

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“Proposta de Parametrização para o Fluxo de Carga Continuada Visando Redução de Perdas na Transmissão e o Aumento da Margem Estática de Estabilidade de Tensão”

FRANCISCO CARLOS VIEIRA MALANGE

Orientador: Prof. Dr. Dilson Amancio Alves

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação.

Ilha Solteira – SP
Novembro/2008

FICHA CATALOGRÁFICA

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

M237p Malange, Francisco Carlos Vieira.
Proposta de parametrização para o fluxo de carga continuado visando redução de perdas na transmissão e o aumento da margem estática de estabilidade de tensão / Francisco Carlos Vieira Malange. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2008
139 f. : il. color.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2008

Orientador: Dilson Amancio Alves
Bibliografia: p. 129-137

1. Sistemas de energia elétrica – Estabilidade. 2. Energia elétrica – Transmissão – Perdas. 3. Métodos de continuação. 4. Fluxo de carga – Potência – Tese. 5. Margem de carregamento - Curva PV.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Proposta de Parametrização para o Fluxo de Carga Continuado Visando Redução de Perdas na Transmissão e o Aumento da Margem Estática de Estabilidade de Tensão

AUTOR: FRANCISCO CARLOS V MALANGE

ORIENTADOR: Prof. Dr. DILSON AMANCIO ALVES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR em ENGENHARIA ELÉTRICA pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. DILSON AMANCIO ALVES

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. LUIZ FERNANDO BOVOLATO

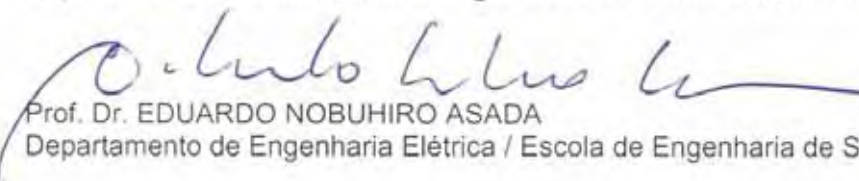
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. LUIS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. VIVALDO FERNANDO DA COSTA

Departamento de Sistemas de Energia Elétrica / Universidade Estadual de Campinas


Prof. Dr. EDUARDO NOBUHIRO ASADA

Departamento de Engenharia Elétrica / Escola de Engenharia de São Carlos-USP

Data da realização: 07 de novembro de 2008.

*A **DEUS**, pelas oportunidades, e a
minha mãe, Nair, a minha esposa Isabel
e aos meus filhos Pedro e Mariana, que
são responsáveis por grande parte delas.*

AGRADECIMENTOS

A Deus acima de tudo.

A todos aqueles que direta ou indiretamente influenciaram positivamente em minha vida tanto pessoal como profissional.

Ao amigo orientador professor Dr. Dílson Amâncio Alves, pela confiança, compreensão e principalmente paciência durante a evolução deste trabalho.

Aos Docentes e funcionários do DEE/FEIS/UNESP, que de alguma forma contribuíram para que mais esta etapa fosse vencida.

Em particular aos Docentes: José Paulo Fernandes Garcia, Luiz Fernando Bovolato, José Carlos Rossi e Falcondes José Mendes Seixas, pela ajuda nas disciplinas da graduação nos momentos em que precisei.

A outros que involuntariamente foram esquecidos.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia alternativa para a melhoria da margem de carregamento e redução da perda total de potência ativa com base no método da continuação. Para atingir esta meta, uma equação de parametrização baseada na perda de potência ativa total e as equações da potência reativa nas barras de geração são acrescentadas às equações de fluxo de carga convencional. As tensões nas barras *PV* são consideradas como variáveis de controle e um novo parâmetro é escolhido para reduzir as perdas de potência ativa nas linhas de transmissão. Os resultados mostram que este procedimento, em geral, conduz a um aumento no ponto de máximo carregamento e por conseguinte, melhoria na margem estática da estabilidade de tensão. Este procedimento também leva a uma redução nos custos operacionais e, simultaneamente, uma melhoria no perfil da tensão.

Palavras Chave: Método da continuação, fluxo de potência, margem de carregamento, margem de estabilidade de tensão e redução de perdas.

ABSTRACT

This work presents an alternative methodology for loading margin improvement and total real power losses reduction by using a continuation method. In order to attain this goal, a parameterizing equation based on the total real power losses and the equations of the reactive power at the slack and generation buses are added to the conventional Power Flow equations. The voltages at these buses are considered as control variables and a new parameter is chosen with to reduce the real power losses in the transmission lines.

The results show that this procedure leads to maximum loading point increase and consequently, in static voltage stability margin improvement. Besides, this procedure also takes to a reduction in the operational costs and, simultaneously, to voltage profile improvement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Classificação da estabilidade em sistemas elétricos de potência.	28
figura 2.2 - Curva pv genérica.	38
Figura 2.3 – Curva qv genérica.	40
Figura 2.4 – Definição do ponto de máximo carregamento e da margem de carregamento.	43
Figura 3.1 - Processos de predição e correção em sistemas parametrizados.	56
Figura 3.2 - Sistema de três barras.	59
Figura 3.3 - Comparação entre os métodos da continuação com preditor tangente e com preditor secante.	59
Figura 3.4 - Controle automático do passo σ .	62
Figura 4.1 - Sistema de duas barras.	71

Figura 4.2 - Sistema de três barras – caso base.	74
Figura 4.3 - Sistema de três barras - caso otimizado.	74
Figura 4.4 - Desempenho do fccp para o sistema de duas barras.	83
Figura 4.5 - Curvas p_v : efeito da redução das perdas sobre o ponto de máximo carregamento para o sistema de duas barras.	83
Figura 4.6 - Desempenho do sistema de três barras: (a) $v \times p_a$, (b) $qg \times p_a$, (c) potência ativa gerada pela barra de folga $\times p_a$, (d) curvas p_v .	86
Figura 4.7 - Variações das tensões da barra de folga e das barras de controle de tensão (p_v) em função de p_a , para o sistema ieee-14 barras.	90
Figura 4.8 - Variações das potências reativa geradas pelas barras de folga e de controle de tensão (p_v) em função de p_a , para o sistema ieee-14 barras.	91
Figura 4.9 - Variações das potências reativa em função de p_a para o sistema ieee-14 barras: (a) somatório das variações das potências reativa geradas pelas barras de controle de tensão (p_v); (b) somatório das variações de geração de potência reativa nos <i>shunts</i> das linhas de transmissão; (c) somatório das variações de geração de potência reativa nos <i>shunts</i> de barra (banco de capacitores e/ou reatores); (d) somatório das variações de perda de potência reativa nos elementos série das linhas de transmissão e (e) somatório das variações das potências reativa geradas pelas barras de controle de tensão p_v 's mais a barra de folga	93
Figura 4.10 – Variações das magnitudes de tensão das barras do sistema ieee-14 em função de p_a .	94

Figura 4.11 - Curvas pv do sistema ieee-14 barras.	98
Figura 4.12 - Perfil da magnitude da tensão e de ângulo do sistema ieee-14 barras.	98
Figura 4.13 - Curvas pv do sistema ieee-30 barras.	99
Figura 4.14 - Perfil da magnitude da tensão e de ângulo do sistema ieee-30 barras.	99
Figura 4.15 - Curvas pv do sistema ieee-57 barras.	100
Figura 4.16 - Perfil da magnitude da tensão e de ângulo do sistema ieee-57 barras.	100
Figura 4.17 - Perfil da magnitude de tensão do sistema ieee-57 barras.	103
Figura 4.18 - Perfil de ângulo do sistema ieee-57 barras.	104
Figura 4.19 - Curvas pv's da barra crítica (barra 31) do sistema ieee-57 barras.	107
Figura 4.20 - Perfil da magnitude de tensão do sistema ieee-118 barras considerando a barra 69 como barra de folga.	109
Figura 4.21 - Perfil da magnitude de tensão do sistema ieee-118 barras considerando a barra 27 como barra de folga.	110
Figura 4.22 - Perfil da magnitude de tensão do sistema ieee-118 barras considerando a barra 26 como barra de folga.	110
Figura 4.23 - Perfil da magnitude de tensão das barras de geração do sistema ieee-118 barras considerando a barra 26 como barra de folga.	111

- Figura 4.24 - Variação percentual, em relação ao caso base, da magnitude de tensão das barras de geração do sistema ieee-118 barras, considerando a barra 26 como barra de folga. **111**
- Figura 4.25 - (a) Variação da magnitude de tensão e (b) da potência reativa gerada pelas barras de geração 26, 27 e 69 do sistema ieee-118 barras, considerando a barra 26 como barra de folga. **112**
- Figura 4.26 - Curvas pv's do sistema ieee-118 barras: (a) curva pv da barra 9 e (b) curva pv da barra 13. **114**
- Figura 4.27 - Perfis de magnitude de tensão e de ângulo para o sistema ieee-57. **116**
- Figura 4.29 - Curvas pv inicial e final para o sistema ieee-57. **119**
- Figura 4.30 - Curvas pv inicial e final para o sistema ieee-118. **119**
- Figura 4.31 - Curva pv's do sistema ieee-300 barras. **122**
- Figura 4.32 - Curvas pv's do sistema ots-904 barras. **123**

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Soluções do fluxo de carga ótimo para o sistema da figura 4.1	73
Tabela 4.2 - Soluções para o sistema da figura 4.2	75
Tabela 4.3 - Redução nas perdas de potência ativa	96
Tabela 4.4 - Margem de carregamento	96
Tabela 4.5 - Reserva de reativos	101
Tabela 4.6 - Magnitude de tensão das barras de geração do sistema ieee-57 barras	104
Tabela 4.7 - Potência reativa gerada nas barras de geração do sistema ieee-57 barras	105
Tabela 4.8 - Redução das perdas ativa e reativa série totais para o sistema ieee-57 barras	105
Tabela 4.9 - Aumento da potência reativa fornecida pelos <i>shunts</i> das linhas de transmissão e variação total da potência reativa gerada pelas barras de folga mais as <i>pv's</i> , com a redução da perda ativa total no sistema ieee-57 barras	106

Tabela 4.10 - Margem de carregamento	106
Tabela 4.11 - Redução das perdas ativa e reativa série totais para o sistema ieee-118 barras	109
Tabela 4.12 - Aumento da potência reativa fornecida pelos shunts das linhas de transmissão e variação total da potência reativa gerada pelas barras de folga mais as <i>pv's</i> , com a redução da perda ativa total no sistema ieee-118 barras	109
Tabela 4.13 - Margem de carregamento para o sistema ieee-118 barras	113
Tabela 4.14 – Redução das perdas ativa e reativa série totais.	121
Tabela 4.15 – Aumento da potência reativa fornecida pelos <i>shunts</i> das linhas de transmissão e variação total da potência reativa gerada pelas barras de folga e <i>pv's</i> , com a redução da perda ativa total.	121

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	16
1.1 - Introdução geral	16
1.2 – Estrutura do trabalho	22
CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DA ESTABILIDADE ESTÁTICA DE TENSÃO	25
2.1 - Introdução	25
2.2 – Estabilidade em sistemas elétricos de potência	25
2.3 – Estabilidade estática de tensão	33
2.4 – Métodos de estudo da estabilidade estática de tensão	34
2.5 – Avaliação do colapso de tensão baseado nas curvas PV e QV	36
2.5.1 – Curvas PV	37
2.5.2 – Curvas QV	39
2.6 - Margem de carregamento	40

CAPÍTULO 3 - MÉTODO DA CONTINUAÇÃO E SUAS TÉCNICAS DE	
PARAMETRIZAÇÃO	46
3.1 – Introdução	46
3.2 - Fluxo de carga convencional	48
3.3 - Método da continuação e suas técnicas de predição, parametrização e correção	53
3.3.1 – Técnicas de predição	56
3.3.1.1 - Preditor tangente	56
3.3.1.2 – Preditor secante	58
3.3.1.3 - Preditor polinomial modificado de ordem zero	60
3.3.2 - Controle do passo preditor	61
3.3.3 – Técnicas de parametrização e correção	62
3.3.3.1 - Parametrização local	64
3.3.3.2 – Técnica do comprimento de arco	66
3.3.3.3 – Técnica da perpendicularidade	67
CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA PROPOSTA	69
4.1 - Introdução	69
4.2 - O problema do fluxo de carga ótimo	71
4.3 - Metodologia proposta	75
4.3.1 - Metodologia proposta aplicada aos sistemas de duas e três barras	80
4.3.1.1 - Resultados obtidos com o fluxo de carga continuado proposto para o sistema de duas barras	81
4.3.1.2 - Resultados obtidos com o FCCP para o sistema de três barras	84
4.4 – Resultados da redução da perda total de potência ativa	87
4.4.1 – Balanço de reativos durante o procedimento de redução da perda total de potência ativa	88

4.4.2 - Análise de desempenho do método proposto para os sistemas IEEE	94
4.4.3 - Influência da barra de folga na redução das perdas	101
4.4.3.1 - Resultados obtidos com o fluxo de carga continuado proposto para o sistema IEEE-57 barras	102
4.4.3.2 - Resultados obtidos com o fluxo de carga continuado proposto para o sistema IEEE-118 barras	107
4.5 - Comparação entre os resultados obtidos com um programa de fluxo de carga ótimo e o fluxo de carga continuado proposto	115
4.6 – Desempenho do fluxo de carga continuado proposto para sistemas de grande porte	120
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	124
5.1 Introdução	124
5.2 Contribuições	124
5.3 Sugestões para futuros trabalhos	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
APÊNDICE A	138

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Introdução geral

Nas últimas décadas, os sistemas elétricos de potência (SEP) têm passado por várias experiências, tais como: mudanças no comportamento sociológico da população, crises econômicas, restrições ecológicas, progressos tecnológicos, desregulamentação do setor elétrico, entre outras.

Estas experiências chamam a atenção sobre alguns aspectos não considerados no passado. Dentre tais aspectos estão a procura por segurança no sistema (confiança) e as incertezas no futuro, uma vez que os planejadores se baseiam em uma visão de longo prazo levando em conta previsões como a demanda de potência, a disponibilidade de geração, a possibilidade de interconexão de equipamento e/ou de novos sistemas, e o desenvolvimento de novas tecnologias.

Estas previsões são por sua própria natureza incertas, e qualquer divergência entre o planejamento e a realidade experimentada algum tempo depois, deve ser equalizada por meio de um impacto capaz de ser absorvido pelo sistema.

Dentre os impactos, de diversas naturezas, podem-se citar, por exemplo, a crise do petróleo, as restrições ambientais que impedindo a construção de novos parques geradores e linhas de transmissão, a privatização de concessionárias estatais de energia, os blecautes e o racionamento de energia elétrica.

Com o crescente aumento do parque industrial há naturalmente um aumento subsequente no carregamento do sistema e, por conseguinte um aumento na potência que flui por entre as linhas de transmissão, ou seja, no fluxo de potência.

Em consonância com as leis de Ohm e as leis de Kirchhoff, a energia elétrica que flui em uma rede é distribuída entre os ramos de acordo com as suas respectivas impedâncias até que um equilíbrio de tensão seja alcançado.

O fluxo de energia poderá sofrer mudança de direção em qualquer instante caso a configuração da rede sofra alterações em consequência de contingências de linhas de transmissão, de manobras em transformadores ou ainda quando estes são retirados do sistema para manutenção ou substituição.

Estes fluxos também mudarão devido a variações na geração ou conforme a solicitação de carga, isto é, alteração no carregamento do sistema.

O aumento no fluxo de potência tem como consequência direta um aumento nas perdas ativas e reativas nas linhas de transmissão.

As impedâncias dos equipamentos de rede, tais como: geradores, transformadores e linhas de transmissão provocam não só perdas de potência ativa e reativa, como também queda de tensão nestes elementos. Assim, as mudanças no fluxo de potência podem levar a um baixo perfil de tensão e em perdas mais altas nos sistemas, podendo piorar particularmente sob condições de carga pesada.

Esta situação pode ser melhorada através da escolha de um baixo valor para a reatância série durante o processo de planejamento dos sistemas elétricos de potência. Porém,

isto poderia resultar em um aumento nos níveis reais de falhas no sistema. Aumentos nos níveis de corrente de curto-circuito resultariam em um custo operacional maior dos equipamentos avaliados uma vez que deverão ser majorados seus valores nominais, ou ainda provocar arranjos operacionais inaceitáveis (GLOVER et al., 1989).

Por outro lado, o operador do sistema também pode melhorar esta situação realocando a geração de potência reativa no sistema, uma vez que o despacho de potência ativa também é controlável e tem influência na potência reativa, que por sua vez altera as perdas na transmissão.

Neste trabalho é assumido que o despacho de potência ativa é executado antes do despacho de potência reativa ser considerado.

Várias razões favoreceram a opção pelo controle de reativos em vez de despacho de potência ativa (CIGRE, 1989), entre elas:

- O baixo custo inicial investido nas instalações o que normalmente alcança pequenas porcentagens do custo correspondente para potência ativa em um sistema de grande porte quando comparado às instalações de potência ativa (geradores ou linhas de transmissão);
- Sua instalação pode reduzir investimentos em componentes de rede como linhas de transmissão e transformadores; além de possibilitar uma maior confiabilidade no sistema.

A realocação de geração de potência reativa pode ser feita satisfatoriamente através de ajustes nas variáveis de controle, tais como: tensões terminais dos geradores, *tap* de transformadores e chaveamento de fontes de potência reativa. Qualquer mudança em uma destas variáveis tem o efeito de mudar o perfil de tensão do sistema, a potência reativa gerada

e a perda total do sistema. Os elementos da rede podem transferir potências maiores se por eles circularem correntes reativas menores.

As informações inerentes às mudanças de fluxo de potência não só são importantes para que os operadores de sistemas assegurem uma operação eficiente, mas também para manterem a confiança nos serviços prestados. Além disso, tal informação também é útil para a redução de perdas.

As perdas na transmissão representam de 5% a 10% da geração total, o que se traduz em milhões de dólares por ano (SHARIF, et al. 2000). Caso se tenha informações de como estas perdas acontecem, é possível efetuar-se ações de controle com o intuito de reduzi-las.

Perdas reativas baixas podem reduzir a potência reativa total das instalações e ainda as perdas ativas provendo com isto um ganho econômico considerável (CIGRE, 1989).

Então, a quantificação e redução das perdas ativas são importantes porque determinarão a operação econômica dos sistemas elétricos de potência. Também é importante salientar que a redução nas perdas de potência ativa não só pode representar uma economia significativa no tocante a parte financeira, mas também que sua redução pode ser obtida atuando-se exclusivamente sobre as variáveis de controle de reativos do sistema, isto é, sem qualquer investimento adicional em equipamentos ou construções.

Um outro fato importante conhecido é que a margem de estabilidade estática de tensão do sistema aumenta em função da disponibilidade de reservas de potência reativa do sistema (KUNDUR, 1994). Assim, ao reduzirem-se as perdas totais na transmissão do sistema elétrico de potência, implicitamente estar-se-á aumentando a margem de reativos do mesmo e, por conseguinte, a margem de estabilidade estática será aumentada (ALVES et al. 2002-I), (ALVES et al. 2002-II).

Para um ponto de operação particular, a margem de estabilidade estática de tensão ou margem de carregamento de colapso de tensão, ou simplesmente margem de carregamento, é

a quantia de carga adicional em um padrão específico de aumento de carga que causaria um colapso de tensão (CIGRE, 1989), (KUNDUR, 1994). A determinação da margem de carregamento (MC) e as ações de controle necessárias para garantir aquela margem é uma tarefa essencial no planejamento e operação de sistemas elétricos de potência. O *Western System Coordinating Council (WSCC)* exige que seus membros garantam pelo menos 5% de margem na curva PV após qualquer contingência em um único elemento (WECC, 1998).

No Brasil o operador nacional do sistema elétrico brasileiro (ONS) apresenta em seu manual de procedimentos de rede sugestões de critérios para o planejamento, no tocante a expansão do sistema elétrico, visando a manutenção de um nível mínimo de margem de estabilidade estática da tensão, ou seja, para situação de contingência simples, a margem de carregamento seja maior ou igual a 6% (ONS, 2001).

Assim, as vantagens da redução de perdas em linhas de transmissão além de proporcionarem economias de gastos, enquanto impõe aos equipamentos dos sistemas um decréscimo no carregamento, provê uma melhoria no perfil da tensão do sistema e na margem de estabilidade estática de tensão.

O cálculo da perda de potência ativa pode ser realizado através de vários métodos já apresentados na literatura, como por exemplo, pelo simples produto entre os valores da resistência elétrica da linha de transmissão pelo quadrado da magnitude da corrente que circula por ela (em outras palavras, $R I^2$).

O cálculo pode também ser realizado através da adição algébrica do fluxo de potência ativa nas duas extremidades das linhas de transmissão, sendo que a perda total será o somatório de todas as perdas nas linhas de transmissão.

O método do fluxo de carga convencional (FC) é utilizado na determinação da magnitude da tensão e do ângulo de fase da tensão de cada barra em um sistema de potência sob condições equilibradas. Uma vez obtidos, os fluxos de potência ativa e reativa de cada

uma das linhas de transmissão e equipamento, assim como as potências ativas e reativas, também são calculadas as perdas (KUNDUR, 1994).

Porém, o método fluxo de carga convencional é considerado inadequado quando o objetivo for a obtenção do ponto de máximo carregamento do sistema, uma vez que a matriz Jacobiana (J) fica singular exatamente neste ponto e assim, o fluxo de carga convencional apresentará problemas de mau condicionamento ao se aproximar desta região crítica.

No método do fluxo de carga continuado (FCC), a singularidade da matriz Jacobiana e, por conseguinte, os problemas numéricos que surgem na vizinhança do ponto de máximo carregamento do sistema, são eliminados através da adição de equações de parametrização (SEYDEL, 1994). Assim, os métodos fluxo de carga continuado, que são baseados nos algoritmos preditor-corretor, podem ser considerados como um melhoramento do fluxo de carga convencional, uma vez que ele não só pode ser usado para a obtenção de uma solução particular do fluxo de carga, mas também para:

- O traçado de trajetórias de soluções; (AJJARAPU; CHRISTY, 1992), (CAÑIZARES et al. 1992), (SEYDEL, 1994);
- Análise do colapso de tensão em sistemas elétricos de potência; (KUNDUR, 1994);
- A computação de soluções múltiplas; (AJJARAPU; CHRISTY, 1992), (CAÑIZARES et al. 1992), (KUNDUR, 1994), (SEYDEL, 1994);
- Investigação da existência de soluções de fluxo de potência; (CHIANG et al. 1995), (WECC, 1998), (FETTE; VOSS, 1999);
- Avaliar contingências (FLUECK; DONDETTI, 2000), (WANG; DA SILVA; XU, 2000).

Nesta tese uma nova proposta é apresentada como alternativa para a redução nas perdas de potência ativa na transmissão usando um método de continuação.

Para atingir esta meta, uma equação de parametrização baseada na perda total de potência ativa na transmissão e as equações da potência reativa injetada nas barras de geração e na barra de folga (*slack*) são adicionadas às equações do fluxo de carga convencional.

As tensões nas barras de geração e na barra de folga são consideradas como variáveis de controle e um novo parâmetro é escolhido para reduzir as perdas de potência ativa. Os resultados mostram que este procedimento não só leva a uma redução nas perdas de potência ativa e, por conseguinte, nos custos operacionais, mas, simultaneamente, contribui para a melhoria do perfil de tensão. Além disto, este procedimento também conduz, na maioria das vezes, a um aumento na margem de carregamento, ou seja, na estabilidade estática de tensão.

1.2 – Estrutura do trabalho

Procura-se ao longo deste trabalho criar os subsídios necessários não só para o entendimento do problema em si, mas também das técnicas utilizadas em sua análise, entre estas, muitas serão apenas comentadas por não se tratarem de técnicas adotadas neste trabalho.

O capítulo 2 almeja situar o trabalho proposto no contexto geral da estabilidade estática da tensão em sistemas elétricos de potência. Para tanto são tecidas considerações a respeito da estabilidade em sistemas elétricos de potência, sua divisão em categorias, e, dependendo do tempo utilizado para o processamento das informações, sua estruturação em análise dinâmica e análise estática. Este projeto de pesquisa refere-se especificamente ao estudo de desenvolvimento de procedimentos de análises estáticas referentes à estabilidade de

tensão de sistemas elétricos de potência. É apresentada a linha de estudo da estabilidade estática de tensão através da análise das curvas PV e QV.

O capítulo 3 tem por objetivo levar ao leitor a compreensão do método da continuação e de algumas técnicas de parametrização existentes na literatura, as quais têm como objetivo a eliminação dos problemas relacionados com a singularidade da matriz Jacobiana pertinente ao fluxo de carga convencional.

Será apresentado o fluxo de carga convencional, que emprega o método de Newton-Raphson objetivando a obtenção do ponto de máximo carregamento dos sistemas por meio de soluções do fluxo de carga convencional para sucessivos incrementos na carga. Serão então apresentadas algumas variações no emprego do método da continuação com suas respectivas técnicas de parametrização. Finaliza-se com a explanação a respeito do fluxo de carga continuado, com o qual se remove o problema da singularidade da matriz Jacobiana no ponto de máximo carregamento.

A proposta do capítulo 4 é apresentar, após a explanação da metodologia proposta, a aplicação da abordagem proposta para dois sistemas, sendo: Um sistema de 2 barras (uma barra de folga e uma PV), para o qual é possível se obter o ponto ótimo a partir das equações algébricas desenvolvidas em (ALVES et al. 2002-II); E o outro, um sistema de três barras (uma barra de folga, uma PV e uma PQ) apresentado e analisado em (DOMMEL; TINNEY, 1968). Os resultados também são comparados com os resultados obtidos por um programa de fluxo de carga ótimo (DA COSTA; LANGONA; ALVES, 1998). São apresentados os efeitos do redespacho das variáveis de controle nas reduções da perda total de potência ativa na transmissão do sistema, além da investigação dos efeitos causados por esta redução na margem de estabilidade de tensão e no perfil de tensão. Através do sistema IEEE 14 barras é analisado como se dá o balanço de reativo do sistema elétrico de potência durante o processo de redução da perda ativa total. Em seguida, apresentam-se os resultados obtidos para os

sistemas do *Institute of Electrical and Eletronics Engineering* (IEEE) 14, 30 e 57 barras que mostram que este procedimento conduz a uma redução nas perdas de potência ativa na transmissão.

Adicionalmente, mostra-se através do traçado das curvas PV que a redução na perda total na transmissão leva, em geral, não só a uma diminuição dos custos operacionais do sistema, mas também a um aumento da margem de estabilidade de tensão e a uma melhoria no perfil da tensão. Apresenta-se também a influência da escolha da barra de folga durante o processo de redução da perda ativa total (sistemas IEEE 57 e IEEE 118 barras). São apresentadas comparações entre os resultados obtidos com um programa de fluxo de carga ótimo e o fluxo de carga continuado proposto. Encerrando este capítulo são apresentados o desempenho da metodologia proposta para sistemas de grande porte, isto é para o sistema IEEE 300 barras e o sistema OTS-904.

O capítulo 5 apresenta as conclusões gerais deste trabalho, enfatiza as contribuições assim como apresenta sugestões de estudos para possíveis continuidade do trabalho.

Finalizando apresenta-se o apêndice A, onde são listados os artigos publicados com conteúdo específico referente a esta tese.

Capítulo 2

ANÁLISE DA ESTABILIDADE ESTÁTICA DE TENSÃO

2.1 - Introdução

Este capítulo tem como objetivo prover uma idéia global a respeito da importância do estudo da estabilidade estática de tensão, bem como situar o trabalho proposto no contexto geral do assunto.

São apresentados conceitos básicos imprescindíveis para a análise da estabilidade estática de tensão. Apresenta-se, em particular, o conceito da margem de estabilidade de tensão, uma vez que tal conceito é fundamental aos operadores dos sistemas elétricos de potência no tocante à determinação dos limites da transferência de potência.

2.2 – Estabilidade em sistemas elétricos de potência

A complexidade dos sistemas elétricos de potência vem agregando cada vez mais variantes, dentre elas destacam-se os possíveis acidentes associados ao comportamento do sistema e o crescente aumento no número de situações a serem exploradas, tais como:

estruturas no setor elétrico; compensação de reativos; disponibilidade de dispositivos rápidos de controle.

Os operadores dos sistemas elétricos de potência devem essencialmente explorá-los de forma econômica e com elevados níveis de confiabilidade, ou seja, é necessário que o sistema tenha capacidade de estabelecer, após um distúrbio, um novo ponto de equilíbrio, sem que haja violação às restrições físicas de seus componentes. Portanto os operadores devem proceder de forma que o sistema atue corretamente a qualquer tempo, evitando atuações indevidas ou desnecessárias. Porém, atualmente, os sistemas elétricos de potência têm sido operados cada vez mais próximos à sua capacidade de transmissão, atuando efetivamente com baixos níveis de segurança.

Esta situação de operação do sistema de forma estressada se deve a crescente expansão do mercado consumidor de energia e as imposições de restrições de ordens ecológicas e econômicas, ou seja, dificuldades de construção de novas usinas de geração e linhas de transmissão para o transporte da energia.

Particularmente no sistema elétrico brasileiro, este problema apresenta-se de forma mais contundente uma vez que o mesmo possui um parque gerador de energia de base predominantemente hidráulica. Assim, o esgotamento dos recursos hidrelétricos mais próximos dos principais centros de carga tem como consequência a necessidade de se recorrer a aproveitamentos hidrelétricos cada vez mais distantes, exigindo a formação de um sistema elétrico complexo caracterizado por linhas de transmissão preponderantemente longas, sendo assim mais propício à ocorrência de problemas de instabilidade de tensão (CIGRE, 1992).

A classificação dos problemas de estabilidade em categorias, subcategorias e tempo utilizado para o processamento das informações, visa facilitar a análise dos problemas de estabilidade através da identificação dos principais fatores e do desenvolvimento de métodos para melhorar as condições de operação dos sistemas elétricos de potência.

As categorias são:

- Estabilidade de ângulo do rotor;
- Estabilidade de frequência;
- Estabilidade de tensão.

A estabilidade angular transitória em sistemas elétricos de potência se caracteriza na capacidade dos geradores, que compõem o sistema, de se manterem em sincronismo após o sistema ser submetido a uma grande perturbação.

A estabilidade de frequência em sistemas elétricos de potência se caracteriza na capacidade do sistema de manter a frequência gerada dentro da faixa de tolerância, em torno da frequência nominal, em condições operacionais normais ou mesmo após o sistema ser submetido a uma perturbação.

O termo estabilidade de tensão de forma geral envolve problemas de curta, média e longa duração, sendo neste trabalho utilizado exclusivamente para fenômenos de longa duração. A estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência se caracteriza na capacidade do sistema de manter as tensões em todas as barras que o compõe, em faixas de tolerância da tensão nominal, em condições operacionais normais ou mesmo após o sistema ser submetido a uma perturbação. Geralmente, a instabilidade se dá na forma de uma queda progressiva e incontrolada na magnitude da tensão em uma ou mais barras, do sistema elétrico, provocada pela tentativa de restabelecimento da carga.

A Figura 2.1 identifica as categorias e subcategorias do problema da estabilidade em sistemas elétricos de potência (KUNDUR et al. 2004).

