou contingências sobre o carregamento [Man93].

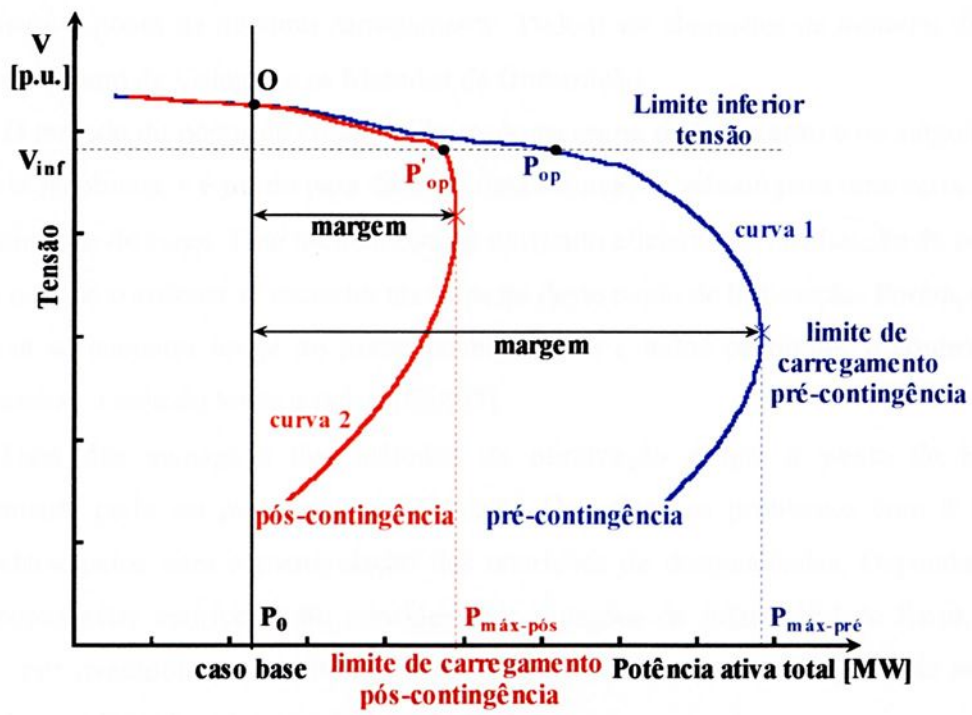


Figura 2.5 – Curvas PV de pré e pós-contingência

Nota-se na figura que o perfil de tensão é praticamente o mesmo até a proximidade do ponto de operação P'_{op}. Verifica-se que se o sistema se encontra no ponto P_{op} não mais será possível operar o sistema em condições de contingência. Caso o sistema se encontre no ponto P'_{op} um pequeno aumento de carga também levará o sistema a uma condição de

colapso. Além disso, pode-se verificar que a tensão, para os dois pontos, encontra-se acima do valor mínimo permitido (V_{inf}). Portanto, é mais seguro obter o perfil de tensão completo, isto é, até o ponto de colapso, em ambas condições de operação, utilizando-se para isso sucessivas soluções do fluxo de carga, ou métodos da continuação. Estes métodos permitem o traçado completo da curva PV variando automaticamente o parâmetro λ, sem a preocupação com a singularidade da matriz Jacobiana. O método da continuação será abordado com maiores detalhes no próximo capítulo.

2.6.4.3 Métodos Diretos

Estes métodos foram assim denominados por possibilitarem o cálculo direto do ponto de máximo carregamento, sem a determinação dos demais pontos existentes entre o caso base e o ponto de máximo carregamento. Podem ser chamados de métodos diretos o Método do Ponto de Colapso e os Métodos de Otimização.

O método do ponto de colapso é baseado na teoria da bifurcação e na singularidade da matriz Jacobiana, e é usado para detectar uma bifurcação sela-nó para uma certa direção de crescimento de carga. Este método tem-se mostrado eficiente na localização do ponto de sela-nó quando o sistema se encontra muito perto deste ponto de bifurcação. Porém, quando o sistema se encontra longe do ponto de bifurcação e todos os limites e controles são considerados, o método tende a falhar [Cañ93].

Uma das vantagens dos métodos de otimização é que o ponto de máximo carregamento pode ser precisamente calculado. Os principais problemas com o método estão relacionados com a manipulação das restrições de desigualdades. Dependendo do modo como estas restrições são consideradas, situações de infactibilidade física podem ocorrer, por exemplo, quando um gerador atinge o limite máximo de potência reativa a tensão do gerador sobe, ao invés de cair [Cut98].

Outros trabalhos foram realizados para eliminar a singularidade da matriz Jacobiana através da modificação do método convencional de Newton.

Muitos métodos propostos para determinar algumas (ou todas) múltiplas soluções do fluxo de carga também permitem o traçado da curva PV inclusive para sistemas mal condicionados ou altamente carregados. Note-se que, a despeito das soluções da parte



inferior da curva PV terem ou não algum significado prático, um par destas soluções, isto é, a solução de alta tensão e a sua respectiva solução de baixa tensão, provê informações a respeito da estabilidade relativa do respectivo ponto de operação. Diversos índices utilizados para avaliar a estabilidade de tensão são baseados na existência destas duas soluções.

unesp

CAPÍTULO 3

Métodos da Continuação

3.1 Introdução

Os objetivos deste capítulo são introduzir os conceitos básicos dos métodos da continuação de Newton e desacoplado rápido existentes que são utilizados para o traçado da curva PV. Demonstra-se que estes métodos, uma vez adequadamente formulados, podem ser usados para a obtenção do ponto de máximo carregamento (PMC) de um sistema de potência. Os métodos foram separados em dois grupos: métodos de Newton e desacoplado rápido. Os parâmetros utilizados foram o fator de carregamento λ, a magnitude de tensão de uma determinada barra V_k, o ângulo de fase desta tensão θ_k, e a potência reativa de uma barra PV (Q_{PV}) qualquer. Primeiramente são apresentados os métodos parametrizados por λ, evidenciando a impossibilidade de seu uso para a obtenção do ponto de máximo carregamento. A seguir, mostra-se a possibilidade da determinação do ponto de máximo carregamento pela troca de parâmetro (V_k, θ_k, ou Q_{PV}). Também são apresentados o preditor tangente, o preditor secante de ordem zero, que será utilizado ao longo deste capítulo, e o secante que usa um polinômio de primeira ordem (uma reta) passando através da solução atual e da anterior, para predizer a próxima solução.

3.2 Curvas PV - Método da Continuação

As curvas PV podem ser obtidas por sucessivas soluções das equações de fluxo de carga, aumentando gradualmente a carga, através da variação de um parâmetro (λ), em uma direção pré-definida. As potências ativa (P) e reativa (Q) das barras de carga são as variáveis independentes, enquanto que as magnitudes de tensão (V) e os ângulos de tensão (θ) são as variáveis dependentes. Dependendo da direção do incremento de carga, diferentes pontos de máximo carregamento podem ser obtidos. A proposta do fluxo de

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

carga continuado consiste em encontrar uma continuidade de soluções do fluxo de carga para uma dada condição de mudança de carga. O objetivo do método é traçar perfis de tensão das barras a partir de uma solução inicial conhecida (caso base) e usando um esquema preditor-corretor para encontrar subseqüentes soluções até o ponto de máximo carregamento. Deste processo pode ser obtida a margem de estabilidade de tensão, e informações adicionais sobre o comportamento das tensões das barras do sistema com o aumento do nível de carregamento.

Em geral as equações de fluxo de carga para o sistema podem ser escritas como:

$$\mathbf{G}(\theta, \mathbf{V}, \lambda) = 0 \tag{3.1}$$

Ou ainda:

$$\begin{aligned} &\lambda \mathbf{P}^{\mathbf{esp}} - \mathbf{P}(\theta, \mathbf{V}) = \mathbf{0} \quad \text{para barras PQ e PV} \\ &\lambda \mathbf{Q}^{\mathbf{esp}} - \mathbf{Q}(\theta, \mathbf{V}) = \mathbf{0} \quad \text{para barras PQ} \end{aligned} \tag{3.2}$$

onde $\mathbf{V}$ é o vetor das magnitudes de tensões nodais, θ é o vetor dos ângulos de fase nodais, λ é o fator de carregamento, $\mathbf{P^{esp}} = \mathbf{P_g} - \mathbf{P_c}$ é a diferença entre as potências ativas geradas e consumidas para as barras de carga (PQ) e de geração (PV) e $\mathbf{Q^{esp}} = \mathbf{Q_g} - \mathbf{Q_c}$ é a diferença entre as potências reativas gerada e consumida para as barras PQ. Para o carregamento do caso base, $\lambda = 1$.

Nas equações (3.2) assume-se que o aumento de carga do sistema é proporcional ao caso base (λ=1) e que o fator de potência é mantido constante [RRWG99, Tay94]. As potências ativa P_k^{esp} e reativa Q_k^{esp} poderiam também ser definidas como $C_{p,k}^{esp} x S_k^{esp} \cos\varphi_k^{esp}$ e $C_{q,k}^{esp} x S_k^{esp} \operatorname{sen}\varphi_k^{esp}$, respectivamente. Assim, seria possível realizar uma variação de carregamento individual, isto é, para cada barra do sistema, considerando para cada uma, um crescimento de carga com fatores de potência diferentes aos do caso base. Tradicionalmente, entretanto, assume-se que o aumento de carga de uma determinada área é feito com fator de potência constante e proporcional ao carregamento do caso base com modelo de carga de potência constante, visto que este fornece a condição de operação mais segura para o sistema [RRWG99,Chia99].

unesp

3.2.1 Método de Newton Parametrizado por λ

As equações (3.2) podem ser resolvidas usando um método de fluxo de carga convencional, como o Newton, por exemplo, calculando as soluções para várias condições de carregamento. Isto é feito incrementando λ gradualmente a partir de λ = 1 (caso base) até um valor para o qual não haja solução (o cálculo do fluxo de carga não converge ou diverge). Neste caso λ é tratado como um parâmetro (variável independente) no processo iterativo de Newton. No caso em que λ é usado como parâmetro, a linearização das equações do fluxo de carga de acordo com o método de Newton fornece:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \hline \mathbf{M} & \mathbf{L} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} = -\mathbf{J} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

onde **H, N, M** e **L** são as submatrizes que correspondem às derivadas das potências ativa e reativa em relação aos ângulos e magnitudes de tensões, respectivamente. **ΔP** e **ΔQ** são os *mismatches* de potência ativa e reativa respectivamente, enquanto **ΔV** e Δθ são as correções das magnitudes e ângulos das tensões.

Como exemplo, a figura 3.1(a) mostra o diagrama unifilar de um sistema de 3 barras e 2 ramos, para o qual se deseja obter o máximo carregamento. Ao variar-se o parâmetro λ, o ponto de operação do sistema (**θ, V**) mudará, como mostrado nas figuras 3.1(b) e 3.1(c). O ponto A corresponde ao ponto de máximo carregamento, no qual a matriz Jacobiana (**J**) torna-se singular, conforme se pode observar na figura 3.1(e) que mostra a variação do determinante da Jacobiana à medida que λ varia.

unesp

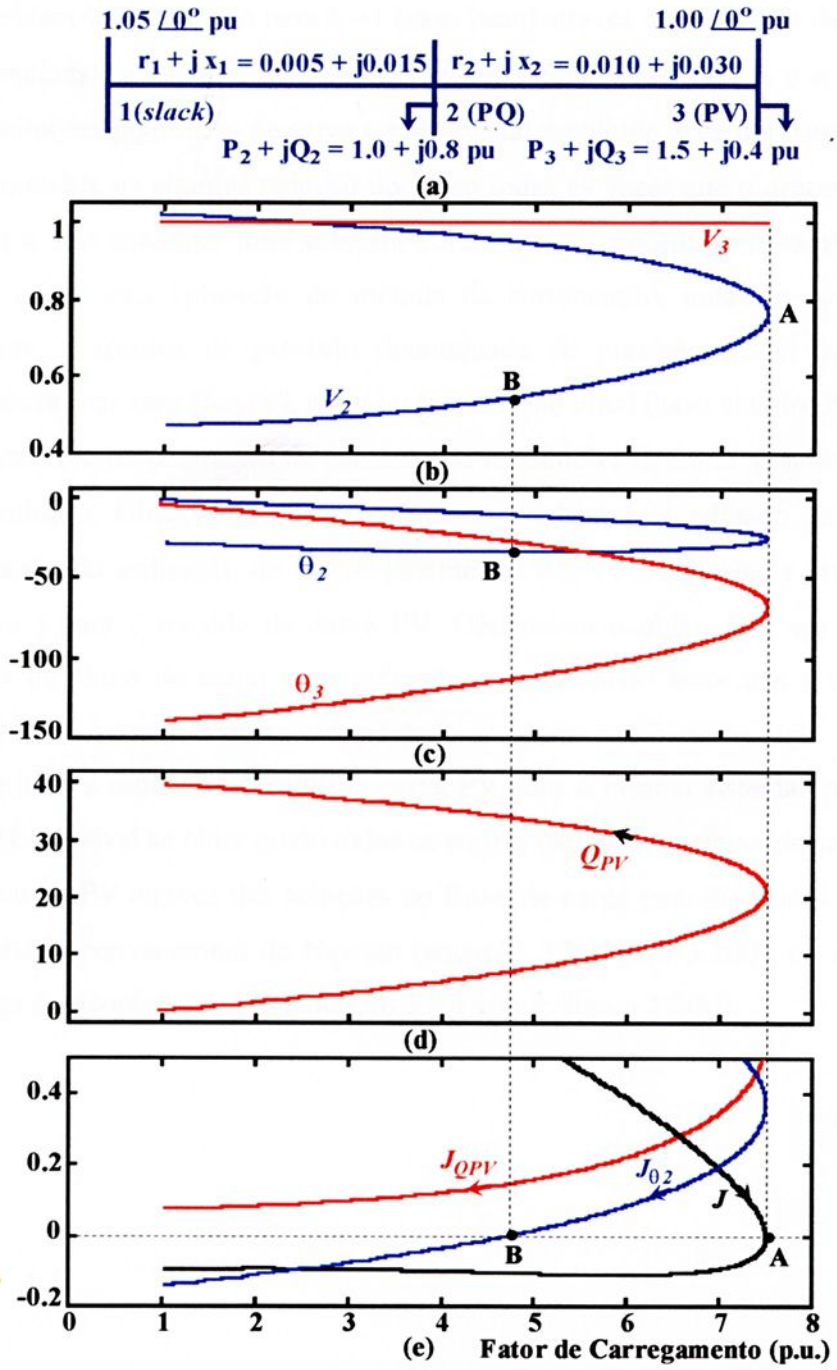


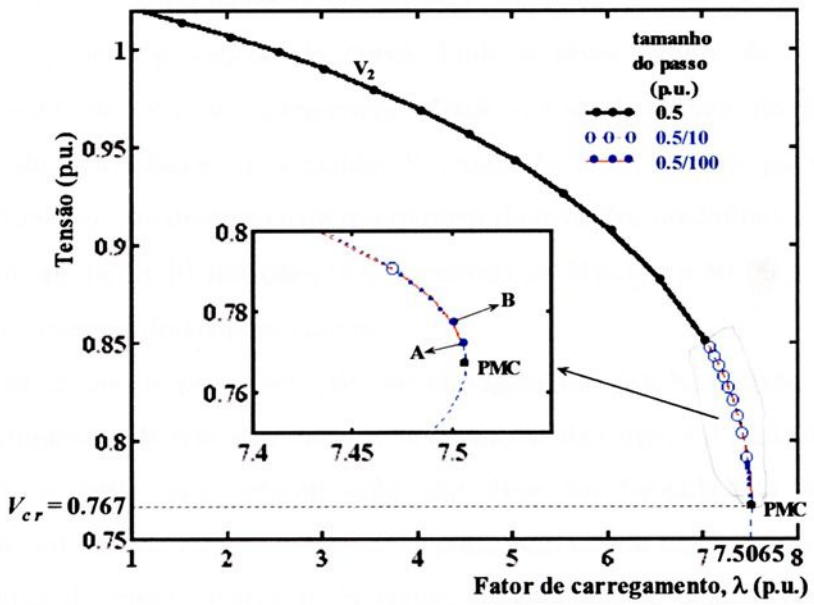
Figura 3.1 – (a) Diagrama unifilar sistema 3 barras, (b) magnitudes de tensão, (c) ângulos de tensão, (d) potência reativa da barra PV, (e) determinantes normalizados.

Para esclarecer melhor a dificuldade que existe para se obter o ponto de máximo carregamento, ponto A, por meio do uso dos métodos convencionais de fluxo de carga, de Newton e desacoplado rápido, será apresentado a seguir o procedimento mais comum que

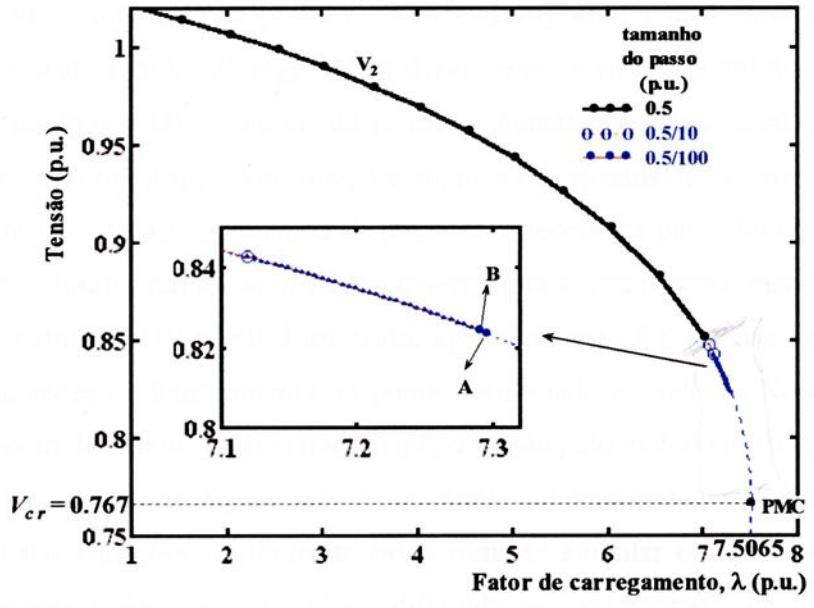
consiste na obtenção da solução para $\lambda = 1$ (caso base) através da utilização de um fluxo de carga convencional, a predefinição de incrementos sucessivos para λ e a obtenção da respectivas soluções pelo fluxo de carga convencional escolhido, e de um controle de passo (em λ) que consiste na simples redução do passo todas as vezes que o processo numérico divergir, isto é, não encontrar uma solução. Portanto, esse procedimento também pode ser considerado como uma aplicação do método da continuação, uma vez que se utiliza, implicitamente, a técnica de previsão denominada de previsão trivial ou polinomial modificada de ordem zero [Sey94], a qual usa a solução atual (caso anterior convergido) e um incremento fixo no parâmetro da continuação escolhido (λ), como uma estimativa para a próxima solução. Observa-se que esse método também será adotado ao longo deste capítulo, quando da utilização de outros parâmetros (θ_k, V_k e a potência reativa de uma barra PV,Q_{PV}) para o traçado da curva PV. Observa-se também que, em geral, a não convergência do fluxo de carga é considerada como estando associada à existência de múltiplas soluções, ao método numérico adotado, ou a uma má inicialização.

A figura 3.2 mostra o traçado da curva PV para o mesmo sistema apresentado na figura 3.1(a).É possível se obter quase todos os pontos (soluções do fluxo de carga) da parte superior da curva PV através das soluções do fluxo de carga para diferentes valores de λ usando o método convencional de Newton (equação 3.3, figura 3.2(a)), ou o método do fluxo de carga desacoplado rápido (equação 3.8 a seguir, figura 3.2(b)).

unesp



(a)



(b)

Figura 3.2 – Magnitude de tensão em função do fator de carregamento: (a) método convencional de Newton, λ como parâmetro, (b) método convencional de fluxo de carga desacoplado rápido, λ como parâmetro.

Como pode ser verificado nestas figuras, diferentes tamanhos de passos foram usados para λ durante o traçado da curva. Pode-se obter pontos de operação muito próximos ao ponto de máximo carregamento desde que um bom controle do tamanho do passo seja usado. As reduções no tamanho do passo são feitas sempre que o processo de solução não converge (ou diverge) para um número de iterações predefinido. No caso deste exemplo foram adotados 10 iterações para o método de Newton e 50 Pθ e 50 QV meias iterações para o método desacoplado rápido.

Observa-se que o ponto de máximo carregamento está associado às limitações físicas da configuração da rede de potência, às condições da carga, à direção de aumento da carga, etc, e, portanto, sua determinação não deve ser baseada em uma limitação matemática de um método numérico. Como se pode verificar na figura 3.2, o ponto onde o cálculo do fluxo de carga diverge pode variar, dependendo de qual método esta sendo usado no cálculo. O ponto λ = 7,505 pu (ponto A na figura 3.2(a)) onde o método de Newton diverge, é diferente do ponto λ = 7,295 pu (ponto A na figura 3.2(b)) onde o método desacoplado rápido, diverge. Além disso, esses pontos são obtidos de diferentes soluções prévias (ponto B), e, apesar do pequeno tamanho de passo usado, o número de iterações necessário foi, respectivamente, 3 e 30, para os métodos de Newton e desacoplado rápido. Uma nova redução no tamanho do passo será necessária para obter pontos além do ponto A, caso contrário ambos os métodos divergem com um número menor de iterações do que as predefinidas (10 e 50). Entretanto, apesar da redução do tamanho do passo, o número de iterações de fato aumenta. O ponto obtido pelo método de Newton está mais próximo do ponto de máximo carregamento que o obtido pelo método desacoplado rápido.

Como mostrado na figura 3.1(e), no ponto de máximo carregamento a matriz Jacobiana (**J**) das equações do fluxo de carga torna-se singular e, conseqüentemente, os métodos convencionais apresentarão dificuldades numéricas devido ao mau condicionamento das matrizes. A singularidade da matriz Jacobiana no ponto de máximo carregamento é devido à redução de seu *rank*. Isto não significa que no ponto de máximo carregamento o fluxo de carga não tenha solução. Na verdade, esta solução existe, é única, e é bem definida. Porém, é necessário compensar a informação perdida com a redução do *rank* para se obter a solução. Em geral, isto é feito adicionando equações parametrizadas [Sey94]. Assim, pontos muito próximos ao ponto de máximo carregamento podem ser

unesp

obtidos se um bom controle do tamanho de passo é usado. Não obstante, dificuldades numéricas ocorrem no ponto de máximo carregamento e próximo a ele. Então, o sucesso de obtenção da solução do fluxo de carga dependerá de várias características do processo de solução das equações algébricas não lineares, como da existência da solução ou de múltiplas soluções, do método de solução, das condições iniciais, e também, da presença de singularidade. Assim, será sempre necessário ponderar se as situações de não convergências se devem a problemas numéricos, ou a características dos processos de solução usados ou ainda a limitações físicas do sistema. Para sistemas desconhecidos, as diferenças não são óbvias.