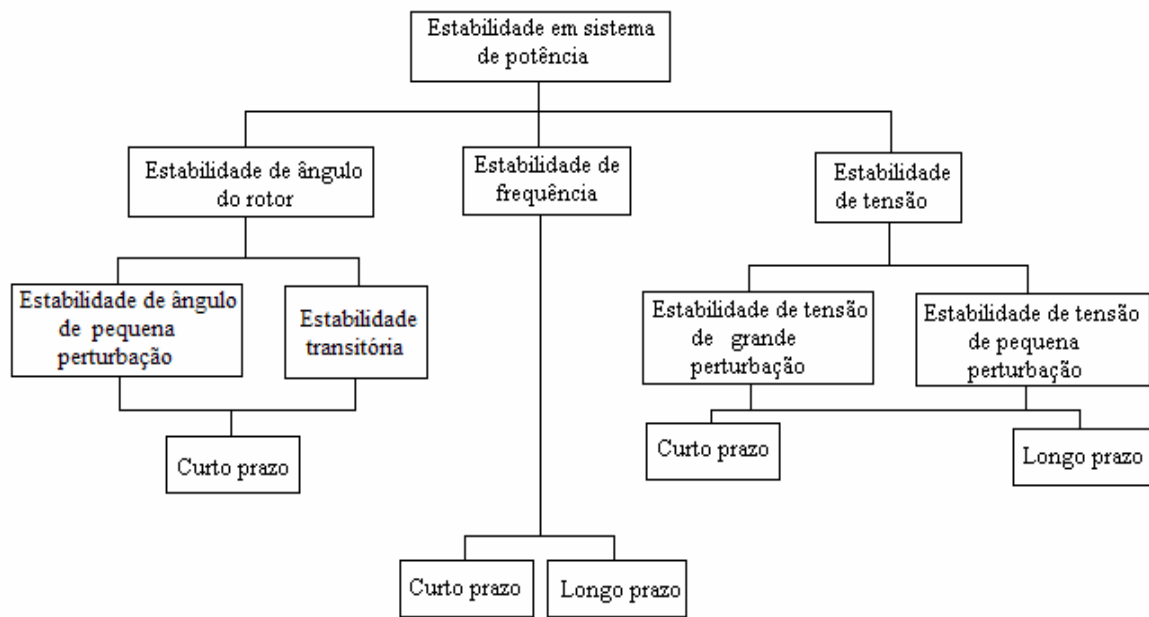


Figura 2.1 - Classificação da estabilidade em sistemas elétricos de potência.

Nos sistemas elétricos de potência o aumento de cargas tem como consequência direta a diminuição nos níveis de tensão em suas barras (nos barramentos), sendo assim um aumento contínuo de cargas pode eventualmente levar o sistema a um estado instável caracterizado pelo rápido decréscimo nos valores de tensão em seus barramentos. Este fenômeno é conhecido na literatura específica como colapso de tensão, onde o perfil da tensão nas barras é obtido em função do carregamento do sistema.

O carregamento do sistema pode ser interpretado de uma maneira mais abrangente, isto é, não somente como um aumento de carga, mas também como um aumento na transferência de potência entre áreas; do aumento da carga de determinadas áreas; ou da carga de barras específicas. Não obstante, o aumento pode também ser definido em termos de potência ativa (P), potência reativa (Q) ou potência aparente (S) (XU; MASOUR; HARRINGTON, 1993).

Se há um aumento na solicitação de potência reativa, a potência reativa adicional deverá ser fornecida através das reservas existentes nos geradores e/ou nos compensadores de reativos que compõem o sistema.

Normalmente, haverá reserva de potência reativa suficiente e o sistema se estabilizará em um novo ponto de operação com novos valores de tensão. No entanto, poderá ocorrer que devido a uma combinação de eventos e condições do sistema, que esta solicitação adicional provoque o colapso de tensão.

Dentre muitos cenários que podem levar a rede ao colapso de tensão pode-se citar:

- Sistema operando com muitos geradores próximos aos centros de carga que estão fora de serviço. Neste cenário as linhas de transmissão estarão sobrecarregadas e as reservas de potência reativa estarão no mínimo;
- Perda de uma linha de transmissão sobrecarregada provocando sobrecarga nas linhas adjacentes. Neste cenário haverá um aumento nas perdas reativas nas linhas ocasionando um aumento no provimento de potência reativa na rede;
- No cenário anterior teremos um decréscimo na tensão nas cargas adjacentes, o que provocará uma redução na potência fornecida, com conseqüente redução no fluxo de potência. Neste cenário os reguladores automáticos de tensão dos geradores irão tentar repor os níveis de tensão através do acréscimo na corrente de excitação dos geradores. A energia reativa injetada pelo gerador na rede provocará um aumento da queda de tensão nas linhas e nos transformadores. Entretanto, os geradores poderão estar operando nos limites da corrente de excitação e da corrente do estator, sendo necessário que os reguladores de velocidade dos geradores regulem a frequência, diminuindo a potência reativa injetada no sistema;

- A redução da tensão nas cargas reflete-se para a distribuição. Os transformadores com regulação automática de *tap* sob carga (OLTC) nas subestações tentam repor os níveis de tensão na distribuição. A cada operação dos *tap*'s dos transformadores o resultante aumento da potência fornecida fará com que as perdas nas linhas de transmissão aumentem o que por sua vez aumentará a queda de tensão na respectiva linha. Se a linha estiver bastante sobrecarregada, a cada aumento no fluxo de potência provocará um aumento progressivo das perdas de potência reativa na linha. Ainda, a cada mudança nos *tap*'s dos transformadores a potência reativa fornecida pelos geradores irá aumentar. Os geradores irão aumentar o fornecimento de potência reativa até seu limite. Quando o primeiro gerador atinge o limite da corrente de excitação, a tensão em seus terminais diminui. A distribuição pelos diferentes geradores da potência reativa consumida poderá provocar a sobrecarga de outros geradores. Com poucos geradores tendo o controle da sua corrente de excitação, o sistema torna-se ainda mais vulnerável do ponto de vista da tensão.

Mudanças nas configurações do sistema e em sua operação fazem com que o mesmo opere na sua faixa máxima de capacidade de geração e transmissão, tendo como consequência a ocorrência de vários problemas de instabilidade de tensão (CIGRE, 1992).

Os sistemas de potência estão sujeitados a uma extensiva gama de pequenas e grandes perturbações. Pequenas perturbações na forma de mudanças com incremento de carga, acontecem continuamente, o sistema de potência deve ajustar-se às novas condições e operar satisfatoriamente.

O sistema deve também ter condições de responder a numerosas perturbações de natureza severa, como dê curto circuito em uma linha de transmissão ou perda de um grande gerador. Uma grande perturbação pode conduzir a mudanças estruturais devido ao isolamento dos elementos de falta.

Se após uma perturbação passageira o sistema elétrico de potência manter-se estável ocorrerá a um novo estado de equilíbrio com praticamente o sistema inteiro permanecendo intacto, ou seja, com todos os geradores e cargas conectadas por um único sistema de transmissão contínuo.

Por outro lado, se o sistema for instável, resultará em situação de estado precário, por exemplo, um aumento progressivo na distância angular dos rotores do gerador, ou uma diminuição progressiva nas magnitudes das tensões de barra. Uma condição de sistema instável poderia conduzir a faltas em cascata e ao desligamento de uma parte importante dos sistemas elétricos de potência.

Recentemente, a instabilidade de tensão foi responsável por vários colapsos de tensão de redes elétricas. Como conseqüências os termos “instabilidade de tensão” e “colapso de tensão” aparecem mais frequentemente na literatura e na discussão do planejamento e operação dos sistemas.

Quando sujeito a uma perturbação, a estabilidade do sistema dependerá da condição operacional inicial e também da natureza da perturbação. Na região de equilíbrio, um sistema de potência pode ser estável com respeito a uma grande perturbação física, e instável com respeito à outra.

Do ponto de vista econômico, ou seja, da avaliação custo versus benefício, torna-se impraticável, por ser antieconômico, projetar sistemas de potência para serem estáveis para todas as possíveis contingências.

As contingências básicas são selecionadas no projeto. Elas apresentam uma probabilidade razoavelmente alta de ocorrência. Conseqüentemente a estabilidade frente a uma grande perturbação ocorrerá em um conjunto de incidentes de perturbação específica.

O conjunto de incidentes de perturbação citado anterior descreve como um colapso de tensão pode evoluir em um sistema. Observa-se que o intervalo para que um colapso ocorra fica, portanto, dependendo da resposta dos vários controles envolvidos, dependente do tempo utilizado para o processamento das informações.

Por ser representado por meio de um sistema de equações não-lineares, os sistemas elétricos de potência operam com seus principais parâmetros (potência gerada, tensões, cargas, correntes) sofrendo constantemente variações em seus valores operacionais. A avaliação da estabilidade frente a uma grande perturbação envolve efeitos não-lineares que não permitem aplicar a linearização, em torno do ponto de operação através da série de Taylor, das equações do sistema (KUNDUR et al. 2004).

Tradicionalmente, a análise dinâmica, quando aplicada ao estudo da estabilidade de ângulo, limita-se às dinâmicas dos geradores durante os milissegundos da fase transitória. Contudo, o intervalo de tempo para a análise de estabilidade de tensão é muito maior, e nesse caso, se as dinâmicas dos geradores forem consideradas, os requisitos computacionais tornar-se-iam proibitivos (KUNDUR, 1994). Em conseqüência do longo intervalo de tempo envolvido, a estabilidade de tensão tem sido analisada como um problema à regime permanente, portanto, apropriado para a abordagem através da análise estática.

A abordagem estática pode oferecer uma visão geral para o fenômeno e pode de fato fornecer uma solução aproximada, ainda aceitável, a qual é computacionalmente muito mais simples quando comparada a abordagem dinâmica. Também, como fator principal no estudo da estabilidade de tensão está a disponibilidade de potência reativa, problema ideal para análise de fluxo de carga que é um dos focos deste trabalho.

2.3 – Estabilidade estática de tensão

A estabilidade de tensão envolve análises em regime permanente antes e depois de um distúrbio no sistema elétrico. São verificados nos sistemas elétricos: os níveis das magnitudes de tensões nas barras, e a violação dos limites térmicos dos equipamentos que o compõem.

Os sistemas elétricos de potência estão continuamente experimentando pequenas flutuações nas magnitudes das tensões, porém, para avaliar estabilidade de tensão quando o sistema estiver sob uma dada perturbação específica, é normalmente válido assumir que o mesmo encontra-se inicialmente em uma condição operacional estática.

A estabilidade nos sistemas elétricos de potência está relacionada com a propriedade do sistema em permitir que ele permaneça em um estado de operação de equilíbrio sob condições normais de operação e atinja um estado de equilíbrio aceitável após ser submetido a um distúrbio, seja ele pequeno ou grande. Recentemente, tendo como objetivo prover a compreensão do termo “estabilidade de sistemas de potência” em uma definição física que se enquadrasse nas definições da teoria de sistemas elétricos, KUNDUR et al. (2004) propuseram:

“A estabilidade de sistemas elétricos de potência é a habilidade de um sistema de energia elétrica, para uma determinada condição operacional inicial, recuperar um estado de equilíbrio operacional depois que estiver sujeito a uma perturbação física, com limitação das variáveis do sistema de forma que a integridade de sistema seja preservada”.

A integridade do sistema é preservada quando praticamente todo sistema de potência restante permanece intacto sem sofrer desligamento de geradores ou cargas, com exceção daqueles desconectados através do isolamento dos elementos sob falta ou intencionalmente desconectados para preservar a continuidade da operação do restante do sistema.

2.4 – Métodos de estudo da estabilidade estática de tensão

Alguns fatos importantes têm marcado o planejamento e a operação de sistemas elétricos de potência nas últimas décadas:

- O número de conexões entre companhias de eletricidade tem aumentado muito. Por exemplo, países como o Brasil e os Estados Unidos, entre outros, possuem praticamente um único sistema de potência, composto de um grande número de companhias de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Por um lado, isto aumenta a confiabilidade de atendimento da demanda do sistema, já que a energia pode ser repassada pelas companhias que a tem em excesso para aquelas que apresentam déficit. Em consequência, a necessidade de reserva girante (*spinning reserve*) de cada companhia diminui, diminuindo seus custos de geração. Por outro lado, os efeitos de perturbações na área de uma companhia podem se propagar e serem notados em todo o sistema. Logo, do ponto de vista de segurança da operação, o sistema pode ficar mais vulnerável;
- Os novos investimentos na expansão do sistema e instalação de novos equipamentos têm sido, em sua maioria, adiada e as causas são várias, incluindo desde as econômicas até as ambientais. Como a demanda tem aumentado consistentemente ao longo dos anos, os equipamentos já existentes passaram a operar cada vez mais próximo de seus limites. Em consequência, a habilidade do sistema em manter condições aceitáveis de operação após perturbações tem diminuído bastante.

Naturalmente, os fatos descritos anteriormente têm um impacto direto sobre a estabilidade do sistema e, em particular, sobre a estabilidade de tensão. Tem se verificado a

ocorrência de perfis de tensão normalmente altos ou baixos, e incidentes de tensão que levaram ao colapso de tensão (TOGNETE, 1997).

O colapso de tensão, que é um processo pelo qual a instabilidade de tensão leva uma parte significativa da rede a um perfil de tensões baixas, tem ocorrido em sistemas com torques sincronizante e de amortecimento suficientes, mas com problemas relacionados ao controle de potência reativa.

Estas ocorrências têm sido mais freqüentes em sistemas muito interconectados, altamente carregados e com falta de um suporte de reativos adequado. Eles operam, portanto, com pequenas margens de segurança, ou seja, com pouca capacidade de manter o sistema estável sob condições de variação de carga ou sob contingência.

Desta forma, uma vez que os problemas de estabilidade de tensão são identificados, a não ser que se tenha um estudo prévio de ações de controle eficientes, preventivas ou restaurativas, incluindo a alocação de reativos, a redução de potência transferida se faz necessária. Assim, a análise do problema de estabilidade de tensão vem ganhando maiores destaques, já que ele tem se mostrado um fator de limitação na operação de redes.

Existem hoje, diversos métodos de análise de estabilidade de tensão propostos na literatura, para o estudo do problema de estabilidade de tensão (FLATABO; OGNEDAL; CARLSEN, 1990), (AJJARAPU; CHRISTY, 1992), (WGVS, 1993), (YONG-HUEI; CHING-TSAI; WEN-WEI, 1997), (MOGHAVVEMI; JASMON, 1997), incluindo várias teorias que procuram explicar o fenômeno do colapso de tensão e os mecanismos para sua ocorrência. Estes métodos permitem que se avaliem as condições de operação do sistema e de seu nível de segurança em termos de estabilidade de tensão.

A análise estática da estabilidade de tensão pode ser realizada em princípio, com as equações de fluxo de carga ou alguma generalização adequada destas. Estas análises

relacionam a ocorrência do colapso de tensão com o problema conhecido das equações de fluxo de carga de apresentarem múltiplas soluções.

SEKINE et al. (1989) estudaram a natureza das soluções do fluxo de carga com métodos algébricos, baseados na natureza quadrática das equações de fluxo de carga com as tensões representadas em coordenadas retangulares.

GALIANA et al. (1992) identificaram o colapso de tensão como um ponto em que, ao se variar a carga do sistema, deixa de haver solução para o fluxo de carga.

Alguns métodos estáticos buscam a definição de índices de proximidade ao colapso de tensão para a comparação entre diferentes pontos de operação, de modo a se obter uma seleção qualitativa das condições críticas.

Dentre as abordagens estáticas têm-se os métodos baseados na obtenção das curvas PV e QV para barras de interesse do sistema. Essas curvas são obtidas através de cálculos do fluxo de carga convencional ou através do fluxo de carga continuado (IBA et al. 1991), (CAÑIZARES et al. 1992) (AJJARAPU; CHRISTY, 1992), (CHIANG et al. 1995), (ALVES et al. 2000), (GARBELINI et al. 2005) e que serão vistos no capítulo 3 e 4, por se tratar do método proposto.

2.5 – Avaliação do colapso de tensão baseado nas curvas PV e QV

Uma tarefa que vem se tornando essencial nas etapas de planejamento e operação de sistemas elétricos de potência é a avaliação da estabilidade de tensão. O aspecto mais importante dessas análises é a determinação da margem de estabilidade de tensão e as ações de controle necessárias para se garantir essa margem. As margens de estabilidade devem ser determinadas no planejamento e durante a operação em tempo-real objetivando um melhor aproveitamento dos recursos de geração e de capacidade de transmissão. Portanto, a margem

de estabilidade de tensão e as ações de controle devem ser obtidas não só para as condições normais de operação identificada como caso base, mas também para um conjunto de diferentes condições de contingência. Isto é realizado através do traçado de curvas PV, QV, ou SV para cada contingência e várias condições operativas.

O operador nacional do sistema elétrico brasileiro (ONS) considera o levantamento das curvas PV como sendo a metodologia mais adequada para se determinar as margens de estabilidade de tensão, utilizando o levantamento da curva QV como metodologia complementar em subsídio à avaliação das margens de reativos (ONS, 2001).

Tradicionalmente empregados pelas concessionárias de energia elétrica, estes métodos são utilizados na determinação da demanda máxima que o sistema pode atender conhecido como ponto “nariz” das curvas PV e QV, identificando assim, a condição em que o colapso de tensão poderá ocorrer. A distância de um dado ponto de operação para o “nariz” das curvas PV e QV indica a margem estática de estabilidade de tensão do sistema (TAYLOR, 1994).

2.5.1 – Curvas PV

A característica de transferência de potência, também denominada curva PV, é definida como sendo a relação entre a magnitude da tensão e a potência ativa em um determinado barramento, para uma condição específica de fator de potência e tensão no mesmo barramento.

As curvas PV são utilizadas:

- Na análise estratégica de planejamento e operação de sistemas elétricos de potência;
- Na determinação de limites de transferência de potência;

- No ajuste das margens.

O levantamento da curva PV consiste em realizar cálculos de fluxo de potência, a partir de um ponto de operação inicial identificado como caso base, considerando sucessivos aumentos de carga em uma única barra, numa área, ou em todo o sistema.

O aumento de carga pode ou não ser realizado com o fator de potência constante, sendo que a cada incremento de carga são realizados novos cálculos de fluxo de carga, determinando-se assim, os pontos de operação que formarão a curva PV.

Portanto a curva PV mostra a variação da tensão numa barra em função do aumento de carga considerado no sistema.

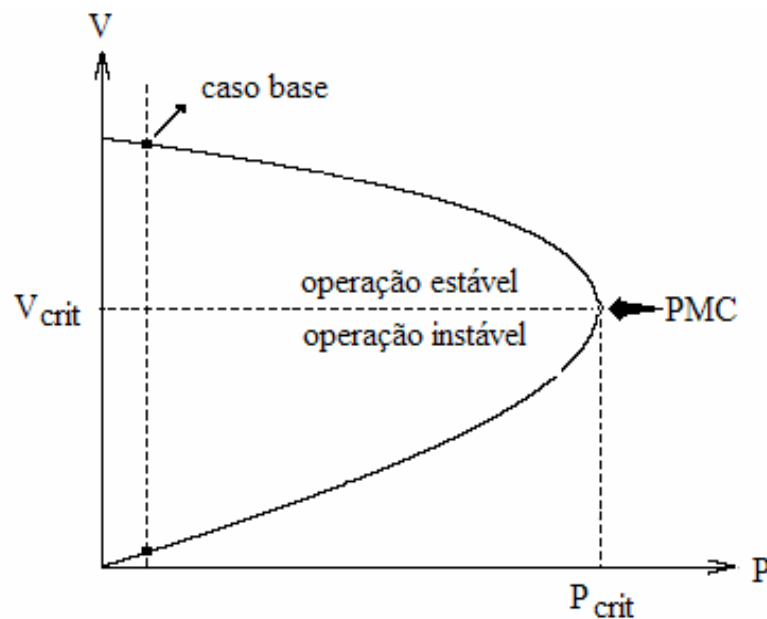


Figura 2.2 - Curva PV genérica.

Empregada principalmente em análises conceituais de estabilidade de tensão, a curva PV fornece o ponto de máximo carregamento ou ponto de colapso de tensão ou ponto crítico ou “nose” (nariz) da curva (Figura 2.2).

O ponto de máximo carregamento é identificado após a obtenção da curva PV, é por meio dele que se identifica a margem de estabilidade do sistema.

Na Figura 2.2 o valor do máximo carregamento da rede para uma dada condição específica é representado pela potência (P_{crit}) com o respectivo valor da tensão (V_{crit}) para as quais este máximo carregamento ocorre.

Uma desvantagem deste método é que a solução do fluxo de carga convencional diverge na região do “nariz” da curva PV impossibilitando a obtenção de curvas PV completas através deste método (TAYLOR, 1994).

2.5.2 – Curvas QV

O procedimento para se obter as curvas de QV é semelhante ao utilizado na obtenção das curvas de PV.

A curva QV pode ser obtida plotando-se a tensão na barra, no eixo das abscissas, contra a potência reativa injetada na mesma barra, no eixo das ordenadas.

Através desta curva obtém-se a variação da magnitude da tensão em uma determinada barra em função da injeção de potência reativa.

A injeção de potência reativa pode ser feita acoplando-se à barra uma fonte fictícia de potência ativa nula e de potência reativa variável, ou seja, um condensador síncrono, sem limite de reativos.

Diminui-se gradativamente a tensão na barra à medida que se calcula a injeção de reativos através da solução de sucessivos fluxo de carga convencional. Computacionalmente, isto é realizado convertendo-se a barra de geração (PV) em questão em barra de carga (PQ) sem limites de injeção de reativos (TAYLOR, 1994). Para grandes sistemas, as curvas são obtidas por meio de séries de simulações de fluxo de carga convencional.

Pode-se observar na Figura 2.3 que a margem de reativos disponível na barra, é a diferença entre a potência reativa de saída nula do compensador síncrono e a potência de saída do mesmo na base da curva QV, que representa o limite de estabilidade de tensão ($dQ/dV=0$).

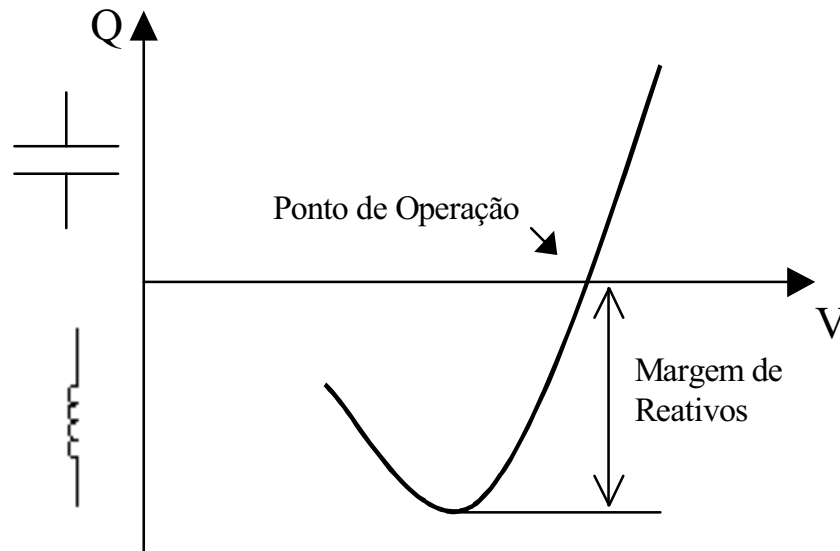


Figura 2.3 – Curva QV genérica.

Como vantagem deste método, tem-se que a determinação da margem reativa em barras críticas é simples e rápida. Porém, uma das suas limitações é o fato de aumentar a carga reativa em apenas uma barra do sistema, podendo assim, levar a resultados enganosos (KUNDUR, 1994).

A segurança estática esta intrinsecamente relacionada com a potência reativa, e a curva QV nos dá a margem de potência reativa na barra escolhida para análise.

2.6 - Margem de carregamento

Os operadores de sistemas elétricos de potência monitoram toda a topologia da rede com seus atuais fluxos de potência ativa e reativa concomitantemente com os níveis de tensão nos barramentos. Estas grandezas são monitoradas com o claro intuito de se garantir sua

permanência dentro de limites aceitáveis na atual configuração, ou em qualquer outra das possíveis configurações subseqüentes a uma contingência predefinida.

O operador deve estar sempre ciente da capacidade de transmissão do sistema, sendo que uma quantificação mais direta da capacidade de transmissão é a margem estática de estabilidade de tensão também definida como margem de carregamento.

A definição da margem dependerá da aplicação a que se destina. De uma forma geral procura-se estabelecer a margem em função da diferença entre o valor de um parâmetro correspondente a um evento e o seu atual valor.

A margem de estabilidade mede a distância a um evento que cause a instabilidade e deve ser definida de forma a ser facilmente compreendida pelo operador.

Para o colapso de tensão, a margem de estabilidade é definida como o maior aumento de carga que o sistema pode ter, sem provocar o colapso de tensão.

A estabilidade de tensão tem se tornado um assunto relevante pelo fato de que o desequilíbrio existente entre os aumentos contínuos de carga e as restrições econômicas e ambientais impostas à construção de novas usinas de geração, bem como da construção de novas linhas de transmissão, levar os sistemas a operarem próximos de seus limites, com reduzida margem de estabilidade.

Na análise estática de estabilidade de tensão de sistemas elétricos de potência o ponto de máximo carregamento define, em particular, a fronteira entre as regiões operacional estável e instável como observado na Figura 2.2.

A determinação do ponto de máximo carregamento é importante não somente para a obtenção de margens estáticas de estabilidade de tensão, como também para sua aplicação em análise modal, uma vez que é nesse ponto que a curva PV fornece as informações para a determinação de medidas efetivas para se obter um aumento da estabilidade de tensão do sistema (KUNDUR, 1994), (TAYLOR, 1994).

Independentemente de qual metodologia se utiliza para levantar as curvas PV de um sistema, em qualquer uma delas o objetivo será determinar a máxima carga possível a ser atendida.

Para sistemas com cargas do tipo PQ constante o ponto de colapso de tensão é o ponto de operação correspondente ao máximo carregamento do sistema. A diferença entre tal ponto e o ponto de operação do sistema (em MW ou p.u.) é denominada como sendo a margem de carregamento.

O conhecimento preciso da margem de carregamento para o ponto de operação atual é fundamental para que o operador de sistemas avalie se para um distúrbio o sistema encontrará um outro ponto de operação estável (WECC, 1998).

Para ilustrar o exposto, considere a Figura 2.4, na qual são apresentadas duas curvas PV obtidas para o sistema 14 barras do IEEE.

A curva 1 resulta da condição normal de operação considerada como curva de pré-contingência, enquanto que a curva 2 resulta da condição de pós-contingência da linha de transmissão entre as barras 1 e 2.

Os pontos de máximo carregamento são representados nas curvas 1 e 2 como $P_{\max\text{-pré}}$ e $P_{\max\text{-pós}}$, respectivamente.

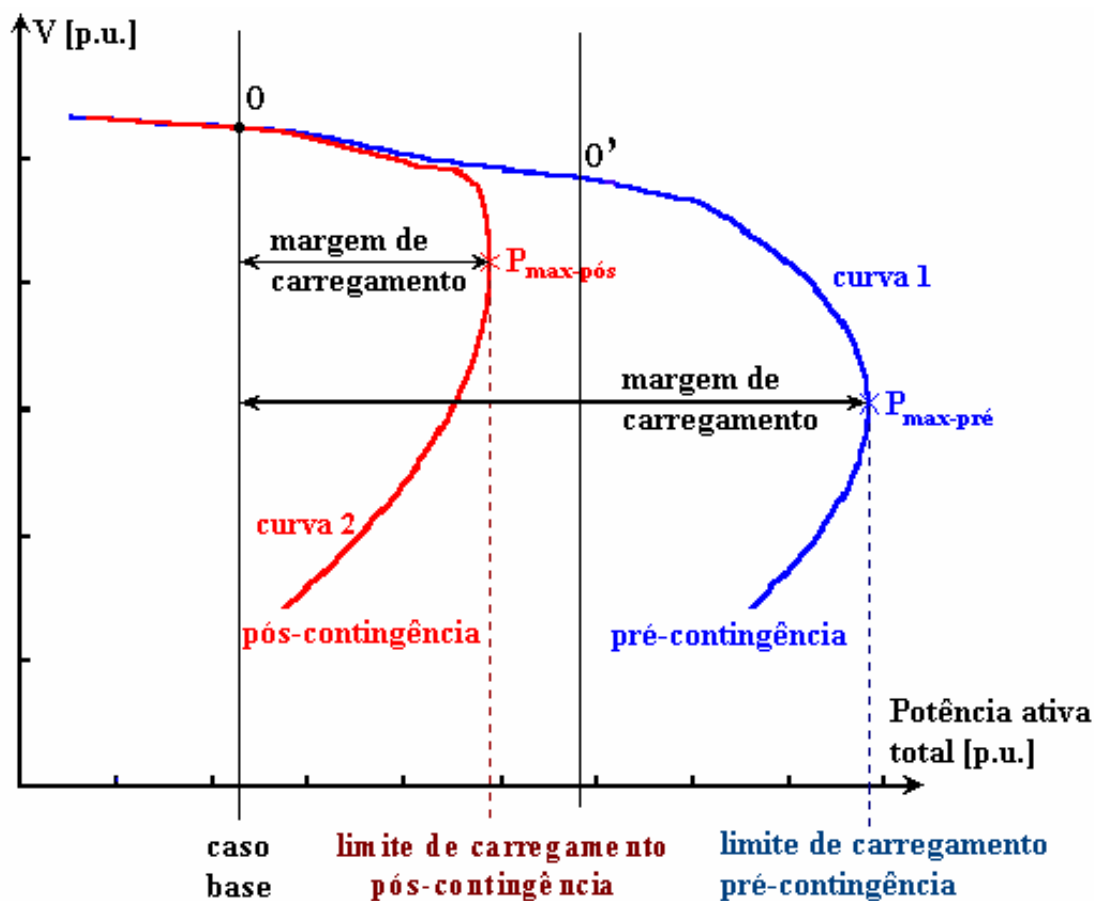


Figura 2.4 – Definição do ponto de máximo carregamento e da margem de carregamento.

O ponto “O” foi obtido por meio de um programa de fluxo de carga convencional e representa o ponto de operação estável do sistema, denominado caso base.

Conforme foi definido, a margem de carregamento para as curvas 1 e 2 são os valores em p.u., entre o ponto “O” e os pontos $P_{\max\text{-pré}}$ e $P_{\max\text{-pós}}$, respectivamente.

Caso o sistema esteja operando no ponto “O” da curva 1 e o mesmo for submetido, por exemplo, a um aumento de carga, ele passaria a operar no ponto “O’”. Nesse caso, o sistema entraria em colapso se ocorresse à contingência conforme mostra a curva 2, porém permaneceria operando com uma margem reduzida na condição normal conforme mostrado pela curva 1.

Nas análises de planejamento e operação sistemas elétricos de potência, o cálculo da margem de carregamento é efetuado por meio do fluxo de carga convencional e, mais recentemente, do fluxo de carga continuado.

Observa-se que o método fluxo de carga convencional é considerado ineficiente na obtenção do ponto de máximo carregamento devido às dificuldades numéricas apresentadas à medida que o carregamento do sistema se aproxima deste ponto crítico, pois para sistemas com cargas do tipo PQ constante a matriz Jacobiana torna-se singular no ponto de máximo carregamento. Dessa forma, a sua obtenção torna-se ineficiente e imprecisa devido às dificuldades numéricas apresentadas pelo fluxo de carga convencional à medida que o carregamento do sistema se aproxima de sua vizinhança.

De um modo geral, a divergência de um fluxo de carga convencional pode estar associada ao método utilizado na resolução, à estimativa inicial, às múltiplas soluções existentes e à inexistência da solução ou à existência de singularidades.

Uma vez que o ponto de máximo carregamento está associado às limitações físicas do sistema elétrico de potência, sua determinação não deve ser baseada numa limitação matemática de um método numérico. Assim, haverá sempre a necessidade de se investigar se a divergência é devida a problemas numéricos ou a limitações físicas do sistema, geralmente, as diferenças não são tão óbvias.

Observa-se que a singularidade da matriz Jacobiana no ponto de máximo carregamento é devido à redução de seu posto, ou seja do seu *rank*. Isto não significa que no ponto de máximo carregamento, o fluxo de carga convencional não tenha nenhuma solução. Na realidade esta solução existe, é única, e é bem definida, porém é necessário reformular a informação perdida com a redução do posto da matriz Jacobiana para se obter a solução.

Normalmente, esta compensação de informação será realizada através da adição de equações algébricas parametrizadas (CHIANG et al. 1995).

Para carregamentos maiores que o do ponto de máximo carregamento, no entanto, as equações de fluxo de carga convencional não têm solução.

Os métodos da continuação vêm sendo utilizados por longa data na análise de sistemas de equações algébricas não-lineares parametrizadas (SEYDEL, 1994). Mais recentemente foi proposta a sua utilização para o traçado das curvas de carregamento, obtenção de múltiplas soluções e do ponto de colapso de tensão de sistemas elétricos de potência (ALVES et al. 2000), (FLUECK; DONDETTI, 2000), (WANG; DA SILVA; XU, 2000), (ALVES et al. 2002-I), (ALVES et al. 2002-II).

Em função de sua crescente utilização na análise de sistemas elétricos, esses métodos já fazem parte de livros textos (KUNDUR, 1994), (SEYDEL, 1994), (TAYLOR, 1994).

A reformulação das equações de fluxo de carga convencional visa à remoção da singularidade da matriz Jacobiana no ponto de máximo carregamento e, por conseguinte, dos problemas numéricos que surgem em sua vizinhança. Como resultado, algoritmos de precisão simples podem ser usados para obter o ponto de máximo carregamento.

Capítulo 3

MÉTODO DA CONTINUAÇÃO E SUAS TÉCNICAS DE PARAMETRIZAÇÃO

3.1 – Introdução

Os sistemas de equações não-lineares têm, na formulação matricial do método de Newton-Raphson, um algoritmo com uma enorme versatilidade para sua solução. O conjunto de soluções se dá através do estabelecimento de uma estimativa inicial com posteriores execuções do método, através de um processo que envolve sucessivas variações de um determinado parâmetro do sistema.

O algoritmo é executado através de uma seqüência de etapas, sendo a mais complexa do ponto de vista computacional, a obtenção da matriz Jacobiana a partir da linearização do sistema de equações e a posterior inversão, explícita ou não, dessa matriz para o cálculo de aproximações para a solução.

Com a execução do método de Newton-Raphson obtém-se uma única solução para o sistema de equações desde que se estime adequadamente a solução inicial e que conseqüentemente a solução desejada não corresponda a um ponto singular.

Os métodos conhecido como *path following methods* (SEYDEL, 1994), no qual se inclui o método da continuação, são capazes de reformular o problema do fluxo de carga

convencional nos sistemas elétricos de potência, de uma maneira tal a definir as soluções como funções contínuas de um determinado parâmetro λ .

O fluxo de carga continuado pode ser usado para resolver qualquer conjunto de equações de equilíbrio, ou regime permanente, de sistemas elétricos de potência. Consiste na consecução de sucessivas soluções de equações algébricas não-lineares, objetivando traçar trajetórias de solução a partir de um caso base, mudando o valor de um parâmetro escolhido automaticamente.

A proposta do fluxo de carga continuado é a de encontrar uma continuidade de soluções do fluxo de carga convencional 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 identificada como caso base, usando um esquema preditor-corretor para encontrar as subseqüentes soluções até o ponto de máximo carregamento. Deste processo podem ser obtidas a margem de estabilidade de tensão e as informações adicionais sobre o comportamento das tensões das barras do sistema com o aumento do nível de carregamento.

Os estudos pertinentes à análise estática de tensão mostram que a aplicação do fluxo de carga continuado consegue superar as dificuldades numéricas (no ponto de máximo carregamento) por meio da adição de equações parametrizadas.

Este capítulo tem por objetivo introduzir os conceitos básicos gerais do fluxo de carga convencional e do fluxo de carga continuado. São também apresentadas algumas variações no emprego do método da continuação com suas respectivas técnicas de parametrização. Dentre as diversas técnicas, muitas serão apenas comentadas por não se tratarem de técnicas empregadas neste trabalho.

3.2 - Fluxo de carga convencional

Na formulação do problema fluxo de carga convencional as equações (\mathbf{G}) para um sistema podem ser escritas como:

$$\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) = \mathbf{0} \quad (3.1)$$

Onde:

$\boldsymbol{\theta}$ é o vetor dos ângulos de fase nodais das barras de carga (PQ) e de geração (PV);

\mathbf{V} é o vetor das magnitudes das tensões nodais das barras de carga (PQ);

\mathbf{G} é o vetor que contém as equações dos balanços de potências ativa e reativa nodais.

De acordo com Monticelli (MONTICELLI, 1983):

- A barra PV , conhecida como barra de geração, é aquela onde são conhecidas as variáveis independentes, isto é a potência ativa (P) e a tensão (V), sendo desconhecidas as variáveis dependentes, ou seja, a potência reativa (Q) e o ângulo de fase da tensão (θ);
- A barra PQ , também denominada barra de carga, é aquelas onde são conhecidas a potência ativa (P) e a potência reativa (Q), sendo desconhecidas a tensão (V) e o ângulo de fase da tensão (θ);
- A barra $V\theta$, conhecida como barra de folga (*slack*) ou barra de referência, é aquela onde são conhecidas a tensão (V) e o ângulo de fase da tensão (θ), sendo desconhecidas a potência ativa (P) e a potência reativa (Q).

No fluxo de carga utilizando o método de Newton-Raphson, para a resolução das equações do fluxo de carga convencional, obtém-se os valores de V_k e θ_k para todas as barras, atribuindo-lhe a denominação de caso base e seguindo o algoritmo apresentado a seguir (MONTICELLI, 1983).

A Equação (3.1) pode também ser reescrita como:

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

onde $\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})$ são as equações básicas do fluxo de carga, \mathbf{V} é o vetor das magnitudes das tensões nodais e $\boldsymbol{\theta}$ é o vetor do ângulo das tensões nodais, $\mathbf{P}^{\text{esp}} = \mathbf{P}_g^{\text{esp}} - \mathbf{P}_c^{\text{esp}}$ é a diferença entre as potências ativas geradas e consumidas para as barras de carga (PQ) e de geração (PV) e $\mathbf{Q}^{\text{esp}} = \mathbf{Q}_g^{\text{esp}} - \mathbf{Q}_c^{\text{esp}}$ é a diferença entre as potências reativas geradas e consumidas para as barras PQ

As equações de injeção de potência ativa e reativa na barra k , obtidas pela primeira Lei de Kirchhoff são:

$$\begin{aligned}P_k(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) &= V_k \sum_{m \in \boldsymbol{\kappa}} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \\ Q_k(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) &= V_k \sum_{m \in \boldsymbol{\kappa}} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km})\end{aligned}\quad (3.3)$$

Onde: P_k é a potência ativa na barra k ; Q_k é a potência reativa na barra k ; V_k e V_m são as magnitudes das tensões terminais do ramo $k-m$; θ_{km} é a defasagem angular entre as tensões das barras terminais no ramo $k-m$; G_{km} é a condutância do ramo $k-m$; B_{km} é a susceptância do ramo $k-m$; $\boldsymbol{\kappa}$ é o conjunto formado pela barra k mais todas as barras m conectadas a ela.

- i) Fazer $v = 0$ e escolher os valores iniciais do ângulo das tensões das barras PQ e PV ($\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta}^0$), e as magnitudes das tensões das barras PQ ($\mathbf{V} = \mathbf{V}^0$).
- ii) Calcular $\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v)$ para as barras PQ e PV e $\mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v)$ para as barras PQ , e determinar os *mismatches* $\Delta \mathbf{P}^v$ e $\Delta \mathbf{Q}^v$.
- iii) Testar convergência: se $\text{Max} \{ |\Delta \mathbf{P}^v| \} \leq \boldsymbol{\varepsilon}_P$ e $\text{Max} \{ |\Delta \mathbf{Q}^v| \} \leq \boldsymbol{\varepsilon}_Q$, o processo iterativo convergiu para a solução $(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v)$; caso contrário passar para (iv).
- iv) Calcular a matriz Jacobiana

$$J(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) = \begin{bmatrix} \mathbf{H}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) & \mathbf{N}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) \\ \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) & \mathbf{L}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Os componentes das submatrizes Jacobianas \mathbf{H} , \mathbf{N} , \mathbf{M} e \mathbf{L} correspondem às derivadas das potências ativa e reativa em relação ao ângulo de fase das tensões das barras PQ e PV , e em relação à magnitude das tensões nas barras PQ .

$$\mathbf{H} \left\{ \begin{array}{l} H_{km} = \partial P_k / \partial \theta_l = V_k V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \text{cos} \theta_{km}) \\ H_{kk} = \partial P_k / \partial \theta_k = -V_k^2 B_{kk} - V_k \sum_{m \in K} V_l (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \text{cos} \theta_{km}) \end{array} \right\} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{N} \left\{ \begin{array}{l} N_{km} = \partial P_k / \partial V_m = V_k (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \\ N_{kk} = \partial P_k / \partial V_k = V_k G_{kk} + \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \end{array} \right\} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{M} \left\{ \begin{array}{l} M_{km} = \partial Q_k / \partial \theta_m = -V_k V_m (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \\ M_{kk} = \partial Q_k / \partial \theta_k = -V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \end{array} \right\} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{L} \left\{ \begin{array}{l} L_{km} = \partial Q_k / \partial V_m = V_k (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \text{cos} \theta_{km}) \\ L_{kk} = \partial Q_k / \partial V_k = -V_k B_{kk} + \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \text{cos} \theta_{km}) \end{array} \right\} \quad (3.8)$$

v) Determinar a nova solução $(\boldsymbol{\theta}^{v+1}, \mathbf{V}^{v+1})$:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\theta}^{v+1} &= \boldsymbol{\theta}^v + \Delta \boldsymbol{\theta}^v \\ \mathbf{V}^{v+1} &= \mathbf{V}^v + \Delta \mathbf{V}^v \end{aligned} \quad (3.9)$$

sendo $\Delta \boldsymbol{\theta}^v$ e $\Delta \mathbf{V}^v$ determinados resolvendo-se o sistema linear:

$$\begin{bmatrix} \Delta P(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) \\ \Delta Q(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) & N(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) \\ M(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) & L(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta}^v \\ \Delta \mathbf{V}^v \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

vi) Fazer $v + 1 \rightarrow v$ e voltar para o passo (ii).

A dimensão do sistema de equações (3.1) é:

$$n = 2n_{PQ} + n_{PV}$$

Onde: n_{PQ} representa o número de barras PQ ; n_{PV} representa o número de barras PV ; n representa o número de incógnitas.

Isto normalmente é suficiente para a resolução do problema fluxo de carga convencional, contanto que a matriz Jacobiana tenha posto completo, ou seja, não deve ser singular.

No fluxo de carga convencional uma barra PV é usada para representar a barra de geração com controle de tensão.

Em cada interação a geração de reativo de cada barra PV é comparada com seu respectivo limite (Q-limite), no caso de violação, a barra PV é alterada para tipo PQ onde Q é especificado no valor limite alcançado, ou seja, torna-se uma variável independente, e V se torna uma incógnita no problema, isto é, torna-se uma variável dependente. Estas barras podem voltar a ser PV nas iterações futuras. Em geral, mudanças no tipo das barras não afetam a solução.

As curvas PV podem ser traçadas através de sucessivas soluções do fluxo de carga convencional, a partir de um caso base até próximo ao ponto de máximo carregamento, para incrementos graduais de carga (λ).

A expressão (3.11), corresponde às equações de balanço de potências definidas em (3.1), acrescida da dependência contínua da carga (resistiva, indutiva ou capacitiva) com o parâmetro escalar λ .

$$\mathbf{G}(\mathbf{\theta}, \mathbf{V}, \lambda) = \mathbf{0} \quad (3.11)$$

Ou ainda:

$$\lambda \mathbf{P}^{\text{esp}} - \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) = 0 \text{ para barras } PQ \text{ e } PV \quad (3.12)$$

$$\lambda \mathbf{Q}^{\text{esp}} - \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) = 0 \text{ para barras } PQ$$

Onde:

$\mathbf{P}^{\text{esp}} = \mathbf{P}_g - \mathbf{P}_c$ é a diferença entre as potências ativas geradas e consumidas para as barras de carga (PQ) e de geração (PV); $\mathbf{Q}^{\text{esp}} = -\mathbf{Q}_c$ é potência reativa consumida para as barras PQ.

Observa-se que quando o tipo da barra PV é alterado para PQ, deve-se tomar o cuidado de não multiplicar suas potências reativas geradas (\mathbf{Q}_g) por λ .

No sistema de equações (3.12), assume-se que o aumento de carga do sistema é proporcional ao caso base ($\lambda=1$) e que o fator de potência é mantido constante (Costa *et al.*, (1998)), (TAYLOR, 1994). As potências ativa P_k^{esp} e reativa Q_k^{esp} podem também ser definidas como $C_{p,k}^{\text{esp}} S_k^{\text{esp}} \cos\varphi_k^{\text{esp}}$ e $C_{q,k}^{\text{esp}} S_k^{\text{esp}} \sin\varphi_k^{\text{esp}}$, respectivamente. Assim, dependendo do valor de $C_{p,k}^{\text{esp}}$ e $C_{q,k}^{\text{esp}}$ pode-se obter as curvas PV, QV ou SV.

Portanto, é possível realizar-se 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 (WECC, 1998), (TAYLOR, 1994).

Em geral, λ é considerado uma variável dependente e então, variado automaticamente. Dessa forma, o sistema de equações (3.12), cuja dimensão é $n = 2n_{PQ} + n_{PV}$, agora tem $n + 1$ incógnitas, e uma equação adicional é necessária.

Por outro lado, qualquer uma das $n + 1$ incógnitas pode ser definida como parâmetro, seus valores podem ser especificados e, então, esta equação pode ser usada para calcular a nova variável dependente λ . Assim, o sistema (3.12) ficará com n equações e n incógnitas. Nestas condições, a nova matriz Jacobiana diferirá da original na coluna k onde as derivadas das potências em relação ao novo parâmetro serão substituídas pelas correspondentes derivadas em relação à nova variável dependente (λ).

A adição de equações parametrizadas tem se tornado um procedimento padrão (SEYDEL, 1994). Entretanto, isto implicará em um aumento na dimensão da matriz Jacobiana.

Aplicando-se a técnica do método do fluxo de carga convencional para resolver a Equação (3.12), para o caso base ($\mathbf{V}^0, \boldsymbol{\theta}^0, \lambda^0 = 1$), obtem-se como resultado o primeiro ponto da curva PV correspondente ao ponto $(x, \lambda)^a$ visualizado na Figura 3.1. Emprega-se, então, o método da continuação para calcular as soluções adicionais, até que o ponto de máximo carregamento seja alcançado. No início do processo, um passo preditor é executado para encontrar uma estimativa para a próxima solução.

A diferença entre os métodos da continuação está na forma como esta nova variável é tratada e em como a singularidade da nova matriz Jacobiana é evitada.

3.3 - Método da continuação e suas técnicas de predição, parametrização e correção

O traçado das curvas PV e QV para uma única barra, a solução do fluxo de carga convencional dependerá dentre outros fatores: da existência da solução; das múltiplas

soluções existentes; do método utilizado na resolução das equações algébricas não-lineares; da existência de singularidades da matriz Jacobiana no ponto de máximo carregamento; da estimativa inicial. Todas estas características são comuns aos processos de solução de equações algébricas não-lineares em geral.

O método da continuação pode ser implementado com qualquer conjunto de equações de equilíbrio, ou seja, em regime permanente de um sistema elétrico de potência, embora, nas análises de estabilidade de tensão, têm sido empregados mais especificamente para o cálculo da trajetória de soluções.

A denominação de fluxo de carga continuado (do inglês: *Continuation Power Flow*) advém do uso das equações padrões do fluxo de carga convencional como modelo das redes elétricas (KUNDUR, 1994), (VAN CUTSEM, 1998).

O método da continuação abaliza-se fundamentalmente na determinação de uma estimativa através de um processo de predição a partir de uma solução conhecida.

A estimativa representa a condição inicial para o processo de correção que por sua vez e o responsável pela convergência à nova solução.

Dentre os inúmeros métodos descritos na literatura específica, o mais amplamente empregado, consiste de quatro procedimentos básicos:

- I. Um procedimento de predição, necessário na ponderação de uma estimativa para o próximo ponto de solução.

Dentre as diversas técnicas de previsão destaca-se o método da tangente (AJJARAPU; CHRISTY, 1992), (AJJARAPU; LAU; BATTULA 1994) e o método da secante (CHIANG et al. 1995), (CHIANG et al. 1999);

Uma outra técnica de previsão é a denominada de previsão trivial ou polinomial modificada de ordem zero (CHIANG et al. 1995).

- II. Um procedimento estratégico de parametrização, necessário para evitar a singularidade da matriz Jacobiana.

As técnicas de parametrização mais freqüentemente utilizadas nos fluxo de carga continuado são a local, a geométrica, e a que utiliza o comprimento de arco (AJJARAPU; CHRISTY, 1992), (AJJARAPU; LAU; BATTULA 1994), (SEYDEL, 1994), (CHIANG et al. 1995), (CHIANG et al. 1999);

- III. Um controle de tamanho de passo, usado para obter um bom desempenho global;
- IV. Um procedimento corretor, necessário para corrigir a solução aproximada do passo preditor a fim de se evitar acumulo de erros.

A técnica mais aplicada é a da interseção perpendicular (AJJARAPU; CHRISTY, 1992), (IBA et al. 1991).

O método da continuação tem como objetivo encontrar soluções consecutivas $\{a, a+1\}$ para um sistema de equações não-lineares, de tal forma que:

$$(x, \lambda)^a \rightarrow (x^e, \lambda^e)^{a+1} \rightarrow (x, \lambda)^{a+1}$$

predição *correção*

A partir da solução conhecida, $(x, \lambda)^a$ através de um processo de predição é possível se determinar uma estimativa $(x^e, \lambda^e)^{a+1}$. Tal estimativa é a condição inicial para o processo de correção responsável pela convergência à nova solução $(x, \lambda)^{a+1}$.

A Figura 3.1 ilustra, de forma genérica, os processos de predição e correção em sistemas parametrizados.

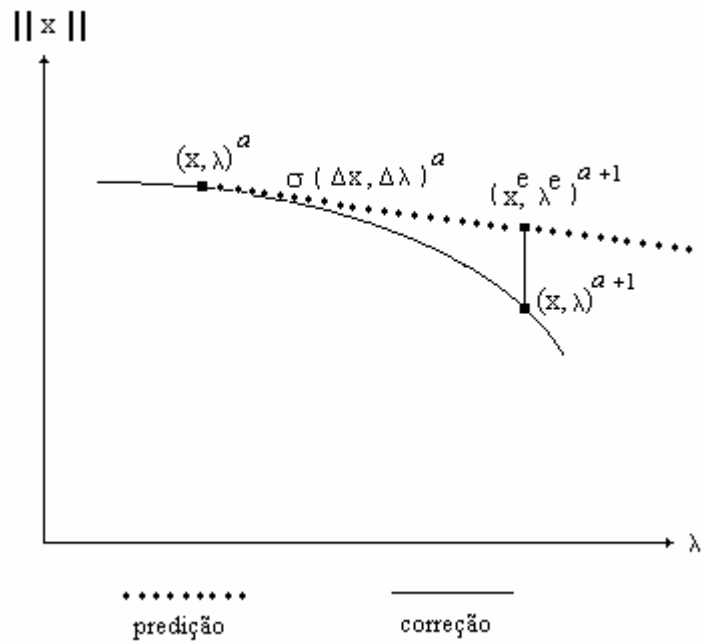


Figura 3.1 - Processos de predição e correção em sistemas parametrizados.

3.3.1 – Técnicas de predição

3.3.1.1 - Preditor tangente

No passo preditor tangente, a estimativa da próxima solução pode ser encontrada dando-se um passo, de dimensão apropriadamente escolhida, na direção do vetor tangente à curva PV, calculado na solução atual do processo.

O cálculo do vetor tangente (t) pode ser obtido tomando-se as derivadas parciais do sistema de equações (3.11).

Diferenciando-se a Equação (3.11) e colocando-a na sua forma matricial, pode-se calcular o vetor tangente através da seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_\theta & \mathbf{G}_V & -G_\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J} & -G_\lambda \end{bmatrix} \mathbf{t} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Onde:

\mathbf{G}_θ são as derivadas parciais de \mathbf{G} em relação à θ ; \mathbf{G}_V são as derivadas parciais de \mathbf{G} em relação à \mathbf{V} ; \mathbf{G}_λ são as derivadas parciais de \mathbf{G} em relação à λ ;

\mathbf{G}_θ e \mathbf{G}_V compõem a matriz Jacobiana do Fluxo de carga convencional.

Incrementa-se uma coluna $-\mathbf{G}_\lambda$ em \mathbf{J} , correspondente a nova variável λ . Através do incremento da nova coluna, o número de incógnitas passa a ser maior do que o número de equações, uma variável do vetor \mathbf{t} deve ser especificada com um valor diferente de zero. A variável escolhida dá-se a denominação de “parâmetro da continuação”.

Com a especificação do parâmetro da continuação deve-se acrescentar uma nova equação ($\mathbf{e}_k \mathbf{t} = t_k = \pm 1$) ao sistema (3.2).

O sistema de equações (3.14) com as devidas modificações passa a ser:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_\theta & \mathbf{G}_V & -\mathbf{G}_\lambda \\ & \mathbf{e}_k & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ d\mathbf{V} \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_\theta & \mathbf{G}_V & -\mathbf{G}_\lambda \\ & \mathbf{e}_k & \end{bmatrix} \mathbf{t} = \mathbf{J}_m \mathbf{t} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Na Equação (3.14) \mathbf{e}_k é um vetor linha, devidamente dimensionado, com todos os elementos nulos exceto o k -ésimo, que será igual a 1.

A identificação do índice “ k ” é realizada de forma tal que o vetor tangente \mathbf{t} tenha uma norma não-nula e garanta que a matriz Jacobiana modificada (\mathbf{J}_m) seja não-singular no ponto de máximo carregamento.

O número 1 deverá ser posto na coluna da variável escolhida como parâmetro da continuação (V_k , θ_k ou λ). A introdução do sinal + ou – dependerá de como a variável escolhida, como parâmetro da continuação, estará sendo alterada, positivo se ela estiver crescendo de valor, e negativo se estiver decrescendo.

Uma vez obtido o vetor \mathbf{t} , a estimativa para a próxima solução será dada por:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}^e \\ \mathbf{V}^e \\ \lambda^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}^a \\ \mathbf{V}^a \\ \lambda^a \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\boldsymbol{\theta} \\ d\mathbf{V} \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

O sobrescrito “e” indica estimativa, isto é, o vetor tangente é usado para obter uma estimativa para $\boldsymbol{\theta}$, \mathbf{V} , e λ a partir da solução atual “a”.

O escalar σ é o tamanho do passo preditor apropriado.

A dimensão do passo deve ser tal que a solução prevista esteja dentro do raio de convergência do passo corretor.

3.3.1.2 – Preditor secante

O método do preditor secante de ordem um é uma aproximação do vetor tangente e utiliza a solução anterior e a solução atual para fazer a estimativa da próxima solução. Estes dois primeiros pontos são obtidos pelo método do preditor tangente.

Os métodos polinomiais estão baseados em um polinômio de ordem variada que “corta” a solução atual e as soluções prévias $(\mathbf{x}^a, \lambda^a)$, $(\mathbf{x}^{a-1}, \lambda^{a-1})$, para prover um ponto de aproximação para a próxima solução $(\mathbf{x}^{a+1}, \lambda^{a+1})$.

$$(\mathbf{x}^{a+1}, \lambda^{a+1}) = (\mathbf{x}^a, \lambda^a) + \sigma (\mathbf{x}^a - \mathbf{x}^{a-1}, \lambda^a - \lambda^{a-1}) \quad (3.16)$$

O sistema da Figura 3.2, apresentada em (ALVES, 2000), para ilustrar os passos do método da continuação com preditor tangente e secante.

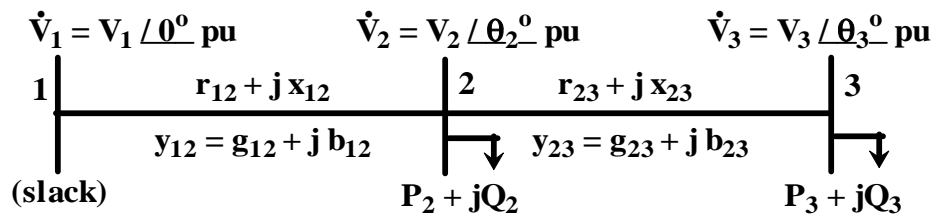


Figura 3.2 - Sistema de três barras.

Os valores adotados para o sistema de três barras da Figura 3.2 foram:

$$\dot{V}_1 = 1,19 \angle 0^\circ \text{ p.u.}, z_{12} = 0,10 + j0,33 \text{ p.u.}, z_{23} = 0,20 + j0,67 \text{ p.u.}, P_2 + jQ_2 = 0 + j0 \text{ p.u.},$$

tolerância de 10^{-5}

A Figura 3.3 (ALVES, 2000), obtida para o sistema da Figura 3.2, ilustra os passos da previsão pelo vetor tangente por meio da reta contínua e pelo vetor secante por meio da reta tracejada, respectivamente obtidas utilizando λ como parâmetro da continuação.

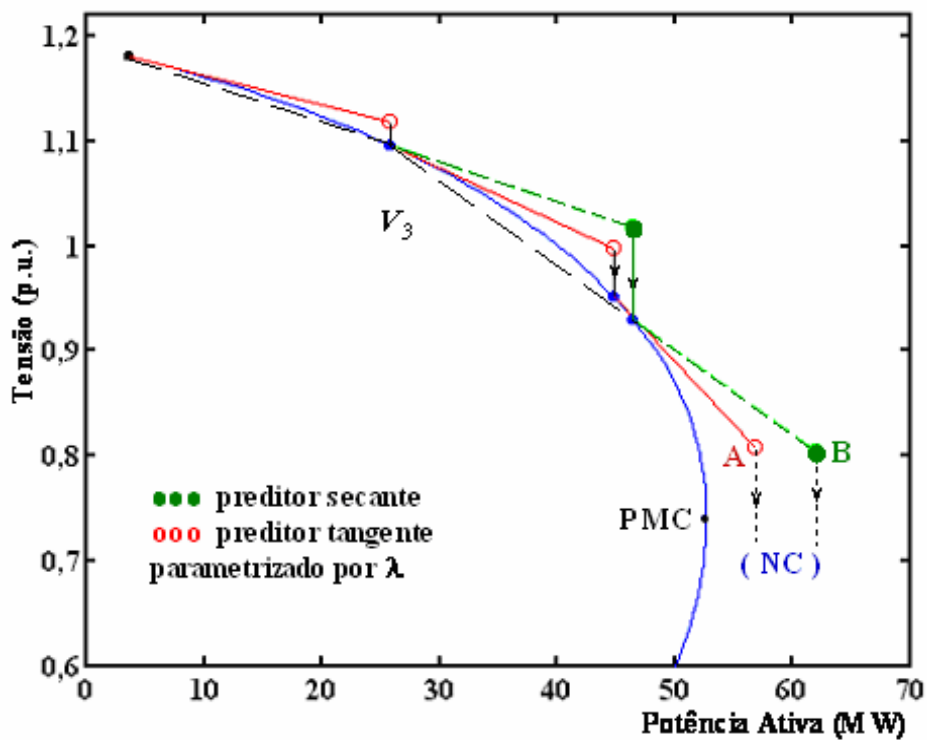


Figura 3.3 - Comparação entre os métodos da continuação com predictor tangente e com predictor secante.

Observa-se na Figura 3.3, que no ponto “A”, o passo corretor não encontrará solução se λ for o parâmetro utilizado. Além disso, o uso deste parâmetro não eliminará a singularidade da matriz Jacobiana modificada (Jm) no ponto de máximo carregamento, tanto no passo preditor quanto no corretor.

Assim, para obter-se o ponto de máximo carregamento com maior precisão, o passo terá que ser reduzido à medida que os pontos se aproximam do ponto de máximo carregamento.

3.3.1.3 - Preditor polinomial modificado de ordem zero

Uma outra técnica de previsão, que será adotada para o passo preditor na metodologia proposta nesse trabalho, é a denominada de previsão trivial ou polinomial modificada de ordem zero (CHIANG et al. 1995).

Esta técnica usa a solução atual e um incremento fixo no parâmetro (λ , θ_k ou V_k), como uma estimativa para a próxima solução. Observa-se que as soluções sucessivas de (3.2) pelo método de Newton, com a prefixação de vários valores para o parâmetro em uso (λ , θ_k , ou V_k), são casos particulares dessa técnica de previsão.

Uma vez especificado um incremento fixo no parâmetro (λ , θ_k ou V_k) como uma estimativa para a próxima solução, torna-se necessário realizar a correção, a partir da solução atual, para obter a solução correta final.

Em geral, o incremento adotado pelo passo preditor exige poucas iterações para que a próxima solução seja obtida dentro da precisão desejada.

3.3.2 - Controle do passo preditor

A adoção do controle de passo é de fundamental importância para a eficiência do método da continuação. Uma boa opção é, na medida do possível, definir o menor passo entre a solução conhecida $(x, \lambda)^a$ e a solução estimada $(x^e, \lambda^e)^{a+1}$. Esta opção apesar de garantir a convergência do método nos trechos da trajetória de solução com curvatura mais acentuada tem como agravante o elevado dispêndio de tempo nos trechos planos.

O controle de passo ideal deve se adaptar à topologia da trajetória de solução tornando-se um algoritmo com considerável grau de sofisticação.

Para sistemas pouco carregados aplicam-se passos maiores, já para sistemas altamente carregados aplicam-se passos menores. O ideal seria se o tamanho do passo se adaptasse às condições reais de convergência. Um método simples, baseado no número de iterações do passo corretor é utilizado para controlar o tamanho do passo preditor, se o número de iterações do passo corretor for pequeno, indica que a carga ainda é leve ou normal e o passo pode ser maior. Aumentando o número de iterações, o sistema estará numa região de alto carregamento, e o tamanho do passo deve ser reduzido.