Diferentes implementações de métodos da continuação foram propostos para contornar as dificuldades apresentadas anteriormente, e assim, se conseguir obter o ponto de máximo carregamento em sistemas de potência [Cañ93, Ajj92, Chia95]. Os métodos da continuação são ferramentas úteis na obtenção de curvas de solução de equações algébricas não lineares, variando um parâmetro. Em geral, λ é considerado uma variável dependente e então, variado automaticamente. Neste caso, o sistema de equações (3.2), cuja dimensão é $n = 2n_{PQ} + n_{PV}$ (n_{PQ} e n_{PV} correspondendo ao número de barras PQ e PV, respectivamente), agora tem $n+1$ incógnitas, e uma equação adicional é necessária. A diferença entre os métodos da continuação está na forma como esta nova variável é tratada e em como a singularidade da matriz Jacobiana é evitada. A adição de equações parametrizadas tem se tornado um procedimento padrão [Sey94]. Isto implicará em um aumento do tamanho da matriz. Por outro lado, qualquer uma das $n+1$ incógnitas podem ser definidas como parâmetro. Seus valores (θ_k ou V_k) podem ser especificados e, então, esta equação pode ser usada para calcular a nova variável dependente λ. Desta forma, o sistema de equações (3.2) ficará com n equações e n incógnitas. Agora, a nova matriz Jacobiana diferirá da original na coluna k onde as derivadas das potências em relação à θ_k ou V_k serão substituídas pelas derivadas das potências em relação à nova variável dependente λ. Uma escolha formal do parâmetro da continuação depende da variável que tem a maior taxa de mudança próximo a uma dada solução. Enquanto a matriz tiver *rank* completo (igual a n), ela será não singular depois da remoção da coluna do respectivo parâmetro da continuação. Esta troca de variáveis corresponde a uma rotação de 90° no



diagrama θ_k versus λ, ou V_k versus λ [Sey94]. Este será o procedimento usado nas versões parametrizadas por θ_k e V_k.

3.2.2 Método de Newton Parametrizado por V_k e θ_k

Como foi visto anteriormente, é necessária uma mudança de parâmetro para contornar as dificuldades numéricas devidas à singularidade da matriz Jacobiana no ponto de máximo carregamento. A nova matriz Jacobiana deve ser bem condicionada no ponto de máximo carregamento, e de preferência em toda sua vizinhança. De acordo com Arya e Verma [Ary96], as curvas PV completas podem ser obtidas usando uma magnitude de tensão como um parâmetro (variável independente) e o fator de carregamento λ como uma variável dependente. Ajjarapu e Christy [Ajj92] mostraram que ângulos de tensão também podem ser escolhidos como parâmetros. Em geral, como pode ser visto nas figuras 3.1(b) e 3.1(c), os ângulos e as magnitudes das barras PQ estão continuamente decrescendo à medida que o carregamento se aproxima do ponto de máximo carregamento. Assim, um deles pode ser especificado e a respectiva solução encontrada. Considerando a magnitude de tensão de uma barra k, V_k, como um parâmetro, a aplicação do método de Newton ao sistema de equações (3.2) resulta em:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|cc} \mathbf{H} & \mathbf{N_1} & -\mathbf{P}^{esp} \\ \hline \mathbf{M} & \mathbf{L_1} & -\mathbf{Q}^{esp} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V' \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{H} & \mathbf{N'} \\ \hline \mathbf{M} & \mathbf{L'} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V' \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = -\mathbf{J_V} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V' \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} \qquad (3.4)$$

onde o vetor $\mathbf{\Delta V'}$ não contém o elemento ΔV_k, o qual é substituído por $\Delta\lambda$. As submatrizes **N'** e **L'** diferem das **N** e **L** da equação (3.3) apenas na coluna k onde as derivadas de **P** e **Q** com relação a V_k foram substituídas pelas derivadas com relação à nova variável λ. Desta forma a nova matriz Jacobiana $\mathbf{J_V}$ não apresentará singularidade no ponto de máximo carregamento, como pode ser observado na figura 3.1(e). A parametrização resulta em um método robusto não somente ao redor do ponto de máximo carregamento, mas ao longo de toda curva PV.

unesp

Considerando o ângulo de tensão de uma barra k, θ_k, como um parâmetro, a aplicação do método de Newton ao sistema de equações (3.2) resulta em:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cc|c} \mathbf{H_1} & -\mathbf{P}^{esp} & \mathbf{N} \\ \mathbf{M_1} & -\mathbf{Q}^{esp} & \mathbf{L} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta\theta' \\ \Delta\lambda \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{H'} & \mathbf{N} \\ \mathbf{M'} & \mathbf{L} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta\theta' \\ \Delta\lambda \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} = -\mathbf{J}_{\theta} \begin{bmatrix} \Delta\theta' \\ \Delta\lambda \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} \qquad (3.5)$$

onde o vetor $\Delta\theta$' não contém o elemento $\Delta\theta'_k$, o qual é substituído por $\Delta\lambda$. As submatrizes **H'** e **M'** diferem de **H** e **M** da equação (3.3) apenas na coluna k onde as derivadas de **P** e **Q** com relação a θ_k foram substituídas pelas derivadas com relação à nova variável λ. Novamente, como pode ser visto na figura 3.1(e), a nova Jacobiana $\mathbf{J}_{\theta}$ não é singular no ponto A, mas somente no ponto B que está localizado na parte inferior da curva. Isto mostra que, no caso do exemplo do sistema de 3 barras da figura 3.1(a), a curva não pode ser completamente obtida se θ_2 é escolhido como um parâmetro, porque $\mathbf{J}_{\theta}$ torna-se singular no ponto B. Assim, quando a vizinhança do ponto B é alcançada, o método apresentará dificuldades numéricas, e uma mudança de parâmetro será necessária. Pode-se observar na figura 3.1(e) que se θ_3 for adotado como parâmetro, a matriz Jacobiana $\mathbf{J}_{\theta}$ não será singular, para qualquer valor do fator de carregamento λ. Desta forma, toda a curva pode ser traçada.

3.2.3 Método de Newton Parametrizado pela Potência Reativa de uma Barra PV (Q_{PV}), μ

Em [Alv00-1] mostrou-se que a parametrização pela potência reativa de uma barra *PV* pode ser utilizada para contornar a singularidade da matriz Jacobiana no ponto de máximo carregamento. A injeção de potência reativa gerada de uma barra *PV* qualquer pode fazer parte do vetor $\mathbf{x} = [\theta\ \mathbf{V}]^T$ por meio da inclusão da respectiva equação de balanço de potência reativa no sistema de equações (3.2), tomando o cuidado para que quando o limite de reativos for atingido, a correspondente magnitude de tensão seja considerada no vetor **x**, e seja efetuada a escolha de uma nova barra *PV*.

unesp

Visto que os programas de fluxo de carga normalmente incluem as equações das barras *PV*, o uso da potência reativa de uma barra *PV* (Q_{PV}) qualquer como parâmetro apresenta-se como uma opção muito atraente, já que isto praticamente implicaria em poucas alterações nos programas de fluxo de carga convencionais. Não haveria nenhum problema relacionado com perda de esparsidade, apenas a substituição de uma coluna correspondendo à nova variável λ. Portanto, bastaria especificar, através do parâmetro μ, o valor da potência reativa de uma barra *PV* que esteja com folga de reativos. Este procedimento seria válido enquanto os reativos gerados permanecessem dentro de seus limites, isto é, entre os seus valores de potência reativa (máximo e mínimo) prefixados. Quando um dos limites fosse atingido, haveria a necessidade da escolha de uma outra barra *PV* ou a troca do tipo do parâmetro, por exemplo, por V_k. Neste procedimento a seguinte equação é acrescentada ao sistema de equações (3.2):

$$W(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda, \mu) = \mu Q^0 - Q(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda) = 0 \tag{3.6}$$

Nesta equação Q corresponde à equação da potência reativa da barra de geração k escolhida. Q^0 é o respectivo valor da função no caso base. Um novo parâmetro μ é adicionado ao problema. Como uma equação é adicionada, λ pode ser tratado como uma variável dependente e μ é considerado como um parâmetro. Para $\mu = 1$, a solução convergida deverá resultar em $\lambda = 1$. Em (3.6) pode-se especificar o valor desejado para a função, através do parâmetro μ, e a sua solução, juntamente com o sistema de equações (3.2), fornecerá o ponto de operação, incluindo o fator de carregamento λ para o qual os valores especificados ocorrem.

A expansão do sistema de equações (3.2), acrescido da equação (3.6), em série de Taylor, incluindo somente os termos de primeira ordem, resulta em:

unesp

$$-\begin{bmatrix} \mathbf{J} & \mathbf{G}_{\lambda} \\ -\mathbf{Q}_{\mathbf{x}} & -Q_{\lambda} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \Delta\mathbf{x} \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = -\mathbf{J}_{\mathbf{Qpv}}\begin{bmatrix} \Delta\mathbf{x} \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{G} \\ \Delta W \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

onde $\mathbf{G}_{\lambda} = [\mathbf{P}^{esp}\ \mathbf{Q}^{esp}]^{T}$ e $\Delta\mathbf{G}=[\Delta\mathbf{P}\ \Delta\mathbf{Q}]^{T}$. $\mathbf{Q}_{\mathbf{x}}$ e Q_{λ} correspondem às derivadas de Q em relação à $\mathbf{x}$ e λ respectivamente. ΔW corresponde ao *mismatche* de potência reativa da barra de geração k escolhida. Observe que esta equação pode ser colocada na mesma forma da equação (3.4). Entretanto, deve-se observar que o sistema de equações em questão, ao contrário do empregado quando do uso de θ_k ou V_k como parâmetro, possui $(n + 1)$ variáveis para $(n + 1)$ equações. A nova variável μ é tratada como uma variável independente, ou seja, seu valor é prefixado.

A figura 3.1(d) mostra a potencia reativa Q_{PV} como uma função do fator de carregamento, enquanto a figura 3.1(e) mostra o determinante normalizado da matriz Jacobiana modificada $\mathbf{J}_{\mathbf{Qpv}}$ correspondente à equação (3.6). Está claro que $\mathbf{J}_{\mathbf{Qpv}}$ não será singular, não importando o valor do fator de carregamento.

3.2.4 Métodos Desacoplados Parametrizados

As simplificações introduzidas por Stott e Alsaç [Sto74] na matriz Jacobiana do fluxo de carga pelo método de Newton deram origem ao método de fluxo de carga desacoplado rápido, descrito por:

$$\begin{aligned} \mathbf{B'}\,\Delta\theta &= \Delta\mathbf{P}/\mathbf{V} \\ \mathbf{B''}\,\Delta\mathbf{V} &= \Delta\mathbf{Q}/\mathbf{V} \end{aligned} \tag{3.8}$$

Esta versão é atualmente conhecida como versão XB. Existe ainda a versão BX, implementada e testada por Van Amerongen [Ame88]. A diferença básica entre as duas está nos elementos das matrizes **B'** e **B''.** Monticelli *et al* [Mont90] apresentaram uma justificativa analítica e unificada, que possibilitou uma melhor compreensão do bom desempenho dos métodos desacoplados rápidos (BX e XB), a qual era até então desconhecida. Mostra-se que os algoritmos dessas versões podem ser deduzidos a partir da equação do método de Newton (equação (3.3)), assumindo-se que o sistema seja

unesp

constituído por ramos com a mesma razão r_{kl}/x_{kl} ou seja radial, e considerando que **V = 1** pu e **θ = 0** grau, condição conhecida como *flat start*.

Mesmo quando o sistema não seja constituído por ramos com a mesma razão r_{kl}/x_{kl} ou não seja radial, os algoritmos BX e XB continuam a ser uma boa aproximação para fins práticos. No geral, a versão BX apresenta melhor desempenho que a XB, em virtude das aproximações extras (desconsideração dos efeitos das barras PVs e dos elementos *shunts* na matriz de sensibilidade P-θ) necessárias para a obtenção da última.

Os métodos propostos do fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado foram obtidos a partir dos respectivos métodos de Newton parametrizados, descritos anteriormente, usando o mesmo procedimento apresentado em [Mont90].

Vamos considerar o sistema mostrado na figura 3.3 (3 barras e 2 ramos) para obtenção do fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado, sendo consideradas duas versões: BX parametrizada por V_k e XB parametrizada por θ_k.

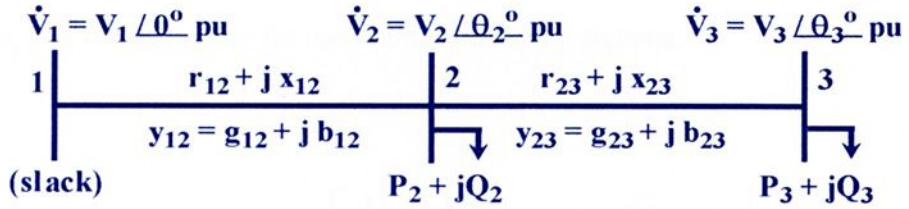


Figura 3.3 – Sistema de três barras.

3.2.4.1 Versão BX Parametrizada por V_k

Considerando V_3 como parâmetro e considerando $V_2 = 1$ pu e $\theta_2 = \theta_3 = 0$ grau, o sistema de equações (3.4), para o sistema da figura 3.3, torna-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \hline \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cc|cc} -b_{12}-b_{23} & b_{23} & g_{12}+g_{23} & -P_2^{esp} \\ b_{23} & -b_{23} & -g_{23} & -P_3^{esp} \\ \hline -g_{12}-g_{23} & g_{23} & -b_{23} & -Q_2^{esp} \\ g_{23} & -g_{23} & b_{23} & -Q_3^{esp} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \hline \Delta V_2 \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

onde $(g_{kl} + jb_{kl}) = (r_{kl} + jx_{kl})^{-1}$. Usando o mesmo procedimento da referência [Mont90], obtém-se a matriz $\mathbf{L_{eq}} = \mathbf{L'} - \mathbf{MH^{-1}N'}$:

$$\mathbf{L_{eq}} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{x_{12}} + \dfrac{1}{x_{23}} & -Q_2^{esp} + \dfrac{g_{12}}{b_{12}} P_2^{esp} + \left(\dfrac{g_{12}}{b_{12}} - \dfrac{g_{23}}{b_{23}}\right) P_3^{esp} \\ -\dfrac{1}{x_{23}} & -Q_3^{esp} + \dfrac{g_{23}}{b_{23}} P_3^{esp} \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

Em [Mont90] verifica-se que no caso do sistema não atender às condições acima os elementos da $\mathbf{L_{eq}}$ ainda terão valores muito próximos dos da matriz **B"** da versão BX. Entretanto, se a relação r_{kl}/x_{kl} for constante para todo o sistema:

$$\mathbf{B"} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{x_{12}} + \dfrac{1}{x_{23}} & -Q_2^{esp} + \dfrac{G_2}{B_2} P_2^{esp} \\ -\dfrac{1}{x_{23}} & -Q_3^{esp} + \dfrac{G_3}{B_3} P_3^{esp} \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

onde $(G_2 + jB_2)$ e $(G_3 + jB_3)$ são os elementos da diagonal da matriz admitância. Finalmente, a versão BX do fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado utilizando V_k como parâmetro é dada por:

$$\mathbf{B'}\Delta\theta = \Delta\mathbf{P} \quad \text{e} \quad \mathbf{B"}\begin{bmatrix} \Delta\mathbf{V'} \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \Delta\mathbf{Q} \tag{3.12}$$

unesp

onde o elemento ΔV_k do vetor $\mathbf{\Delta V'}$ é eliminado, sendo substituído por $\Delta\lambda$. A matriz **B'** é obtida pelo cálculo de **H** para o *flat start*. A matriz **B"** é dada por $\mathbf{L_{eq}= L'- MH^{-1}N'}$ calculada para o *flat start*. Além disso, os elementos *fill-in* são desprezados e b_{kl} é substituído por $1/x_{kl}$. A coluna k de **B"** é substituída pelo seguinte vetor $\mathbf{B"_k}$:

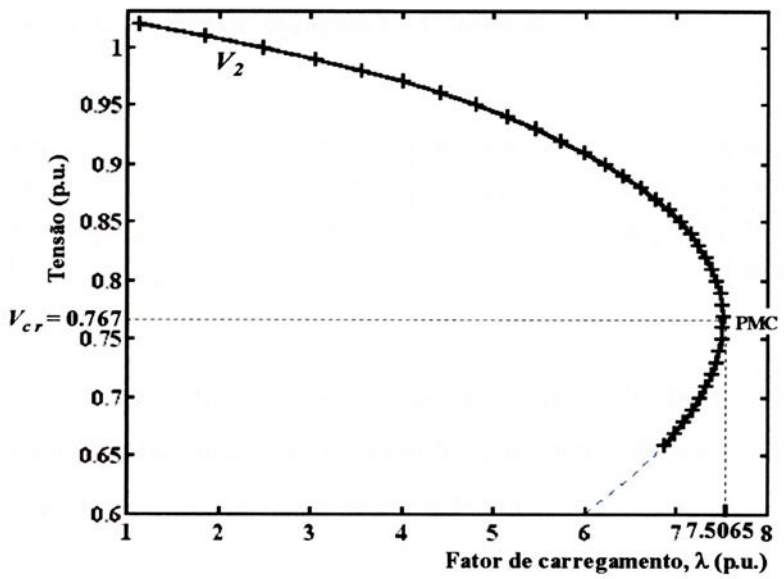
$$B''_{ik} = -Q_i^{esp} + \frac{G_i}{B_i} P_i^{esp} \qquad i \in \{\text{barras } PQ\} \tag{3.13}$$

A figura 3.4 mostra a curva PV obtida pela versão BX do método de fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado usando V_2 como parâmetro. O número de iterações predefinido foi de 30. Na vizinhança do ponto de máximo carregamento o método convencional apresenta dificuldades numéricas, enquanto que o método desacoplado rápido parametrizado não somente encontra uma solução, mas também permite que pontos além do ponto de máximo carregamento sejam obtidos, isto é, pontos na parte de baixo da curva PV. Os resultados contradizem a idéia de que as versões desacopladas fornecem sempre soluções de alta tensão (parte superior da curva). Além disso, isso assegura que a causa de não convergência do desacoplado rápido na obtenção da solução é devido ao algoritmo e não à precisão usada.

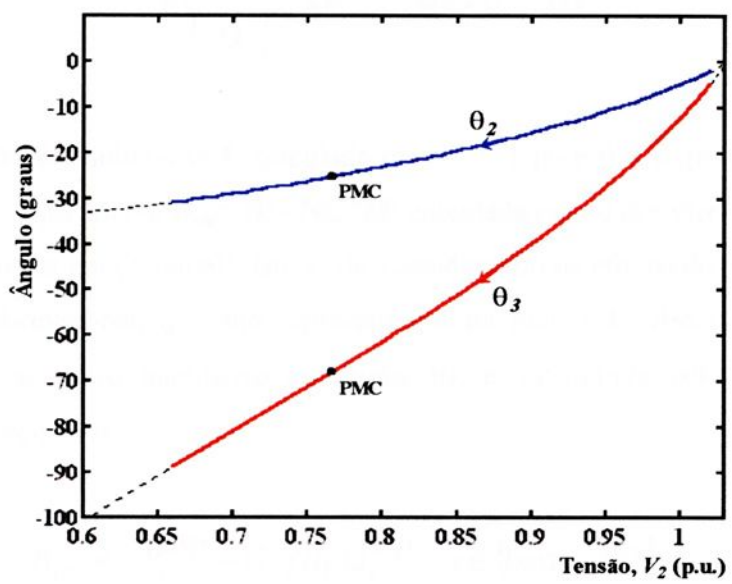
O número de iterações para cada ponto é ainda pequeno e um número reduzido de iterações (18 P-θ e 19 Q-V) são necessários para obter o ponto de máximo carregamento com a mudança de parâmetro. O tamanho do passo não precisa ser reduzido significantemente como no caso do desacoplado rápido convencional. Portanto, o desacoplado rápido torna-se mais robusto com a parametrização. Isto ocorre porque a não linearidade das equações do fluxo de carga é suavizada em conseqüência do novo parâmetro usado. A figura 3.4(b) mostra ângulos de tensão em função da tensão V_2, a qual é o novo parâmetro. Na região do ponto de máximo carregamento o sistema de equações modificado apresenta um comportamento quase linear, justificando o pequeno número de iterações do método de fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado. Em outras palavras, enquanto o método desacoplado rápido convencional tem problemas de convergência nas vizinhanças do ponto de máximo carregamento devido ao alto grau de

unesp

não linearidade do sistema, o desacoplado rápido parametrizado pode facilmente obter o ponto de máximo carregamento devido à diminuição desta não linearidade.



(a)



(b)

Figura 3.4 – Versão BX do método de fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado, usando V_2 como parâmetro: (a) magnitude de tensão em função do fator de carregamento, (b) ângulos de tensão em função do novo parâmetro V_2.

3.2.4.2 Versão XB Parametrizada por θ_k

Utilizando θ_3 como parâmetro e considerando $V_2 = V_3 = 1$ pu e $\theta_2 = 0$ grau, ainda no sistema da figura 3.3, o sistema de equações (3.4) torna-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \hline \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cc|cc} -b_{12}-b_{23} & -P_2^{esp} & g_{12}+g_{23} & -g_{23} \\ b_{23} & -P_3^{esp} & -g_{23} & g_{23} \\ \hline -g_{12}-g_{23} & -Q_2^{esp} & -b_{12}-b_{23} & b_{23} \\ g_{23} & -Q_3^{esp} & b_{23} & -b_{23} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\lambda \\ \hline \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

Utilizando um procedimento similar ao da versão BX, para sistemas radiais e malhados com relação r_{kl}/x_{kl} constante, a versão XB parametrizada por θ_k do fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado será representada por:

$$\mathbf{B'}\begin{bmatrix} \Delta\boldsymbol{\theta}' \\ \Delta\boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \Delta\mathbf{P} \quad \text{e} \quad \mathbf{B''}\Delta\mathbf{V} = \Delta\mathbf{Q} \tag{3.15}$$

onde a matriz **B''** é a submatriz **L** calculada para **V** = 1 pu e θ = 0 grau. Já a matriz **B'** é dada pela matriz equivalente $\mathbf{H_{eq}} = \mathbf{H'} - \mathbf{NL^{-1}M'}$ calculada para o *flat start*, com as hipóteses adicionais propostas em [Mont90], isto é, desconsiderando os efeitos dos *shunts*, barras *PV* e *tap* de transformadores, que são representados na matriz **L**. Assim sendo, a coluna correspondente ao novo parâmetro escolhido, θ_k, é substituída pelo vetor $\mathbf{B'_k}$, cujos elementos são dados por:

$$\begin{aligned} B'_{ik} &= -P_i^{esp} - G_i/B_i\, Q_i^{esp} \quad i \in \{\text{barras } PQ\} \\ B'_{ik} &= -P_i^{esp} \qquad\qquad\qquad\quad i \in \{\text{barras } PV\} \end{aligned} \tag{3.16}$$

A figura 3.5 mostra a curva PV obtida pela versão XB do método de fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado usando θ_2 como parâmetro. O número de iterações predefinido foi de 30. As mesmas conclusões apresentadas para a figura 3.4 são válidas

aqui. O número de iterações para cada ponto é também menor e um número reduzido de iterações (14 P-θ e 12 Q-V) são necessárias para obter o ponto de máximo carregamento com a mudança de parâmetro.

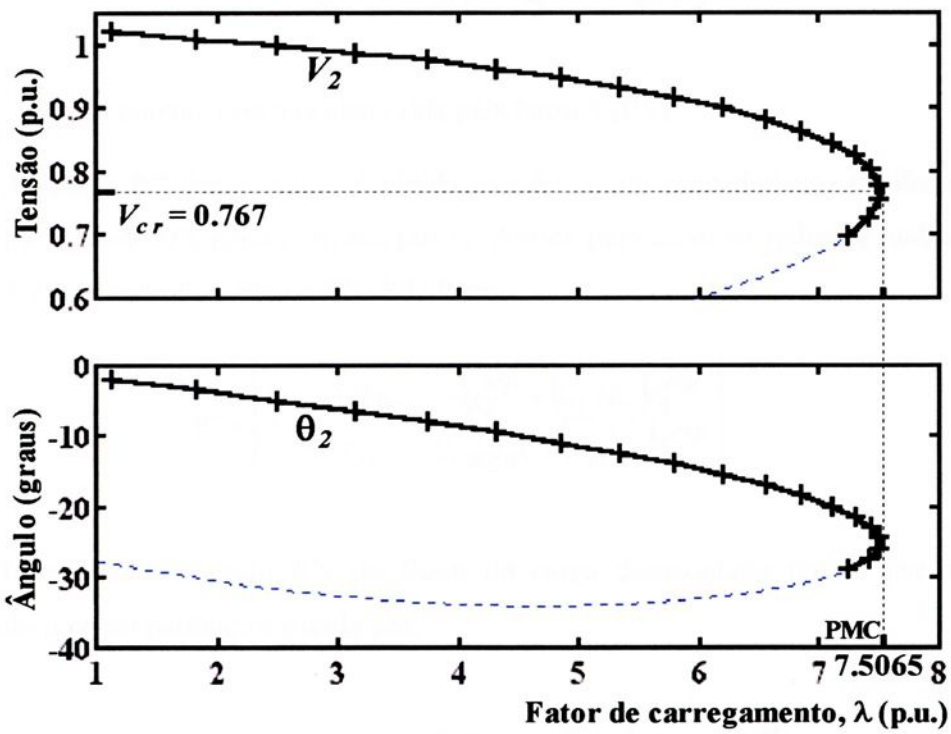


Figura 3.5 – Versão XB do método de fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado, usando, θ_2 como parâmetro: (a) magnitude de tensão em função do fator de carregamento, (b) ângulos de tensão em função do fator de carregamento.

3.2.4.3 Versão BX Parametrizada pela Potência Reativa de uma Barra PV (Q_{PV}), μ

Considere o sistema de 3 barras da figura 3.1(a). Usando μ como parâmetro e $V_2 = 1$ pu e $\theta_2 = \theta_3 = 0$, a equação (3.7) torna-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta W \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cc|cc} -b_{12}-b_{23} & b_{23} & g_{12}+g_{23} & -P_2^{esp} \\ b_{23} & -b_{23} & -g_{23} & -P_3^{esp} \\ \hline -g_{12}-g_{23} & g_2 & -b_{12}-b_{23} & -Q_2^{esp} \\ g_{23} & -g_{23} & b_{23} & Q_{c\,\mathrm{arg}\,a3}^{esp} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} \tag{3.17}$$

onde Q_{carga3}^{esp} é a potencia reativa absorvida pela barra 3 (PV).

A matriz **B''** desta versão é obtida usando-se um procedimento similar ao usado para obter a versão BX parametrizada por V_k. Assim, para sistemas radiais e malhados com relação r_{kl}/x_{kl} constante, a matriz **B''**, é dada por:

$$\mathbf{B''} = \begin{bmatrix} 1/x_{12}+1/x_{23} & -Q_2^{esp}+\left(G_2/B_2\right)P_2^{esp} \\ -1/x_{23} & Q_{c\,\mathrm{arg}\,a3}^{esp}+\left(G_3/B_3\right)P_3^{esp} \end{bmatrix} \tag{3.18}$$

Finalmente a versão BX do fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado utilizando μ como parâmetro é dada por:

$$\mathbf{B'}\Delta\theta = \Delta\mathbf{P} \quad \text{e} \quad \mathbf{B''}\left[\Delta\mathbf{V'} \quad \Delta\boldsymbol{\lambda}\right]^T = \left[\Delta\mathbf{Q} \quad \Delta\mathbf{W}\right]^T \tag{3.19}$$

onde o elemento ΔV_k do vetor $\Delta\mathbf{V'}$ é eliminado, sendo substituído por $\Delta\lambda$, e o elemento ΔQ_k do vetor $\Delta\mathbf{Q}$ é eliminado, sendo substituído por ΔW. As matrizes **B'** é obtida calculando **H** para **V** = 1 pu e θ = 0. A matriz **B''** é dada por $\mathbf{L_{eq}}$ calculada para **V** = 1 pu e θ = 0. Além disso, os elementos *fill-in* são ignorados e b_{km} é substituído por $1/x_{km}$. A coluna k de **B''**, correspondente a barra de geração Q_k, cuja equação da potência reativa foi escolhida, é substituída pelo seguinte vetor $\mathbf{B''}_{Qpv}$:

$$\begin{aligned} B''_{iQk} &= -Q_i^{esp}+\left(G_i/B_i\right)P_i^{esp} \; i \in \{\text{barras } PQ\} \\ B''_{iQk} &= Q_{c\,\mathrm{arg}\,a-i}^{esp}+\left(G_i/B_i\right)P_i^{esp} \; i \in \{\text{barra } Qk \text{ de geração}\} \end{aligned} \tag{3.20}$$

A figura 3.6 mostra a curva PV obtida pela versão BX do método de fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado usando a potência reativa de uma barra PV (μ), no sistema de 3 barras mostrado na figura 3.1(a), como parâmetro. O número de iterações predefinido foi de 30 e o tamanho do passo 1 pu. As mesmas conclusões apresentadas para a figura 3.4 são também válidas aqui. O número de iterações para cada ponto também é pequeno e um número reduzido de iterações (11 P-θ e 12 Q-V) é necessário para obter o ponto de máximo carregamento com a mudança de parâmetro.

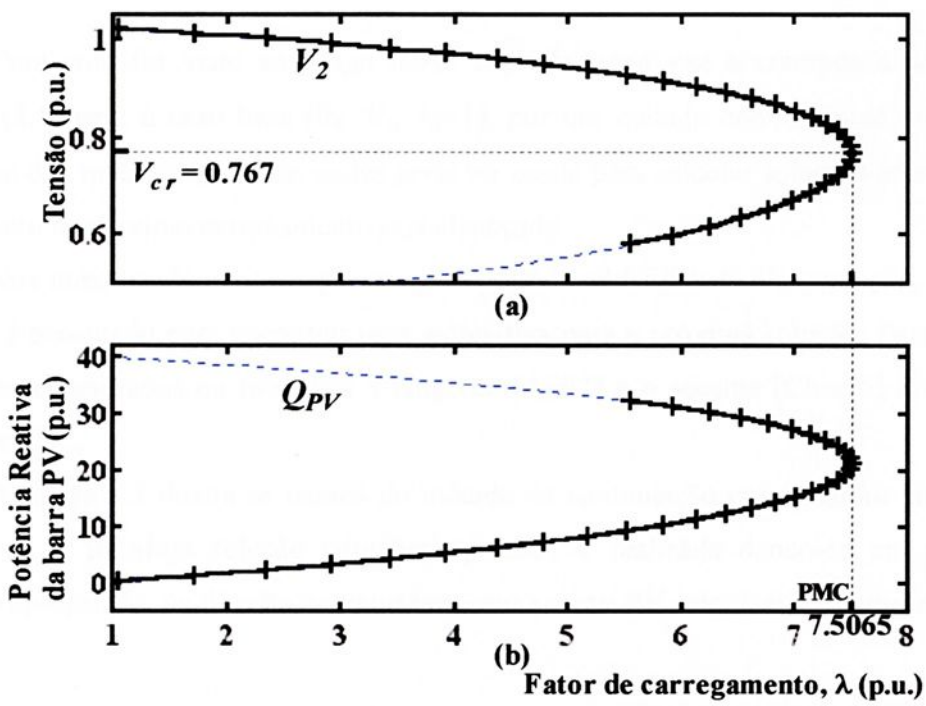


Figura 3.6 – Versão BX do método de fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado, usando μ como parâmetro: (a) magnitude de tensão em função do fator de carregamento, (b) potência reativa da barra PV , Q_{PV} em função do fator de carregamento.

Observa-se que as versões BX e XB requerem a fatoração da matriz **B''** para cada ponto da curva em caso de violação, seja quando uma barra PV é alterada para tipo PQ, ou quando esta barra torna-se novamente PV, enquanto a matriz **B'** é mantida constante. O mesmo se aplica quando ocorrem violações de limites de *tap* de transformadores. Isto representa uma clara vantagem das versões do método desacoplado rápido sobre os métodos de Newton, que requerem a fatoração da matriz Jacobiana completa a cada

iteração. Observa-se também que a crença de que o fluxo de carga desacoplado rápido só fornece as soluções da parte superior da curva PV não é verdadeira. Com as devidas alterações esse método pode ser empregado para obter eficientemente (com poucas iterações) não só o ponto de máximo carregamento, mas também as soluções da parte inferior da curva.

3.3 Passo Preditor

Conforme foi visto ao longo desse capítulo, uma vez encontrada a solução do sistema (3.1) para o caso base (θ_0, $\mathbf{V_0}$, λ_0=1), por um método convencional de fluxo de carga, um dos métodos parametrizados pode ser usado para calcular soluções adicionais até que o ponto de máximo carregamento seja alcançado.

Nos métodos da continuação em geral, após a obtenção de uma solução, um passo preditor é executado para encontrar uma estimativa para a próxima solução. Dentre vários preditores encontrados na literatura o tangente [Ajj92] e o secante [Chia95] são os mais populares.

A figura 3.7 ilustra os passos do método da continuação com preditor tangente. A estimativa da próxima solução com esse preditor é realizada dando-se um passo, de tamanho apropriado, na direção do vetor tangente à curva PV calculado na solução atual.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

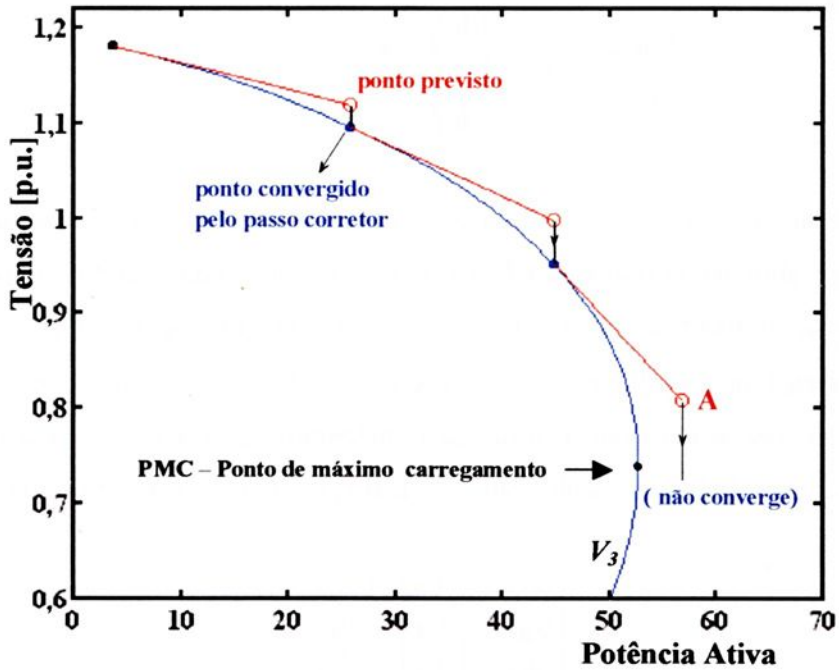


Figura 3.7 – Método da continuação com preditor tangente.

O cálculo do vetor tangente é obtido tomando a diferencial de (3.1), e que posto na forma matricial fornece:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_\theta & \mathbf{G}_V & -\mathbf{G}_\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{d\theta} \\ \mathbf{dV} \\ \mathbf{d\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J} & -\mathbf{G}_\lambda \end{bmatrix} \mathbf{t} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

em que $\mathbf{G}_\theta = [\partial \mathbf{P}/\partial\theta \;\; \partial \mathbf{Q}/\partial\theta]^T$, $\mathbf{G}_V = [\partial \mathbf{P}/\partial \mathbf{V} \;\; \partial \mathbf{Q}/\partial \mathbf{V}]^T$, e $\mathbf{G}_\lambda = [\mathbf{P}^{esp} \; \mathbf{Q}^{esp}]^T$. $\mathbf{G}_\theta$ e $\mathbf{G}_V$ compõem a matriz Jacobiana (**J**)do fluxo de carga convencional. Acresce-se a **J** uma coluna ($-\mathbf{G}_\lambda$) correspondente à nova variável λ. O vetor **t** é chamado de vetor tangente. Uma vez que o número de incógnitas é maior do que o número de equações, uma variável do vetor **t** deve ser especificada com um valor diferente de zero. Esta variável é denominada de parâmetro da continuação. Uma nova equação ($\mathbf{e}_k \,.\, \mathbf{t} = t_k = \pm 1$) é acrescida ao sistema de equações (3.1), que passa a ter a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_\theta & \mathbf{G}_V & -\mathbf{G}_\lambda \\ & \mathbf{e_k} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{d\theta} \\ \mathbf{dV} \\ \mathbf{d\lambda} \end{bmatrix} = \mathbf{J_a t} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \pm 1 \end{bmatrix} \tag{3.22}$$

onde $\mathbf{e_k}$ é um vetor linha com todos os elementos nulos exceto o *k*-ésimo, que é igual a 1. A escolha do índice *k* é feita de forma que o vetor **t** tenha uma norma não nula e garanta que a matriz Jacobiana aumentada ($\mathbf{J_a}$) seja não singular no ponto de máximo carregamento. A escolha do sinal + ou – dependerá de como a variável escolhida como parâmetro estará variando, positivo se ela estiver aumentando de valor, e negativo se estiver diminuindo. Uma vez obtido o vetor **t**, a estimativa para a próxima solução será dada por:

$$\begin{bmatrix} \theta^e \\ \mathbf{V}^e \\ \lambda^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^j \\ \mathbf{V}^j \\ \lambda^j \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} \mathbf{d\theta} \\ \mathbf{dV} \\ \mathrm{d}\lambda \end{bmatrix} \tag{3.23}$$

onde o sobrescrito "e" indica estimativa, isto é, o vetor tangente é usado para obter uma estimativa para θ , **V**, e λ a partir da solução atual *j*. σ é um escalar que define o tamanho do passo preditor. O tamanho do passo deve ser tal que a solução prevista esteja dentro do raio de convergência do passo corretor.

O cálculo do vetor tangente $\mathbf{t}=[\mathbf{dx}\ \mathrm{d}\lambda]^T$, para o caso da potência reativa de uma barra PV, será realizado pela equação:

$$-\begin{bmatrix} \mathbf{J} & \mathbf{G}_\lambda \\ -\mathbf{Q_x} & -Q_\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{dx} \\ \mathrm{d}\lambda \end{bmatrix} = -\mathbf{J_{Qpv}} \begin{bmatrix} \mathbf{dx} \\ \mathrm{d}\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \Delta k_W \end{bmatrix} \tag{3.24}$$

onde $\Delta k_W = W^0 \Delta\mu$ é um escalar que define a variação em W^0. Após a solução da equação (3.24) para o vetor tangente, a estimativa para a próxima solução é dada por:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}^{\mathbf{e}} \\ \lambda^{\mathbf{e}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \lambda \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} \mathbf{dx} \\ d\lambda \end{bmatrix} \tag{3.25}$$

$$k_W^e = k_W + \sigma \Delta k_W$$

O cálculo do vetor tangente não representa um custo computacional significante quando está se usando os métodos de Newton, uma vez que pode ser usada a última matriz Jacobiana fatorada. Por outro lado, dependendo do parâmetro em uso, a matriz Jacobiana pode ser mal condicionada próximo ao ponto de máximo carregamento. Isso implicará na necessidade de uma mudança de parâmetro.

No caso do preditor secante usado, isto é, da técnica de previsão trivial ou polinomial modificada de ordem zero [Sey94, Chia95], utilizou-se a solução atual e um incremento fixo no parâmetro (λ, θ_k, V_k, ou μ) como uma estimativa para a próxima solução. Outra possibilidade é utilizar ou o carregamento λ, ou a magnitude de tensão V_k ou o ângulo de fase da tensão θ_k, ou a potência reativa como parâmetro, e um preditor secante que usa um polinômio de primeira ordem (uma reta) passando através da solução atual e da anterior, para predizer a próxima solução. Portanto, conforme se pode constatar na figura 3.8, este preditor é uma aproximação do vetor tangente. Note que quanto mais próximo os dois pontos estiverem (solução atual e anterior), melhor será a aproximação do vetor secante em relação ao vetor tangente. Entretanto, isto implicaria no cálculo de um maior número de pontos da curva para se obter o ponto de máximo carregamento. Por outro lado, pontos muito distantes um do outro produziriam estimativas muito imprecisas, que poderiam dificultar a convergência do passo corretor. As principais vantagens dos preditores secantes é que a sua implementação computacional é relativamente mais simples e que não apresentam problemas relacionados à singularidade da matriz Jacobiana. A figura 3.8 mostra uma comparação entre os preditores tangente e secante. Como será visto no próximo capitulo, a principal vantagem do preditor secante de primeira ordem, quando comparado com o preditor trivial, é a redução do número de iterações do passo corretor.

O vetor secante $\mathbf{x}=[\Delta\theta, \Delta\mathbf{V}, \Delta\lambda]^T$ pode ser calculado após a obtenção de pelo menos duas soluções, ou por um método convencional, ou por um dos métodos apresentados usando a técnica de previsão trivial. Em seguida, a estimativa para a próxima solução será dada por:

$$[\theta^{\mathbf{e}}, \mathbf{V}^{\mathbf{e}}, \lambda^{\mathbf{e}}]^T = [\theta, \mathbf{V}, \lambda]^T + \sigma\, \mathbf{x} \tag{3.26}$$

unesp

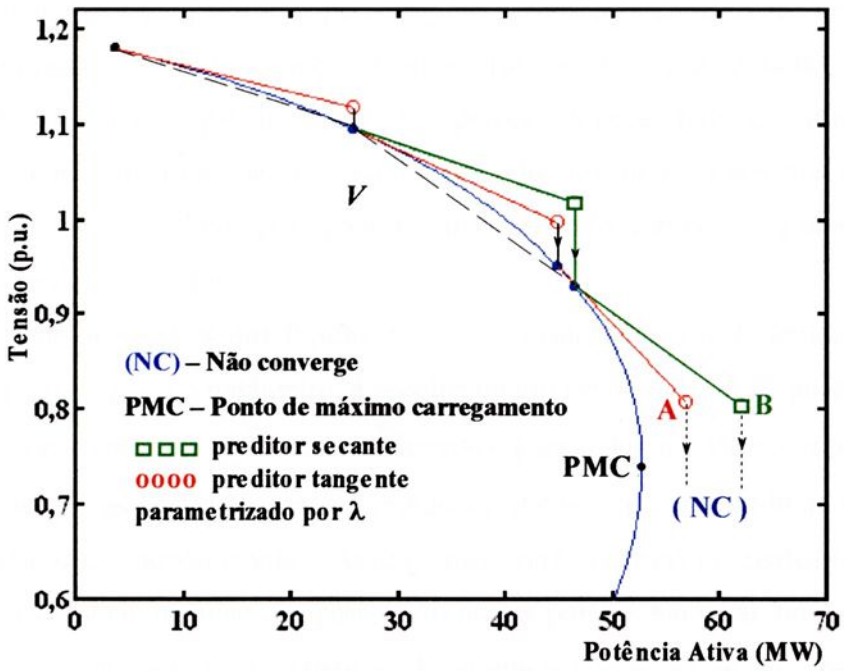


Figura 3.8: Comparação entre os métodos da continuação com preditor tangente e secante, parametrizado por λ.

3.3.1 Controle do Tamanho do Passo Preditor (σ)

Como mostrado na figura 3.2, a eficiência no traçado da curva PV está relacionada com a estratégia de controle do tamanho do passo λ. Em geral, esta escolha é dependente do sistema em estudo. Na prática, o tamanho do passo apropriado é definido após um processo de tentativa e erro. Para sistemas com baixo carregamento, uma variação da carga resultará numa pequena mudança do ponto de operação, e, portanto, o tamanho do passo pode ser maior. Já em um sistema altamente carregado, uma pequena variação na carga resulta em grandes variações do ponto de operação e, neste caso, o tamanho do passo deve ser menor. O ideal seria se o tamanho do passo se adaptasse ao comportamento da convergência da solução atual, a qual estará particularmente relacionada com o desempenho do algoritmo usado pelo passo corretor. Portanto, a flexibilidade do controle de passo será decisiva na performance do algoritmo corretor. Um método simples para o controle de passo é baseado no número de iterações do passo corretor [Sey94]. Se esse

unesp

número de iterações for baixo, o sistema encontra-se na condição de carga leve, e o passo para o cálculo do próximo ponto de operação pode ser maior. Caso este número seja alto, o sistema estará numa região de operação de alto carregamento (carga pesada), e o tamanho do passo para o cálculo do próximo ponto de operação deve ser reduzido. Entretanto, este procedimento pode falhar na identificação do ponto de máximo carregamento uma vez que o aumento do número de iterações pode ser maior devido à atuação de diversos limites operacionais de equipamentos.

Conforme se verifica nas figuras 3.4 e 3.5, quando do uso da tensão (V_2) ou do ângulo da tensão (θ_2) como parâmetro, a escolha de um passo fixo, –0,01 pu ou –1,5 graus respectivamente, resulta em um controle automático para λ durante todo o traçado da curva PV. Em particular, as variações em λ diminuem à medida que o traçado se aproxima do ponto de máximo carregamento. Assim, não será necessário realizar-se nenhum procedimento adicional de ajuste do passo. Isto ocorre porque, em geral, um passo fixo em V (ou θ) corresponde a um passo grande em λ durante as condições de carga leve e normal, onde V (ou θ) varia pouco, e num passo reduzido em condições de alto carregamento, uma vez que nesta região estes parâmetros V (ou θ) variam muito. Deve-se notar que para sistemas altamente compensados, o uso da tensão como parâmetro pode falhar devido à presença de singularidade da matriz Jacobiana modificada na parte superior da curva PV, isto é, antes do ponto de máximo carregamento. Portanto, provavelmente esta será a principal razão do aumento do número de iterações. Isto exigirá uma redução do passo ou uma troca de parâmetro, sendo esta última opção a mais eficiente (menor número de iterações). Um outro aspecto que deve ser levado em conta é que dependendo da análise que se está efetuando, p. ex., a análise de contingências, o ponto de máximo carregamento poderá ocorrer para baixos valores de carregamento, conforme se pode constatar na figura 3.9 a seguir.