Uma opção é o uso da tensão (V_k) como parâmetro durante todo o traçado da curva PV, pois isso acarretará em um controle automático do passo. Isto porque, em geral, um passo fixo na tensão corresponde a passos largos no fator de carregamento durante carga leve e normal, e em passos reduzidos para altos carregamentos, conforme mostrado na Figura 3.4.

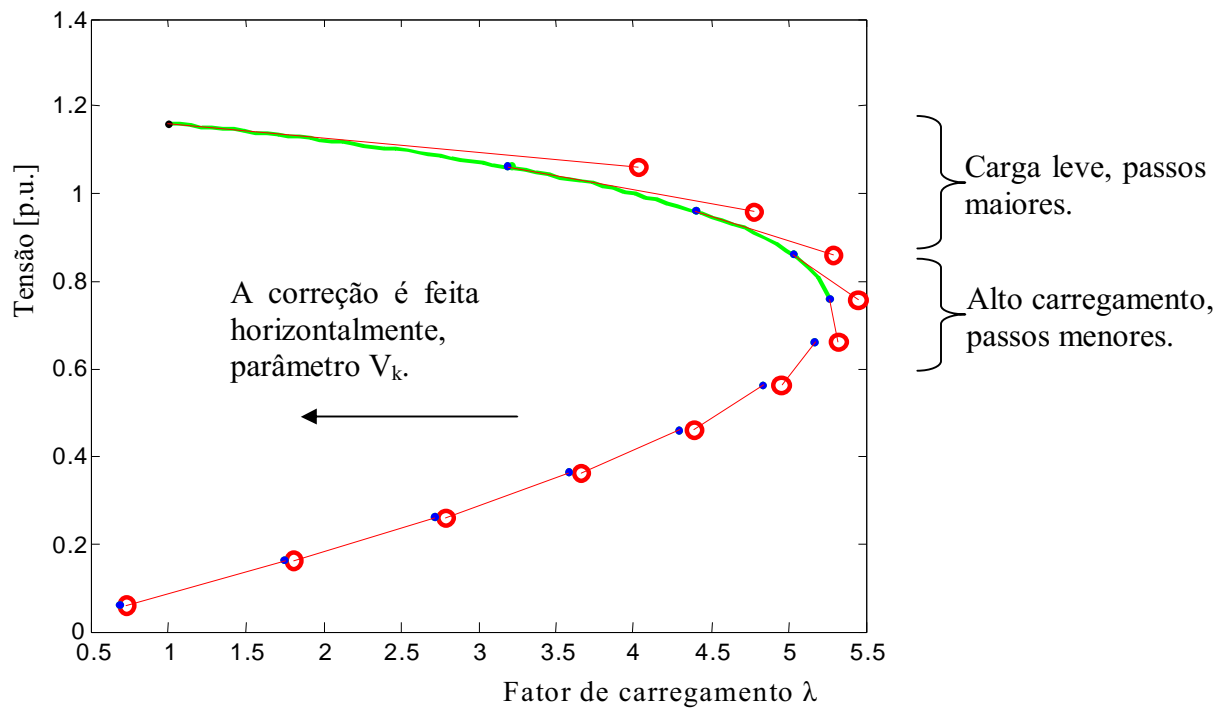


Figura 3.4 - Controle automático do passo σ .

Outro método de controle do tamanho do passo é baseado na norma do vetor tangente (ZAMBRONI et al. 1997). O tamanho do passo é definido como:

$$\sigma = \sigma^0 / \|t\|_2 \tag{3.17}$$

Onde: σ^0 é um escalar predefinido; $\|t\|_2$ é a norma Euclidiana do vetor tangente t .

À medida que o sistema torna-se carregado, a magnitude do vetor tangente aumenta e conseqüentemente σ diminui.

3.3.3 – Técnicas de parametrização e correção

A parametrização, na análise estática da tensão, é a forma matemática usada para identificar cada solução na curva correspondente à trajetória de soluções (curva PV) de forma que a próxima solução, ou a solução prevista possa ser quantificada.

A estratégia de parametrização é quem define a robustez do método da continuação em relação à eliminação dos problemas numéricos relacionados aos métodos de soluções das equações e a obtenção das múltiplas soluções.

O processo da parametrização é normalmente efetuado através da aplicação de parâmetros físicos tais como: magnitude de tensão; fator de carregamento; potência ativa; potência reativa; etc. e/ou parâmetros artificiais cabendo destacar equações geométricas, comprimento de arco.

As técnicas de parametrização física podem resultar em dificuldades de convergência do método, inerentes aos pontos de transição.

Consegue-se evitar tais dificuldades efetuando-se uma avaliação local em cada solução e, caso o processo neste ponto convirja, efetua-se a troca desse parâmetro. Essa técnica de parametrização é chamada de parametrização local (AJJARAPU; CHRISTY, 1992).

Já as técnicas de parametrização artificial favorecem as convergências uma vez que não encontram problemas nos pontos de transição, sendo por este motivo, consideradas mais robustas e apropriadas em relação às técnicas baseadas em parâmetros físicos (WGVS, 1993).

Com o passo preditor realizado, isto é com o ponto estimado $(x^e, \lambda^e)^{a+1}$ encontrado, existe, nesta solução, um erro uma vez que o ponto (estimado) não se encontra na solução real da função definida, portanto torna-se necessário realizar a correção desta solução aproximada para se obter a solução correta, evitando-se desta forma um acúmulo de erros.

Uma vez que o ponto obtido encontra-se muito próximo da solução correta, reduzido número de iterações, geralmente e, torno de duas ou três, serão necessárias para se alcançar a curva trajetória de soluções (curva PV) dentro da precisão desejada.

Qualquer método numérico pode ser utilizado na aplicação do passo corretor. Para o sistema elétrico de potência o mais frequentemente utilizado é o método de Newton-Raphson (ALVES et al. 2004-I).

Uma equação adicional é acrescentada ao sistema de equações (3.11), definindo um hiperplano perpendicular ao vetor de predição. Assim, o sistema de equações da etapa de correção passa a ser:

$$\begin{aligned} \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda) &= 0 \\ p - p^e &= 0 \end{aligned} \quad (3.18)$$

Onde: p corresponde à variável escolhida como o parâmetro de continuação; p^e corresponde a valor estimado do parâmetro de continuação obtido no procedimento de predição.

Linearizando-se, em torno do ponto de operação, (3.18) vem:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_\theta & \mathbf{G}_V & -\mathbf{G}_\lambda \\ & \mathbf{e}_k & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\boldsymbol{\theta} \\ \Delta\mathbf{V} \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \mathbf{J}_m \begin{bmatrix} \Delta\boldsymbol{\theta} \\ \Delta\mathbf{V} \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{P} \\ \Delta\mathbf{Q} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

sendo que o vetor \mathbf{e}_k conterá a unidade apenas na coluna correspondente ao novo parâmetro p .

3.3.3.1 - Parametrização local

Uma outra forma de contornar o problema da singularidade é usar em ambos os passos, preditor e corretor, uma técnica muito simples conhecida por parametrização local (AJJARAPU; CHRISTY, 1992), (AJJARAPU; LAU; BATTULA 1994) e (SEYDEL, 1994), que consiste na troca de parâmetro próximo ao ponto de máximo carregamento.

Na parametrização local avaliam-se os incrementos em cada uma das variáveis e seleciona-se a que apresentar o maior desvio relativo (AJJARAPU; CHRISTY, 1992) (AJJARAPU; LAU; BATTULA 1994).

O ponto crítico para o processo de parametrização passa a ser a escolha adequada do índice k .

$$\left| \frac{\Delta x_k}{x_k} \right| = \max \left\{ \left| \frac{\Delta x_1}{x_1} \right|, \left| \frac{\Delta x_2}{x_2} \right|, \dots, \left| \frac{\Delta x_n}{x_n} \right|, \left| \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right| \right\} \quad (3.20)$$

No método do vetor tangente, após o processo de escolha da variável que será aquela que apresentou a maior variação, λ passa a ser, a partir daí, tratado como variável dependente, enquanto que a variável escolhida passa a ser o novo parâmetro p , do conjunto de $n+1$ variáveis.

O novo parâmetro p será dado por:

$$p \leftarrow \max \{ |t_1|, |t_2|, \dots, |t_{n+1}| \} \quad (3.21)$$

O uso deste método para a escolha automática de p não tem apresentado dificuldades mesmo para sistemas altamente compensados (CAÑIZARES et al. 1993).

A experiência com o método do vetor tangente tem demonstrado que ao aproximar-se do ponto de máximo carregamento, p muda de λ para V_k , aquela tensão que apresenta a maior variação, retornando novamente para λ após alguns pontos.

Já no método baseado no preditor secante, a escolha do parâmetro p não mais se processa com a variável que apresentar a maior variação, mas sim com aquela que apresentar a máxima variação relativa (SEYDEL, 1994):

$$p \leftarrow \max \left\{ \left(\frac{|\boldsymbol{\theta}^{j+1} - \boldsymbol{\theta}^j|}{|\boldsymbol{\theta}^{j+1}|} \right), \left(\frac{|\mathbf{V}^{j+1} - \mathbf{V}^j|}{|\mathbf{V}^{j+1}|} \right), \left(\frac{|\lambda^{j+1} - \lambda^j|}{|\lambda^{j+1}|} \right) \right\} \quad (3.22)$$

Onde j refere-se ao ponto da curva.

O preditor secante apresenta um alto grau de confiabilidade, porém o mesmo não garante que o parâmetro p escolhido agilize o processo (SEYDEL, 1994).

Almeja-se que a escolha do parâmetro p , com base em qualquer uma das equações (3.21) ou (3.22), resulte em um bom desempenho do algoritmo.

3.3.3.2 – Técnica do comprimento de arco

Em CHIANG et al. (1995) os autores propuseram uma técnica para eliminar a singularidade da matriz Jacobiana baseada no parâmetro do comprimento do arco (s). Os dois primeiros pontos são obtidos pelo vetor tangente, e ao invés de acrescentar a equação ($e_k * t = \pm 1$), acrescenta-se à Equação (3.13) do passo preditor a Equação (3.23).

$$\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{dx_i}{ds} \right)^2 \right] + \left(\frac{d\lambda}{ds} \right)^2 = 1 \quad (3.23)$$

Para a correção é adicionada à Equação (3.11) a seguinte equação:

$$R(\mathbf{x}, \lambda, s) = \sum_{i=1}^n \{(x_i - x_i(s))^2\} + (\lambda - \lambda(s))^2 - (\Delta s)^2 = 0 \quad (3.24)$$

O comprimento de arco Δs vale:

$$\Delta s = \left\{ \sum_{i=1}^n [(x_i - x_i(s))^2] + (\lambda - \lambda(s))^2 \right\}^{0.5} \quad (3.25)$$

A expansão das equações (3.11) e (3.24) em série de Taylor, considerando somente as condições de primeira ordem, resulta na seguinte equação linearizada:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_x & -G_\lambda \\ \frac{\partial R}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial R}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{G} \\ \Delta \mathbf{R} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Onde \mathbf{G}_x representa a matriz Jacobiana.

A Equação (3.23) assegura que o parâmetro s seja o comprimento do arco sobre a curva de solução. As equações (3.13) e (3.23) juntas, formam um conjunto $n + 1$ equações a $n + 1$ incógnitas.

A estimativa para a próxima solução é obtida da Equação (3.15), onde σ representará o passo do comprimento de arco s .

A Equação (3.23) é não-linear e o sistema formado por esta equação e a Equação (3.13) não pode ser linearizada, sendo que a sua solução pode consumir muito tempo computacional.

A opção sugerida em (CHIANG et al. 1995) é a obtenção de dois pontos da curva através do preditor tangente sendo utilizado depois o preditor secante. De acordo com os autores esta técnica de parametrização é mais robusta, possibilitando que sejam dados maiores passos do que a técnica utilizando parametrização local.

3.3.3.3 – Técnica da perpendicularidade

Uma outra técnica utilizada para contornar a singularidade sem a necessidade de parametrização foi utilizada primeiramente por (IBA et al. 1991) e posteriormente, associada a um controle de passo, aplicada com sucesso em vários sistemas em (CAÑIZARES et al. 1992).

A técnica consiste na adição, ao equacionamento do sistema, de uma nova equação $(\left\{ \left[\Delta x^{aT} \left((x)^{a+1} - (x)^a - \sigma \Delta x^a \right) \right] + \left[\Delta \lambda^{aT} \left((\lambda)^{a+1} - (\lambda)^a - \sigma \Delta \lambda^a \right) \right] \right\} = 0)$. Tal procedimento deverá definir um hiperplano perpendicular ao vetor de predição, que se inicia na solução conhecida $(x, \lambda)^a$ e passa pela solução estimada $(x^e, \lambda^e)^{a+1}$ e, um outro que se encontra sobre a curva da trajetória de soluções, solução $(x, \lambda)^{a+1}$ (SEYDEL, 1994).

Destarte a equação de parametrização a ser acrescida ao sistema (3.11) será dada pelo produto escalar:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta^a \\ \Delta\mathbf{V}^a \\ \Delta\lambda^a \end{bmatrix}^T \bullet \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}^a - \Delta\boldsymbol{\theta}^a \\ \mathbf{V} - \mathbf{V}^a - \Delta\mathbf{V}^a \\ \lambda - \lambda^a - \Delta\lambda^a \end{bmatrix} = 0 \quad (3.27)$$

Onde $(\Delta\boldsymbol{\theta}^a, \Delta\mathbf{V}^a, \Delta\lambda^a)^T = (\boldsymbol{\theta}^e - \boldsymbol{\theta}^a, \mathbf{V}^e - \mathbf{V}^a, \lambda^e - \lambda^a)$.

Partindo da solução fornecida pelo passo preditor, o sistema resultante da expansão em série de Taylor do sistema (3.11), acrescido da equação anterior, converge para o ponto $(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda)$ da curva PV.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_\theta & \mathbf{G}_v & -G_\lambda \\ \frac{\partial H}{\partial \theta} & \frac{\partial H}{\partial v} & \frac{\partial H}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\boldsymbol{\theta} \\ \Delta\mathbf{V} \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{P} \\ \Delta\mathbf{Q} \\ \Delta H \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Capítulo 4

METODOLOGIA PROPOSTA

4.1 - Introdução

A maioria das análises nas áreas de planejamento e operação de sistemas elétricos envolve cálculos de fluxo de carga, fluxo de carga continuado e fluxo de carga ótimo.

Como mencionado no capítulo 1, as simulações de fluxo de carga são utilizadas para determinar, nas condições de regime permanente, as magnitudes de tensão e os ângulos de cada barra em um sistema elétrico de potência. Uma vez obtidas, essas grandezas são utilizadas não só para a determinação da margem de carregamento e do cálculo dos fluxos de potência ativa e reativa em todas as linhas de transmissão e equipamentos conectados as barras, mas também para quantificar as perdas nos sistemas de energia elétrica (MONTICELLI, 1983).

Já um fluxo de carga ótimo não somente resolve as equações do fluxo de carga, como também determina um conjunto de valores ótimos para as variáveis de estado da rede levando em conta a demanda e os parâmetros do sistema. Os valores ótimos são calculados objetivando minimizar uma função objetivo tal como o custo de geração ou as perdas de transmissão, sujeitos as restrições de igualdade e desigualdade (DOMMEL; TINNEY, 1968).

Sabe-se que o ponto de máximo carregamento de um sistema aumenta em função da disponibilidade de reservas de reativo do mesmo (ALVES et al. 2002-II). Assim, ao minimizarem-se as perdas no sistema, implicitamente estar-se-á aumentando a margem de reativos do sistema e, conseqüentemente, aumentando a margem de estabilidade estática, ou seja, o ponto de máximo carregamento.

Por outro lado o fluxo de carga não foi desenvolvido para minimizar automaticamente qualquer função objetivo. Dessa forma, um processo de tentativa e erro deve ser executado para otimizar algum critério desejado, escolhendo uma dentre as várias soluções factíveis de um conjunto muito amplo.

A metodologia apresentada em (CHEN; HSU, 2000) resolve seqüencialmente o fluxo de potência ótimo seguindo uma dada curva de previsão de carga, atendendo restrições operativas do sistema e garantindo que cada gerador atenda metas estabelecidas pelo planejamento de médio/longo prazo, ainda que representando algumas restrições de segurança, tal como manutenção de um perfil de tensão seguro para todo o sistema, não era levado em conta a avaliação da margem de estabilidade de tensão para cada horário. Tal restrição é contemplada em (MENEZES, 2002), onde a metodologia apresentada leva em consideração o modelo do fluxo de potência ótimo paramétrico, o método do fluxo de carga continuado para o cálculo das margens de estabilidade, e o método de análise modal estática expandida para a obtenção dos fatores de participação dos geradores.

Affonso (AFFONSO, 2004) baseado na forte relação entre margem de estabilidade de tensão e as reservas de potência reativa da rede, apresentou metodologia propondo o despacho da geração de potência ativa e reativa para condições normais de operação, obtendo indiretamente um aumento na margem de estabilidade de tensão do sistema, através da maximização das reservas de potência reativa e da minimização das perdas de potência ativa por meio do fluxo de carga ótimo.

No presente trabalho propõe-se uma nova metodologia que associada ao método da continuação possibilite obter uma ampliação na margem de estabilidade do sistema visando atender os níveis mínimos de ampliação de margem de estabilidade de tensão de acordo com as recomendações da Força-Tarefa “Colapso de Tensão” do GTAD/SCEL/GCOI (FTCT, 1999) e do WSCC-Reactive Power Reserve Work Group (WECC, 1998). Para se alcançar essa meta acrescenta-se às equações do fluxo de carga, a equação parametrizada da perda ativa total na transmissão e as equações das potências reativa geradas nas barras *PV*. As tensões nas barras *PV* são consideradas como variáveis de controle e um novo parâmetro é escolhido com o intuito de se reduzir a perda ativa nas linhas de transmissão.

4.2 - O problema do fluxo de carga ótimo

Considere inicialmente um sistema de duas barras sendo uma barra de folga (*slack*) e uma barra *PV*, interligadas por uma linha de transmissão cuja impedância é z_{12} , como ilustrado na Figura 4.1.

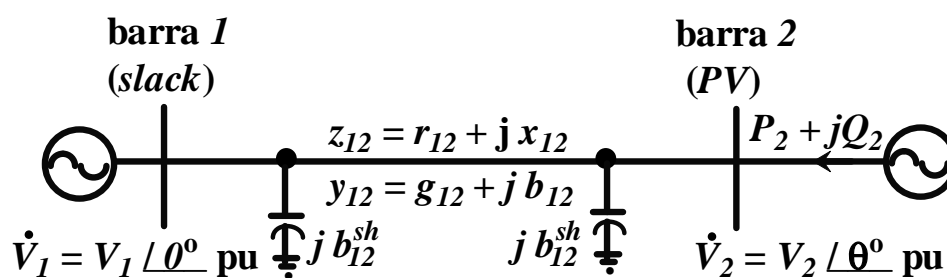


Figura 4.1 - Sistema de duas barras.

Define-se: P_{g2} como sendo a potência ativa gerada na barra 2; P_{c2} como sendo a potência ativa consumida na barra 2; Q_{g2} como sendo a potência reativa gerada na barra 2; Q_{c2} como sendo a

potência reativa consumida na barra 2; $P_2 = P_{g2} - P_{c2}$ como sendo a injeção de potência ativa na barra 2; e $Q_2 = Q_{g2} - Q_{c2}$ como sendo injeção de potência reativa na barra 2.

O fluxo de carga ótimo é um problema de otimização não-linear, em regime permanente, que calcula os valores ótimos de um conjunto de variáveis a partir do estado da rede, dos dados da carga e dos parâmetros do sistema.

Os valores ótimos são calculados objetivando minimizar uma determinada função tal como custo de geração ou perdas de potência ativa na transmissão sob restrições de igualdade e de desigualdade.

O problema do fluxo de carga ótimo pode ser apresentado como:

$$\begin{aligned} & \text{minimizar } Pa(\mathbf{x}), \\ & \text{sujeito a } \mathbf{G}(\mathbf{x}) = 0 \\ & \mathbf{H}(\mathbf{x}) \leq 0 \\ & \mathbf{x}_{\min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_{\max} \end{aligned} \tag{4.1}$$

Onde: $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix}$ é o vetor composto pelas variáveis de estado e controle do sistema; \mathbf{x}_{\max} e \mathbf{x}_{\min} são os limites das variáveis de estado e controle do sistema; $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ são as condições de igualdade do fluxo de carga; $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ são as restrições de desigualdade do fluxo de carga.

A função objetivo $Pa(\mathbf{x})$ representa o desempenho do sistema, sendo neste trabalho esta função representada pela perda total de potência ativa na transmissão (Pa);

As restrições de desigualdade, $\mathbf{H}(\mathbf{x})$, representam as equações funcionais do fluxo de carga como os limites dos fluxos de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão e transformadores, e limites de injeção de potência reativa nas barras de controle de reativos, barras *PV*.

Considere o caso do sistema da Figura 4.1, onde a barra 2 é uma barra de tensão controlada do tipo *PV*, no caso, controlada por um compensador síncrono. Sua tensão, bem

como a da barra de folga, variará de forma a reduzir Pa . A barra de folga deverá ser capaz de suprir tanto a solicitação de carga como a perda de potência ativa na linha de transmissão.

Sendo a barra 2 do tipo PV , sua correspondente equação $Q_2(\mathbf{x})$ deixa de pertencer ao conjunto de restrições de igualdade enquanto não for ativa.

A solução analítica do fluxo de carga ótimo desse problema já foi apresentada em (ALVES et al. 2002-II), de onde se tem que as coordenadas do ponto ótimo $V_1^* = e_1^*$ e $V_2^* = e_2^* + jf_2^*$, Pa^* e Q_{g2}^* , devem satisfazer as seguintes equações:

$$e_2^* = e_1^* + \frac{f_2^*}{tg\phi} \quad \text{e} \quad f_2^* = -tg\phi \left(\frac{e_1^*}{2} - \sqrt{\frac{(e_1^*)^2}{4} + r_{12}P_2} \right) \quad (4.2)$$

$$Pa^* = r_{12}(f_2^*)^2/x_{12}^2, \text{ e } Q_{g2}^* = (f_2^*)^2/x_{12} = tg\phi(Pa^*) \quad (4.3)$$

Para o caso base, para o qual o fator de carregamento (λ) é igual a 1, e considerando $z_{12} = r_{12} + jx_{12} = (0,2 + j1, 0)$ p.u. e $P_2 = -P_{c2} = -0,4$ p.u., a Tabela 4.1 apresenta as soluções, obtidas com (4.2) e (4.3) e por um programa de fluxo de carga ótimo (DA COSTA; LANGONA; ALVES, 1998), para diversos valores máximos de e_1 dentro do intervalo $0,95 \text{ p.u.} \leq e_1 \leq 1,10 \text{ p.u.}$.

Tabela 4.1 - Soluções do fluxo de carga ótimo para o sistema da Figura 4.1

e_1^* (p.u.)	$ V_2^* $ (p.u.)	θ_2^* (graus)	Pa^* (MW)	Q_g^* (MVAr)
0,95	0,976	-28,60	4,361	21,81
1,00	1,012	-25,67	3,845	19,22
1,05	1,052	-23,15	3,420	17,10
1,10	1,094	-20,97	3,066	15,33

A Figura 4.2 mostra o caso base de um sistema de três barras constituído de uma barra de folga, uma PV e uma PQ . A perda ativa total na transmissão é igual a 16,66 MW.

Este sistema foi apresentado e analisado detalhadamente em (DOMMEL; TINNEY, 1968).

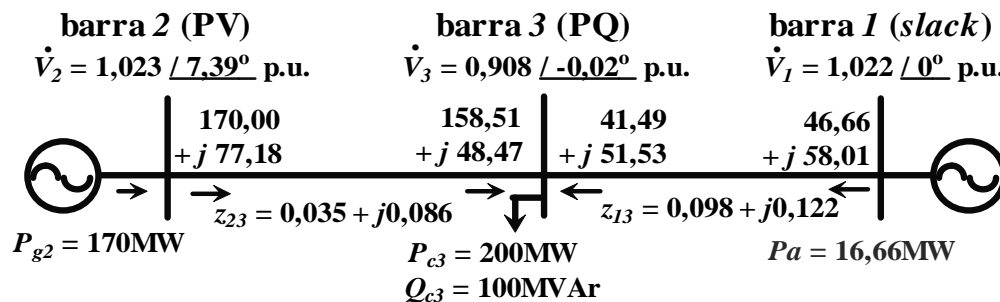


Figura 4.2 - Sistema de três barras – caso base.

Os intervalos adotados para a variação dos valores da tensão nas barras foram:

- de folga (V_1): $V_1^{min} \leq V_1 \leq V_1^{max}$, onde $V_1^{min} = 0,9$ p.u. e $V_1^{max} = 1,16344$ p.u.;
- PV (V_2): $V_2^{min} \leq V_2 \leq V_2^{max}$, onde $V_2^{min} = 0,9$ p.u. e $V_2^{max} = 1,2$ p.u.

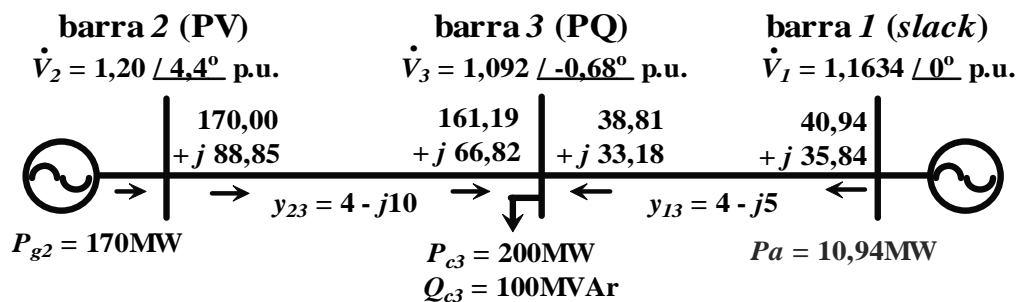


Figura 4.3 - Sistema de três barras - caso otimizado.

Na Figura 4.3 apresenta-se a solução obtida otimizada, de onde se verifica que a perda ativa total na transmissão é igual 10,94 MW. Observe que a redução das perdas em 5,72 MW foi obtida através da transferência de parte do suprimento de potência reativa efetuado pelo gerador 1, barra de folga, para o gerador 2, barra tipo PV. Isto ocorre porque z_{13} é maior que

A Tabela 4.2 mostra o ponto ótimo obtido por meio do fluxo de carga ótimo apresentado em (DA COSTA; LANGONA; ALVES, 1998) e que reproduziu o mesmo resultado de (DOMMEL; TINNEY, 1968), bem como o resultado obtido pelo fluxo de carga continuado proposto (FCCP) o qual será apresentado a seguir.

Observa-se que estes resultados foram obtidos para o caso em que o fator de carregamento (λ) é igual a 1, isto é, λ do caso base.

Tabela 4.2 - Soluções para o sistema da Figura 4.2

Barra	Fluxo de carga ótimo			Fluxo de carga proposto		
	V (p.u.)	θ (graus)	Q_g (MVAr)	V (p.u.)	θ (graus)	Q_g (MVAr)
1	1,1634	0,00	35,84	1,1634	0,00	35,71
2	1,2000	4,40	88,85	1,2002	4,39	88,98
3	1,0916	-0,68	---	1,0918	-0,68	---

4.3 - Metodologia proposta

Uma das questões importantes em tempo-real relacionada ao controle da potência reativa é a escolha das variáveis de controle. Nesta situação os ajustes de controle (SHARIF, et al. 2000):

- devem ser possíveis de serem executados num intervalo de tempo razoável, uma vez que o ciclo de tempo do controle de reativo pode ser muito pequeno, 15/30 minutos, e o operador poderá não ter tempo suficiente para ajustar todos os controles;
- não deve causar uma sobrecarga excessiva de trabalho ao operador;
- não devem, no caso de controles discretos, ser chaveados muito freqüentemente.

Por estas razões, os controles discretos e contínuos são tratados separadamente. Além do mais, ao contrário dos controles discretos que na maioria dos casos são ajustados no valor mais próximo, as variáveis contínuas podem, em geral, ser ajustadas nos valores calculados fornecidos pelo programa. Estas questões tornam a implementação de tais controles uma tarefa difícil e pode levar a necessidade de diferentes estratégias de ajustes, por exemplo, primeiro se ajusta os bancos em derivação (*shunt*) chaveados, então os geradores e finalmente os transformadores (SHARIF, et al. 2000). Assim, a escolha no método proposto dos controles de potência reativa dos geradores e condensadores síncronos, para obtenção da redução das perdas, é baseado no fato de que nos geradores, o fornecimento de potência reativa é controlado numa faixa contínua e o número de operações é ilimitado, enquanto que os bancos de capacitores em derivação apresentam valores fixos e discretos de capacitância, e o número de operação é normalmente restrito de duas a quatro operações diárias, porque essas ações podem causar o desgaste e a redução da vida do equipamento (CIGRE, 1989), (SHARIF, et al. 2000).

Uma característica desejável para um dado sistema é que a tensão crítica, no limite de estabilidade, seja mantida tão baixa quanta esta possa ser em relação à tensão normal de operação sem comprometer, conseqüentemente, o perfil geral de tensão (CIGRE, 1989). Nesse sentido, os bancos de capacitores em derivação têm uma característica desfavorável, que é a de prover um baixo suporte de potência reativa quando este é mais necessário, isto é, próximo ao limite de carregamento. Isto ocorre porque o seu fornecimento de potência reativa é proporcional ao quadrado da tensão e assim, o suporte de potência reativa dos bancos em derivação, incluindo os de linha - *line charging*, diminui com a diminuição da tensão. Com a aplicação de bancos de capacitores em derivação, a margem de carregamento de um sistema aumenta conforme a compensação de reativo aumenta, mas a tensão crítica fica mais próxima da faixa normal de operação do sistema ($0,9 \leq V \leq 1,1$ p.u.), isto é, o perfil de tensão tende a

tornar-se mais e mais plano. Dessa forma, o sistema poderá entrar em colapso para magnitudes de tensão dentro da faixa normal de operação do sistema.

Ao contrário dos bancos de capacitores em derivação, os geradores produzem seu pleno fornecimento de potência reativa próximo ao limite de estabilidade de tensão, e efetivamente expande a capacidade de transferência de potência e reduz a magnitude da tensão crítica (ALVES et al. 2002-II); (SEKINE, et al. 1992). Então, num sistema de potência, de todos os controles, os geradores (barras *PV*) são de longe os mais eficientes no controle das tensões das barras quando comparados aos *tap's* e bancos em derivação (TARE; BIJWE, 1997). Portanto, para prevenir ou postergar o colapso de tensão deve-se manter uma reserva de reativos utilizando tanto quanto forem possíveis os bancos de capacitores em derivação e/ou reduzindo as perdas na transmissão a fim de permitir que os geradores existentes mantenham-se operando com o máximo possível de margem de reativo (CIGRE, 1989).