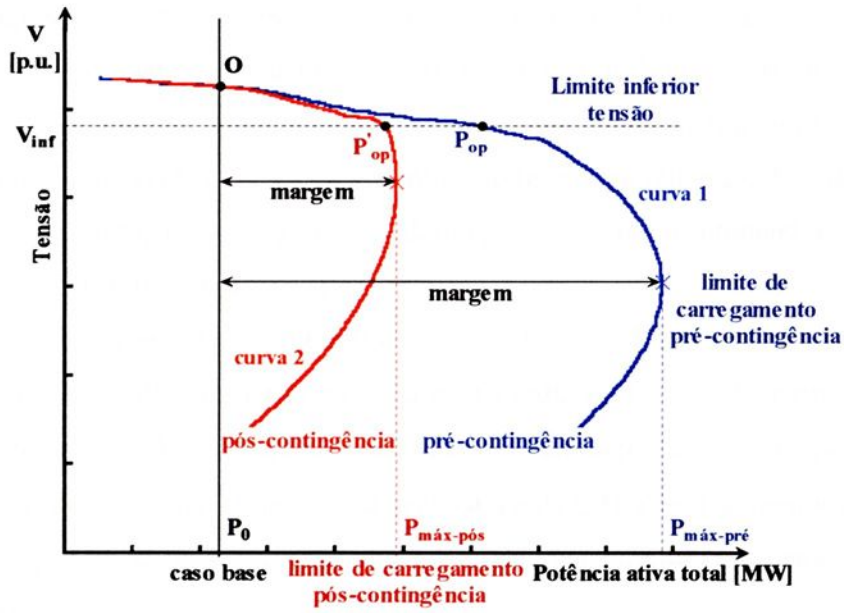


Figura 3.9: Curvas PV de pré e pós-contingência.

Outro método de controle do tamanho do passo é baseado no vetor tangente normalizado [Zamb97]. O tamanho do passo é definido como:

$$\sigma = \sigma^0 / \| t \|_2 \tag{3.27}$$

onde $\| t \|_2$ é a norma Euclidiana do vetor tangente $[d\theta \; dV \; d\lambda]^T$, e σ^0 é um escalar predefinido. Conforme o sistema torna-se carregado, a magnitude do vetor tangente aumenta e σ diminui. A eficiência do processo depende da boa escolha de σ^0. Seu valor dependerá do sistema. Cañizares e Alvarado (1993) [Cañ93] alcançaram bons resultados assumindo $\sigma^0 = 1$, juntamente com a redução de passo quando limites são atingidos ou ocorrem problemas de convergência. A equação (3.27) também pode ser utilizada na técnica de previsão pelo vetor secante de primeira ordem e será usada no próximo capítulo.

3.3.2 Mudança de Parâmetro

Uma mudança no parâmetro da continuação pode ser necessária durante o processo de traçado da curva PV. Usando V_k, θ_k, ou μ como parâmetro, a nova matriz Jacobiana pode

tornar-se singular na parte inferior ou superior da curva PV. À medida que a curvatura do caminho de soluções não é conhecida a priori, é muito difícil, ou até mesmo impossível, identificar qual equação de potência reativa de uma barra PV ou qual magnitude ou ângulo de tensão é mais apropriada para ser usada como parâmetro na obtenção de todos os pontos da curva PV. Portanto, é necessária uma definição de como se efetuará a mudança de parâmetro durante o processo de cálculo.

O objetivo é remover a singularidade da matriz Jacobiana através da adição, por meio de uma equação, da informação perdida com a redução do *rank* da matriz no ponto de máximo carregamento. Quando usa-se V_k ou θ_k como parâmetro, uma forma muito simples de contornar este problema é usar uma técnica conhecida como parametrização local [Sey94, Ajj92], que consiste na mudança do parâmetro próximo ao ponto de máximo carregamento.

Na técnica que usa o vetor tangente, a variável escolhida é aquela que apresentar a maior variação, sendo que λ passa a ser, a partir daí, tratado como variável dependente, enquanto que a variável escolhida passa a ser o novo parâmetro p, isto é, do conjunto de n+1 variáveis. O novo parâmetro será dado por:

$$p \leftarrow max\left\{|t_1|,|t_2|,\cdots,|t_{n+1}|\right\} \tag{3.28}$$

Na técnica que usa o preditor secante, p é escolhido como sendo a componente que apresentar a máxima variação relativa [Sey94]:

$$p \leftarrow max\left\{\left(\frac{\left|\theta^{j+1}-\theta^{j}\right|}{\left|\theta^{j+1}\right|}\right),\left(\frac{\left|V^{j+1}-V^{j}\right|}{\left|V^{j+1}\right|}\right),\left(\frac{\left|\lambda^{j+1}-\lambda^{j}\right|}{\left|\lambda^{j+1}\right|}\right)\right\} \tag{3.29}$$

onde j é o ponto atual da curva. É esperado que a escolha de p baseada nas equações (3.28) e (3.29) resulte em uma boa performance do algoritmo. *A* experiência com o método do vetor tangente utilizando a equação (3.28) tem demonstrado que ao aproximar-se do ponto de máximo carregamento, p muda de λ para a tensão que apresenta a maior variação,

unesp

retomando a λ após alguns pontos. O uso deste método para a escolha automática de p não tem apresentado dificuldades mesmo para sistemas altamente compensados [Cañ93].

3.3.3 Passo Corretor

Uma vez pré definido o incremento fixo no parâmetro (V_k, θ_k, λ ou μ) como uma estimativa para a próxima solução, é necessário realizar a correção, a partir da solução atual para se obter a próxima solução. Em geral, o tamanho do passo preditor é tal que poucas iterações serão necessárias para obter a solução exata dentro da precisão desejada. A solução correta é obtida resolvendo-se as equações (3.3) ou (3.8) quando λ é usado como parâmetro, as equações (3.4) ou (3.12) quando V_k é usado como parâmetro, as equações (3.5) ou (3.15) quando θ_k é usado como parâmetro e, as equações (3.7) ou (3.19) quando μ é usado como parâmetro.

unesp

CAPÍTULO 4

Resultados da Implementação do Preditor Secante Polinomial de Primeira Ordem

4.1 Introdução

No capítulo anterior foram apresentados os métodos de Newton e os fluxos de carga desacoplado rápido parametrizados, usando como parâmetro ou o ângulo de fase (θ_k) ou a magnitude de tensão (V_k) de uma barra k qualquer, ou o fator de carregamento (λ), ou a potência reativa de uma barra PV (Q_{pv}). No passo preditor, esses métodos usavam a técnica de previsão trivial conhecida como preditor polinomial modificada de ordem zero [Sey94, Chia95]. Neste capítulo são apresentados os resultados, obtidos através de algoritmos desenvolvidos no *software* MATLAB, da implementação do preditor secante polinomial de primeira ordem para estimar a próxima solução. Essa implementação tem por objetivo reduzir a carga computacional exigida para o traçado das curvas PV. Em adição, mostra-se que estes métodos podem ser comutados durante o processo de traçado da curva PV objetivando a determinação eficiente (com poucas iterações) de todos os pontos. A troca de parâmetro é feita quando o número de iterações excede um determinado valor preestabelecido. O processo de troca é realizado de forma que o método que apresenta o melhor desempenho seja escolhido em cada parte da curva. Deve-se enfatizar que as características inerentes dos métodos convencionais não somente são preservadas, mas também melhoradas. A aplicação desta metodologia para aos sistemas IEEE 14, 30, 57 barras [Fre68] e 118 barras [http://www.ee.washington.edu/research/pstca/] mostra que o ponto de máximo carregamento pode ser determinado com a precisão desejada sem nenhuma dificuldade numérica [Mat02-1, Mat02-2].

4.2 Resultados



Os testes são feitos utilizando as formas de parametrização do fluxo de carga desacoplado rápido apresentadas no capítulo precedente.

Para todos os testes realizados, a tolerância adotada para os *mismatches* é de 10^{-4} pu. Nos métodos parametrizados por tensão ou por ângulo de fase da tensão, a tensão ou o ângulo com a menor magnitude, ou aquela com a maior taxa de decréscimo foi escolhida como parâmetro. Nesses casos, os passos adotados para a magnitude da tensão V_k e para o ângulo de fase da tensão θ_k, são apresentados nos testes. Em todos os métodos desacoplados é usado o esquema de iteração padrão [Sto74], ou seja, após a convergência de um dos subproblemas, iterações sucessivas podem ser realizadas no outro subproblema, até que ambos atinjam a convergência ou, o que pode ocorrer, o subproblema convergido, divirja.

O primeiro ponto de cada curva foi obtido com a inicialização *flat start* e considerando posição de *tap* nominal. O método empregado na obtenção desse primeiro ponto foi uma das versões (BX ou XB) do fluxo de carga desacoplado rápido convencional. Os pontos subsequentes são obtidos utilizando-se um dos métodos desacoplado rápido parametrizado (V_k, θ_k, λ, Q_{pv}), associado a um dos dois preditores, o trivial ou o de primeira ordem.

Os limites, superior e inferior, adotados para os *taps* de transformadores foram 1,05 e 0,95. O ajuste de *tap* nos transformadores com comutação de *tap* sob carga (*On Load-Tap Changing* - OLTC) consiste da inclusão da posição do *tap* como variável dependente, ao passo que as magnitudes da tensão das barras controladas são consideradas variáveis independentes [Pet71].

Os limites de potência reativa Q nas barras PV é o mesmo utilizado no método convencional de fluxo de carga. Em cada iteração a geração de reativos de todas as barras PV são comparadas com seus respectivos limites. No caso de violação, a barra PV é alterada para tipo PQ. Estas barras podem voltar a ser PV nas iterações futuras.

As violações de limite de *tap* também são verificadas.

As cargas são modeladas como de potência constante e o parâmetro λ é usado para simular incrementos de carga de potência ativa e reativa, considerando fator de potência constante. Cada aumento de carga é seguido por um aumento de geração equivalente usando λ.

unesp

4.2.1 Preditor Secante Polinomial de Primeira Ordem: Influência dos Limites

A figura 4.1 ilustra os resultados dos testes para o sistema IEEE-14 considerando o preditor secante (polinomial de primeira ordem). O objetivo deste teste é o de comparar os métodos propostos com o propósito de explicitar suas características, considerando a influência dos limites de potência reativa (Q) e de *tap* dos transformadores.

O valor adotado para σ^0 (equação 3.27) é igual a 0,5. O tamanho do passo definido para a magnitude de tensão (V_k) é de 0,01 pu e para o ângulo de tensão (θ_k) é de 1 grau. A partir de dois pontos da curva PV, obtidos por meio de um fluxo de carga desacoplado rápido convencional, a estimativa para os demais pontos é obtida pelo preditor secante, equação (3.26), e pelo controle de passo, equação (3.27). A correção da estimativa é calculada pela Eq. (3.12) para o fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado por V_k e pela Eq. (3.15) para o fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado por θ_k. Este procedimento é repetido até que o número de iterações seja maior do que 15. Para a obtenção de outros pontos da curva foi usada a versão de Newton parametrizado por V_k (V_{14} como parâmetro).

A figura 4.1(a) e a tabela 4.1 mostram o efeito dos limites de potência reativa Q e do *tap* sobre o valor do fator de carregamento λ no ponto de máximo carregamento. Destes resultados pode-se concluir que a inclusão dos limites no controle de Q ocasionam uma grande redução no máximo carregamento, o que não acontece com os limites de controle de *tap*, onde o máximo carregamento se mantém praticamente o mesmo.

Tabela 4.1 – Valores de λ para o Ponto de Máximo Carregamento

Sistemas IEEE	Sem limites de reativos e tap's fixos	Com limites De tap	Com limites de tap e de potência reativa
14	4,0448	4,0624	1,7668
30	2,8554	2,9990	1,5335
57	1,6564	1,8196	1,7252
118	3,1828	3,1822	1,8664



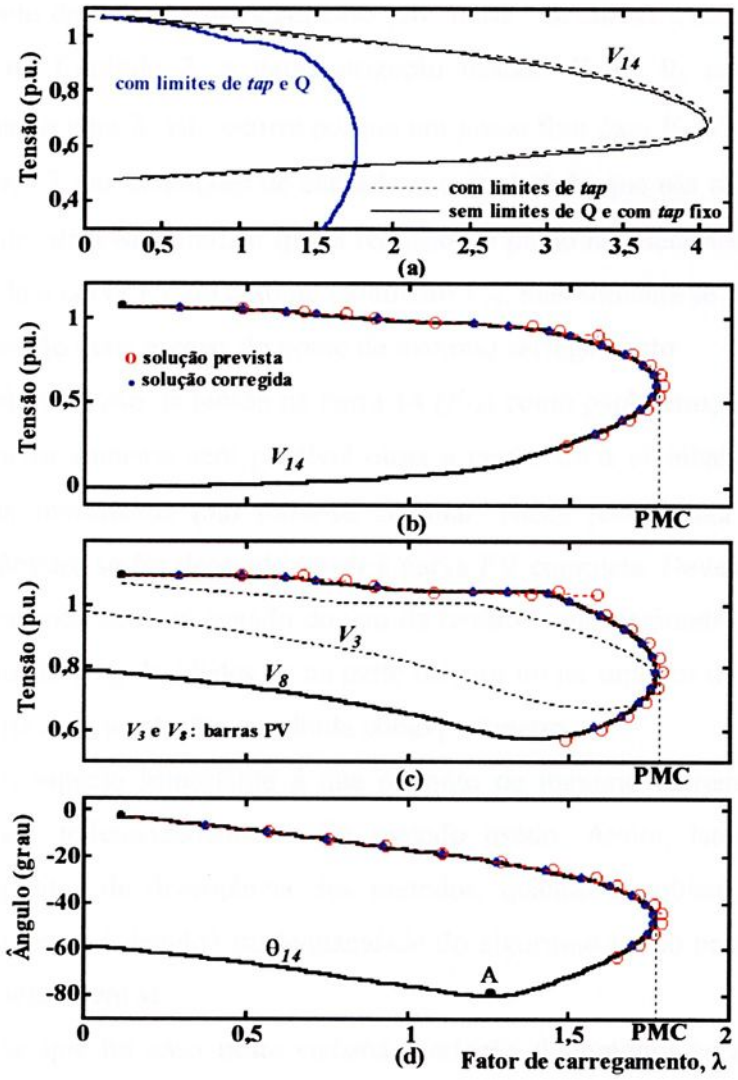


Figura 4.1 – Sistema IEEE-14: (a) Efeitos dos limites de *tap*'s e de reativos sobre a curva PV, (b) magnitude de tensão da barra crítica, (c) magnitudes de tensão nas barras PV, (d) ângulo de tensão da barra crítica.

As figuras 4.1(b) e 4.1(c) mostram as curvas PV para a barra crítica e para duas barras PV, respectivamente, usando V_{14} como parâmetro. O efeito do limite de controle de potência reativa é evidente. A figura 4.1(d) apresenta a curva Pθ para a barra crítica, obtida pela versão XB usando θ_{14} como parâmetro. Deve-se notar nas figuras. 4.1(b) e 4.1(d), que a escolha de um passo constante para o parâmetro (V_{14} ou θ_{14}) resulta num passo variável para λ. Em particular, a variação em λ diminui à medida que o ponto de operação se

aproxima do ponto de máximo carregamento (do "nariz" da curva). Portanto, conforme já foi comentado no Capítulo 3, a parametrização usando V_k ou θ_k resulta num ajuste automático de passo para λ. Isto ocorre porque um passo fixo para V_k ou θ_k corresponde a maiores passos em λ nas condições de carga leve e normal do que nas condições de carga pesada. Entretanto, deve-se enfatizar que a redução no passo não será necessária ao longo do traçado de toda a curva PV no caso do parâmetro V_{14}, mas somente se fará necessário no caso da determinação mais precisa do ponto de máximo carregamento.

Ao contrário do uso da tensão na barra 14 (V_{14}) como parâmetro, quando do uso de θ_{14} como parâmetro somente será possível obter a curva até a vizinhança do A, onde a matriz Jacobiana modificada ($\mathbf{J_\theta}$) torna-se singular. Neste ponto, será necessário uma mudança de parâmetro se for desejado traçar a curva PV completa. Deve-se notar que este mesmo problema pode ocorrer quando do uso da tensão como parâmetro, isto é, a matriz ($\mathbf{J_V}$), pode apresentar singularidades ou na parte inferior ou na superior da curva PV, o que dependerá da barra cuja tensão for escolhida como parâmetro.

Um outro aspecto importante é que o ponto de máximo carregamento obtido é sempre o mesmo, independentemente do método usado. Assim, isto mostra que as diferenças dos pontos de divergência dos métodos, quando da obtenção do ponto de máximo carregamento, é devidoà inadequacidade do algoritmo usado para o cálculo deste ponto e não do método em si.

Observa-se que no caso deste sistema a adoção do preditor secante de primeira ordem acarretou na redução de apenas uma iteração no cálculo de cada ponto da curva.

4.2.2 Preditor Secante Polinomial de Primeira Ordem: Influência de σ^0

A figura 4.2 ilustra os resultados dos testes para o sistema IEEE-57 considerando o preditor secante de primeira ordem e diferentes valores para σ^0. O objetivo deste teste é comparar o número de iterações para diferentes valores de σ^0.

O tamanho do passo definido para a magnitude de tensão (V_k) é de 0,01. A partir de dois pontos da curva PV, obtidos por meio de um fluxo de carga desacoplado rápido convencional, a estimativa para os demais pontos é obtida pelo preditor secante de primeira ordem, equação (3.26), e pelo controle de passo, equação (3.27), usando a tensão da barra

unesp

31 (V_{31}) como parâmetro, onde para cada teste o valor de σ^0 foi alterado. A figura 4.2 (a) mostra as iterações Pθ/QV para um valor de $\sigma^0 = 0,5$. Na figura 4.2 (b) o valor de σ^0 foi dobrado ($\sigma^0 = 1,0$) e na figura 4.2 (c) foi usado $\sigma^0 = 0,8$.

A análise destes resultados mostram que o 5.° e o 7.° ponto, utilizando $\sigma^0 = 0,5$ correspondem praticamente aos mesmos pontos obtidos (4.° e 5.°, respectivamente) utilizando $\sigma^0 = 1,0$. No segundo caso ($\sigma^0 = 1,0$) o número de iterações para ir de um ponto a outro foi menor do que no primeiro caso ($\sigma^0 = 0,5$). Porém, a precisão do ponto de máximo carregamento fica prejudicada quando o tamanho do passo é maior. O ideal, portanto, seria ter-se um controle do valor de σ^0, de forma que na parte mais plana da curva avançássemos mais rápido em direção ao ponto de máximo carregamento, e, próximo a este, reduzíssemos esse valor de forma a obter um valor mais preciso para o ponto de máximo carregamento. Desta forma, optou-se pelo valor $\sigma^0 = 0,5$ por questões de precisão, uma vez que a definição de um valor ótimo para esse parâmetro está fora do objetivo deste trabalho. Quanto ao controle do passo feito pela equação 3.27 pouco influi para o parâmetro em questão, uma vez que o "*nose*" desse parâmetro não ocorre próximo ao ponto de máximo carregamento e portanto a norma do vetor tangente $\mathbf{t}$ ($\|\mathbf{t}\|$), ao contrário do que acontece quando se usa λ como parâmetro, não variará muito nessa região.

Observa-se também que independentemente do valor de σ^0, o número de iterações para pontos localizados na região mais "linear" da curva é menor que em pontos próximos ao ponto de máximo carregamento ("*nose*"), o que se deve ao fato de que na região mais linear a previsão é melhor do que na região não-linear.



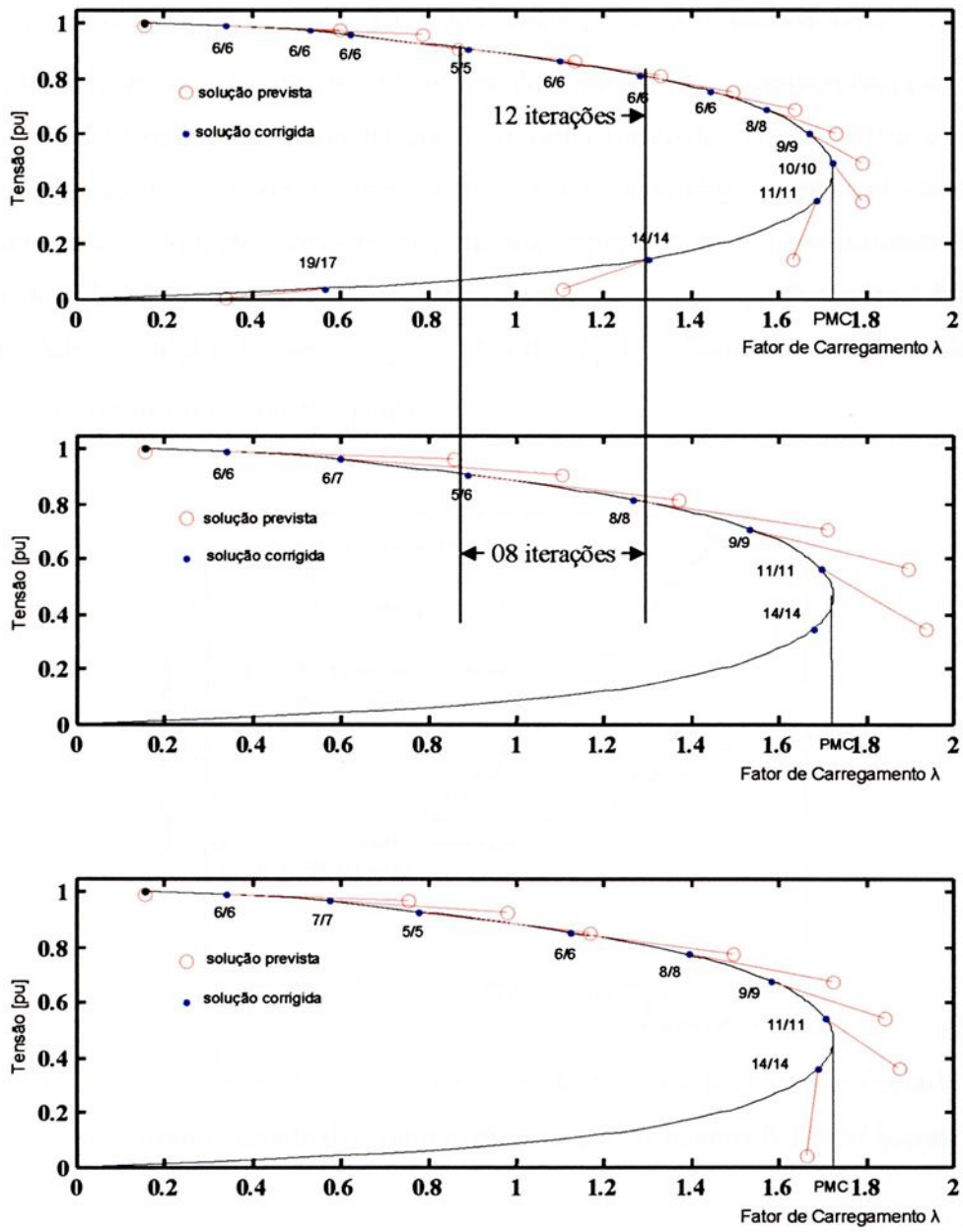


Figura 4.2 – Sistema IEEE –57: (a) Iterações Pθ/QV para $\sigma^0 = 0,5$ e passo = 0,01, com V_{31} como parâmetro, (b) Iterações Pθ/QV para $\sigma^0 = 1,0$ e passo = 0,01, com V_{31} como parâmetro, (c) Iterações Pθ/QV para $\sigma^0 = 0,8$ e passo = 0,01, com V_{31} como parâmetro.