A metodologia propõe o uso do método da continuação para a redução da perda total de potência ativa na transmissão. Assim, ao sistema de equações (2.1) acrescenta-se, além da equação da perda ativa total na transmissão, a equação da potência reativa injetada em cada uma das barras de controle de tensão (barras *PV*), escolhidas para participar do procedimento de redução de perdas. A geração de potência ativa nas barras de controle de tensão são mantidas constantes nos respectivos valores do caso base, enquanto que a geração de potência ativa da barra de folga variará a fim de acomodar a redução das perdas ativas na transmissão.

A potência reativa gerada na barra k de controle de tensão escolhida, Q_{gk} , e sua respectiva tensão terminal, V_k , são consideradas, respectivamente, como variáveis dependente e de controle. As respectivas mudanças nos valores de Q_{gk} e Pa serão consideradas através das variáveis λ_q e μ . Assim, as mudanças são proporcionais aos seus respectivos valores do caso base case, Q_{gk}^0 e Pa^0 .

O novo conjunto de equação é dado por:

$$\begin{aligned} \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) &= 0 \\ \mathcal{Q}_{PVk}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, V_k, \lambda_q) &= (\lambda_q \mathcal{Q}_{gk}^0 - \mathcal{Q}_{ck}^{esp}) - \mathcal{Q}_k(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, V_k) = 0 \\ W(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, V_k, \mu) &= (\mu + 1)Pa^0 - Pa(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, V_k) = 0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

sendo \mathcal{Q}_{ck}^{esp} é a demanda de potência reativa especificada na barra k .

Considerando V_k , λ_q e μ como variáveis, o número de incógnitas em (4.4) é maior do que o número de equações. Contudo, se μ é considerado como uma variável independente será escolhida como parâmetro da continuação, isto é, seu valor é pré-ajustado, e V_k e λ_q são tratadas como variáveis dependente, o número de incógnitas é igual ao número de equações, isto é, a condição necessária para que o novo sistema tenha solução é atendida, desde que a nova matriz Jacobiana tenha posto máximo, isto é, seja não-singular.

Deve-se lembrar que a prefixação do valor de μ corresponde à técnica de previsão trivial ou polinomial modificada de ordem zero (SEYDEL, 1994); (CHIANG et al. 1995). Este preditor será usado no método proposto e é baseado na solução atual e em um decremento fixo, objetivando a redução de Pa , no parâmetro μ como uma estimativa para a próxima solução.

Após se obter a solução do caso base $(\boldsymbol{\theta}^0, \mathbf{V}^0)$ por meio de um fluxo de carga convencional e se ter definido um passo em μ , o fluxo de carga continuado proposto é usado para calcular as demais soluções até que seja atingido um ponto de operação, aqui denominado como ponto mínima perda (PMP). Assim, através do uso da Equação (4.4), é possível se especificar o valor desejado de variação em Pa , e a sua solução provê o ponto de operação para o qual as perdas ocorrem.

A variável μ sendo igual a zero, corresponde a solução do caso base, onde V_k igual a V_k^{esp} , isto é, a tensão especificada no caso base e $\lambda_q = 1$.

Então, a linearização da Equação (4.4) em torno do ponto de operação, e considerando o valor prefixado do parâmetro μ , é dada pelos termos de primeira ordem da série de Taylor, e resulta em:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} & \partial \mathbf{P} / \partial V_k & 0 \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} & \partial \mathbf{Q} / \partial V_k & 0 \\ \partial Q_k / \partial \theta & \partial Q_k / \partial \mathbf{V} & \partial Q_k / \partial V_k & -Q_{gk}^0 \\ \partial Pa / \partial \theta & \partial Pa / \partial \mathbf{V} & \partial Pa / \partial V_k & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \mathbf{V} \\ \Delta V_k \\ \Delta \lambda_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \\ \Delta Q_{PVk} \\ \Delta W \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

sendo \mathbf{H} , \mathbf{N} , \mathbf{M} e \mathbf{L} são as matrizes que correspondem às derivadas das potências ativa e reativa (\mathbf{P} e \mathbf{Q}) em relação ao ângulo de fase das tensões das barras PQ e PV , e em relação à magnitude das tensões nas barras PQ ; Δ representa os fatores de correção, ou seja, os *mismatches* das respectivas funções na Equação (4.4).

Deve-se observar que os fatores de correção serão iguais a zero, ou praticamente nulos, isto é, inferior a tolerância adotada, para o caso base convergido. Assim, somente ΔW será diferente de zero devido à variação de μ .

Observe que o método modificado aqui proposto, fluxo de carga continuado proposto difere em alguns aspectos do fluxo de carga continuado usado para obter o ponto de máximo carregamento. No fluxo de carga continuado o objetivo é obter o ponto de máximo carregamento da curva PV . Por outro lado, no fluxo de carga continuado proposto, o objetivo é o de melhorar a margem de carregamento por meio da redução das perdas usando um método da continuação.

Ao contrário do fluxo de carga continuado, no qual a carga e a geração de potência reativa são aumentadas em uma direção preestabelecida, no método proposto elas são fixas.

As barras PV são tratadas como simples barras PV e, enquanto suas respectivas potências reativas geradas estão entre seus respectivos limites, suas respectivas equações não estão presentes na matriz Jacobiana. Assim, suas magnitudes de tensões (\mathbf{V}) permanecem

fixas, sendo tratadas como variáveis independentes. No caso de violação, a barra *PV* é alterada para tipo *PQ*, com o valor de sua potência reativa gerada especificada no valor do seu respectivo limite violado, e a sua magnitude de tensão tornando-se uma incógnita. Geralmente neste caso, a magnitude de tensão cai devido ao aumento do carregamento.

Por outro lado, no fluxo de carga continuado proposto a magnitude de tensão nas barras *PV* serão calculadas para o valor especificado de perdas de potência ativa e tratadas como variáveis dependentes. Em geral, a magnitude da tensão nas barras *PV* ou aumentam ou permanecem fixas nos seus valores especificados. Ambos os limites de magnitude de tensão e de potência reativa gerada devem ser verificados.

4.3.1 - Metodologia proposta aplicada aos sistemas de duas e três barras

Neste item apresenta-se a aplicação do método proposto para os dois sistemas analisados no item 4.2: o sistema de 2 barras, para o qual é possível se obter o ponto ótimo a partir das equações algébricas (4.2) e (4.3), desenvolvidas em (ALVES et al. 2002-II); e o sistema de três barras apresentado e analisado em (DOMMEL; TINNEY, 1968). Os resultados são comparados com os resultados obtidos anteriormente e apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2. Adicionalmente, mostra-se, através do traçado das curvas *PV*, que a redução das perdas conduz a um aumento do ponto de máximo carregamento e, portanto, da margem de estabilidade do sistema.

4.3.1.1 - Resultados obtidos com o fluxo de carga continuado proposto para o sistema de duas barras

Considere primeiramente o sistema de duas barras, da Figura 4.1, para o qual se deseja reduzir Pa . Nesse caso, duas equações são adicionadas a Equação (2.1): a equação da potência reativa injetada na barra 2 (Q_{PV2}) e a equação da perda ativa total na transmissão (Pa).

A potência reativa gerada na barra 2 escolhida, Q_{g2} , e a sua respectiva tensão terminal V_2 , são consideradas como variável dependente e de controle, respectivamente.

As respectivas mudanças nos valores de Q_{g2} e Pa serão considerados através das variáveis λ_q e μ . Assim, as mudanças serão proporcionais aos seus respectivos valores do caso base, Q_{g2}^0 e Pa^0 .

Considerando que $\theta_1 = 0$ e $V_1 = V_1^{esp}$, onde *esp* significa valor especificado, o novo conjunto de equações será:

$$\begin{aligned} G(\theta_2, V_2) &= P_2(\theta_2, V_2) = 0 \\ Q_{PV2}(\theta_2, V_2, \lambda_q) &= (\lambda_q Q_{g2}^0 - Q_{c2}^{esp}) - Q_2(\theta_2, V_2) = 0 \\ W(\theta_2, V_2, \mu) &= (\mu + 1)Pa^0 - Pa(\theta_2, V_2) = 0 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Considerando-se μ como uma variável independente, ou seja, prefixando o seu valor, que corresponde à técnica de previsão trivial ou polinomial modificada de ordem zero, e θ_2 , V_2 e λ_q como variáveis dependentes, o número de incógnitas é igual ao de equações. Desta forma, a condição necessária para que o sistema de equações tenha solução é atendida, desde que a matriz Jacobiana tenha posto completo, isto é, seja não-singular.

Após obter a solução do caso base (θ^0 e V^0) por meio de um fluxo de carga convencional, define-se o passo para μ . Em seguida, calculam-se as demais soluções

utilizando-se o fluxo de carga continuado proposto, até que o ponto de mínima perda seja alcançado.

A linearização de (4.6) em torno do ponto de operação, por intermédio da série de Taylor, incluindo somente os termos de primeira ordem, de acordo com o método de Newton fornece:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & 0 \\ \frac{\partial Q_{PV2}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_{PV2}}{\partial V_2} & -Q_{g2}^0 \\ \frac{\partial Pa}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Pa}{\partial V_2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta V_2 \\ \Delta \lambda_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta W \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Onde: Δ representa os fatores de correção das respectivas funções em (4.6).

A Figura 4.4 apresenta as curvas Pa versus V_2 obtidas pela metodologia proposta considerando que a geração de potência ativa na barra 2 foi mantida constante no valor do caso base, enquanto que a da barra de folga variará a fim de reduzir as perdas ativas na transmissão. Para tal objetivo considerou-se que apenas a variação da tensão da barra 2, V_2 .

A curva foi obtida através de decrementos sucessivos de Pa , considerando $V_l = 1,1$ p.u. e uma tolerância para os *mismatches* igual a 10^{-6} p.u. Partindo-se de dois pontos diferentes, A para $V_2^{esp} = 1,0$ p.u. ou A' para $V_2^{esp} = 1,2$ p.u., os próximos pontos foram obtidos usando um passo de $-0,1$ MW para μ , ou seja, uma redução de 10% em Pa . As duas trajetórias consideradas foram plotadas na mesma figura para demonstrar que o método converge para um mesmo ponto de mínima perda (PMP).

Inicialmente para cada ponto foi resolvido um fluxo de carga continuado, sendo que o número de iterações gasta em cada um foi inferior a 4, sendo que o limite máximo de iterações adotado foi de 10. Para o primeiro ponto em que o fluxo de carga continuado proposto divergiu, retornou-se ao passo anterior e aplicou-se uma redução de 1/10 no passo de μ . O mesmo procedimento foi usado para os pontos de divergência subseqüentes, até que o

procedimento foi finalizado e o valor de Pa obtido foi considerado como correspondente ao ponto de mínima perda, no caso, $Pa = 3,066$ MW.

O estado da rede, nesse caso, praticamente coincidiu com o mostrado na Tabela 4.1.

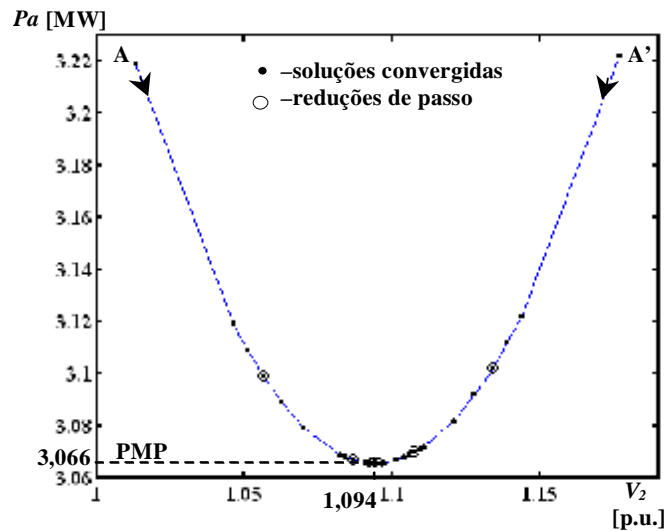


Figura 4.4 - Desempenho do FCCP para o sistema de duas barras.

Como se pode constatar na Figura 4.5, a redução das perdas levou a um aumento do ponto de máximo carregamento, ou seja, da margem de estabilidade. Observa-se também que todos os demais casos apresentados na Tabela 4.1 foram alcançados usando o mesmo procedimento.

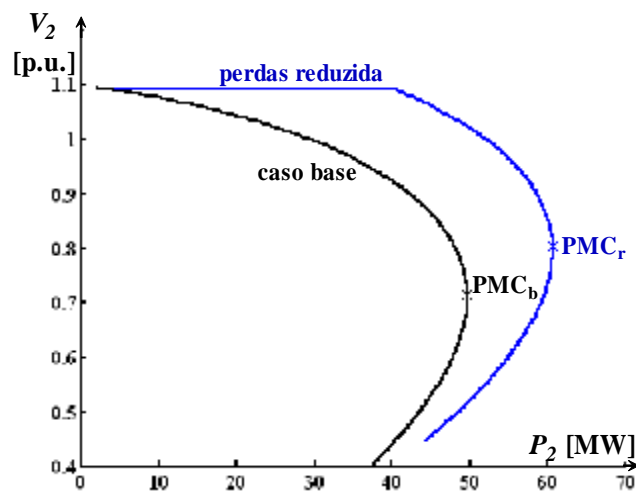


Figura 4.5 - Curvas PV: Efeito da redução das perdas sobre o ponto de máximo carregamento para o sistema de duas barras.

4.3.1.2 - Resultados obtidos com o FCCP para o sistema de três barras

No caso do sistema de três barras da Figura 4.2, os dois geradores, o gerador 1 (barra de folga) e o gerador 2 (barra *PV*), são considerados no procedimento de redução de perdas.

Nesse caso, V_1 , V_2 , θ_2 e λ_q são tratados como variáveis dependentes. Ambas as equações de potência reativa injetada, Q_{PV1} e Q_{PV2} , bem como a equação da perda ativa total na transmissão (Pa) serão consideradas. O parâmetro λ_q é usado para variação de ambas as potências reativas gerada, Q_{g1} e Q_{g2} , e, portanto, seus valores serão proporcionais aos respectivos valores do caso base, Q_{g1}^0 e Q_{g2}^0 .

O procedimento adotado para controlar os limites de Q nas barras de geração é similar ao utilizado no método convencional de fluxo de carga, ou seja, em cada iteração a geração de reativos de cada uma dessas barras é comparada com seus respectivos limites, e no caso de violação, a barra *PV* é alterada para tipo *PQ*. Estas barras podem voltar a ser *PV* nas iterações futuras. Além disso, se, em qualquer uma das barras de geração, um dos limites de tensão for atingido, seu respectivo valor é fixado no valor daquele limite.

A Figura 4.6 mostra o desempenho do fluxo de carga continuado proposto para o sistema de três barras. O procedimento usado para o traçado da curva, no que se refere à divergência, é similar ao usado para o traçado da Figura 4.4, exceto que o valor inicial de μ foi de $-1,0$ MW.

O estado do sistema após a convergência do processo pode ser visto na Figura 4.6 e na Tabela 4.2, de onde se verifica que o mesmo é praticamente igual ao obtido com o fluxo de carga ótimo.

As Figuras 4.6(b) e 4.6(c) confirmam que a redução das perdas em 5,72 MW é obtida através da transferência da potência reativa do gerador 1 para o gerador 2. Também, há uma redução na geração de reativos de 135,21 MVar para 124,69 MVar, ou seja, de 7,8%. Essa

redução acarreta num aumento do ponto de máximo carregamento de 2,19 p.u. para 2,934 p.u., ou seja, num aumento de aproximadamente 62,5% na margem de estabilidade do sistema.

Esses resultados mostram que para esses sistemas, a utilização do método proposto proporciona não só uma redução das perdas e, conseqüentemente, dos custos operacionais, mas também um aumento do ponto de máximo carregamento, isto é, da margem de estabilidade do sistema.

Outro ponto importante diz respeito à possibilidade de se obter pontos de operação próximos dos obtidos por um fluxo de carga ótimo através do método da continuação, o que mostra que o método proposto pode ser uma alternativa viável para as aplicações de estudos da operação.

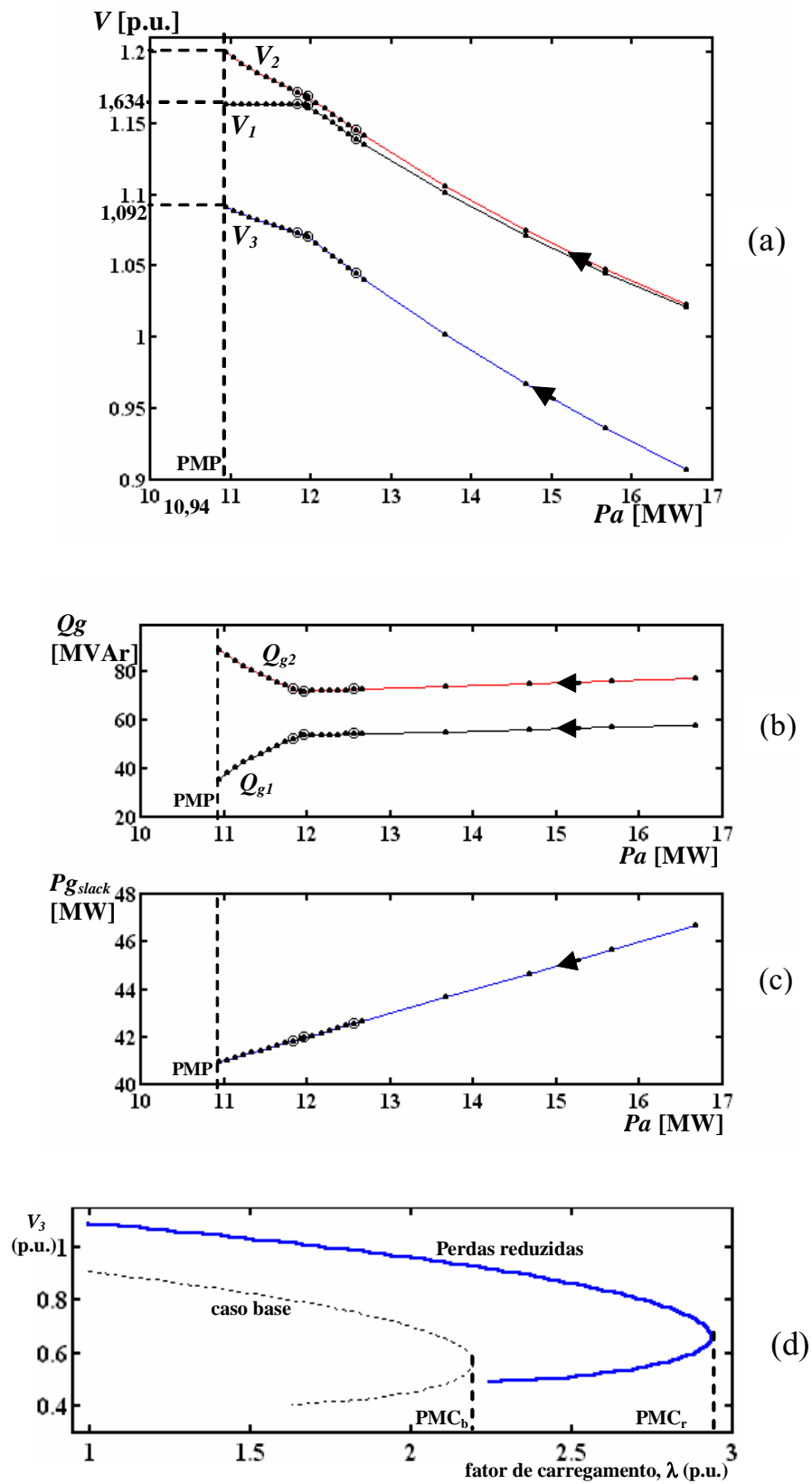


Figura 4.6 - Desempenho do sistema de três barras: (a) $V \times Pa$, (b) $Qg \times Pa$, (c) potência ativa gerada pela barra de folga $\times Pa$, (d) curvas PV.

4.4 – Resultados da redução da perda total de potência ativa

Esta seção tem como propósito mostrar os efeitos do redespacho das variáveis de controle nas reduções da perda total de potência ativa na transmissão do sistema, além de também investigar os efeitos causados por esta redução na margem de estabilidade de tensão e no perfil de tensão.

Em todos os casos analisados a seguir, durante o procedimento de redução de perdas, as injeções de potência ativa dos geradores são fixadas nos seus respectivos valores encontrados na solução do fluxo de carga no caso base, com exceção ao da barra de folga, cuja injeção de potência ativa poderá variar para equiparar eventuais reduções nas perdas do sistema. Para cada iteração os valores das tensões das barras de geração são comparados com seu valor limite, caso este seja ultrapassado, tal tensão terá seu valor fixado no valor limite atingido. Se a barra estiver dentro de seus limites de geração de potência reativa ela permanecerá atuando como simples *PV*, porém não participará da redução das perdas. Além disso, as potências reativas geradas, nas barras de geração, são também comparadas com seus respectivos limites, sendo que no caso de violação desse limite, a barra *PV* é alterada para tipo *PQ*, sendo que estas barras poderão voltar a ser *PV* nas iterações futuras, caso a sua respectiva potência reativa gerada retorne para dentro de sua faixa de limites: $Q_g^{mín} \leq Q_g \leq Q_g^{máx}$.

4.4.1 – Balanço de reativos durante o procedimento de redução da perda total de potência ativa

O objetivo deste item é o de esclarecer como se dá o balanço de reativo do sistema elétrico de potência durante o processo de redução da perda ativa total. Para isso, será utilizado o sistema IEEE 14 barras.

A barra de folga, também conhecida como barra oscilante, é usada com uma dupla função, atuar como referência angular, embora qualquer barra possa ser referência angular, e para fechar o balanço de potência do sistema. Ela é necessária para estabelecer uma referência angular para a resolução das equações do fluxo carga. Essa necessidade se dá porque, conforme apresentado na Equação (3.3) da seção 3.2, os fluxos de potência são expressos como diferenças angulares $(\theta_k - \theta_m)$, isto é, o problema de fluxo de carga é indeterminado nas variáveis θ de cada barra (MONTICELLI, 1983). Na metodologia proposta a geração de potência ativa nas barras de controle de tensão são mantidas constantes nos respectivos valores do caso base, enquanto que o valor da perda total de potência ativa, conforme Equação (4.4), é pré-ajustado através do parâmetro μ . Assim, adotando a barra 1 como sendo a barra de folga, a sua geração de potência ativa (Pg_1) é reprogramada para fechar o balanço de potência ativa do sistema, ou seja, seu valor variará a fim de acomodar, além da diferença entre a potência ativa gerada e a consumida de todo o sistema, a redução das perdas ativas na transmissão, sendo o seu valor calculado por meio da equação:

$$Pg_1 = \sum_{j=1}^{NC} Pc_j - \sum_{i=2}^{NG} Pg_i + \sum_{k,m \in \Omega} g_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (4.8)$$

sendo NB é o número de barras da rede, e NG e NC são os respectivos conjuntos de barras de geração e de demanda (carga), e Ω é o conjunto de todas as barras.

Com relação a geração de potência reativa (Qg_l) da barra de folga, esta é calculada por meio da seguinte equação:

$$Qg_l = \sum_{j=1}^{NC} Qc_j - \lambda_q \sum_{i=2}^{NG} Qg_i + \sum_{k,m \in \Omega} \left[-b_{km}^{sh} (V_k^2 + V_m^2) - b_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}) \right] - \sum_{n=1}^{NB} b_n^{sh} V_n^2 \quad (4.9)$$

Observe na Equação (4.9) que a parcela $-b_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km})$ é a perda reativa no elemento série da linha de transmissão localizada entre as barras k e m , enquanto que $-b_{km}^{sh} (V_k^2 + V_m^2)$ e $b_n^{sh} V_n^2$ correspondem respectivamente, à geração de potência reativa nos *shunts* da linha de transmissão localizada entre as barras k e m , e nos *shunts* de barra, tais como banco de capacitores e/ou reatores, localizados na barra n . Observe que para as linhas de transmissão reais, $b_{km} < 0$ e $b_{km}^{sh} > 0$. As Equação (4.8) e (4.9) mostram que a barra de folga deve gerar a diferença entre a carga ativa (reativa) total do sistema de potência mais as perdas ativa (reativa no elemento série mais a geração de potência reativa nos elementos *shunts*), e a soma de potência ativa (reativa) especificada, isto é calculada, nas barras de geração. Essas diferenças são conhecidas como desbalanço, ou seja, *mismatch* de potência do sistema.

Na convenção de sinais utilizada as injeções líquidas de potência são positivas quando entram na barra (geração) e negativas quando saem da barra (carga); os fluxos de potência são positivos quando saem da barra e negativos quando entram na barra. No caso dos elementos *shunt*, a convenção é a mesma utilizada para as injeções de potência (MONTICELLI, 1983).

A tolerância adotada para os *mismatches* foi de 10^{-6} p.u. O valor inicial adotado para μ é $-0,1$ MW, isto é, Pa é reduzido em 10%. O próximo ponto atual é computado pela Equação (4.5). Este procedimento é repetido até o fluxo de carga continuado não convergir. Adotou-se um número máximo de iterações igual a 10. Durante o processo de redução da perda ativa total, o *tap* nos transformadores com comutação de *tap's* sob carga foram mantidos fixos no

valor de 1,0 p.u. Os valores limites adotados para as magnitudes de tensão da barra de folga e das barras de geração foram $V^{\min} \leq V \leq V^{\max}$, onde $V^{\min} = 0,95$ e $V^{\max} = 1,1$ p.u.

Na Figura 4.7 encontram-se as variações das tensões da barra de folga, barra 1, e das barras de controle de tensão (*PV*), barras 2, 3, 6 e 8, em função da perda total de potência ativa (*Pa*). Da figura observa-se que ocorre um aumento da magnitude de tensão de todas as barras *PV*, bem como da de folga.

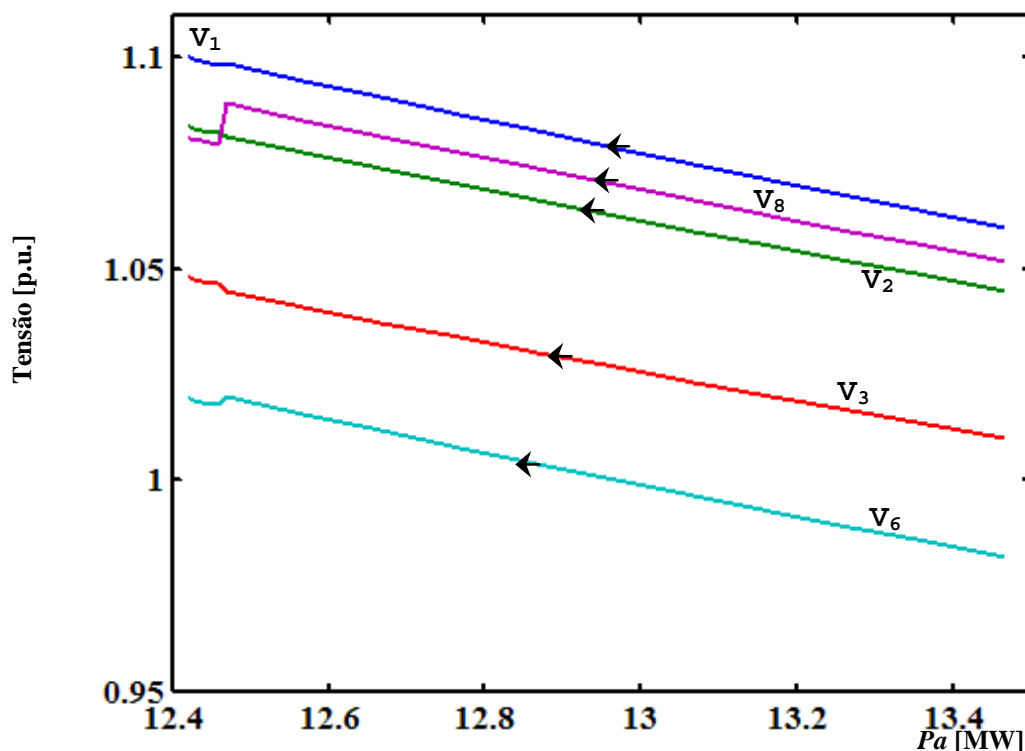


Figura 4.7 - Variações das tensões da barra de folga e das barras de controle de tensão (*PV*) em função de *Pa*, para o sistema IEEE-14 barras.

Na Figura 4.8 apresentam-se as variações das potências reativa geradas pelas barras de folga e de controle de tensão em função de *Pa*. Pode-se verificar que há uma redução das potências reativas geradas pelas barras *PV* de números 2, 3 e 8, enquanto que a da barra 6 permanece constante no seu valor máximo de 24 MVar. Com relação a barra de folga, pode-se afirmar que ocorre uma redução da potência reativa gerada.

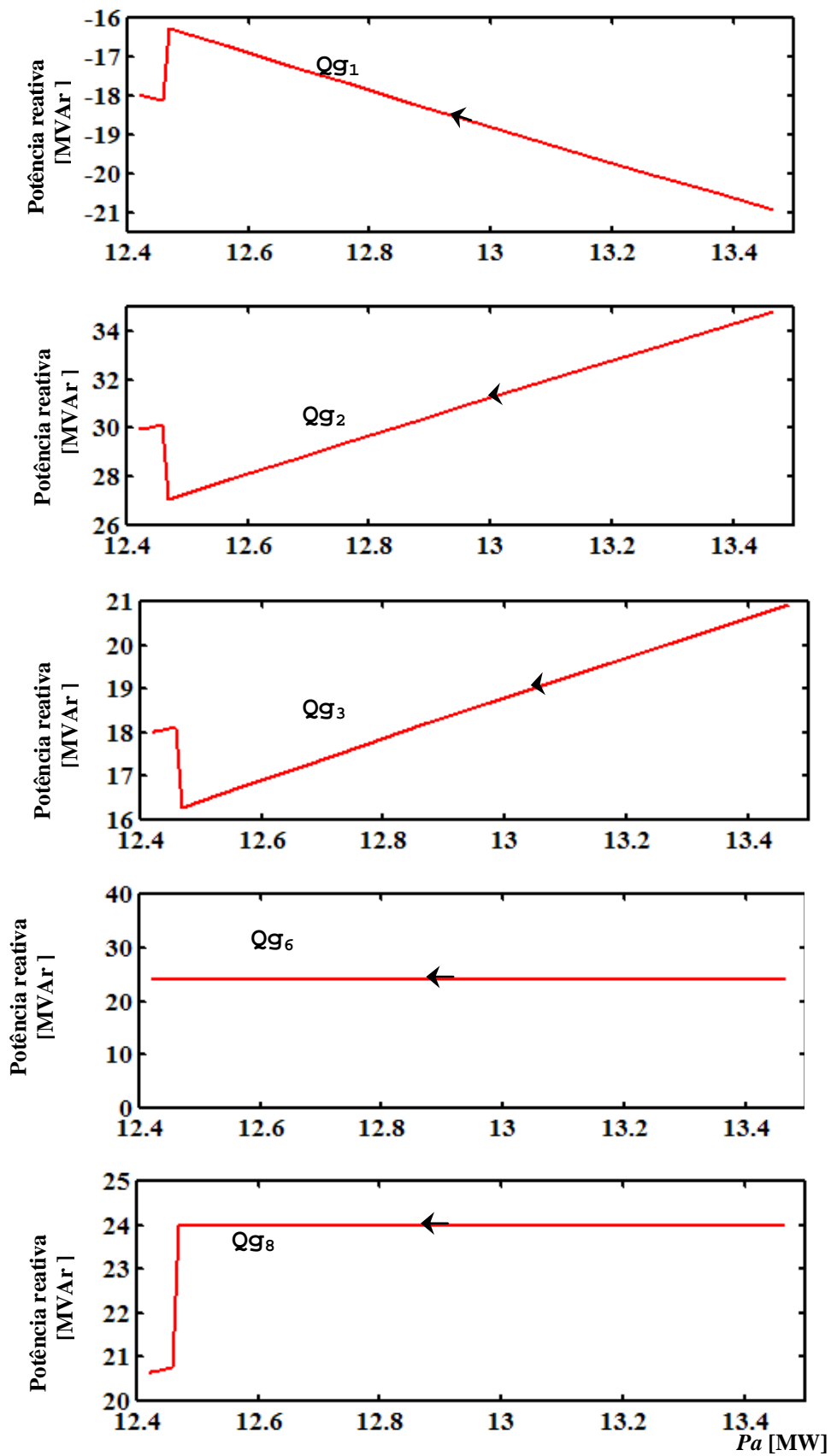


Figura 4.8 - Variações das potências reativa geradas pelas barras de folga e de controle de tensão (PV) em função de P_a , para o sistema IEEE-14 barras.

Na Figura 4.9 são apresentados as variações das potências reativa em função de Pa , dos termos que compõem a Equação (4.9). Da Figura 4.9(a) pode-se verificar que a potências reativa geradas pelas barras de controle de tensão (PV) diminuem com a diminuição das perdas. Conforme já comentado, manter os geradores existentes operando com o máximo possível de margem de reativo é benéfico para prevenir ou postergar o colapso de tensão (CIGRE, 1989). Essa redução de geração de potência reativa nos geradores se deve ao aumento da potência reativa fornecida pelos *shunts* das linhas de transmissão e pelo banco de capacitor localizado na barra 9, Figura 4.9 (b) e (c) respectivamente, e a redução da perda de potência reativa nos elementos série das linhas de transmissão, ver Figura 4.9 (d). O aumento da potência reativa fornecida pelos *shunts* das linhas de transmissão e pelo banco de capacitor é consequência direta do aumento das magnitudes de tensão nas barras do sistema, ver Figura 4.10. A redução das perdas pode ser atribuída ao suprimento local de potência reativa efetuadas por meio desses elementos *shunts*.

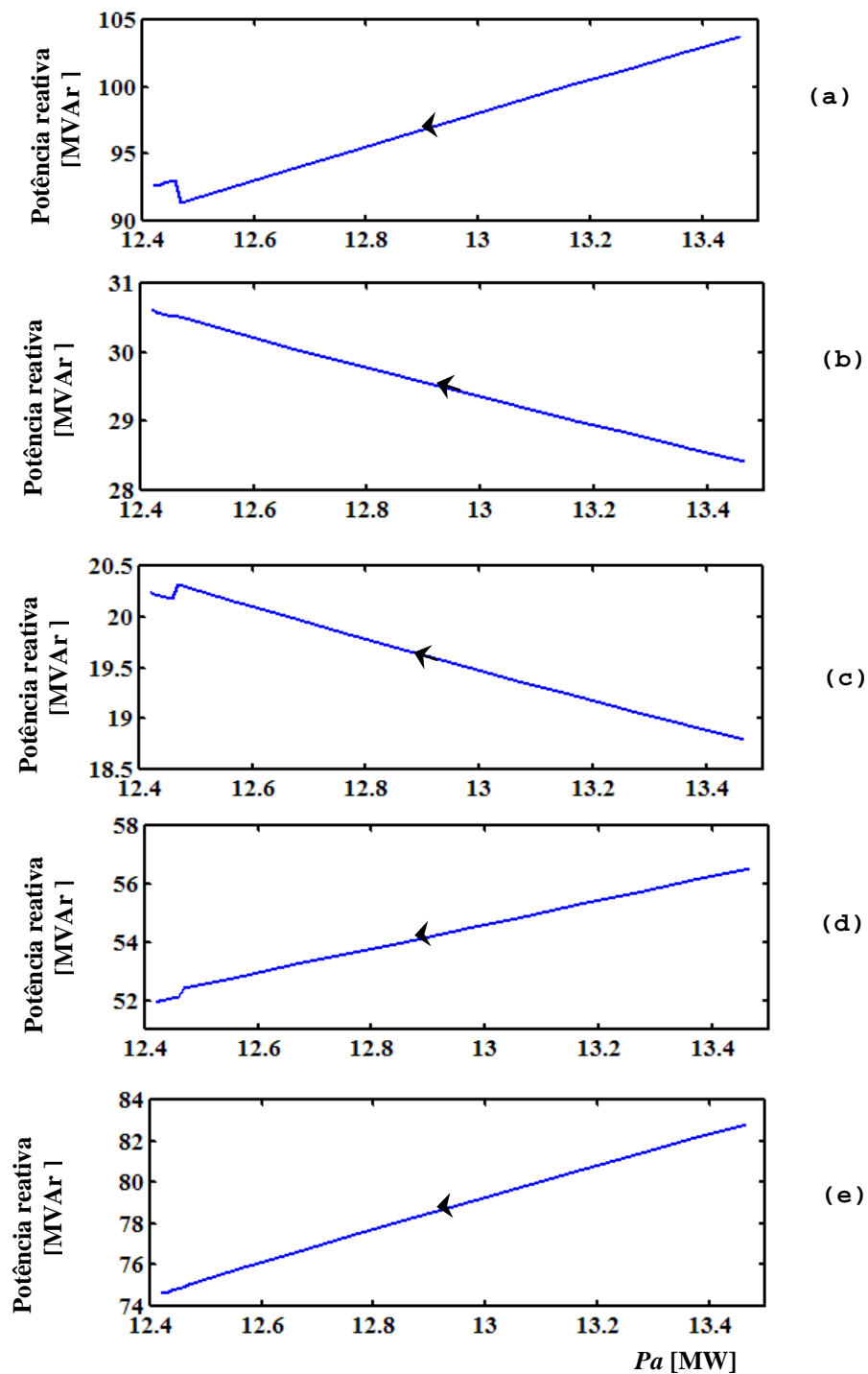


Figura 4.9 - Variações das potências reativa em função de P_a para o sistema IEEE-14 barras: (a) somatório das variações das potências reativa geradas pelas barras de controle de tensão (PV); (b) somatório das variações de geração de potência reativa nos *shunts* das linhas de transmissão; (c) somatório das variações de geração de potência reativa nos *shunts* de barra (banco de capacitores e/ou reatores); (d) somatório das variações de perda de potência reativa nos elementos série das linhas de transmissão e (e) somatório das variações das potências reativa geradas pelas barras de controle de tensão PV's mais a barra de folga

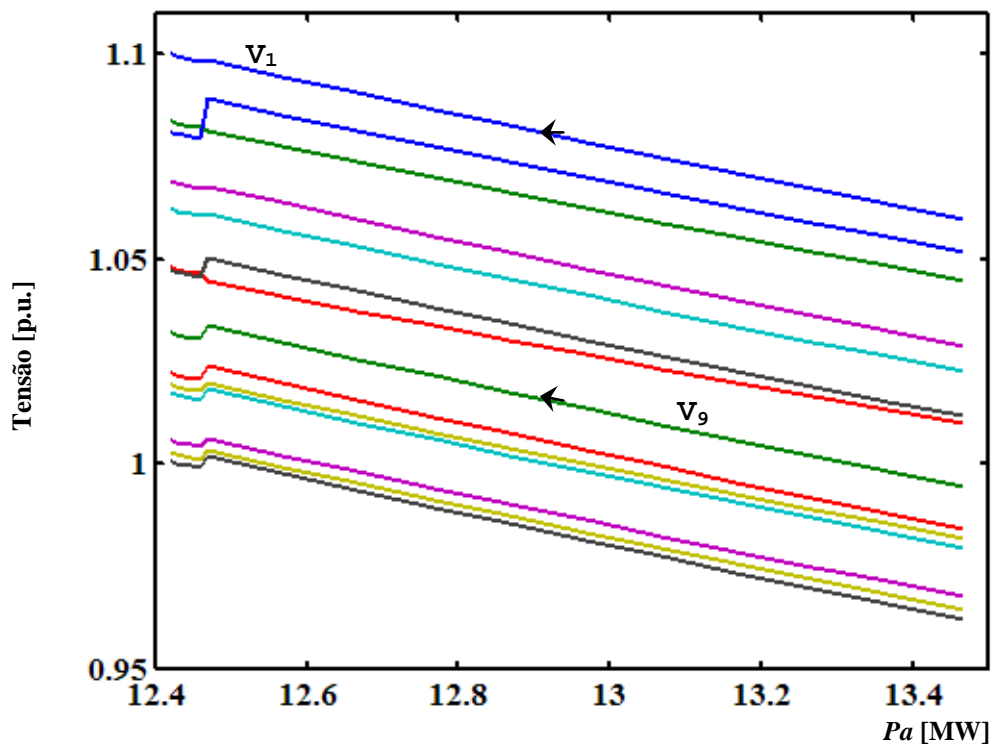


Figura 4.10 – Variações das magnitudes de tensão das barras do sistema IEEE-14 em função de P_a .

4.4.2 - Análise de desempenho do método proposto para os sistemas IEEE

Neste item são apresentados os resultados de teste para os três sistemas do IEEE: 14 barras, 30 barras e 57 barras (FRERIS; SASSON, 1968).

Nos testes, o número máximo de iterações e o valor inicial do parâmetro μ foram de 10 e de $-0,1$ MW, respectivamente. O próximo ponto atual é computado pela Equação (4.5). Este procedimento é repetido até o fluxo de carga continuado não convergir. Neste momento, retorna-se a solução anterior e continua-se o processo com um passo menor para $\mu/10$. As reduções no tamanho passo são efetuadas sempre que o processo de solução divergir (ou o número de iterações for maior que 10) para uma tolerância igual a 10^{-6} . O

processo é suspenso quando a redução no passo (μ) não acarretar uma redução significativa nas perdas, isto é, quando a redução nas perdas for menor que 10^{-6} .

Para o traçado das curvas PV a tolerância adotada para os *mismatches* foi de 10^{-4} p.u. Em ambos os procedimentos, os limites superior e inferior adotados para os *tap* foram 1,05 e 0,95, respectivamente, enquanto que os valores limites adotados para as tensões da barra de folga e das barras PV foram $V^{\min} \leq V \leq V^{\max}$, onde $V^{\min} = 0,95$ e $V^{\max} = 1,1$ p.u.

Os ajustes de *tap* nos transformadores com comutação de *tap's* sob carga consistiram da inclusão da posição do *tap* como variável dependente, ao passo que as magnitudes da tensão das barras controladas foram consideradas como variáveis independentes (PETERSON; MEYER, 1971).

Para o traçado das curvas PV do caso base (curva 1 nas figuras que seguem), o primeiro ponto de cada curva foi obtido com um fluxo de carga convencional. Para os demais pontos da curva usou-se um fluxo de carga continuado e, conforme a Equação (2.1), as cargas foram modeladas como de potência constante e o parâmetro λ foi usado para simular o incremento de carga ativa e reativa, considerando fator de potência constante.

O aumento de carga foi seguido por um aumento de geração usando λ .

Para o traçado das curvas PV após a redução das perdas (curva 2 nas figuras que seguem) usou-se o mesmo procedimento utilizado para a obtenção da curva 1, exceto que o primeiro ponto corresponde ao último ponto de operação obtido com o procedimento de redução das perdas.

A Tabela 4.3 apresenta, para os três sistemas, o desempenho da metodologia proposta para a redução das perdas, enquanto que a Tabela 4.4 apresenta os respectivos aumentos obtidos para a margem de carregamento. Pelas tabelas constata-se que além da diminuição dos custos operacionais dos sistemas com as reduções nas perdas, adicionalmente se obtém

um aumento do ponto de máximo carregamento, ou seja, um aumento superior a 5% na margem de estabilidade desses sistemas.

Tabela 4.3 - Redução nas perdas de potência ativa

Sistema IEEE	Redução nas perdas de potência ativa			
	Perdas (MW)		Redução nas perdas (MW)	%
	Caso base	Finais		
14 barras	13,4411	12,4141	1,0270	7,64
30 barras	18,3360	16,2539	2,0830	11,36
57 barras	28,2796	25,4196	2,8600	10,01

Tabela 4.4 - Margem de carregamento

Sistema IEEE	Margem de carregamento			
	PMC (p.u.)		Aumento da MC (Δ MC em p.u.)	%
	Caso base	Após redução		
14 barras	1,7680	1,8791	0,1111	14,47
30 barras	1,4884	1,6260	0,1376	26,17
57 barras	1,6007	1,7355	0,1348	22,24

As Figuras 4.11, 4.13 e 4.15 apresentam, para os respectivos sistemas, as curvas PV nas barras críticas para o caso base e para o caso após a redução das perdas, de onde se pode confirmar os resultados apresentados na Tabela 4.4. As barras críticas são 14, 30 e 31 respectivamente para os sistemas 14-barras, 30-barras e 57-barras.

Adicionalmente, conforme se pode verificar nas Figuras 4.12, 4.14 e 4.16, onde são apresentados os perfis de magnitude de tensão e dos respectivos ângulos, o aumento da margem de estabilidade de tensão é alcançado juntamente com a melhoria do perfil da magnitude de tensão. Também se pode notar nos perfis de magnitude de tensão e da Tabela

4.4, que as melhorias da margem de carregamento, conseguidas através da redução das perdas, são significativas, uma vez que estas foram obtidas sem nenhuma alteração nas injeções de potência ativa, exceção feita à barra de folga.

Conforme já comentado, uma característica que deve ser almejada em um sistema elétrico de energia é que a tensão crítica, tensão relativa ao ponto de máximo carregamento, se mantenha a um nível, de preferência, o mais baixo quanto possível da tensão normal de operação, sem que isto, conseqüentemente, venha a prejudicar o perfil geral de tensão (WECC, 1998). Observa-se nas Figuras 4.11, 4.13 e 4.15 que os valores das tensões críticas no caso base, representados na curva 1, estão muito próximos aos seus respectivos valores após o procedimento de redução das perdas, conforme verificado por meio da curva 2, ou seja, dentro da característica desejada em (WECC, 1998).

• Sistema IEEE-14 barras

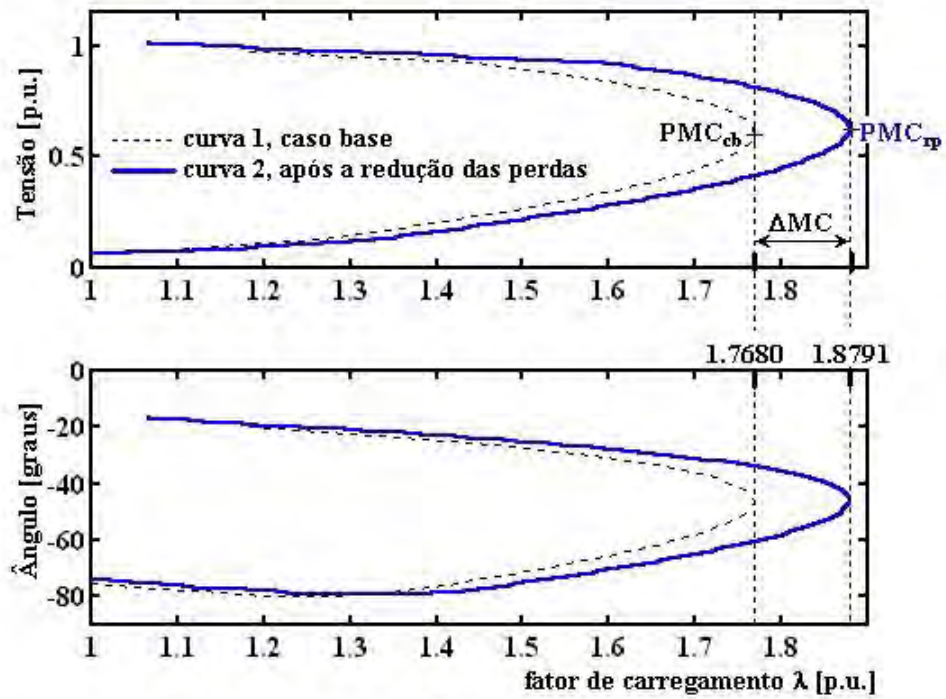


Figura 4.11 - Curvas PV do sistema IEEE-14 barras.

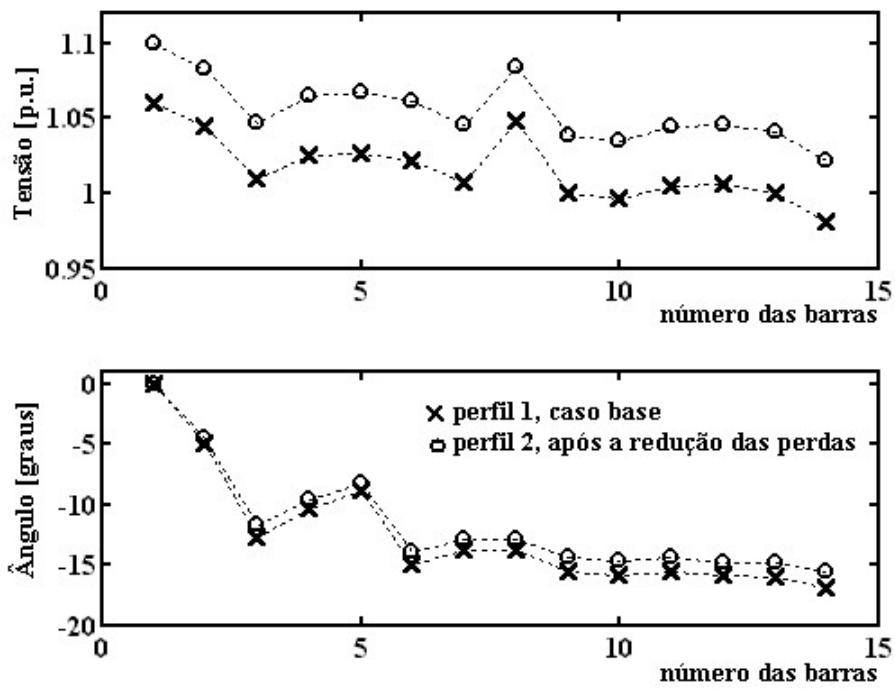


Figura 4.12 - Perfil da magnitude da tensão e de ângulo do sistema IEEE-14 barras.

- Sistema IEEE 30 barras

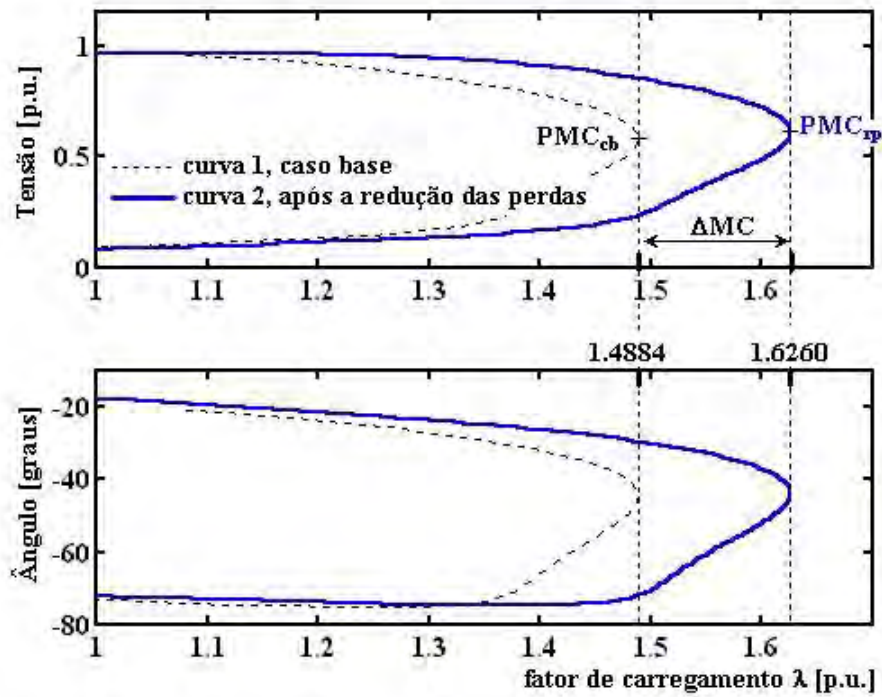


Figura 4.13 - Curvas PV do sistema IEEE-30 barras.

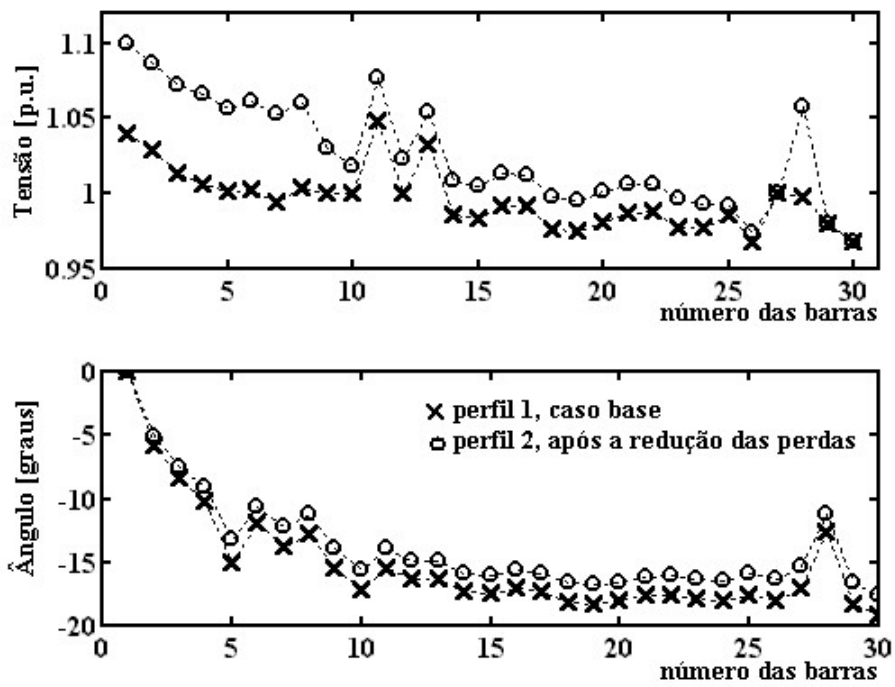


Figura 4.14 - Perfil da magnitude da tensão e de ângulo do sistema IEEE-30 barras.

• Sistema IEEE-57 barras

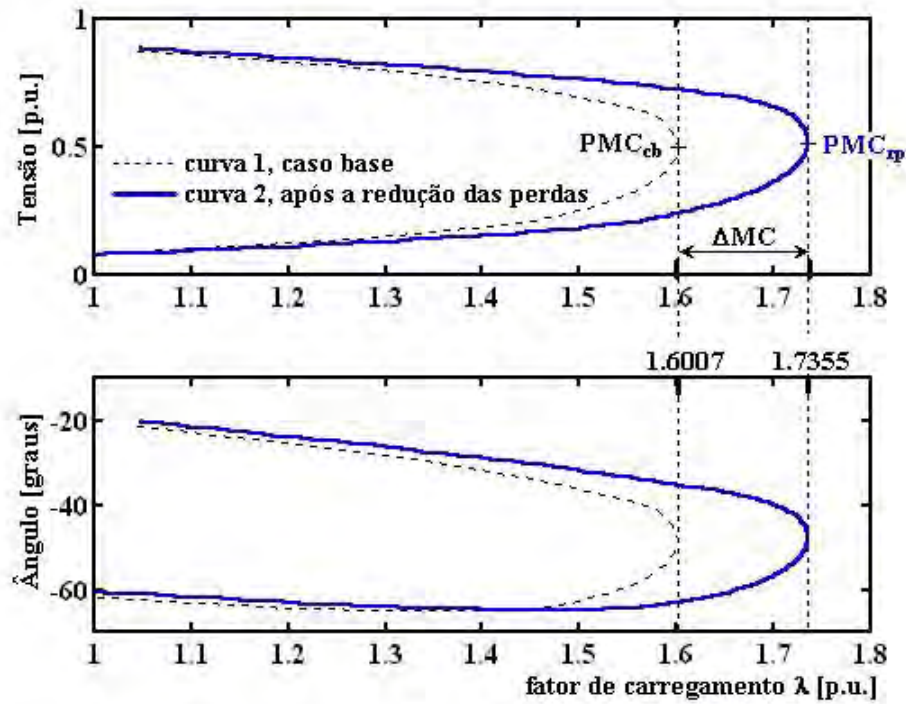


Figura 4.15 - Curvas PV do sistema IEEE-57 barras.

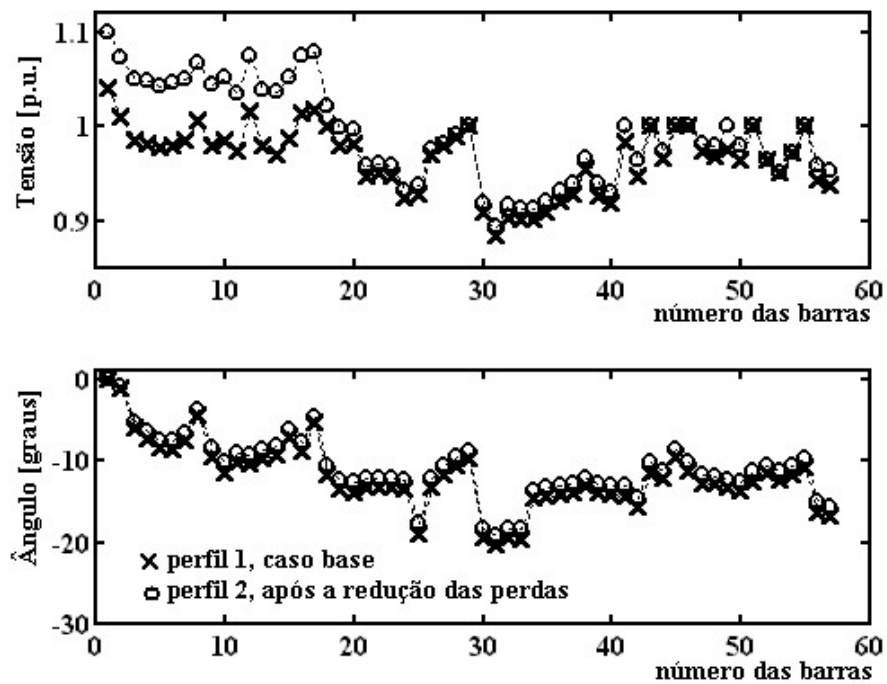


Figura 4.16 - Perfil da magnitude da tensão e de ângulo do sistema IEEE-57 barras.

Um outro aspecto importante que deve ser ressaltado é que o principal fator responsável pela instabilidade de tensão é a incapacidade do sistema em atender a demanda de potência reativa, ou seja, o colapso de tensão é devido ao esgotamento progressivo das reservas de reativos nos geradores.

Com o método proposto obtêm-se um aumento nas reservas de reativos nos geradores, as quais são alcançadas como consequência direta da redução das perdas de potência ativa, conforme se verifica na Tabela 4.5, onde são apresentadas as potências reativas geradas para o caso base e para o caso após a redução das perdas.

Tabela 4.5 - Reserva de reativos

Sistema	Reserva de reativos (MVar)			
	ΣQ_{gerado}		Reserva ΣQ_{gerado}	%
	Caso base	Final		
14 barras	102,1869	74,3556	27,8313	27,24
30 barras	143,9388	130,2830	13,6458	9,48
57 barras	321,9223	297,4083	24,5140	7,62

4.4.3 - Influência da barra de folga na redução das perdas

O objetivo deste item é o de apresentar a influência da escolha da barra de folga durante o processo de redução da perda ativa total. Inicialmente analisaremos o sistema IEEE 57 barras e, posteriormente, o sistema IEEE 118 barras. Nos procedimentos de redução de perdas que se seguem a tolerância adotada para os *mismatches* foi de 10^{-6} p.u., enquanto que para o traçado das curvas PV foi de 10^{-4} p.u.

Adotou-se um número máximo de iterações igual a 10. Em ambos os procedimentos, os valores adotados para os *tap* foram de 1,0 p.u., enquanto que os valores limites adotados para as tensões da barra de folga e das barras PV foram $\mathbf{V}^{\min} \leq \mathbf{V} \leq \mathbf{V}^{\max}$, sendo $\mathbf{V}^{\min} = 0,94$

p.u. e $V^{\text{máx}} = 1,10$ p.u. O valor inicial adotado para μ é $-0,1$ MW, isto é, P_a é reduzido em 10%. O próximo ponto atual é computado pela Equação (4.5). Este procedimento é repetido até o fluxo de carga continuado não convergir.

Convencionalmente a referência angular é especificada na barra de folga. Sabe-se que qualquer barra geradora pode ser escolhida como referência angular e que a convergência do problema de fluxo de potência não será afetada por essa escolha (LEE; KIM, 2002).

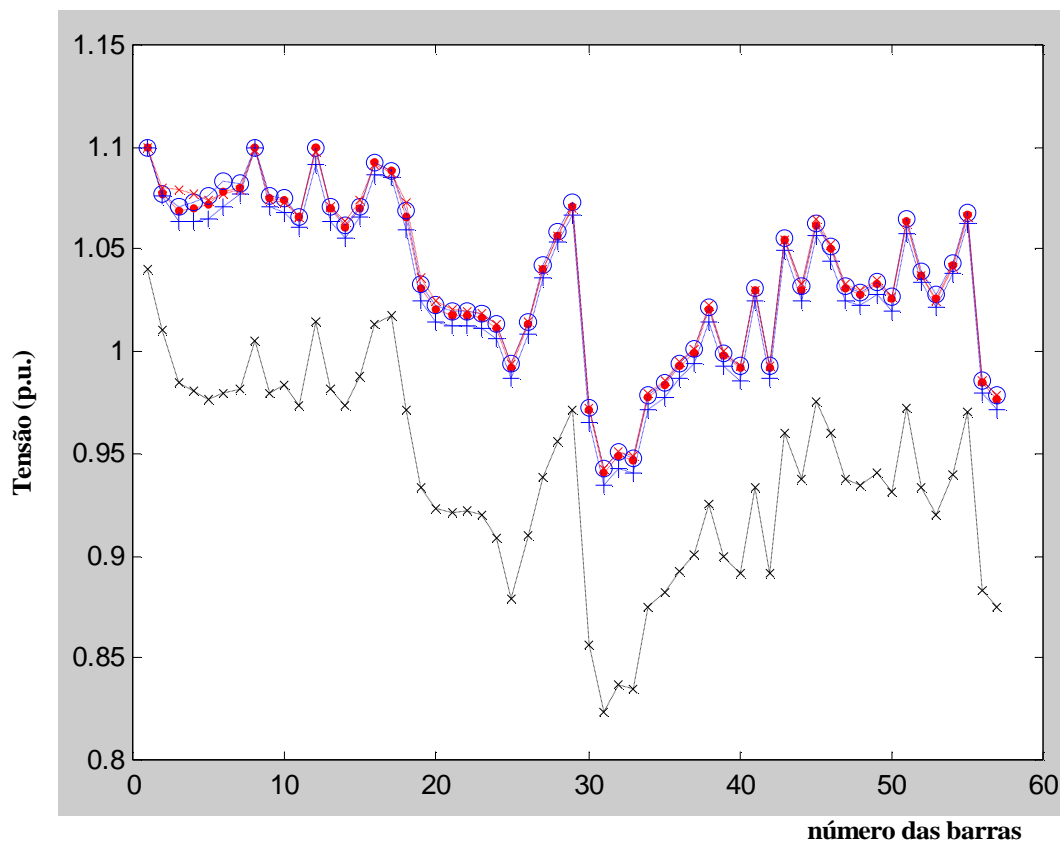
Por outro lado, sabe-se também que a escolha da barra de folga afeta o valor da perda ativa (reativa) total, podendo resultar em maiores ou menores perdas na transmissão. Assim, com o intuito de garantir que o caso base a ser utilizado no processo de redução de perdas seja sempre o mesmo, independente da barra adotada como barra de folga, para todos os demais casos analisados especificou-se como valor de potência ativa gerada para a barra de folga original do banco de dados (no caso a barra 1 do sistema IEEE-57 barras e a 69 do IEEE-118 barras), aquele determinado para o caso base considerando a barra de folga original.