4.2.3 Performance das Versões BX e XB do Método de Fluxo de Carga Desacoplado Rápido Parametrizado

A figura 4.3 ilustra a performance da versão XB do fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado para o sistema IEEE-57 barras, usando o vetor $B'_{ik} = -P_i^{esp} - G_i/B_i\, Q_i^{esp}$ (equação 3.16) ou o vetor $B'_{ik} = -P_i^{esp}$ onde o termo $-G_i/B_i\, Q_i^{esp}$ foi desprezado da equação anterior. O número de iterações para a convergência do fluxo de carga é plotado para cada ponto da curva. A linha tracejada vertical indica o ponto de máximo carregamento. Pode-se observar que os dois processos, desprezando-se ou não a segunda parte da equação, apresentam a mesma performance para praticamente todos os pontos da curva. Para a versão BX, os testes mostraram que sua performance é fortemente afetada pela definição do vetor $B''_{ik} = -Q_i^{esp} + (G_i/B_i).P_i^{esp}$ (equação 3.13), sendo que a melhor alternativa é o uso desta equação.

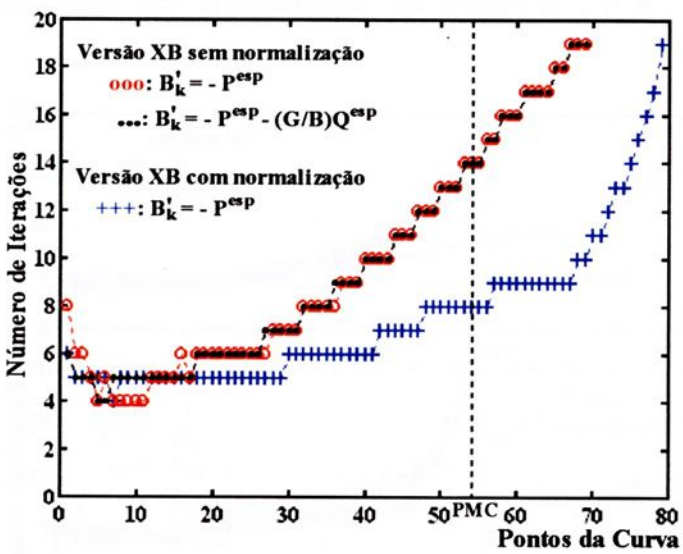


Figura 4.3 – Performance da versão XB do método de fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado, usando θ_{31} como parâmetro para o sistema IEEE-57 barras.

A figura 4.4 ilustra a performance das versões convencionais XB e BX (λ como parâmetro) e as versões XB e BX do desacoplado rápido parametrizado para o sistema IEEE-57 barras. Os valores correspondentes para cada estado foram obtidos usando a tensão da barra 31 (V_{31}) como parâmetro. Com esse objetivo, os pontos foram obtidos através da parametrização pela tensão da barra 31 (V_{31}) com passo de 0,01 pu usando a técnica de previsão trivial. Uma vez obtidos todos os estados, os respectivos valores de

cada parâmetro são calculados e a seguir usados como pontos estimados por seus respectivos métodos, ou seja, usando a técnica de previsão trivial. Dessa forma garante-se que estes valores levarão o sistema de um mesmo estado inicial para o mesmo estado final.

Observa-se que inicialmente todas as versões apresentaram quase a mesma performance. Nas vizinhanças do ponto de máximo carregamento, a versão convencional diverge, como esperado, enquanto as versões parametrizadas obtêm sucesso na solução do problema. Além disso, a versão BX tem uma performance global melhor que a versão XB, como pode ser verificado pelo número de iterações gastas para se obter todos os pontos da curva.

Um outro teste foi feito para avaliar os efeitos do uso de *mismatches* normalizados (**ΔP/V** e **ΔQ/V**) como no fluxo de carga desacoplado convencional apresentado em [Mont90]. Quando se usa este procedimento, os vetores $\mathbf{B''}_k$ e $\mathbf{B'}_k$ também devem ser normalizados.

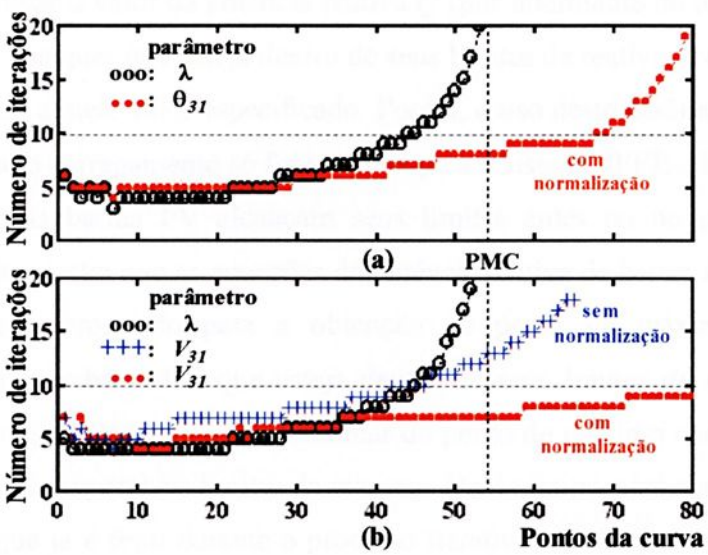


Figura 4.4 – Sistema IEEE-57: (a) comparação entre a performance das versões XB do desacoplado rápido convencional usando λ como parâmetro, e a versão XB do desacoplado parametrizado usando θ_{31} como parâmetro, (b) comparação entre a performance das versões BX do desacoplado rápido convencional usando λ como parâmetro e a versão BX do desacoplado parametrizado usando V_{31} como parâmetro.

Os resultados apresentados nas figuras 4.2 e 4.3 mostram que esta prática reduz o número de iterações próximo ao ponto de máximo carregamento e para a parte inferior da curva PV para ambas as versões.

4.2.4 Performance da Versão BX do Fluxo de Carga Desacoplado Rápido Usando Potência Reativa de uma Barra PV (Q_{PV}) como Parâmetro

A possibilidade do uso da potência reativa de uma barra PV como parâmetro é muito atrativa, visto que qualquer programa de fluxo de carga já inclui estas equações e assim não seriam necessárias grandes alterações no programa convencional, mas somente a substituição da coluna correspondente à nova variável Q_{PV}. O comportamento desse parâmetro é similar ao do parâmetro V_k, isto é, está continuamente aumentando à medida que o carregamento aproxima-se do ponto de máximo carregamento. Assim, é apenas necessário especificar o valor da potência reativa Q (por intermédio de um parâmetro Q_{PV}) de uma barra PV qualquer que esteja dentro de seus limites de reativo, e obter a solução do fluxo de carga para aquele valor especificado. Porém, o uso deste parâmetro para obtenção do ponto de máximo carregamento só foi possível para o sistema IEEE-118 barras.

Em geral, as barras PV alcançam seus limites antes ou no ponto de máximo carregamento. Isto mostra que as equações de potência reativa de barras PV podem não ser o parâmetro mais apropriado para a obtenção do ponto de máximo carregamento. Inicialmente, qualquer barra PV que esteja dentro de seus limites de reativos, pode ser usada como parâmetro. Porém, ao se aproximar do ponto de máximo carregamento, várias barras atingirão seus respectivos limites de reativos. Dessa forma, será necessário monitorar as barras PV (o que já é feito durante o processo iterativo), e escolher sempre aquela que está dentro de seus limites.

A figura 4.5(a) ilustra a performance do parâmetro Q_{PV} de três barras PV (40, 42, e 116) do sistema IEEE-118 e o fluxo de carga desacoplado rápido convencional. Todas as demais barras PV atingem seus respectivos limites antes ou coincidentemente com o ponto de máximo carregamento. Com o intuito de garantir que os respectivos valores dos parâmetros conduzirão o sistema do mesmo estado inicial para o mesmo estado final, o mesmo procedimento usado para obter a figura 4.4 foi usado, isto é, os parâmetros correspondentes de cada estado foram obtidos usando a tensão da barra 52 (V_{52}) como

unesp

parâmetro considerando um passo fixo de 0,01 pu. Uma vez obtidos todos os estados, os respectivos parâmetros Q_{PV} das três barras PV (40, 42 e 116) e o parâmetro λ foram calculados e depois usados como estimativas pelo respectivo fluxo de carga desacoplado rápido continuado, usando o preditor secante de ordem zero. Como esperado, nas vizinhanças do ponto de máximo carregamento o método de fluxo de carga desacoplado rápido continuado encontra uma solução, enquanto a versão convencional diverge.

A figura 4.5(b) compara a performance dos dois preditores secante (modificado de ordem zero e de primeira ordem) para uma das barras PV (barra 40) da figura 4.5(a). Os resultados mostram que o preditor secante polinomial de primeira ordem resulta em um número menor de iterações para todos os pontos da curva.

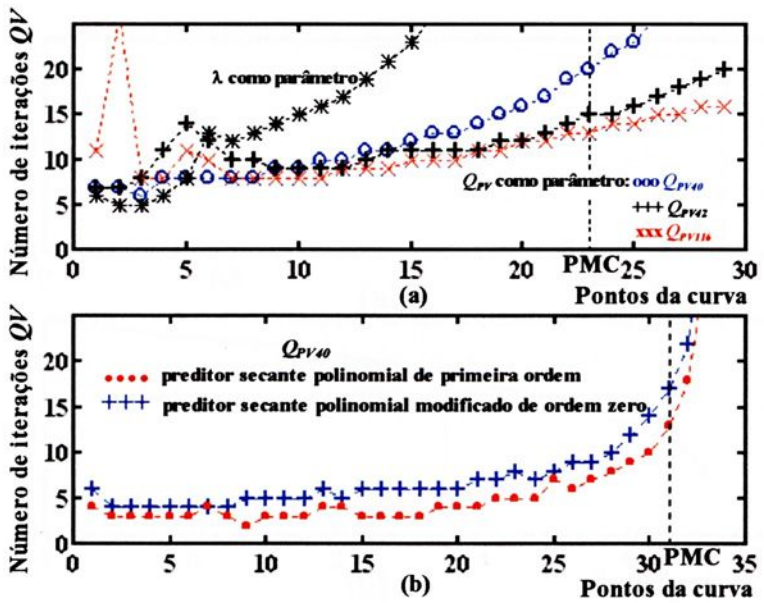


Figura 4.5 – Performance do parâmetro Q_{PV} – Sistema IEEE-118: (a) preditor polinomial modificado de ordem zero, (b) preditor polinomial modificado de ordem zero versus preditor polinomial de primeira ordem ($\sigma^0 = 0,5$).

Com o uso desta técnica de parametrização é importante notar que a singularidade é movida para além do ponto de máximo carregamento, isto é, na parte inferior da curva PV. Isto é responsável pela boa performance de convergência nas vizinhanças do ponto de máximo carregamento, quando comparado às versões convencionais. Como se pode ver, isto ocorre porque a não linearidade da trajetória de soluções das equações do fluxo de carga é "diminuída", como conseqüência da adoção do novo parâmetro. As figuras 4.6(a) e

4.6(b) mostram, respectivamente, a tensão da barra 52 (V_{52}) em função do parâmetro λ e da potência reativa da barra PV 116 (Q_{PV}), a qual é o novo parâmetro. Na região do ponto de máximo carregamento o sistema de equações apresenta um comportamento "quase" linear, justificando o pequeno número de iterações. Em outras palavras, enquanto o método convencional de fluxo de carga tem problemas de convergência na vizinhança do ponto de máximo carregamento devido ao alto grau de não linearidade do sistema, o método parametrizado pode facilmente obter o ponto de máximo carregamento devido à diminuição desta não linearidade.

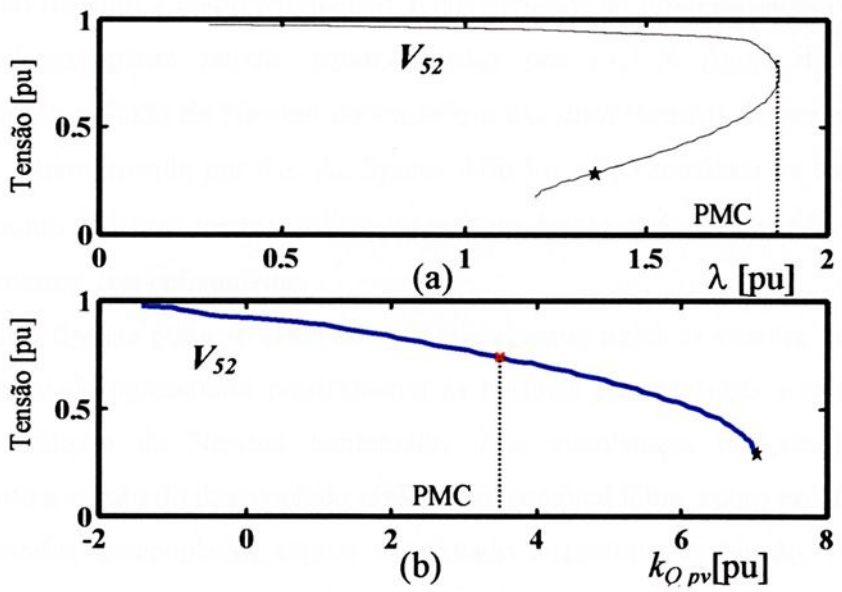


Figura 4.6 – Performance do esquema de parametrização pela potência reativa de uma barra PV – Sistema IEEE-118: (a) magnitude de tensão em função do fator de carregamento λ, (b) magnitude de função em função de k_{Qpv}.

4.2.5 Performance do Preditor Secante Polinomial Modificado de Ordem Zero e do Polinomial de Primeira Ordem

A figura 4.7 ilustra a performance das duas versões do preditor secante (polinomial modificado de ordem zero e polinomial de primeira ordem) usando *mismatches* normalizados ($\Delta P/V$ e $\Delta Q/V$) para o sistema IEEE-118. O tempo de CPU e o número de iterações para a convergência para cada condição de carregamento são mostrados nessa figura. A linha vertical pontilhada indica o ponto de máximo carregamento. A figura 4.7(a) mostra a magnitude de tensão da barra crítica em função do fator de carregamento λ (curva PV). A figura 4.7(b) ilustra a performance das versões BX do método desacoplado rápido convencional (usando λ como parâmetro), e dos métodos de fluxo de carga continuados de Newton e desacoplado rápido, parametrizados por V_{53}. A figura 4.6(e) mostra o desempenho do método de Newton continuado e das duas técnicas de predição, usando a versão XB parametrizada por θ_{53}. As figuras 4.7(c) e 4.7(f) mostram os tempos de CPU para cada ponto da curva correspondente ao método desacoplado continuado, com V_{53} e θ_{53} como parâmetros, respectivamente.

Destas figuras pode-se observar que inicialmente todas as versões do desacoplado rápido continuado apresentam praticamente as mesmas performances e são melhores do que a do método de Newton continuado. Nas vizinhanças do ponto de máximo carregamento a versão do desacoplado rápido convencional falha, como esperado, enquanto que os métodos desacoplados rápido continuado encontram a solução. Além disso, o preditor secante (polinomial de primeira ordem) tem uma melhor performance global comparado com o modificado de ordem zero, como pode ser verificado pelo número de iterações necessárias para obtenção de todos os pontos da curva.

Na vizinhança do ponto de máximo carregamento a versão BX do fluxo de carga desacoplado rápido continuado parametrizado por V_{53} é levemente melhor que o respectivo Newton continuado. A figura 4.7(d) mostra o efeito do aumento do tamanho do passo (σ^0=1). Os resultados mostram que esta prática reduz o número total de iterações sem afetar entretanto, a performance global.

unesp

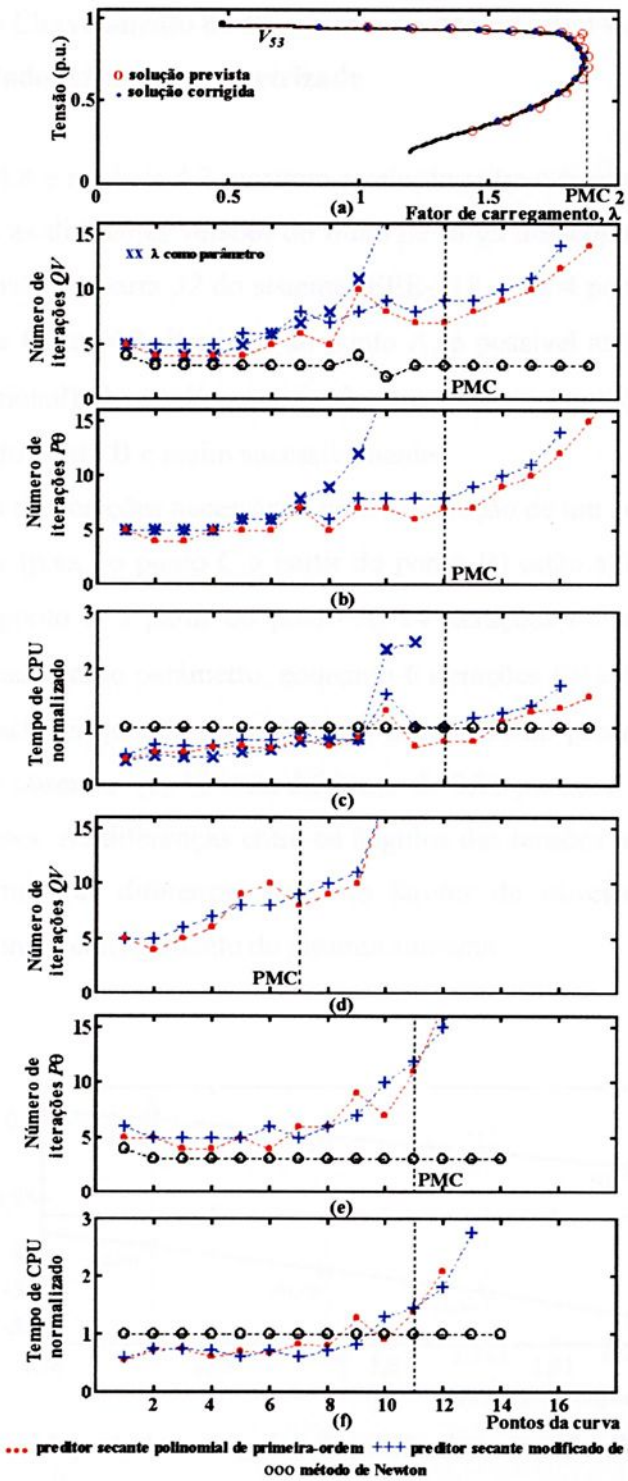


Figura 4.7 – Sistema IEEE – 118: (a) magnitude de tensão da barra crítica, (b) número de iterações $P\theta$ e QV, para V_{53} como parâmetro e $\sigma^0 = 0{,}5$, (c) tempo de CPU normalizado para V_{53} como parâmetro e $\sigma^0 = 0{,}5$, (d) número de iterações QV para V_{53} como parâmetro e $\sigma^0 = 1$, (e) iterações $P\theta$ para θ_{53} como parâmetro e $\sigma^0 = 0{,}5$, (f) tempo de CPU normalizado para θ_{53} como parâmetro e $\sigma^0 = 0{,}5$.

4.2.6 Efeito do Chaveamento de Parâmetro no Método de Fluxo de Carga Desacoplado Rápido Parametrizado

A figura 4.8 e a tabela 4.2 mostram a relação entre o tamanho do passo e o número de iterações para as diferentes versões do fluxo de carga desacoplado rápido. A magnitude e o ângulo da tensão da barra *52* do sistema IEEE-118, para 4 pontos de operação (A a D) são mostrados na figura 4.8. Partindo do ponto A, é possível atingir o ponto B usando λ (método convencional), θ_k, ou V_k como parâmetro. O mesmo se aplica para a obtenção do ponto C a partir do ponto B e assim sucessivamente.

O número de iterações necessárias para a obtenção de um ponto de operação a partir do ponto anterior (p.ex., o ponto C a partir do ponto B) estão apresentados na tabela 4.2. Para obter-se o ponto B a partir do ponto A, 14 iterações $P\theta$ e 13 QV são necessárias quando λ é utilizado como parâmetro, enquanto 6 iterações $P\theta$ e *6* QV e 10 iterações $P\theta$ e 10 QV são necessárias quando θ_{52} e V_{52} são usados como parâmetros, respectivamente. Também se pode observar que há uma diferença de 0,01 pu entre as tensões dos pontos de operação adjacentes. As diferenças entre os ângulos das tensões também são praticamente constantes. Contudo, as diferenças entre os fatores de carregamento são variáveis, e diminuem conforme o carregamento do sistema aumenta.

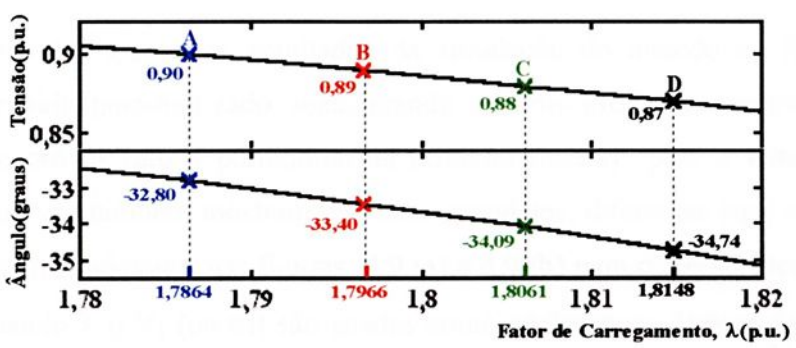


Figura 4.8 - Magnitudes e ângulos da tensão da barra *52* – Sistema IEEE-118.

Tabela 4.2 - Influência do tamanho do passo nas versões fluxo de carga desacoplado rápido.

Ponto	Convencional		θ_{52} como parâmetro		V_{52} como parâmetro	
	λ	$P\theta/QV$	θ (°)	$P\theta/QV$	V (pu)	$P\theta/QV$
A	1,7864	-	-32,80	-	0,90	-
B	1,7966	14/13	-33,44	6/6	0,89	10/10
C	1,8061	15/14	-34,09	7/6	0,88	10/10
D	1,8148	16/15	-34,74	7/6	0,87	10/10

Apesar da redução do tamanho do passo, o número de iterações aumenta quando λ é usado como parâmetro. Desse modo, é possível deslocar-se de um ponto para outro mais eficientemente (com menos iterações) através da mudança do parâmetro ao invés de reduzir o passo. A redução do passo seria necessária apenas nos casos de coincidência da singularidade para todos os parâmetros. De fato esta é uma situação atípica. Portanto, o uso de um limite predefinido do número de iterações para estabelecer a mudança de parâmetro durante o traçado da curva PV, iria assegurar que o método com a melhor desempenho fosse escolhido em cada parte da curva. Com este procedimento evitar-se-ia uma redução excessiva do tamanho do passo e um número excessivo de iterações durante o traçado da curva.