4.4.3.1 - Resultados obtidos com o fluxo de carga continuado proposto para o sistema IEEE-57 barras

Nas Figuras 4.17 e 4.18 apresentam-se os respectivos perfis de magnitude da tensão e de ângulo obtidos para o caso base, com o fluxo de carga convencional, e os obtidos com o processo de redução de perdas utilizando o fluxo de carga continuado proposto. Observa-se que após a redução das perdas os perfis são muito próximos e que há uma melhora do perfil de magnitude de tensão em relação ao do caso base.

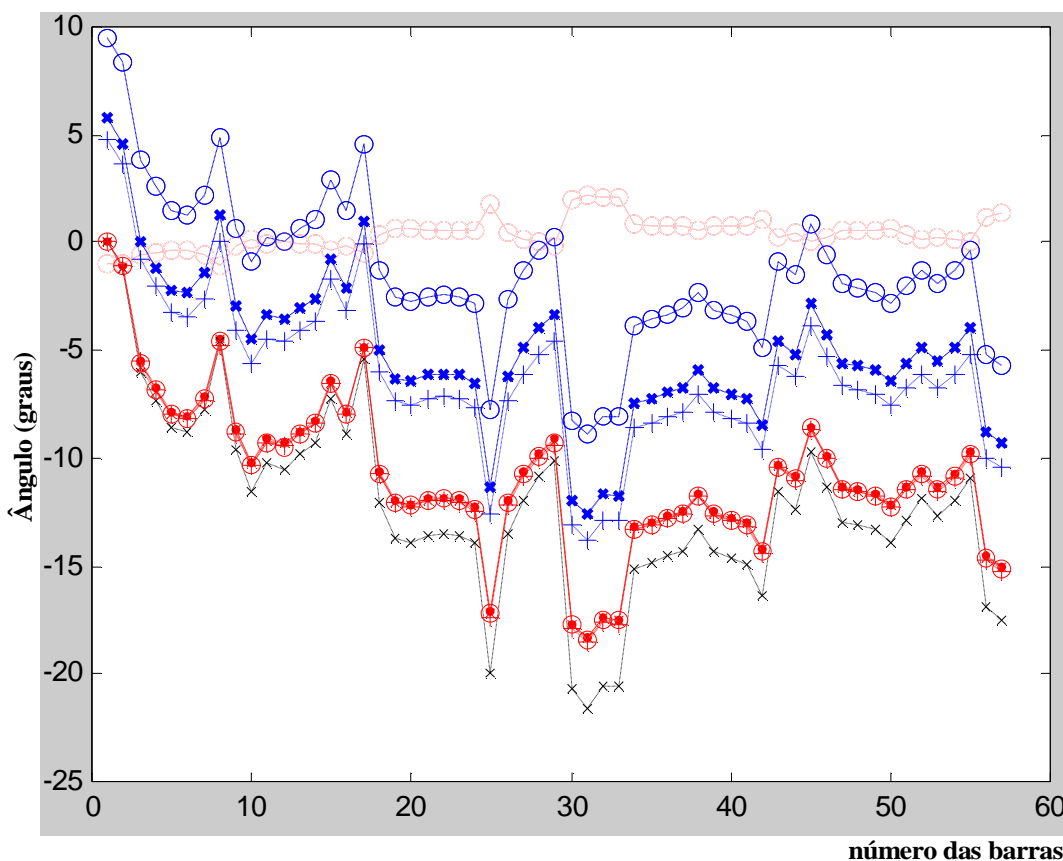
Nas Tabelas 4.6 e 4.7 podem-se verificar os respectivos valores de magnitude de tensão e potência reativa gerada nas barras de geração após a aplicação da metodologia

proposta para a redução das perdas, considerando cada um dos quatros geradores do sistema IEEE-57 (1, 3, 8 e 12) como barra de folga. Observa-se que a menor magnitude de tensão tanto para o caso base quanto após a aplicação do método proposto foi na barra 31, sendo os respectivos valores iguais a 0,8241 p.u. e 0,9408 p.u. Com relação ao perfil de ângulo das barras, após recalculá-los considerando a barra 1 como barra de referência, verifica-se que ocorreu muito pouca variação em relação ao do caso base. Isso já era esperado posto que não houve variação de potência ativa gerada e consumida, mas apenas na perda ativa total.



×××× caso base (barra 1 como barra de folga sem redução de perdas)
 Após o procedimento de redução das perdas utilizando como barra de referência:
 ●●● barra 1 ×××× barra 3 ++++ barra 8 ○○○○ barra 12

Figura 4.17 - Perfil da magnitude de tensão do sistema IEEE-57 barras.



×××× caso base (barra 1 como barra de folga sem redução de perdas)
 Após o procedimento de redução das perdas utilizando como barra de referência:
 ●●● barra 1 ×××× barra 3 ++++ barra 8 ○○○○ barra 12
 Referindo ao ângulo da barra 1, após o procedimento de redução das perdas utilizando como barra de referência:
 ×××× barra 3 ++++ barra 8 ○○○○ barra 12

Figura 4.18 - Perfil de ângulo do sistema IEEE-57 barras.

Tabela 4.6 - Magnitude de tensão das barras de geração do sistema IEEE-57 barras

Barra de folga	Tensão (p.u.)						
	V_1	V_2	V_3	V_6	V_8	V_9	V_{12}
1	1,1000	1,0768	1,0688	1,0783	1,1000	1,0749	1,1000
3	1,1000	1,0798	1,0793	1,0775	1,0991	1,0737	1,0982
8	1,1000	1,0759	1,0636	1,0709	1,1000	1,0707	1,0914
12	1,1000	1,0771	1,0713	1,0831	1,1000	1,0758	1,1000
1 (caso base)	1,0400	1,0100	0,9850	0,9800	1,0050	0,9800	1,0150

Tabela 4.7 - Potência reativa gerada nas barras de geração do sistema IEEE-57 barras

Barra de folga	Potência reativa gerada (MVar)						
	Q_{G1}	Q_{G2}	Q_{G3}	Q_{G6}	Q_{G8}	Q_{G9}	Q_{G12}
1	63,3974	-2,8379	5,9707	13,7612	64,3029	4,4035	133,2204
3	47,3342	-0,7216	39,9725	3,4984	64,6512	1,1178	125,5745
8	78,0394	-0,6764	1,4231	3,2798	83,5336	1,0496	117,7180
12	60,3791	-4,5166	9,5023	21,9001	56,3339	7,0083	132,3922
1 (caso base)	129,4766	-0,7261	1,5276	3,5207	65,0592	1,1267	126,3672

A Tabela 4.8 apresenta, considerando cada um dos quatro geradores do sistema IEEE-57 (1, 3, 8 e 12) como barra de folga, os valores das perdas ativa e reativa série totais após a aplicação da metodologia proposta para a redução das perdas. Observa-se da Tabela 4.8 que o caso base é o mesmo para todos os casos analisados, e que, para este sistema, as reduções nas perdas ativa e reativa série totais são praticamente da mesma ordem de grandeza.

Na Tabela 4.9 observam-se os aumentos da potência reativa fornecida pelos *shunts* das linhas de transmissão e as variações totais da potência reativa gerada pelas barras de folga mais as *PVs*. Fica clara a contribuição da potência reativa fornecida pelos *shunts* das linhas de transmissão. Conseqüente dessa contribuição, bem como da redução da perda de potência reativa nos elementos séries das linhas de transmissão, pode-se observar na última coluna da Tabela 4.9 que há uma redução da potência reativa total gerada pelas barras de folga mais as *PVs*.

Tabela 4.8 - Redução das perdas ativa e reativa série totais para o sistema IEEE-57 barras

Barra de folga	Redução na perda total					
	Ativa (MW)			Reativa série (MVar)		
	Caso base	Final	Redução	Caso base	Final	Redução
1	28,6127	24,1127	4,4997	124,3319	104,5200	19,8119
3	28,6127	24,0126	4,6000	124,3312	104,2192	20,1120
8	28,6127	24,3128	4,2998	124,3319	105,3650	18,9669
12	28,6127	24,4127	4,2000	124,3319	105,6678	18,6641

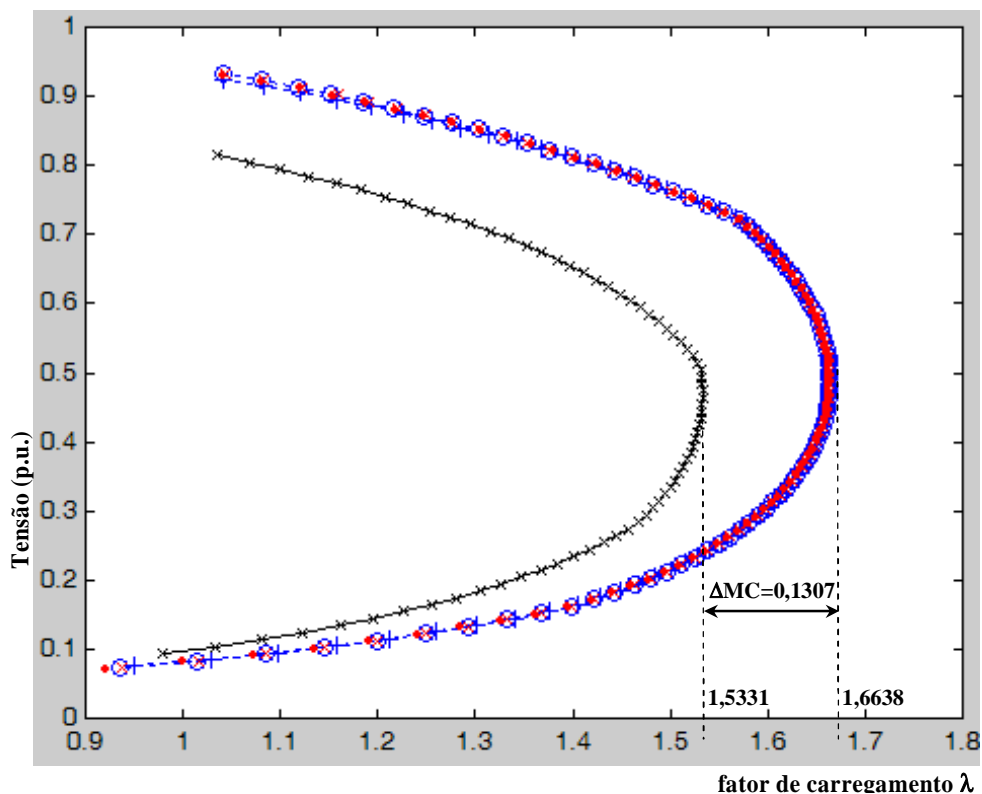
Tabela 4.9 - Aumento da potência reativa fornecida pelos *shunts* das linhas de transmissão e variação total da potência reativa gerada pelas barras de folga mais as *PV's*, com a redução da perda ativa total no sistema IEEE-57 barras

Barra de folga	Variações da potência reativa (MVA _r)					
	<i>Shunts</i> das linhas de transmissão			Potência reativa gerada		
	Caso base	Final	Aumento	Caso base	Final	Redução
1	115,0550	134,9006	19,8456	326,3519	282,2182	44,1338
3	115,0551	135,2361	20,1810	326,3519	281,4270	44,9249
8	115,0550	133,8467	18,7917	326,3519	284,3671	41,9848
12	115,0550	135,1587	20,1036	326,3519	282,9993	43,3526

A Figura 4.19 apresenta as curvas *PV's* para a barra crítica, barra 31, para o caso base e para os casos após a redução das perdas, de onde se pode confirmar que os pontos de máximo carregamento e o aumento da margem de carregamento, conforme apresentado na Tabela 4.10, são praticamente os mesmos. Conforme já comentado anteriormente, o aumento da margem de estabilidade de tensão é alcançado juntamente com a melhoria do perfil da tensão, conforme se pode verificar na Figura 4.17. Também se pode notar das curvas *PV's* e da Tabela 4.10, que as melhorias da margem de carregamento, conseguidas através da redução das perdas, são significativas, uma vez que estas foram obtidas sem nenhuma alteração nas injeções de potência ativa, exceção feita à barra de folga responsável pelo fechamento do balanço ativo. Esse aumento se deve ao aumento da reserva de reativos nos geradores, conforme apresentado na última coluna da Tabela 4.9.

Tabela 4.10 - Margem de carregamento

Barra de folga	Margem de carregamento			
	Ponto de máximo carregamento (p.u.)		Aumento da MC (Δ MC)	
	Caso base	Após a redução	(p.u.)	%
1	1,5331	1,6638	0,1307	24,52
3	1,5331	1,6638	0,1307	24,52
8	1,5331	1,6637	0,1306	24,49
12	1,5331	1,6638	0,1307	24,52



×××× caso base (barra 1 como barra de folga sem redução de perdas)
 Após o procedimento de redução das perdas utilizando como barra de referência:
 ●●● barra 1 ×××× barra 3 ++++ barra 8 ○○○○ barra 12

Figura 4.19 - Curvas PV's da barra crítica (barra 31) do sistema IEEE-57 barras.

4.4.3.2 - Resultados obtidos com o fluxo de carga continuado proposto para o sistema IEEE-118 barras

Nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 apresentam-se os perfis de magnitude da tensão do sistema IEEE-118 barras para o caso base e para os casos obtidos com o processo de redução de perdas considerando como barra de folga as barras 69, 27 e 26, respectivamente. Para este sistema, diferente do ocorrido para o sistema IEEE-57, observa-se que após a redução das perdas os perfis de magnitude de tensão apresentam uma grande diferença. Embora em todos os casos o procedimento tenha produzido uma redução das perdas ativa e reativa série totais,

conforme apresentado na Tabela 4.11, somente com o uso da barra 26 como barra de folga constata-se, em relação ao perfil do caso base, uma melhora de todo o perfil de magnitude de tensão.

Observa-se que o menor e o maior valor de magnitude de tensão para o caso base ocorreram nas barras 76 e 10, e foram de 0,9430 p.u. e 1,050 p.u., respectivamente. Após a aplicação do método proposto a menor magnitude de tensão, no valor de 0,9337 p.u., ocorreu na barra 28 quando do uso da barra 69 como barra de folga. Já a maior magnitude de tensão, no valor de 1,1031 p.u., ocorreu na barra 9 quando do uso da barra 26 como barra de folga. A barra 9 é uma barra sem carga.

Na Figura 4.23 apresenta-se os perfis de magnitude da tensão das barras de geração, para o caso base e o obtido com o processo de redução de perdas considerando a barra 26 como barra de folga. Na Figura 4.24 mostra-se as variações percentuais, em relação à magnitude de tensão do caso base, das respectivas magnitudes de tensão das barras de geração, considerando a barra 26 como barra de folga. Dessas figuras se constata que a variação percentual não será a mesma para todas as barras. Na Figura 4.25 (a) e 4.25 (b) mostra-se as variações da magnitude de tensão e da potência reativa gerada pelas barras 26, 27 e 69, durante o processo de redução de perdas considerando a barra 26 como barra de folga.

Da Tabela 4.11 verifica-se que, para este sistema, as maiores reduções nas perdas ativa e reativa série totais ocorrem quando do uso da barra 26 como barra de folga. Da mesma forma, da Tabela 4.12 que apresenta os aumentos da potência reativa fornecida pelos *shunts* das linhas de transmissão e as reduções totais da potência reativa gerada pelas barras de folga mais as *PV's*, se verifica que as maiores contribuições de potência reativa fornecida pelos *shunts* das linhas de transmissão e de reduções totais da potência reativa gerada pelas barras de folga mais as *PV's* também ocorrem quando do uso da barra 26 como barra de folga.

Tabela 4.11 - Redução das perdas ativa e reativa série totais para o sistema IEEE-118 barras

Barra de folga	Redução na perda total					
	Ativa (MW)			Reativa série (MVar)		
	Caso base	Final	Redução	Caso base	Final	Redução
26	131,1543	115,0543	16,1000	767,8841	672,1797	95,7044
27	131,1543	118,7545	12,3998	767,8841	700,4000	67,4842
69	131,1543	122,2544	8,8999	767,8841	734,7540	33,1301

Tabela 4.12 - Aumento da potência reativa fornecida pelos shunts das linhas de transmissão e variação total da potência reativa gerada pelas barras de folga mais as PV's, com a redução da perda ativa total no sistema IEEE-118 barras

Barra de folga	Variações da potência reativa (MVar)					
	Shunts das linhas de transmissão			Potência reativa gerada		
	Caso base	Final	Aumento	Caso base	Final	Redução
26	1368,262	1545,199	176,6940	752,7540	469,7815	282,9726
27	1368,262	1523,670	155,4077	752,7540	513,3701	239,3840
69	1368,262	1445,854	77,592	752,7540	621,2204	131,5336

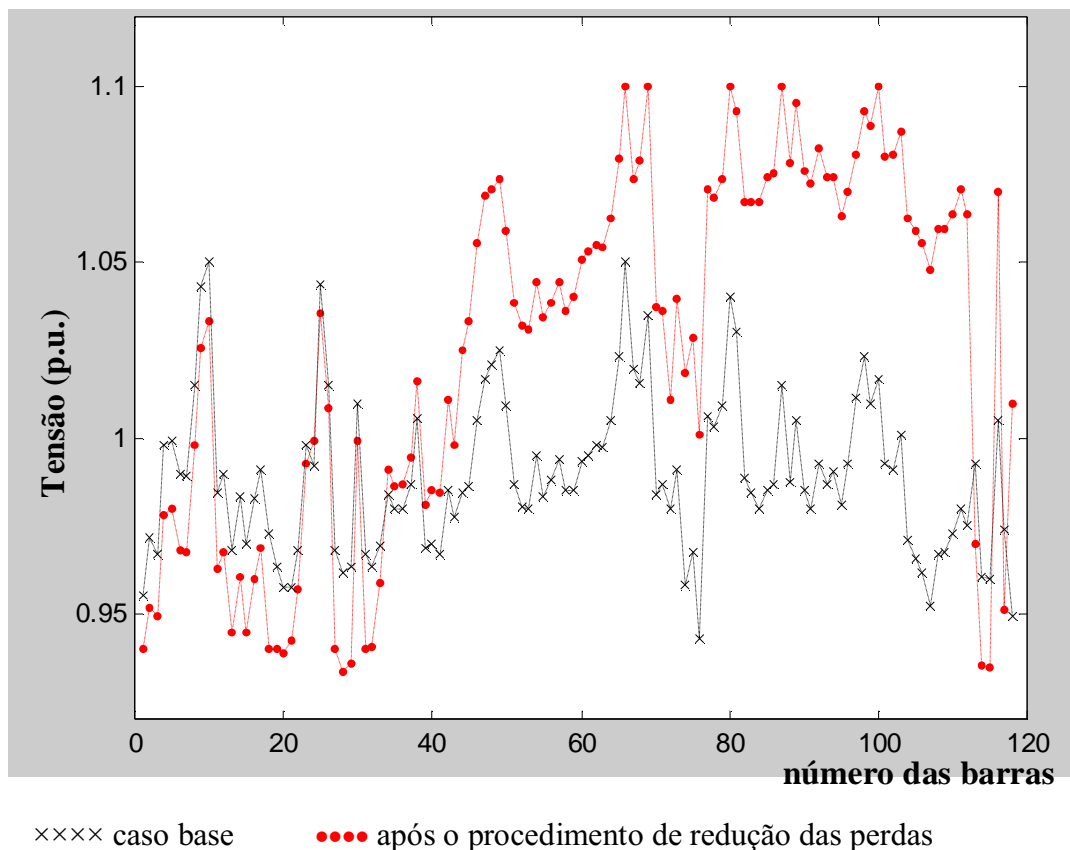


Figura 4.20 - Perfil da magnitude de tensão do sistema IEEE-118 barras considerando a barra 69 como barra de folga.

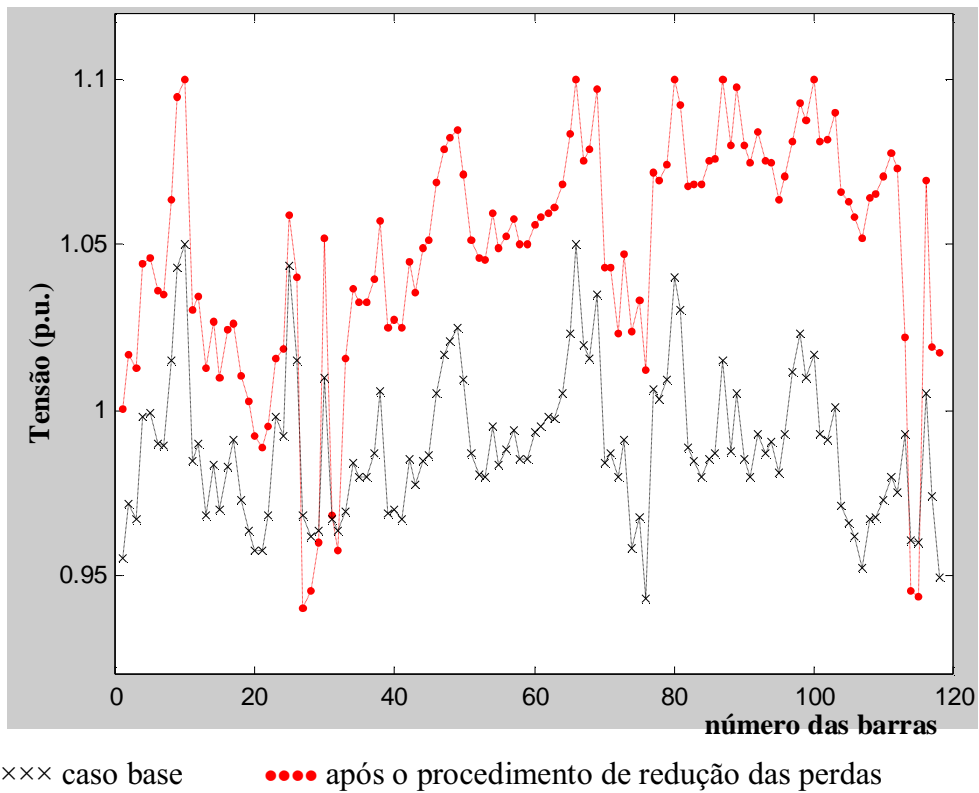


Figura 4.21 - Perfil da magnitude de tensão do sistema IEEE-118 barras considerando a barra 27 como barra de folga.

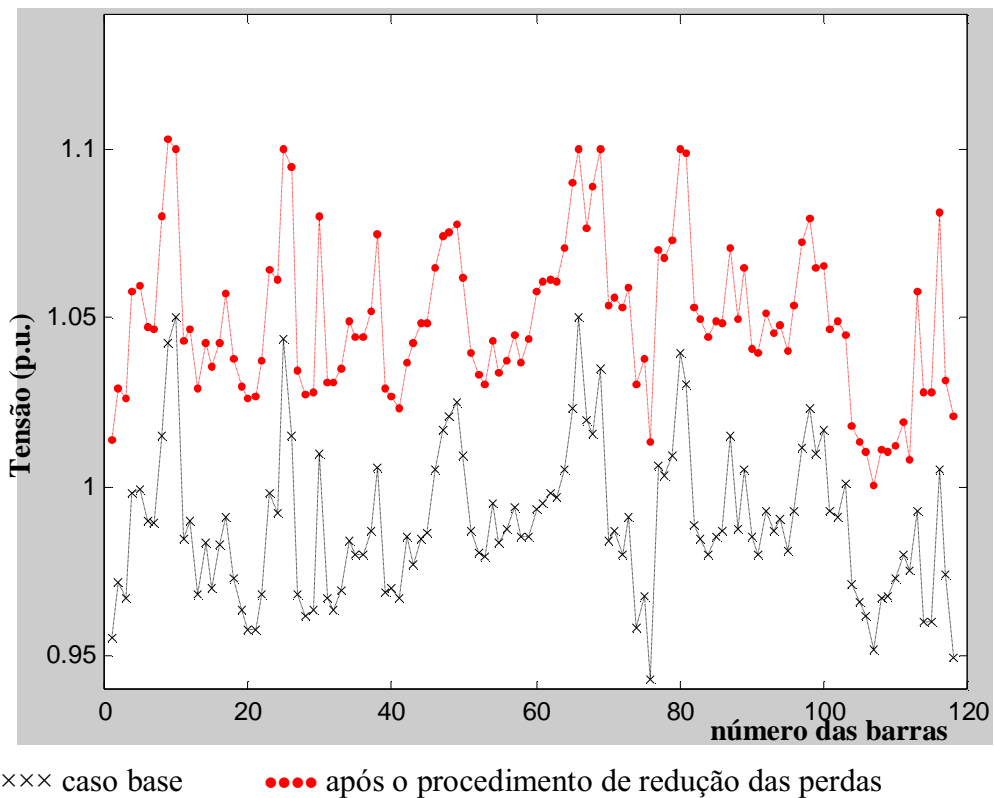


Figura 4.22 - Perfil da magnitude de tensão do sistema IEEE-118 barras considerando a barra 26 como barra de folga.

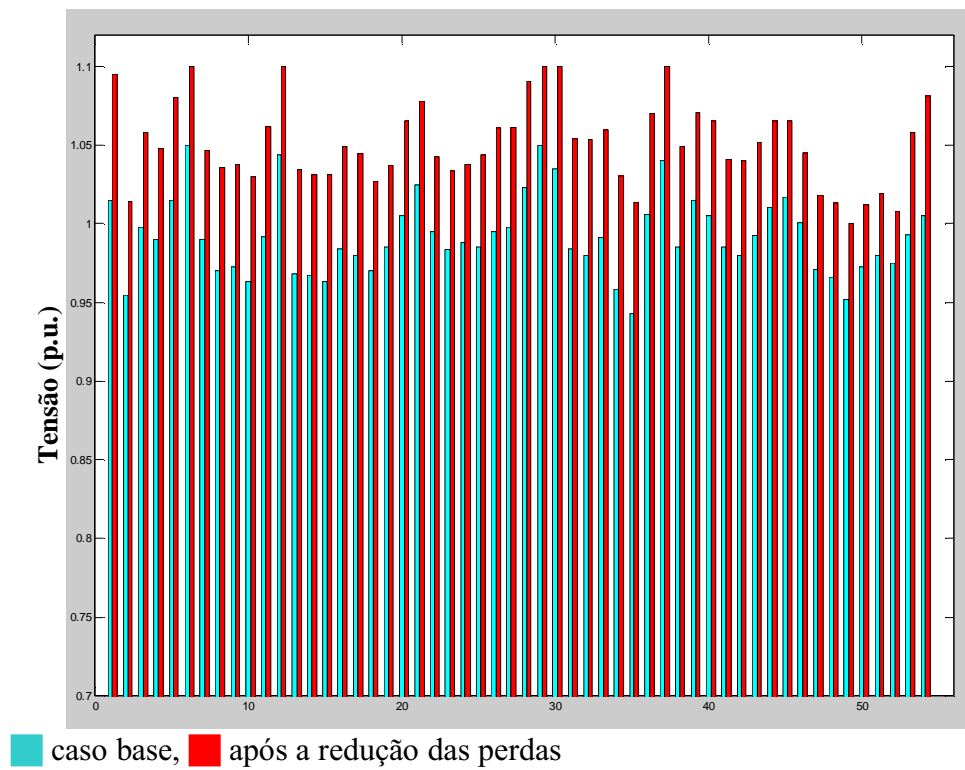


Figura 4.23 - Perfil da magnitude de tensão das barras de geração do sistema IEEE-118 barras considerando a barra 26 como barra de folga.

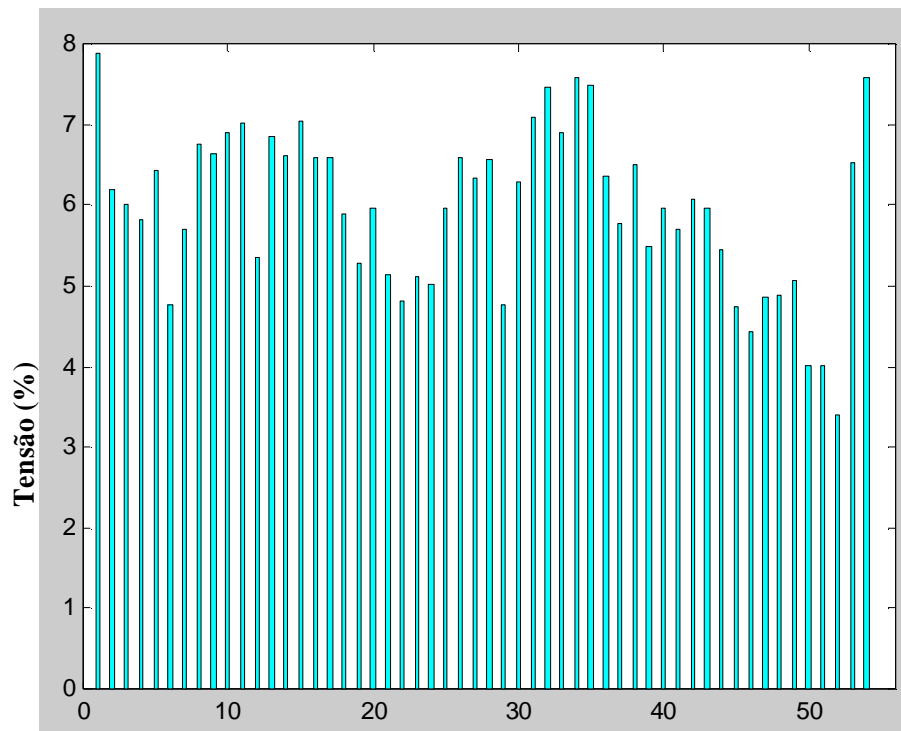


Figura 4.24 - Variação percentual, em relação ao caso base, da magnitude de tensão das barras de geração do sistema IEEE-118 barras, considerando a barra 26 como barra de folga.