A figura 4.9 mostra os resultados da simulação do método de fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado considerando os dois preditores secante (polinomial modificado de ordem zero e polinomial de primeira ordem) para o sistema IEEE-118 barras. Estas curvas também mostram os pontos previstos, diferentes para cada parâmetro adotado. Os valores adotados nas figuras 4.9 (a) e 4.9 (b) para σ^0 foram, respectivamente, 0,5 e 0,25, quando λ e V_k (ou θ_k) são usados como parâmetros. Após a determinação de dois pontos, a estimativa para o próximo ponto é obtida pelo preditor secante e pelo controle de passo. A fim de calcular todos os pontos da curva PV com poucas iterações, os métodos são comutados durante o traçado, o que é feito sempre que o número de iterações excede um limite predefinido. Nesse caso, a magnitude de tensão ou o ângulo com maior taxa de decréscimo é usada como parâmetro.

unesp

Como se pode ver na figura 4.9 (b), com este procedimento, ter-se-á um bom desempenho para todos os pontos da curva. Nas vizinhanças do ponto de máximo carregamento (indicado por uma linha pontilhada) o fluxo de carga desacoplado rápido convencional falha, enquanto os métodos de fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado obtêm a solução. Também se verifica pelo número de iterações, que o preditor polinomial de primeira ordem apresenta um melhor desempenho geral que o polinomial modificado de ordem zero, particularmente nas vizinhanças e além do ponto de máximo carregamento, onde o sistema apresenta um maior grau de não linearidade. Além disso, a figura 4.9 (c) mostra que esse desempenho não é tão susceptível ao tamanho do passo.

unesp

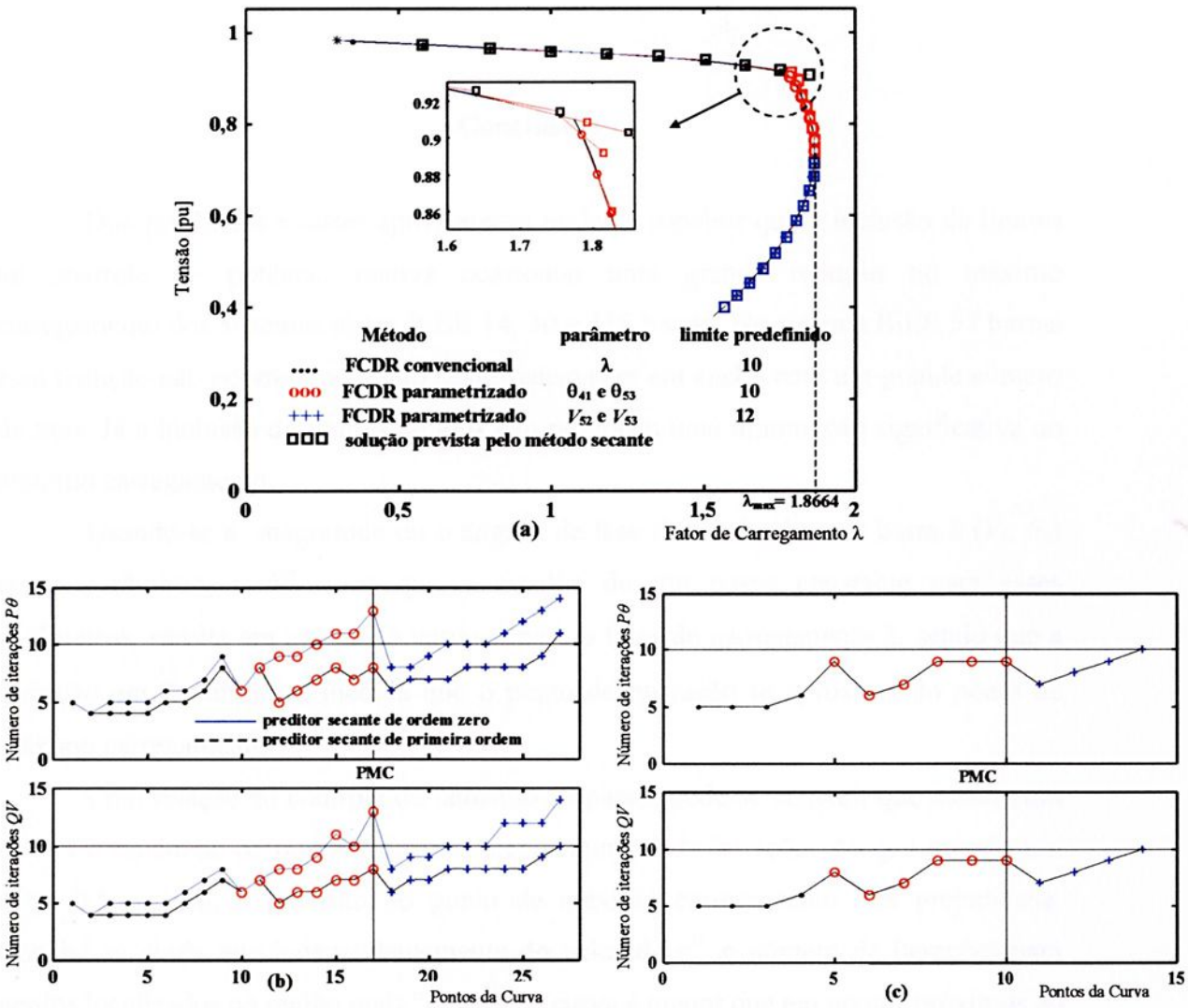


Figura 4.9 - Efeitos do chaveamento de parâmetros e do preditor secante nos métodos de fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado – Sistema IEEE-118:

(a) magnitude de tensão da barra crítica,(b) número de iterações $P\theta$ e QV,

(c) número de iterações $P\theta$ e QV para tamanho dobrado do passo (σ^0_λ=1 e $\sigma^0_{\theta,V}$= 0,5).

CAPÍTULO 5

Conclusões

Dos resultados e testes apresentados pode-se concluir que a inclusão de limites no controle de potência reativa ocasionou uma grande redução no máximo carregamento dos sistemas testes IEEE 14, 30 e 118 barras. No sistema IEEE 57 barras essa redução não ocorreu, pelo fato deste sistema ser em anel e com um grande número de *taps*. Já a inclusão de limites de *taps* não provocou uma diminuição significativa no máximo carregamento.

Usando-se a magnitude ou o ângulo de fase de tensão de uma barra k (V_k, θ_k) como parâmetro, verificou-se que a escolha de um passo constante para esses parâmetros, resulta em um passo variável para o fator de carregamento λ, sendo que a variação em λ diminui à medida que o ponto de operação se aproxima do ponto de máximo carregamento.

Com relação ao controle do tamanho do passo, pode-se concluir que usando um $\sigma^0 = 1{,}0$ obtém-se os pontos com um menor número de iterações do que usando um $\sigma^0 = 0{,}5$, porém, a precisão do ponto de máximo carregamento fica prejudicada. Conclui-se ainda que independentemente do valor de σ^0, o número de iterações para pontos localizados na região mais "linear" da curva é menor que em pontos próximos ao ponto de máximo carregamento ("*nose*"), o que se deve ao fato de que na região mais linear a previsão é melhor do que na região não-linear.

Utilizando-se a versão XB do fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado, conclui-se que o termo $-G_i/B_i\,Q_i^{esp}$ pode ser desprezado da equação $B_{ik}^{'} = -P_i^{esp} - G_i/B_i\,Q_i^{esp}$, visto que esta condição apresentou a mesma performance para praticamente todos os pontos da curva em relação ao uso da equação completa. Conclui-se ainda que para a versão BX o mesmo não acontece, ou seja, o segundo termo da equação $B_{ik}^{*} = -Q_i^{esp} + (G_i/B_i).P_i^{esp}$ não pode ser desprezado. Como esperado, observa-se que inicialmente estas duas versões apresentam quase a mesma performance. Nas vizinhanças do ponto de máximo carregamento não se deve utilizar a versão convencional, pois esta diverge, enquanto as versões parametrizadas obtêm sucesso na

unesp

solução do problema. Mostrou-se também que a versão BX do método desacoplado rápido tem uma performance global melhor que a versão XB, apresentando um número menor de iterações para a obtenção dos pontos da curva PV. Conclui-se ainda que o uso de *mismatches* normalizados reduz o número de iterações próximo ao ponto de máximo carregamento e na parte inferior da curva PV.

Os resultados também mostraram a possibilidade do uso da potência reativa de uma barra PV como parâmetro da continuação do fluxo de carga desacoplado rápido para o sistema IEEE – 118 barras. Inicialmente qualquer barra PV que esteja dentro de seus limites de reativos pode ser usada como parâmetro. Quando seus limites forem atingidos, uma outra barra PV do sistema, que não tenha atingido os seus limites, deve ser escolhida.

Dos resultados apresentados pode-se concluir que o uso de um preditor secante polinomial de primeira ordem produz, em relação ao de ordem zero, uma redução no número de iterações para obtenção de todos os pontos da curva.

Também se mostra que os métodos desacoplados rápidos podem ser comutados entre si, durante o traçado da curva PV, a fim de determinar todos os pontos da curva PV com um menor número de iterações, sendo mais interessante o chaveamento do que a redução do passo.

Os métodos propostos neste trabalho possibilitam o traçado completo da curva PV baseado em simples modificações dos métodos desacoplados rápidos, enquanto mantêm suas vantagens características.

Por fim, observa-se que o ponto de máximo carregamento obtido por qualquer um dos métodos apresentados sempre foi o mesmo.

unesp

Referências Bibliográficas

[Ajj92] Ajjarapu, V. e C. Christy, 1992. The Continuation Power Flow: a Tool for Steady State Voltage Stability Analysis, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, N° 1, February, pp. 416-423.

[Ajj94] Ajjarapu, V.; Lau, P. L. e Battula, S., 1994. An Optimal Reactive Power Planning Strategy Against Voltage Collapse, IEEE Trans. On Power System, Vol. 9, N° 2, May, pp. 906-917.

[Alv00] Alves, D. A., 2000. Obtenção do Ponto de Máximo Carregamento em Sistemas Elétricos de Potência Utilizando Novas Técnicas de Parametrização para o Método da Continuação, Tese de Doutorado, FEEC-UNICAMP.

[Alv00-1] Alves DA, da Silva LCP, Castro CA, da Costa VF. New parameterization schemes for continuation load flow method. Proceedings of the IEEE-IEE International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring, and Power Technologies DRPT 2000: 179-184, London, UK.

[Ame88] Van Amerongen, R. A. M., 1988. A General-Purpose Version of the Fast Decoupled Load Flow, IEEE Trans. on Power System, Vol. 4, N° 2, pp. 760-770.

[Ary96] Arya, L. D. & Verma, H. K., 1996, A Method for Tracing PV Curve for Voltage Stability Analysis with Voltage Dependent Loads, Electric Machines and Power Systems, Vol. 24, pp.583-596.

[Bij97] Bijwe PR and Tare RS. An efficient continuation power flow method for voltage stability analysis. Electric Machines and Power Systems 1997; (25): 927-938.

[Cañ93] Cañizares, C. A.; F. L. Alvarado, 1993. Point of Collapse Methods for Large AC/DC Power Systems, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, N° 1, February, pp. 1-8.

[Cañ95-1] Cañizares, C. A., 1995, On Bifurcations, Voltage Collapse and Load Modeling, IEEE Trans. on Power Systems, Vol.10, N° 1, February, pp. 512-522.



[Cañ95-2] Cañizares, C. A., 1995, Conditions for a Saddle-Node Bifurcations in AC/DC Power Systems, Electric Power & Energy Systems, Vol.17, N° 1, pp. 61-68.

[Chao95] Chao XY, et al. Practical determination of operating transfer limits. In: Proceedings of PICA Conference 1995:271-277.

[Chia95] Chiang, H. D.; Flueck, A. J.; Shah, K. S.; Balu, N., 1995. CPFLOW: A practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations. IEEE Transactions on Power Systems, v. 10, n° 2, p. 623-634, May.

[Chia99] Chiang, H. D.; H. Li; H. Yoshida; Y. Fukuyama e Y. Nakanishi, 1999. The generation of ZIP-V Curves for Tracing Power System Steady State Stationary Behavior Due to Load and Generation Variations, Proc. IEEE PES Summer Meeting, Edmonton, Alberta – Canada, July, pp. 647-651.

[CIGRÉ98] Dobson I., Chiang H.D., 1989, Towards a Theory of Voltage Collapse in Electric Power Systems, Systems & Control Letters, 13, North Holland.

[Cut98] Van Cutsem T. and Vournas C, 1998. Voltage Stability of Electric Power System, Kluwer Academic Publishers, Boston, USA, 378 p.

[Dob89] Dobson I., Chiang H.D., 1989, Towards a Theory of Voltage Collapse in Electric Power Systems, Systems & Control Letters, 13, North Holland.

[Fen00] Z. Feng, W. Xu, C. Oakley, and S. McGoldrick, "Experiences on assessing Alberta power system voltage stability with respect to the WSCC reactive power criteria," in Proc. 1999 IEEE PES Summer Meeting, pp. 1297-1302.

[Fre68] L. L. Freris and A. M. Sasson, 1968."Investigation of the load-flow problem", Proc. of IEE, Vol. 115, N.° 10, October, pp. 1459-1470.

[FTCT99] Força Tarefa "Colapso de Tensão" (1999). Critérios e Metodologias Estabelecidos no âmbito da Força - Tarefa "Colapso de Tensão" do GTAD / SCEL / GCOI para Estudos de Estabilidade de Tensão nos Sistemas Interligados Norte/Nordeste, Sul/Sudeste e Norte/Sul Brasileiros, XV SNPTEE, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

[Gao92] Gao, B. et al, 1992. Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis, IEEE Transactions on Power System, Vol. 7, N° 4, November, pp. 1529-1536.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

[GOP99] GOP – Grupo de Estudo de Operação de Sistemas Elétricos, 1999. Medidas Operativas de Curto Prazo no Controle de Colapso de Tensão, XV SNPTEE, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

[GRID98] GRIDCO, 1998, Evaluation of GRIDCO's RFP for Generation in the Grand Prairie Region on March 1998, Final Report.

[His95] Hiskens IA. Analysis tools for power systems - contending with nonlinearities. Proceedings of the IEEE 1995; 83(11): 1573-1587.

[Iwa81] Iwamoto, S.; Tamura, Y., 1981. A load flow calculation method for ill-conditioned power systems. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-100, N°.4, April, pp. 1736-1742.

[Kun93-1] Kundur, P., 1993, Power System Stability and Control, McGraw - Hill, New York, 1176p.

[Les99] Lesieutre BC, Sauer PW, Pai MA. Existence of solutions for the network/load equations in power systems. IEEE Trans. on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications 1999; CAS-I-46(8):1003-1011.

[Lof95a] Lof P. A., 1995. On Static Analysis of Long-Term Voltage Stability, PhD Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 197 p.

[Man93] Mansour, Y., 1993. Suggested Techniques for Voltage Stability Analysis, IEEE Power Engineering Society, 93TH0620-5PWR, 142 p.

[Mat02-1] Alves D. A., R. R. Matarucco, L. C. P. da Silva, C. A. Castro and V. F. da Costa. "Parameterized Fast Decoupled Load Flows for Obtaining the Maximum Loading of Power Systems with Secant Predictor", Anais do VIII SEPOPE – Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Brasília, Maio de 2002, 06 pp.

[Mat02-2] Alves D. A., R. R. Matarucco, L. C. P. da Silva e V. F. da Costa. "Fluxo de Carga Desacoplado Rápido Parametrizado com Preditor Secante", Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática – CBA, Natal, RN, Setembro de 2002, 06 pp.

[Mont90] Monticelli A., A. Garcia, e O. R. Saavedra, 1990. Fast Decoupled Load Flow : Hypothesis, Derivations and Testing, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, N° 4, November, pp. 1425-1431.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

[Mor93] Morison, G. K.; Gao, B. and Kundur, P., 1993. Voltage Stability Analysis Using Static and Dynamic Approaches, IEEE Transactions on Power System, Vol. 8, N° 3, pp. 1159-1171.

[Pal92] Pal, M. K., 1992. Voltage Stability Conditions Considering Load Characteristics, IEEE Transactions on Power System, Vol. 7, N° 1, pp. 243-249.

[Pet71] Peterson N.M. e W.S. Meyer (1971). Automatic Adjustment of Transformer and Phase-Shifter Taps in the Newton Power Flow, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-90, N° 1, Fevereiro, pp. 103-108.

[PSP98] Final Draft of IEEE/PES Power System Stability Subcommittee Special Publication, 1998, IEEE Special Publication on Voltage Stability Assessment-Procedures and Guides, available at http://www.power.uwaterloo.ca/, July.

[RRWG99] Reactive Power Reserve Work Group. Final report, voltage stability criteria, undervoltage load shedding strategy, and reactive power reserve monitoring methodology. 1999, 154p.

[Sey94] Seydel, R., 1994. From Equilibrium to Chaos: Practical Bifurcation and Stability Analysis, 2ª ed., Springer - Verlag, New York, 407p.

[Sil97] Da Silva, L. C. P., 1997. Uma Reformulação Analítica Alternativa para a Análise Modal de Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado. FEEC-UNICAMP.

[Soa97] Soares, V. L. C. & Caldas, G. P., 1997, Estabilidade de Tensão – Estudo do Sistema Sul, GAT/04, XIV SNPTEE, Belém - PA, Brasil.

[Sto74] Stott B. & Alsac, O., 1974. Fast Decoupled Load Flow, IEEE Trans. on Power System, Vol. 93, pp. 859-869.

[Tay94] Taylor C. W. Power System Voltage Stability, 1994. McGraw-Hill, New York, USA, 273 p.

[Tay97] Taylor C.W. and Erickson D.C., 1997. Recording and Analyzing the July 2 Cascading Outage, IEEE Computer Applications in Power, January, pp. 26-30.

unesp

[Zamb97] Zambroni de Souza, A. C.; C. A. Cañizares e V. H. Quintana, 1997. New Techniques to Speed Up Voltage Collapse Computations Using Tangent Vectors. IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, N° 3, August, pp. 1380-1387.

[Xu93] Xu, W. and Mansour Y., 1993. Voltage Stability Analysis Using Generic Dynamic Load Models, IEEE Transactions on Power System, 93WM185-9PWRS, pp. 1-8.

[Wan00] L. Wang and X. Rong Li, "Robust fast decoupled power flow," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 15, pp. 208-215, Feb. 2000.

APÊNDICE A

ARTIGOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS DURANTE A ELABORAÇÃO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ALVES D. A., R. R. MATARUCCO, L. C. P. DA SILVA, C. A. CASTRO AND V. F. DA COSTA. "Parameterized Fast Decoupled Load Flows for Obtaining the Maximum Loading of Power Systems with Secant Predictor", Anais do VIII SEPOPE – Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Brasília, Maio de 2002, 06 pp.

ALVES D. A., R. R. MATARUCCO, L. C. P. DA SILVA E V. F. DA COSTA. "Fluxo de Carga Desacoplado Rápido Parametrizado com Preditor Secante", Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática – CBA, Natal, RN, Setembro de 2002, 06 pp.

unesp

APÊNDICE B

BANCO DE DADOS DOS SISTEMAS ELÉTRICOS

- **Sistema IEEE – 14 barras**

- **Dados das Barras**

N.º	Nome	V kV	Tipo	V pu	θ °	Pl MW	Ql MVar	Pg MW	Qg MVar	Qgmax MVar	Qgmin MVar	Bsh MVar
1	BUS_1	69,0	3	1,060	0,00	0,0	0,0	232,4	-16,9	990,0	-990,0	0,0
2	BUS_2	69,0	2	1,045	-4,98	21,7	12,7	40,0	42,4	50,0	-40,0	0,0
3	BUS_3	69,0	2	1,010	-12,72	94,2	19,0	0,0	23,4	40,0	0,0	0,0
4	BUS_4	69,0	0	1,019	-10,33	47,8	-3,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	BUS_5	69,0	0	1,020	-8,78	7,6	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	BUS_6	13,8	2	1,070	-14,22	11,2	7,5	0,0	12,2	24,0	-6,0	0,0
7	BUS_7	13,8	0	1,062	-13,37	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	BUS_8	13,8	2	1,090	-13,36	0,0	0,0	0,0	17,4	24,0	-6,0	0,0
9	BUS_9	13,8	0	1,056	-14,94	29,5	16,6	0,0	0,0	0,0	0,0	19.0
10	BUS_10	13,8	0	1,051	-15,10	9,0	5,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	BUS_11	13,8	0	1,057	-14,79	3,5	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	BUS_12	13,8	0	1,055	-15,07	6,1	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	BUS_13	13,8	0	1,050	-15,16	13,5	5,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	BUS_14	13,8	0	1,036	-16,04	14,9	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

- **Dados dos Ramos**

Barra Origem	Barra Destino	Resistência pu	Admitância pu	Bsh pu	Tap pu
1	2	0	0,01938	0,0528	0,0
1	5	0	0,05403	0,0492	0,0
2	3	0	0,04699	0,0438	0,0
2	4	0	0,05811	0,0374	0,0
2	5	0	0,05695	0,0340	0,0
3	4	0	0,06701	0,0346	0,0
4	5	0	0,01335	0,0128	0,0
4	7	0	0,0	0,0	0,978
4	9	0	0,0	0,0	0,969
5	6	0	0,0	0,0	0,932
6	11	0	0,09498	0,0	0,0
6	12	0	0,12291	0,0	0,0
6	13	0	0,06615	0,0	0,0
7	8	0	0,0	0,0	0,0
7	9	0	0,0	0,0	0,0
9	10	0	0,03181	0,0	0,0
9	14	0	0,12711	0,0	0,0
10	11	0	0,08205	0,0	0,0
12	13	0	0,22092	0,0	0,0
13	14	0	0,17093	0,0	0,0

unesp

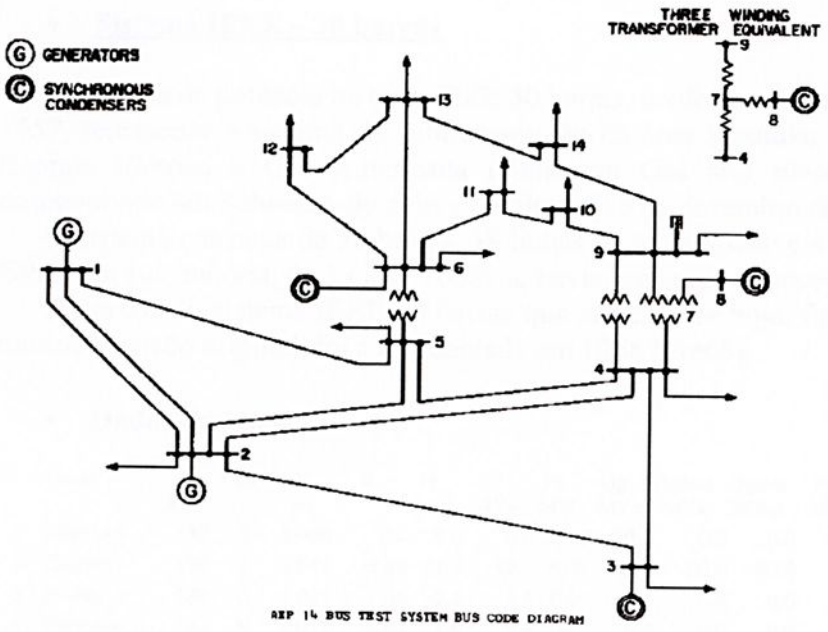


Figura B.1 – Sistema IEEE – 14 barras

- **Sistema IEEE – 30 barras**

O sistema de potência de teste IEEE 30 barras, conforme relatado por Glimn e Stagg em 1957, representa o sistema de subtransmissão da área Roanoke (EUA) da Companhia de Energia Elétrica e Gás Americana (American Gas and Electric Company). Este foi desenvolvido em Schenectady com a configuração de dezembro de 1956.

O sistema consistia de 30 barras, 38 linhas de transmissão e 4 transformadores em fase. Estas, em sua maioria, de 33 kV. Todavia, havia uma rede de transmissão de 132 kV.

A versão do sistema IEEE 30 barras que se conhece hoje, figura B.2, considerada por muitos a versão original, foi a apresentada em 1968 [Fre68].

- **Dados das Barras**

N.º	Nome	V kV	Tipo	V pu	θ °	Pl MW	Ql MVar	Pg MW	Qg MVar	Qgmax MVar	Qgmin MVar	Bsh MVar
1	Glen Lyn	132	3	1.060	0.0	0.0	0.0	260.2	-16.1	0.0	0.0	0.0
2	Claytor	132	2	1.043	-5.48	21.7	12.7	40.0	50.0	50.0	-40.0	0.0
3	Kumis	132	0	1.021	-7.96	2.4	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	Hancock	132	0	1.012	-9.62	7.6	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	Fieldale	132	2	1.010	-14.37	94.2	19.0	0.0	37.0	40.0	-40.0	0.0
6	Roanoke	132	0	1.010	-11.34	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	Blaine	132	0	1.002	-13.12	22.8	10.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	Reusens	132	2	1.010	-12.10	30.0	30.0	0.0	37.3	40.0	-10.0	0.0
9	Roanoke	1.0	0	1.051	-14.38	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	Roanoke	33	0	1.045	-15.97	5.8	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.0
11	Roanoke	11	2	1.082	-14.39	0.0	0.0	0.0	16.2	24.0	-6.0	0.0
12	Hancock	33	0	1.057	-15.24	11.2	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	Hancock	11	2	1.071	-15.24	0.0	0.0	0.0	10.6	24.0	-6.0	0.0
14	Bus 14	33	0	1.042	-16.13	6.2	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	Bus 15	33	0	1.038	-16.22	8.2	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	Bus 16	33	0	1.045	-15.83	3.5	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	Bus 17	33	0	1.040	-16.14	9.0	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	Bus 18	33	0	1.028	-16.82	3.2	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	Bus 19	33	0	1.026	-17.00	9.5	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	Bus 20	33	0	1.030	-16.80	2.2	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	Bus 21	33	0	1.033	-16.42	17.5	11.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	Bus 22	33	0	1.033	-16.41	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	Bus 23	33	0	1.027	-16.61	3.2	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	Bus 24	33	0	1.021	-16.78	8.7	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	4.3
25	Bus 25	33	0	1.017	-16.35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	Bus 26	33	0	1.000	-16.77	3.5	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	Cloverdle	33	0	1.023	-15.82	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	Cloverdle	132	0	1.007	-11.97	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	Bus 29	33	0	1.003	-17.06	2.4	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	Bus 30	33	0	0.992	-17.94	10.6	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

- **Dados dos Ramos – 41 Ramos**

Barra Origem	Barra Destino	Resistência pu	Admitância pu	Bsh pu	Tap pu
1	2	0.0192	0.0575	0.0528	0.0
1	3	0.0452	0.1652	0.0408	0.0
2	4	0.0570	0.1737	0.0368	0.0
3	4	0.0132	0.0379	0.0084	0.0
2	5	0.0472	0.1983	0.0418	0.0
2	6	0.0581	0.1763	0.0374	0.0
4	6	0.0119	0.0414	0.0090	0.0
5	7	0.0460	0.1160	0.0204	0.0
6	7	0.0267	0.0820	0.0170	0.0
6	8	0.0120	0.0420	0.0090	0.0
6	9	0.0	0.2080	0.0	0.978
6	10	0.0	0.5560	0.0	0.969
9	11	0.0	0.2080	0.0	0.0
9	10	0.0	0.1100	0.0	0.0
4	12	0.0	0.2560	0.0	0.932
12	13	0.0	0.1400	0.0	0.0
12	14	0.1231	0.2559	0.0	0.0
12	15	0.0662	0.1304	0.0	0.0
12	16	0.0945	0.1987	0.0	0.0
14	15	0.2210	0.1997	0.0	0.0
16	17	0.0524	0.1923	0.0	0.0
15	18	0.1073	0.2185	0.0	0.0
18	19	0.0639	0.1292	0.0	0.0
19	20	0.0340	0.0680	0.0	0.0
10	20	0.0936	0.2090	0.0	0.0
10	17	0.0324	0.0845	0.0	0.0
10	21	0.0348	0.0749	0.0	0.0
10	22	0.0727	0.1499	0.0	0.0
21	22	0.0116	0.0236	0.0	0.0
15	23	0.1000	0.2020	0.0	0.0
22	24	0.1150	0.1790	0.0	0.0
23	24	0.1320	0.2700	0.0	0.0
24	25	0.1885	0.3292	0.0	0.0
25	26	0.2544	0.3800	0.0	0.0
25	27	0.1093	0.2087	0.0	0.0
28	27	0.0	0.3960	0.0	0.968
27	29	0.2198	0.4153	0.0	0.0
27	30	0.3202	0.6027	0.0	0.0
29	30	0.2399	0.4533	0.0	0.0
8	28	0.0636	0.2000	0.0428	0.0
6	28	0.0169	0.0599	0.0130	0.0



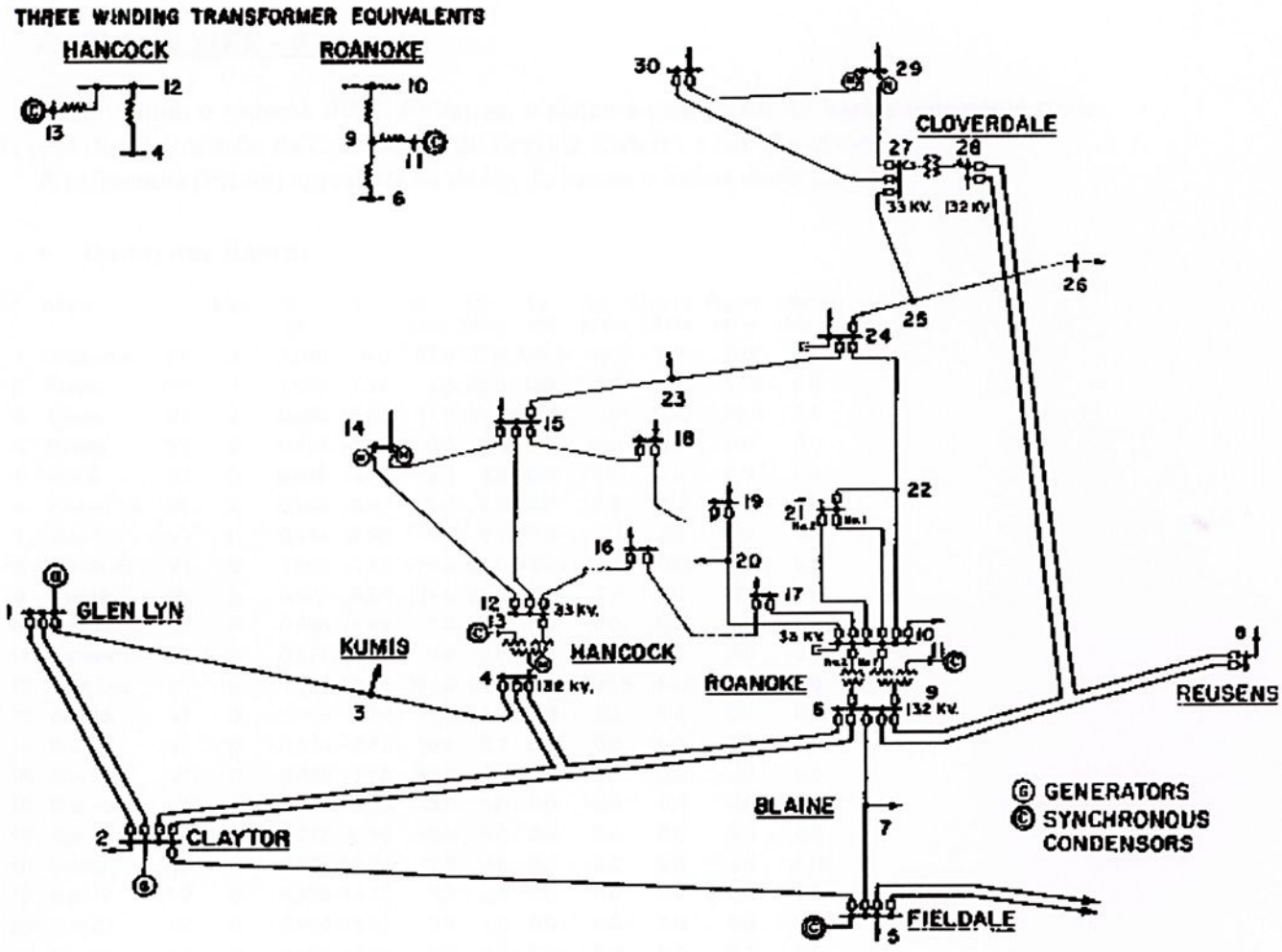


Figura B.2 – Sistema IEEE – 30 barras

- **Sistema IEEE – 57 barras**

Assim como o sistema IEEE 30 barras, o sistema teste IEEE 57 barras representa parte da rede de transmissão da Companhia de Energia Elétrica e Gás Americana.

A referencia [Fre68] apresenta os dados de barras e linhas deste sistema

- **Dados das Barras**

N.º	Nome		Tipo	V pu	θ °	Pl MW	Ql MVar	Pg MW	Qg MVar	Qgmax MVar	Qgmin MVar	Bsh MVar
1	Kanawha	V1	3	1.040	0.0	55.0	17.0	128.9	-16.1	0.0	0.0	0.0
2	Turner	V1	2	1.010	-1.18	3.0	88.0	0.0	-0.8	50.0	-17.0	0.0
3	Logan	V1	2	0.985	-5.97	41.0	21.0	40.0	-1.0	60.0	-10.0	0.0
4	Sprigg	V1	0	0.981	-7.32	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	Bus 5	V1	0	0.976	-8.52	13.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	Beaver Ck	V1	2	0.980	-8.65	75.0	2.0	0.0	0.8	25.0	-8.0	0.0
7	Bus 7	V1	0	0.984	-7.58	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	Clinch Rv	V1	2	1.005	-4.45	150.0	22.0	450.0	62.1	200.0	-140.0	0.0
9	Saltville	V1	2	0.980	-9.56	121.0	26.0	0.0	2.2	9.0	-3.0	0.0
10	Bus 10	V1	0	0.986	-11.43	5.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	Tazewell	V1	0	0.974	-10.17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	Glen Lyn	V1	2	1.015	-10.46	377.0	24.0	310.0	128.5	155.0	-150.0	0.0
13	Bus 13	V1	0	0.979	-9.79	18.0	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	Bus 14	V1	0	0.970	-9.33	10.5	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	Bus 15	V1	0	0.988	-7.18	22.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	Bus 16	V1	0	1.013	-8.85	43.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	Bus 17	V1	0	1.017	-5.39	42.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	Sprigg	V2	0	1.001	-11.71	27.2	9.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.10
19	Bus 19	V2	0	0.970	-13.20	3.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	Bus 20	V2	0	0.964	-13.41	2.3	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	Bus 21	V3	0	1.008	-12.89	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	Bus 22	V3	0	1.010	-12.84	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	Bus 23	V3	0	1.008	-12.91	6.3	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	Bus 24	V3	0	0.999	-13.25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	Bus 25	V4	0	0.982	-18.13	6.3	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	5.9
26	Bus 26	V5	0	0.959	-12.95	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	Bus 27	V5	0	0.982	-11.48	9.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	Bus 28	V5	0	0.997	-10.45	4.6	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	Bus 29	V5	0	1.010	-9.75	17.0	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	Bus 30	V4	0	0.962	-18.68	3.6	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	Bus 31	V4	0	0.936	-19.34	5.8	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	Bus 32	V4	0	0.949	-18.46	1.6	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	Bus 33	V4	0	0.947	-18.50	3.8	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	Bus 34	V3	0	0.959	-14.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	Bus 35	V3	0	0.966	-13.86	6.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
36	Bus 36	V3	0	0.976	-13.59	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	Bus 37	V3	0	0.985	-13.41	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	Bus 38	V3	0	1.013	-12.71	14.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
39	Bus 39	V3	0	0.983	-13.46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	Bus 40	V3	0	0.973	-13.62	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	Tazewell	V6	0	0.996	-14.05	6.3	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
42	Bus 42	V6	0	0.966	-15.50	7.1	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



43	Tazewell	V7	0	1.010	-11.33	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
44	Bus 44	V3	0	1.017	-11.86	12.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	Bus 45	V3	0	1.036	-9.25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46	Bus 46	V3	0	1.050	-11.89	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	Bus 47	V3	0	1.033	-12.49	29.7	11.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
48	Bus 48	V3	0	1.027	-12.59	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	Bus 49	V3	0	1.036	-12.92	18.0	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	Bus 50	V3	0	1.023	-13.39	21.0	10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
51	Bus 51	V3	0	1.052	-12.52	18.0	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
52	Bus 52	V5	0	0.980	-11.47	4.9	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
53	Bus 53	V5	0	0.971	-12.23	20.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.063
54	Bus 54	V5	0	0.996	-11.69	4.1	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
55	Saltville	V5	0	1.031	-10.78	6.8	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
56	Bus 56	V6	0	0.968	-16.04	7.6	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
57	Bus 57	V6	0	0.965	-16.56	6.7	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

- **Dados dos Ramos – 80 Ramos**

Barra Origem	Barra Destino	Resistência pu	Admitância pu	Bsh pu	Tap pu
1	2	0.0083	0.0280	0.1290	0.0
2	3	0.0298	0.0850	0.0818	0.0
3	4	0.0112	0.0366	0.0380	0.0
4	5	0.0625	0.1320	0.0258	0.0
4	6	0.0430	0.1480	0.0348	0.0
6	7	0.0200	0.1020	0.0276	0.0
6	8	0.0339	0.1730	0.0470	0.0
8	9	0.0099	0.0505	0.0548	0.0
9	10	0.0369	0.1679	0.0440	0.0
9	11	0.0258	0.0848	0.0218	0.0
9	12	0.0648	0.2950	0.0772	0.0
9	13	0.0481	0.1580	0.0406	0.0
13	14	0.0132	0.0434	0.0110	0.0
13	15	0.0269	0.0869	0.0230	0.0
1	15	0.0178	0.0910	0.0988	0.0
1	16	0.0454	0.2060	0.0546	0.0
1	17	0.0238	0.1080	0.0286	0.0
3	15	0.0162	0.0530	0.0544	0.0
4	18	0.0	0.5550	0.0	0.970
4	18	0.0	0.4300	0.0	0.978
5	6	0.0302	0.0641	0.0124	0.0
7	8	0.0139	0.0712	0.0194	0.0
10	12	0.0277	0.1262	0.0328	0.0
11	13	0.0223	0.0732	0.0188	0.0
12	13	0.0178	0.0580	0.0604	0.0
12	16	0.0180	0.0813	0.0216	0.0
12	17	0.0397	0.1790	0.0476	0.0
14	15	0.0171	0.0547	0.0148	0.0
18	19	0.4610	0.6850	0.0	0.0
19	20	0.2830	0.4340	0.0	0.0
21	20	0.0	0.7767	0.0	1.043
21	22	0.0736	0.1170	0.0	0.0



22	23	0.0099	0.0152	0.0	0.0
23	24	0.1660	0.2560	0.0084	0.0
24	25	0.0	11.820	0.0	1.000
24	25	0.0	12.300	0.0	1.000
24	26	0.0	0.0473	0.0	1.043
26	27	0.1650	0.2540	0.0	0.0
27	28	0.0618	0.0954	0.0	0.0
28	29	0.0418	0.0587	0.0	0.0
7	29	0.0	0.0648	0.0	0.967
25	30	0.1350	0.2020	0.0	0.0
30	31	0.3260	0.4970	0.0	0.0
31	32	0.5070	0.7550	0.0	0.0
32	33	0.0392	0.0360	0.0	0.0
34	32	0.0	0.9530	0.0	0.975
34	35	0.0520	0.0780	0.0032	0.0
35	36	0.0430	0.0537	0.0016	0.0
36	37	0.0290	0.0366	0.0	0.0
37	38	0.0651	0.1009	0.0020	0.0
37	39	0.0239	0.0379	0.0	0.0
36	40	0.0300	0.0466	0.0	0.0
22	38	0.0192	0.0295	0.0	0.0
11	41	0.0	0.7490	0.0	0.955
41	42	0.2070	0.3520	0.0	0.0
41	43	0.0	0.4120	0.0	0.0
38	44	0.0289	0.0585	0.0020	0.0
15	45	0.0	0.1042	0.0	0.955
14	46	0.0	0.0735	0.0	0.900
46	47	0.0230	0.0680	0.0032	0.0
47	48	0.0182	0.0233	0.0	0.0
48	49	0.0834	0.1290	0.0048	0.0
49	50	0.0801	0.1280	0.0	0.0
50	51	0.1386	0.2200	0.0	0.0
10	51	0.0	0.0712	0.0	0.930
13	49	0.0	0.1910	0.0	0.895
29	52	0.1442	0.1870	0.0	0.0
52	53	0.0762	0.0984	0.0	0.0
53	54	0.1878	0.2320	0.0	0.0
54	55	0.1732	0.2265	0.0	0.0
11	43	0.0	0.1530	0.0	0.958
44	45	0.0624	0.1242	0.0040	0.0
40	56	0.0	11.950	0.0	0.958
56	41	0.5530	0.5490	0.0	0.0
56	42	0.2125	0.3540	0.0	0.0
39	57	0.0	13.550	0.0	0.980
57	56	0.1740	0.2600	0.0	0.0
38	49	0.1150	0.1770	0.0030	0.0
38	48	0.0312	0.0482	0.0	0.0
9	55	0.0	0.1205	0.0	0.940



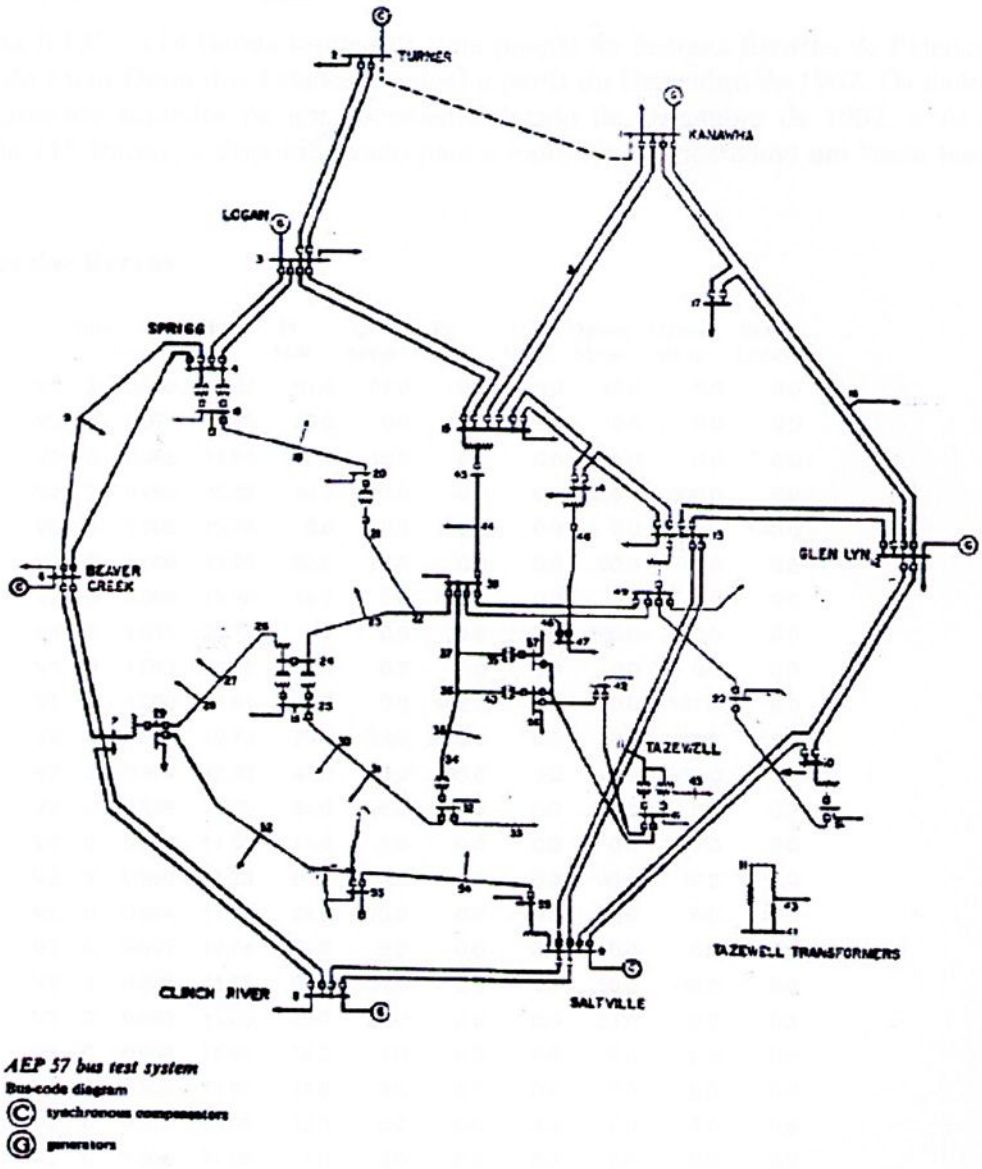


Figura B.3 – Sistema IEEE – 57 barras

- **Sistema IEEE – 118 barras**

O Sistema IEEE – 118 Barras representa uma porção do Sistema Elétrico de Potência Americano (do Meio Oeste dos Estados Unidos) a partir de Dezembro de 1962. Os dados foram manualmente copiados de um documento datado de Dezembro de 1962, o AEP Sistema Teste 118 Barras, e disponibilizado para a indústria elétrica como um "caso teste padrão".

- **Dados das Barras**

N.º	Nome		Tipo	V pu	θ °	Pl MW	Ql MVar	Pg MW	Qg MVar	Qgmax MVar	Qgmin MVar	Bsh MVar
1	Riversde	V2	2	0.955	10.67	51.0	27.0	0.0	0.0	15.0	-5.0	0.0
2	Pokagon	V2	0	0.971	11.22	20.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	HickryCk	V2	0	0.968	11.56	39.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	NwCarlsl	V2	2	0.998	15.28	30.0	12.0	-9.0	0.0	300.0	-300.0	0.0
5	Olive	V2	0	1.002	15.73	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-40.0
6	Kankakee	V2	2	0.990	13.00	52.0	22.0	0.0	0.0	50.0	-13.0	0.0
7	JacksnRd	V2	0	0.989	12.56	19.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	Olive	V1	2	1.015	20.77	0.0	0.0	-28.0	0.0	300.0	-300.0	0.0
9	Bequine	V1	0	1.043	28.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	Breed	V1	2	1.050	35.61	0.0	0.0	450.0	0.0	200.0	-147.0	0.0
11	SouthBnd	V2	0	0.985	12.72	70.0	23.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	TwinBrch	V2	2	0.990	12.20	47.0	10.0	85.0	0.0	120.0	-35.0	0.0
13	Concord	V2	0	0.968	11.35	34.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	GoshenJt	V2	0	0.984	11.50	14.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	FtWayne	V2	2	0.970	11.23	90.0	30.0	0.0	0.0	30.0	-10.0	0.0
16	N. E.	V2	0	0.984	11.91	25.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	Sorenson	V2	0	0.995	13.74	11.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	McKinley	V2	2	0.973	11.53	60.0	34.0	0.0	0.0	50.0	-16.0	0.0
19	Lincoln	V2	2	0.963	11.05	45.0	25.0	0.0	0.0	24.0	-8.0	0.0
20	Adams	V2	0	0.958	11.93	18.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	Jay	V2	0	0.959	13.52	14.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	Randolph	V2	0	0.970	16.08	10.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	CollCrnr	V2	0	1.000	21.00	7.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	Trenton	V2	2	0.992	20.89	0.0	0.0	-13.0	0.0	300.0	-300.0	0.0
25	TannrsCk	V2	0	1.050	27.93	0.0	0.0	220.0	0.0	140.0	-47.0	0.0
26	TannrsCk	V1	2	1.015	29.71	0.0	0.0	314.0	0.0	1000.0	-1000.0	0.0
27	Madison	V2	2	0.968	15.35	62.0	13.0	-9.0	0.0	300.0	-300.0	0.0
28	Mullin	V2	0	0.962	13.62	17.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	Grant	V2	0	0.963	12.63	24.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	Sorenson	V1	0	0.968	18.79	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	DeerCrk	V2	2	0.967	12.75	43.0	27.0	7.0	0.0	300.0	-300.0	0.0
32	Delaware	V2	2	0.964	14.80	59.0	23.0	0.0	0.0	42.0	-14.0	0.0
33	Haviland	V2	0	0.972	10.63	23.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	Rockhill	V2	2	0.986	11.30	59.0	26.0	0.0	0.0	24.0	-8.0	14.0
35	WestLima	V2	0	0.981	10.87	33.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
36	Sterling	V2	2	0.980	10.87	31.0	17.0	0.0	0.0	24.0	-8.0	0.0

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

37	EastLima	V2	0	0.992	11.77	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-25.0
38	EastLima	V1	0	0.962	16.91	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
39	NwLibrty	V2	0	0.970	8.41	27.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	West End	V2	2	0.970	7.35	20.0	23.0	-46.0	0.0	300.0	-300.0	0.0
41	S.Tiffin	V2	0	0.967	6.92	37.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
42	Howard	V2	2	0.985	8.53	37.0	23.0	-59.0	0.0	300.0	-300.0	0.0
43	S.Kenton	V2	0	0.978	11.28	18.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
44	WMVernon	V2	0	0.985	13.82	16.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0
45	N.Newark	V2	0	0.987	15.67	53.0	22.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0
46	W.Lancst	V2	2	1.005	18.49	28.0	10.0	19.0	0.0	100.0	-100.0	10.0
47	Crooksvl	V2	0	1.017	20.73	34.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
48	Zanesvll	V2	0	1.021	19.93	20.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.0
49	Philo	V2	2	1.025	20.94	87.0	30.0	204.0	0.0	210.0	-85.0	0.0
50	Wcambrdg	V2	0	1.001	18.90	17.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
51	Newcmrst	V2	0	0.967	16.28	17.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
52	SCoshoct	V2	0	0.957	15.32	18.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
53	Wooster	V2	0	0.946	14.35	23.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
54	Torrey	V2	2	0.955	15.26	113.0	32.0	48.0	0.0	300.0	-300.0	0.0
55	Wagenhls	V2	2	0.952	14.97	63.0	22.0	0.0	0.0	23.0	-8.0	0.0
56	Sunnysde	V2	2	0.954	15.16	84.0	18.0	0.0	0.0	15.0	-8.0	0.0
57	WNwPhil1	V2	0	0.971	16.36	12.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
58	WNwPhil2	V2	0	0.959	15.51	12.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
59	Tidd	V2	0	0.985	19.37	277.0	113.0	155.0	0.0	180.0	-60.0	0.0
60	SWKammer	V2	0	0.993	23.15	78.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
61	W.Kammer	V2	0	0.995	24.04	0.0	0.0	160.0	0.0	300.0	-100.0	0.0
62	Natrium	V2	2	0.998	23.43	77.0	14.0	0.0	0.0	20.0	-20.0	0.0
63	Tidd	V1	0	0.969	22.75	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
64	Kammer	V1	0	0.984	24.52	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
65	Muskngum	V1	2	1.005	27.65	0.0	0.0	391.0	0.0	200.0	-67.0	0.0
66	Muskngum	V2	0	1.050	27.48	39.0	18.0	392.0	0.0	200.0	-67.0	0.0
67	Summerfl	V2	0	1.020	24.84	28.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
68	Sporn	V1	0	1.003	27.55	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
69	Sporn	V2	3	1.035	30.00	0.0	0.0	516.4	0.0	300.0	-300.0	0.0
70	Portsmth	V2	2	0.984	22.58	66.0	20.0	0.0	0.0	32.0	-10.0	0.0
71	NPortsmt	V2	0	0.987	22.15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
72	Hillsbro	V2	2	0.980	20.98	0.0	0.0	-12.0	0.0	100.0	-100.0	0.0
73	Sargents	V2	2	0.991	21.94	0.0	0.0	-6.0	0.0	100.0	-100.0	0.0
74	Bellefnt	V2	2	0.958	21.64	68.0	27.0	0.0	0.0	9.0	-6.0	12.0
75	SthPoint	V2	0	0.967	22.91	47.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
76	Darrah	V2	2	0.943	21.77	68.0	36.0	0.0	0.0	23.0	-8.0	0.0
77	Turner	V2	2	1.006	26.72	61.0	28.0	0.0	0.0	70.0	-20.0	0.0
78	Chemical	V2	0	1.003	26.42	71.0	26.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
79	CapitlHl	V2	0	1.009	26.72	39.0	32.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0
80	CabinCrk	V2	0	1.040	28.96	130.0	26.0	477.0	0.0	280.0	-165.0	0.0
81	Kanawha	V1	0	0.997	28.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
82	Logan	V2	0	0.989	27.24	54.0	27.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0
83	Sprigg	V2	0	0.985	28.42	20.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0
84	BetsyLne	V2	0	0.980	30.95	11.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



85	BeaverCk	V2	2	0.985	32.51	24.0	15.0	0.0	0.0	23.0	-8.0	0.0
86	Hazard	V2	0	0.987	31.14	21.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
87	Pinevlle	V3	2	1.015	31.40	0.0	0.0	4.0	0.0	1000.0	-100.0	0.0
88	Fremont	V2	0	0.987	35.64	48.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
89	ClinchRv	V2	2	1.005	39.69	0.0	0.0	607.0	0.0	300.0	-210.0	0.0
90	Holston	V2	2	0.985	33.29	78.0	42.0	-85.0	0.0	300.0	-300.0	0.0
91	HolstonT	V2	2	0.980	33.31	0.0	0.0	-10.0	0.0	100.0	-100.0	0.0
92	Saltvlle	V2	2	0.993	33.80	65.0	10.0	0.0	0.0	9.0	-3.0	0.0
93	Tazewell	V2	0	0.987	30.79	12.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
94	Switchbk	V2	0	0.991	28.64	30.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
95	Caldwell	V2	0	0.981	27.67	42.0	31.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
96	Baileysv	V2	0	0.993	27.51	38.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
97	Sundial	V2	0	1.011	27.88	15.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
98	Bradley	V2	0	1.024	27.40	34.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
99	Hinton	V2	2	1.010	27.04	0.0	0.0	-42.0	0.0	100.0	-100.0	0.0
100	Glen Lyn	V2	2	1.017	28.03	37.0	18.0	252.0	0.0	155.0	-50.0	0.0
101	Wythe	V2	0	0.993	29.61	22.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
102	Smythe	V2	0	0.991	32.30	5.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
103	Claytor	V2	2	1.001	24.44	23.0	16.0	40.0	0.0	40.0	-15.0	0.0
104	Hancock	V2	2	0.971	21.69	38.0	25.0	0.0	0.0	23.0	-8.0	0.0
105	Roanoke	V2	2	0.965	20.57	31.0	26.0	0.0	0.0	23.0	-8.0	20.0
106	Cloverdl	V2	0	0.962	20.32	43.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
107	Reusens	V2	2	0.952	17.53	28.0	12.0	-22.0	0.0	200.0	-200.0	6.0
108	Blaine	V2	0	0.967	19.38	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
109	Franklin	V2	0	0.967	18.93	8.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
110	Fieldale	V2	2	0.973	18.09	39.0	30.0	0.0	0.0	23.0	-8.0	6.0
111	DanRiver	V2	2	0.980	19.74	0.0	0.0	36.0	0.0	1000.0	-100.0	0.0
112	Danville	V2	2	0.975	14.99	25.0	13.0	-43.0	0.0	1000.0	-100.0	0.0
113	Deer Crk	V2	2	0.993	13.74	0.0	0.0	-6.0	0.0	200.0	-100.0	0.0
114	WMedford	V2	0	0.960	14.46	8.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
115	Medford	V2	0	0.960	14.46	22.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
116	KygerCrk	V2	2	1.005	27.12	0.0	0.0	-184.0	0.0	1000.0	-1000.0	0.0
117	Corey	V2	0	0.974	10.67	20.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
118	WHuntngd	V2	0	0.949	21.92	33.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



- **Dados dos Ramos – 179 Ramos**

Barra Origem	Barra Destino	Resistência pu	Admitância pu	Bsh pu	Tap pu
1	2	0.03030	0.09990	0.02540	0.0
1	3	0.01290	0.04240	0.01082	0.0
4	5	0.00176	0.00798	0.00210	0.0
3	5	0.02410	0.10800	0.02840	0.0
5	6	0.01190	0.05400	0.01426	0.0
6	7	0.00459	0.02080	0.00550	0.0
8	9	0.00244	0.03050	116.200	0.0
8	5	0.00000	0.02670	0.0	0.985
9	10	0.00258	0.03220	123.000	0.0
4	11	0.02090	0.06880	0.01748	0.0
5	11	0.02030	0.06820	0.01738	0.0
11	12	0.00595	0.01960	0.00502	0.0
2	12	0.01870	0.06160	0.01572	0.0
3	12	0.04840	0.16000	0.04060	0.0
7	12	0.00862	0.03400	0.00874	0.0
11	13	0.02225	0.07310	0.01876	0.0
12	14	0.02150	0.07070	0.01816	0.0
13	15	0.07440	0.24440	0.06268	0.0
14	15	0.05950	0.19500	0.05020	0.0
12	16	0.02120	0.08340	0.02140	0.0
15	17	0.01320	0.04370	0.04440	0.0
16	17	0.04540	0.18010	0.04660	0.0
17	18	0.01230	0.05050	0.01298	0.0
18	19	0.01119	0.04930	0.01142	0.0
19	20	0.02520	0.11700	0.02980	0.0
15	19	0.01200	0.03940	0.01010	0.0
20	21	0.01830	0.08490	0.02160	0.0
21	22	0.02090	0.09700	0.02460	0.0
22	23	0.03420	0.15900	0.04040	0.0
23	24	0.01350	0.04920	0.04980	0.0
23	25	0.01560	0.08000	0.08640	0.0
26	25	0.00000	0.03820	0.0	0.960
25	27	0.03180	0.16300	0.17640	0.0
27	28	0.01913	0.08550	0.02160	0.0
28	29	0.02370	0.09430	0.02380	0.0
30	17	0.00000	0.03880	0.0	0.960
8	30	0.00431	0.05040	0.51400	0.0
26	30	0.00799	0.08600	0.90800	0.0
17	31	0.04740	0.15630	0.03990	0.0
29	31	0.01080	0.03310	0.00830	0.0
23	32	0.03170	0.11530	0.11730	0.0
31	32	0.02980	0.09850	0.02510	0.0
27	32	0.02290	0.07550	0.01926	0.0
15	33	0.03800	0.12440	0.03194	0.0
19	34	0.07520	0.24700	0.06320	0.0
35	36	0.00224	0.01020	0.00268	0.0
35	37	0.01100	0.04970	0.01318	0.0
33	37	0.04150	0.14200	0.03660	0.0
34	36	0.00871	0.02680	0.00568	0.0



34	37	0.00256	0.00940	0.00984	0.0
38	37	0.00000	0.03750	0.0	0.935
37	39	0.03210	0.10600	0.02700	0.0
37	40	0.05930	0.16800	0.04200	0.0
30	38	0.00464	0.05400	0.42200	0.0
39	40	0.01840	0.06050	0.01552	0.0
40	41	0.01450	0.04870	0.01222	0.0
40	42	0.05550	0.18300	0.04660	0.0
41	42	0.04100	0.13500	0.03440	0.0
43	44	0.06080	0.24540	0.06068	0.0
34	43	0.04130	0.16810	0.04226	0.0
44	45	0.02240	0.09010	0.02240	0.0
45	46	0.04000	0.13560	0.03320	0.0
46	47	0.03800	0.12700	0.03160	0.0
46	48	0.06010	0.18900	0.04720	0.0
47	49	0.01910	0.06250	0.01604	0.0
42	49	0.07150	0.32300	0.08600	0.0
42	49	0.07150	0.32300	0.08600	0.0
45	49	0.06840	0.18600	0.04440	0.0
48	49	0.01790	0.05050	0.01258	0.0
49	50	0.02670	0.07520	0.01874	0.0
49	51	0.04860	0.13700	0.03420	0.0
51	52	0.02030	0.05880	0.01396	0.0
52	53	0.04050	0.16350	0.04058	0.0
53	54	0.02630	0.12200	0.03100	0.0
49	54	0.07300	0.28900	0.07380	0.0
49	54	0.08690	0.29100	0.07300	0.0
54	55	0.01690	0.07070	0.02020	0.0
54	56	0.00275	0.00955	0.00732	0.0
55	56	0.00488	0.01510	0.00374	0.0
56	57	0.03430	0.09660	0.02420	0.0
50	57	0.04740	0.13400	0.03320	0.0
56	58	0.03430	0.09660	0.02420	0.0
51	58	0.02550	0.07190	0.01788	0.0
54	59	0.05030	0.22930	0.05980	0.0
56	59	0.08250	0.25100	0.05690	0.0
56	59	0.08030	0.23900	0.05360	0.0
55	59	0.04739	0.21580	0.05646	0.0
59	60	0.03170	0.14500	0.03760	0.0
59	61	0.03280	0.15000	0.03880	0.0
60	61	0.00264	0.01350	0.01456	0.0
60	62	0.01230	0.05610	0.01468	0.0
61	62	0.00824	0.03760	0.00980	0.0
63	59	0.00000	0.03860	0.0	0.960
63	64	0.00172	0.02000	0.21600	0.0
64	61	0.00000	0.02680	0.0	0.985
38	65	0.00901	0.09860	104.600	0.0
64	65	0.00269	0.03020	0.38000	0.0
49	66	0.01800	0.09190	0.02480	0.0
49	66	0.01800	0.09190	0.02480	0.0
62	66	0.04820	0.21800	0.05780	0.0
62	67	0.02580	0.11700	0.03100	0.0
65	66	0.00000	0.03700	0.0	0.935
66	67	0.02240	0.10150	0.02682	0.0



65	68	0.00138	0.01600	0.63800	0.0
47	69	0.08440	0.27780	0.07092	0.0
49	69	0.09850	0.32400	0.08280	0.0
68	69	0.00000	0.03700	0.0	0.935
69	70	0.03000	0.12700	0.12200	0.0
24	70	0.00221	0.41150	0.10198	0.0
70	71	0.00882	0.03550	0.00878	0.0
24	72	0.04880	0.19600	0.04880	0.0
71	72	0.04460	0.18000	0.04444	0.0
71	73	0.00866	0.04540	0.01178	0.0
70	74	0.04010	0.13230	0.03368	0.0
70	75	0.04280	0.14100	0.03600	0.0
69	75	0.04050	0.12200	0.12400	0.0
74	75	0.01230	0.04060	0.01034	0.0
76	77	0.04440	0.14800	0.03680	0.0
69	77	0.03090	0.10100	0.10380	0.0
75	77	0.06010	0.19990	0.04978	0.0
77	78	0.00376	0.01240	0.01264	0.0
78	79	0.00546	0.02440	0.00648	0.0
77	80	0.01700	0.04850	0.04720	0.0
77	80	0.02940	0.10500	0.02280	0.0
79	80	0.01560	0.07040	0.01870	0.0
68	81	0.00175	0.02020	0.80800	0.0
81	80	0.00000	0.03700	0.0	0.935
77	82	0.02980	0.08530	0.08174	0.0
82	83	0.01120	0.03665	0.03796	0.0
83	84	0.06250	0.13200	0.02580	0.0
83	85	0.04300	0.14800	0.03480	0.0
84	85	0.03020	0.06410	0.01234	0.0
85	86	0.03500	0.12300	0.02760	0.0
86	87	0.02828	0.20740	0.04450	0.0
85	88	0.02000	0.10200	0.02760	0.0
85	89	0.02390	0.17300	0.04700	0.0
88	89	0.01390	0.07120	0.01934	0.0
89	90	0.05180	0.18800	0.05280	0.0
89	90	0.02380	0.09970	0.10600	0.0
90	91	0.02540	0.08360	0.02140	0.0
89	92	0.00990	0.05050	0.05480	0.0
89	92	0.03930	0.15810	0.04140	0.0
91	92	0.03870	0.12720	0.03268	0.0
92	93	0.02580	0.08480	0.02180	0.0
92	94	0.04810	0.15800	0.04060	0.0
93	94	0.02230	0.07320	0.01876	0.0
94	95	0.01320	0.04340	0.01110	0.0
80	96	0.03560	0.18200	0.04940	0.0
82	96	0.01620	0.05300	0.05440	0.0
94	96	0.02690	0.08690	0.02300	0.0
80	97	0.01830	0.09340	0.02540	0.0
80	98	0.02380	0.10800	0.02860	0.0
80	99	0.04540	0.20600	0.05460	0.0
92	100	0.06480	0.29500	0.04720	0.0
94	100	0.01780	0.05800	0.06040	0.0
95	96	0.01710	0.05470	0.01474	0.0
96	97	0.01730	0.08850	0.02400	0.0



98	100	0.03970	0.17900	0.04760	0.0
99	100	0.01800	0.08130	0.02160	0.0
100	101	0.02770	0.12620	0.03280	0.0
92	102	0.01230	0.05590	0.01464	0.0
101	102	0.02460	0.11200	0.02940	0.0
100	103	0.01600	0.05250	0.05360	0.0
100	104	0.04510	0.20400	0.05410	0.0
103	104	0.04660	0.15840	0.04070	0.0
103	105	0.05350	0.16250	0.04080	0.0
100	106	0.06050	0.22900	0.06200	0.0
104	105	0.00994	0.03780	0.00986	0.0
105	106	0.01400	0.05470	0.01434	0.0
105	107	0.05300	0.18300	0.04720	0.0
105	108	0.02610	0.07030	0.01844	0.0
106	107	0.05300	0.18300	0.04720	0.0
108	109	0.01050	0.02880	0.00760	0.0
103	110	0.03906	0.18130	0.04610	0.0
109	110	0.02780	0.07620	0.02020	0.0
110	111	0.02200	0.07550	0.02000	0.0
110	112	0.02470	0.06400	0.06200	0.0
17	113	0.00913	0.03010	0.00768	0.0
32	113	0.06150	0.20300	0.05180	0.0
32	114	0.01350	0.06120	0.01628	0.0
27	115	0.01640	0.07410	0.01972	0.0
114	115	0.00230	0.01040	0.00276	0.0
68	116	0.00034	0.00405	0.16400	0.0
12	117	0.03290	0.14000	0.03580	0.0
75	118	0.01450	0.04810	0.01198	0.0
76	118	0.01640	0.05440	0.01356	0.0



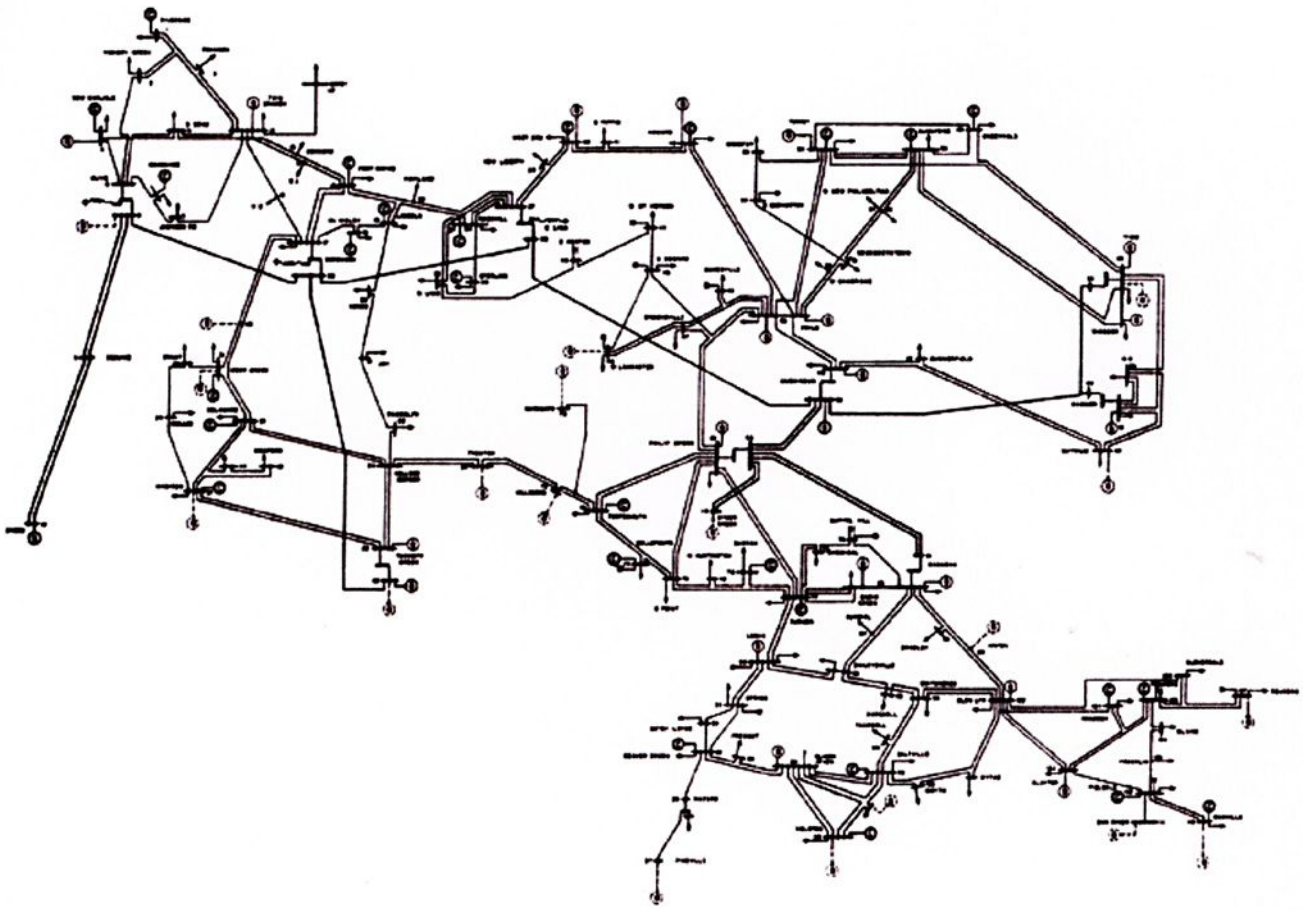


Figura B.4 – Sistema IEEE – 118 barras

unesp
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dee.feis.unesp.br