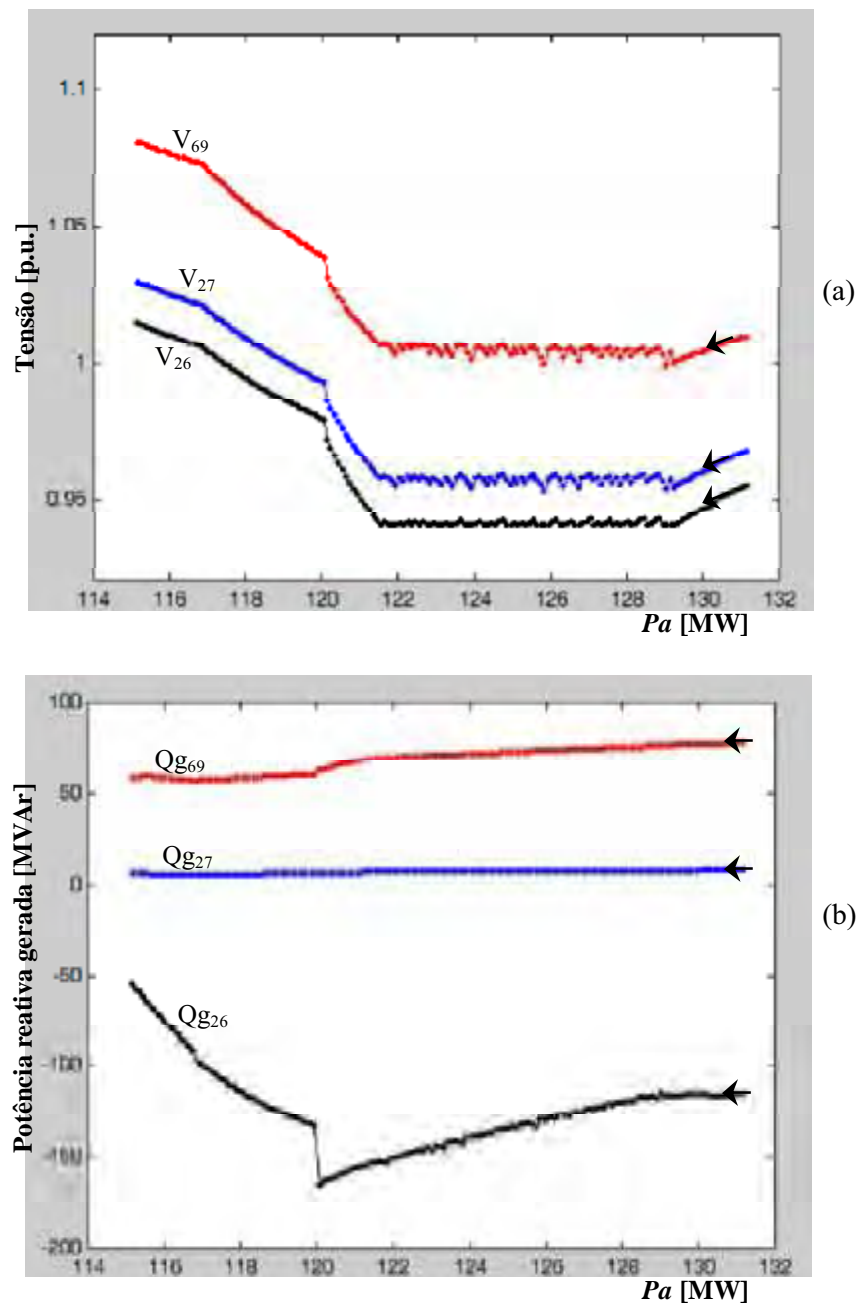


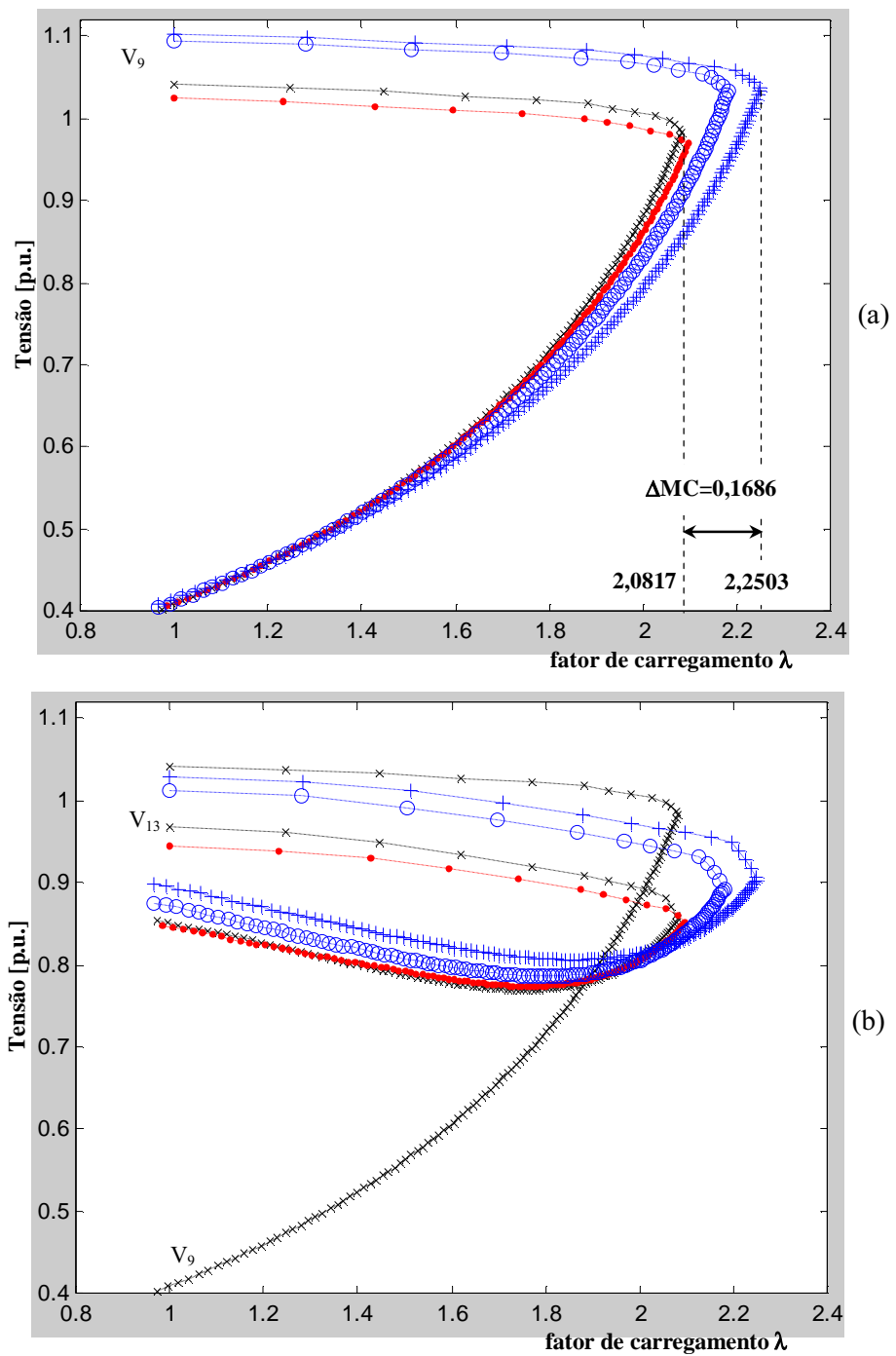
Figura 4.25 - (a) Variação da magnitude de tensão e (b) da potência reativa gerada pelas barras de geração 26, 27 e 69 do sistema IEEE-118 barras, considerando a barra 26 como barra de folga.

As Figuras 4.26 (a) e (b) apresentam as curvas PV's para a barra 9, cuja magnitude de tensão foi utilizada como parâmetro da continuação durante o traçado da curva PV, e da barra crítica, barra 13, para o caso base e para os casos após a redução das perdas. Das figuras 4.26 (a) e (b) e da Tabela 4.13 pode-se verificar que o ponto de máximo carregamento e o aumento da margem de carregamento será maior quando do uso da barra 26 como barra de folga. Conforme já comentado anteriormente, quando do uso da barra 26 como barra de folga, o

aumento da margem de estabilidade de tensão é alcançado juntamente com a melhoria do perfil de magnitude de tensão, conforme se pode verificar na Figura 4.22. Também se pode notar das curvas PV's e da Tabela 4.13, que as melhorias da margem de carregamento, 9,23% e 15,59%, conseguidas através da redução das perdas, são significativas quando do uso ou da barra 26 ou da 27 como barra de folga. Entretanto, quando do uso da barra 69 como barra de folga, apesar da redução das perdas ativa e reativa serem de 8,9 MW e 33,13 MVar (ver Tabela 4.11), o aumento da margem de carregamento do sistema foi de apenas 1,32%.

Tabela 4.13 - Margem de carregamento para o sistema IEEE-118 barras

Barra de folga	Margem de carregamento			
	Ponto de máximo carregamento (p.u.)		Aumento da MC (ΔMC)	
	Caso base	Após a redução	(p.u.)	%
69	2,0817	2,0960	0,0143	1,32
27	2,0817	2,1815	0,0998	9,23
26	2,0817	2,2503	0,1686	15,59



×××× caso base (barra 69 como barra de folga sem redução de perdas)
 Após o procedimento de redução das perdas utilizando como barra de folga:
 ●●●● barra 69 ++++ barra 26 ○○○○ barra 27

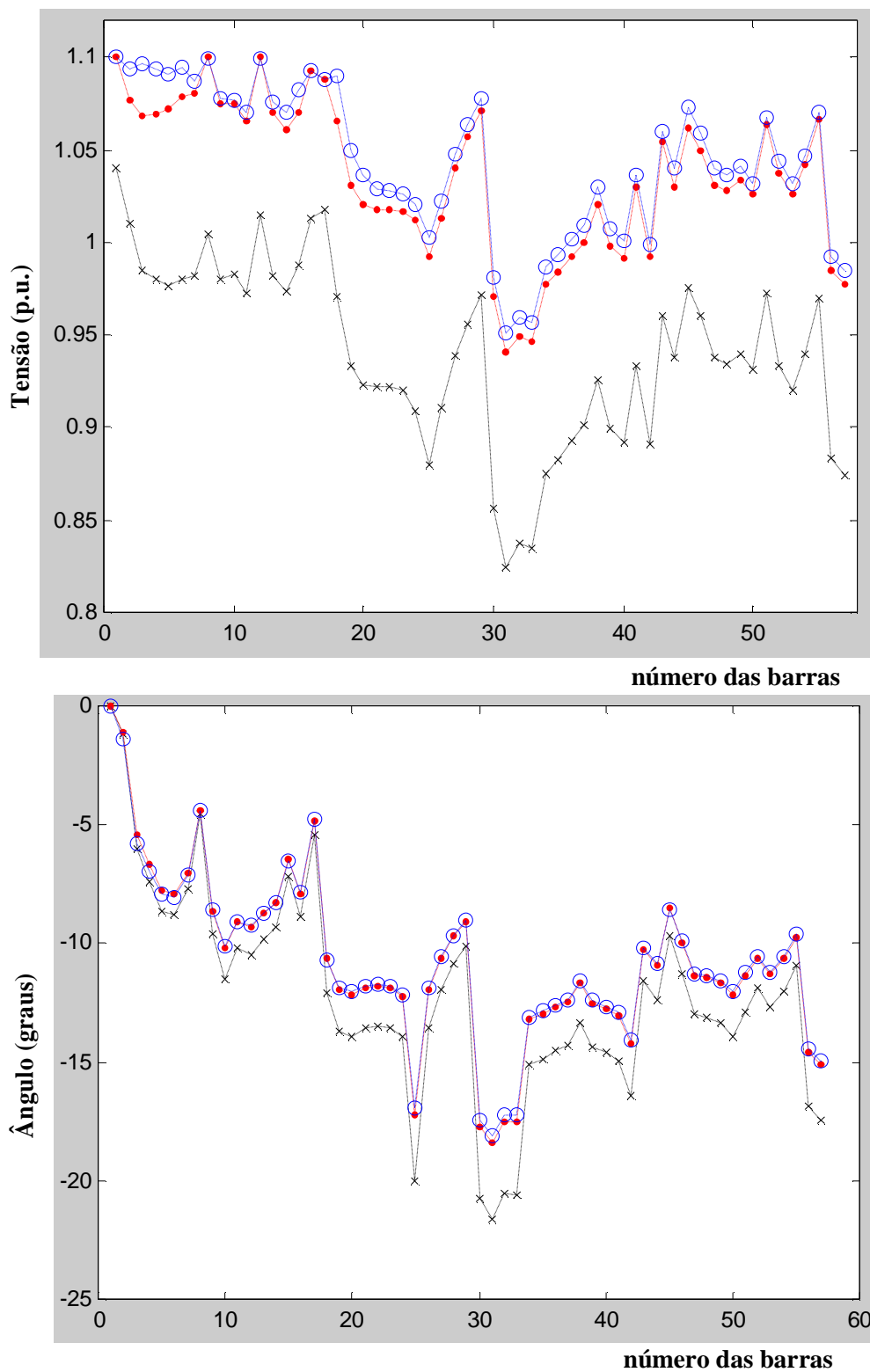
Figura 4.26 - Curvas PV's do sistema IEEE-118 barras: (a) curva PV da barra 9 e (b) curva PV da barra 13.

4.5 - Comparação entre os resultados obtidos com um programa de fluxo de carga ótimo e o fluxo de carga continuado proposto

O objetivo desse item é o de comparar o desempenho do fluxo de carga continuado proposto com o do fluxo de carga ótimo. Ao contrário do fluxo de carga convencional, o fluxo de carga continuado proposto possibilita a redução das perdas a partir de um caso base, assim, não se faz necessário realizar um processo de tentativa e erro para atingir o critério desejado. Por outro lado, conforme ficou claro do item 4.4.3, há a necessidade de se escolher uma barra de folga para se realizar o processo de redução da perda ativa total, uma vez que sua escolha influenciara o estado final obtido. Então, a título de comparação escolheu-se entre os resultados obtidos no item 4.4.3, aquele que apresentou o melhor desempenho.

As Figuras 4.27 e 4.28 apresentam para os sistemas IEEE-57 e IEEE-118 os respectivos perfis de magnitudes de tensão e de ângulo, obtidos com: o fluxo de carga convencional, para o caso base; com os métodos do fluxo de carga continuado proposto e com o fluxo de carga ótimo. Observa-se que o ponto de partida para aplicação da metodologia de redução de perdas e do fluxo de carga ótimo, é um caso base obtido por um fluxo de carga convencional com os *tap's* dos transformadores fixos em 1,0.

As perdas de potência ativa para o caso base dos sistemas IEEE-57 e IEEE-118 são de 28,61 MW e 131,16 MW, respectivamente. Os valores das perdas de potência ativa total obtidos com o fluxo de carga ótimo foram de 23,33 MW para o sistema IEEE-57 barras, e de 108,04 MW para o sistema IEEE-118 barras. Enquanto que após a aplicação fluxo de carga continuado proposto, as perdas de potência ativa para esses sistemas foram de 24,27 MW e 115,05 MW, respectivamente. Assim, aplicação da metodologia de redução de perdas nos sistemas IEEE-57 e IEEE-118, conduz a uma redução nas perdas de 4,24 MW (14,87%) e 16,1 MW (12,28%) respectivamente, com o conseqüente aumento nas economias financeira. Observa-se que além da redução nas perdas, há uma melhora do perfil de tensão. Observa-se



- ×××× caso base utilizando a barra 1 como barra de folga, sem redução de perdas.
- após o procedimento de redução das perdas utilizando a barra 1 como barra de folga.
- obtido com um programa FCO, utilizando a barra 1 como barra de folga.

Figura 4.27 - Perfis de magnitude de tensão e de ângulo para o sistema IEEE-57.

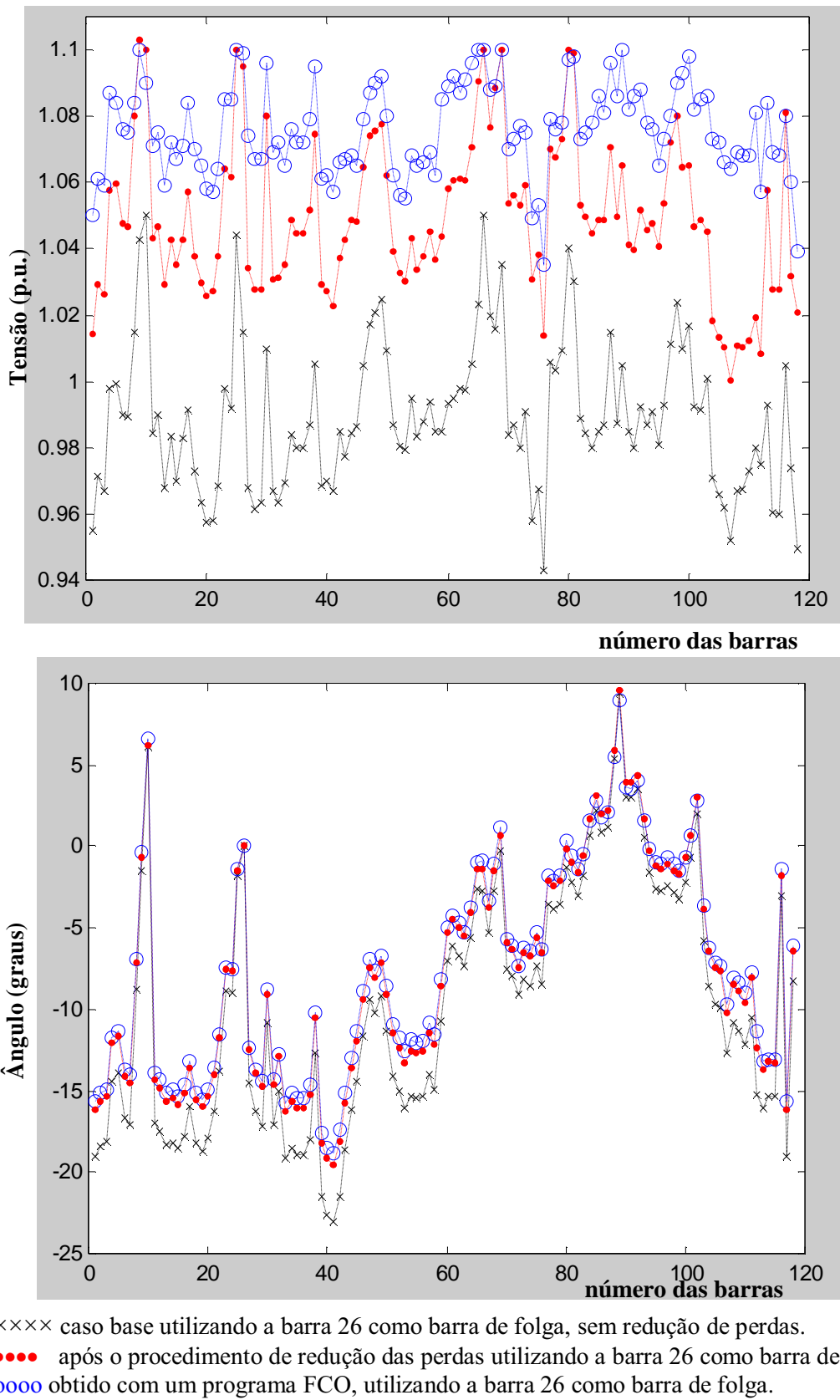


Figura 4.28 - Perfis de magnitude de tensão e de ângulo para o sistema IEEE-118.

também, que ambas foram obtidas sem praticamente nenhuma modificação nas injeções de potência ativa dos geradores.

Os resultados apresentados nestas figuras mostram também que com a aplicação do método do fluxo de carga continuado proposto é possível se obter pontos de operação próximos aos obtidos pelo fluxo de carga ótimo.

A Figura 4.29 apresenta para o sistema IEEE-57, as curvas PV obtidas partindo do estados fornecidos pelo fluxo de carga ótimo e após a última iteração da metodologia de redução de perdas proposta, juntamente com a curva PV do caso base. A melhora de 24,5% na margem de carregamento pode ser confirmada na Figura 4.29, onde a margem de carregamento sem redução de perdas (caso base) era de 1,5331 p.u. e, após a redução das perdas, passou a 1,6637 p.u., correspondendo a um aumento em 0,1306 p.u.

No caso do sistema IEEE-118, como se pode confirmar na Figura 4.30, que a melhora na margem de carregamento foi de 15,6%. Para esse sistema a margem de carregamento sem redução de perdas (caso base) era de 2,0817 p.u. e após a redução das perdas passou a 2,2503 p.u., correspondendo a um aumento de 0,1686 p.u. Como se pode confirmar da figura, o aumento da margem de carregamento obtido partindo do estado fornecido pelo fluxo de carga ótimo é ligeiramente maior, 18%.

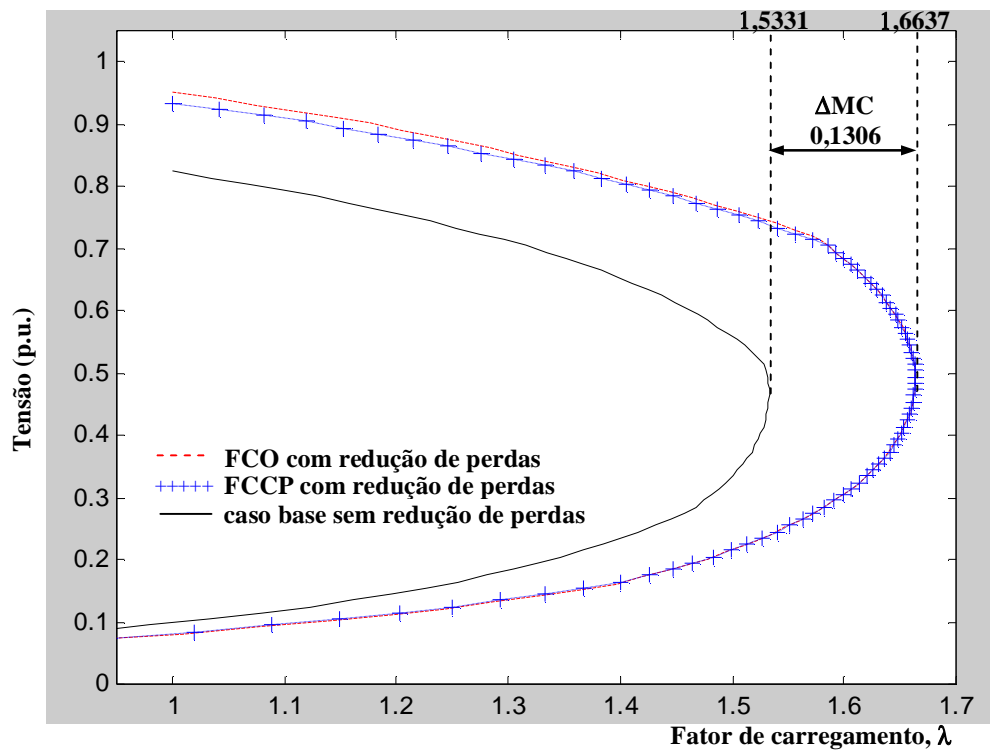


Figura 4.29 - Curvas PV inicial e final para o sistema IEEE-57.

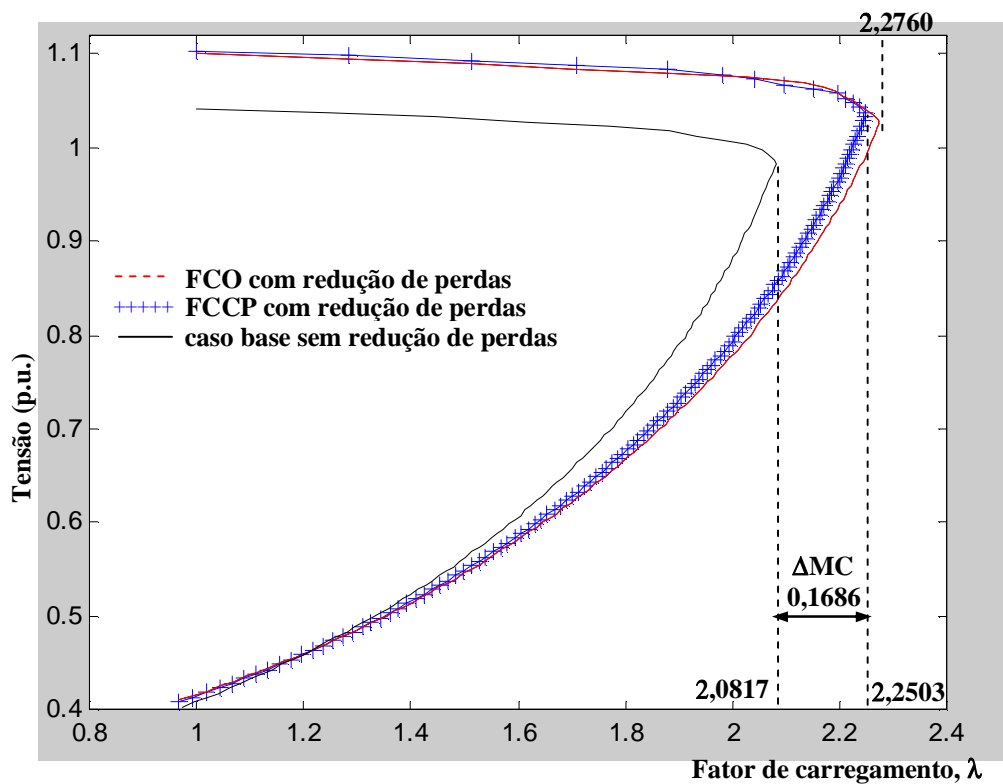


Figura 4.30 - Curvas PV inicial e final para o sistema IEEE-118.

4.6 – Desempenho do fluxo de carga continuado proposto para sistemas de grande porte

O objetivo deste item é o de apresentar o desempenho do método proposto para sistemas de médio porte e real de grande porte, no caso o sistema IEEE-300, de 300 barras e 411 linhas, e o sistema OTS-904 que é um sistema de 904 barras e 1283 linhas correspondente a uma parte do sistema sudoeste Americano.

Nos procedimentos de redução de perdas nesses sistemas a tolerância adotada para os *mismatches* foi de 10^{-6} p.u., enquanto que para o traçado das curvas PV foi de 10^{-5} p.u. Adotou-se um número máximo de iterações igual a 20. Em ambos os procedimentos, os valores adotados para os *tap's* foram de 1,0 p.u., enquanto que os valores limites adotados para as tensões da barra de folga e das barras PV foram $V^{\min} \leq V \leq V^{\max}$, sendo V^{\min} igual a 0,90 p.u. e V^{\max} igual a 1,10 p.u. para ambos os sistemas. Os valores iniciais adotados para o parâmetro da continuação (μ) foram de -0,2 MW e -0,5MW para os sistema IEEE-300 e OTS-904, respectivamente. O próximo ponto atual é computado pela equação (4.5). Este procedimento é repetido até o fluxo de carga continuado não convergir.

Da mesma forma que ocorreu para todos os sistemas já analisados, observa-se que após a redução das perdas há uma melhora do perfil de tensão em relação ao do caso base.

Para o sistema IEEE-300 observou-se que a menor magnitude de tensão para o caso base foi na barra 526 e após a aplicação do método proposto foi na barra 9033, sendo os respectivos valores iguais a 0,8636 p.u. e 0,9156 p.u. Para o sistema OTS-904 a menor magnitude de tensão tanto para o caso base quanto após a aplicação do método proposto foi na barra 277, sendo os respectivos valores iguais a 0,8681 p.u. e 0,9000 p.u. Em ambos os sistemas as máximas magnitudes de tensão não foram maiores que o valor máximo de 1,1 p.u.

A tabela 4.14 apresenta para os dois sistemas, os valores das perdas ativa e reativa série totais após a aplicação da metodologia proposta para a redução das perdas. Observa-se

da tabela que a maior redução nas perdas ativa e reativa série totais ocorrem para o sistema IEEE-300.

Na tabela 4.15 observam-se os respectivos aumentos da potência reativa fornecida pelos *shunts* das linhas de transmissão e as variações totais da potência reativa gerada pelas barras de folga e *PV's*. Novamente, observa-se claramente a contribuição da potência reativa fornecida pelos *shunts* das linhas de transmissão, bem como da redução da perda de potência reativa nos elementos séries das linhas de transmissão, com a conseqüente redução da potência reativa total gerada pelas barras de folga mais as *PV's*, como se pode observar da última coluna da tabela 4.15.

Tabela 4.14 – Redução das perdas ativa e reativa série totais.

Sistema	Barra de folga	Redução na perda total					
		Ativa (MW)			Reativa série (MVar)		
		Caso base	Final	Redução	Caso base	Final	Redução
IEEE-300	7049	421,5983	390,5984	31,0000	5589,485	5170,518	418,967
OTS-904	882	751,7768	743,3768	8,4000	16115,78	15917,07	198,71

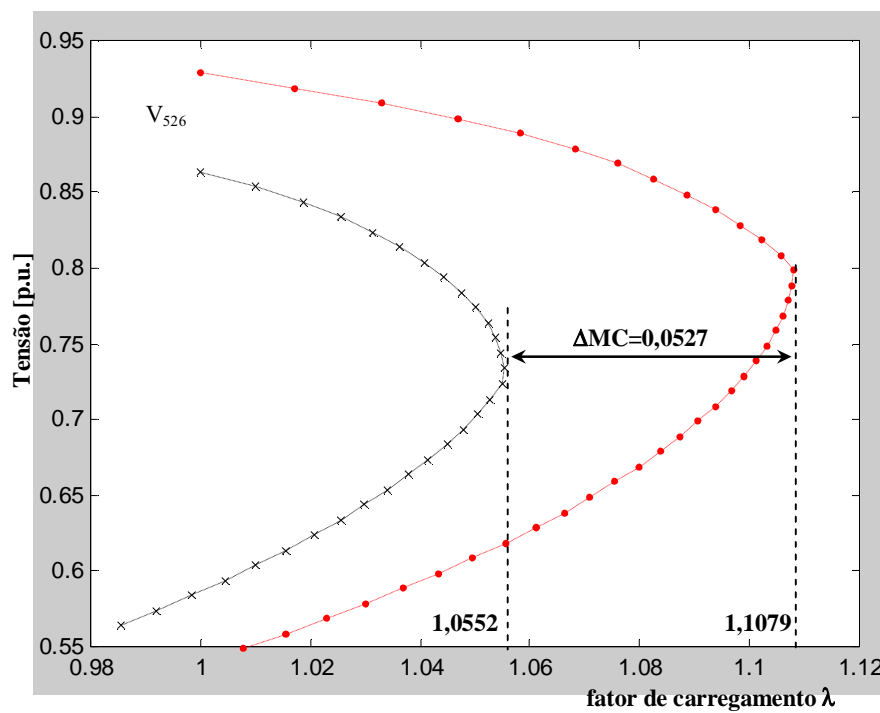
Tabela 4.15 – Aumento da potência reativa fornecida pelos *shunts* das linhas de transmissão e variação total da potência reativa gerada pelas barras de folga e *PV's*, com a redução da perda ativa total.

Sistema	Barra de folga	Variações da potência reativa (MVar)					
		<i>Shunts</i> das linhas de transmissão			Potência reativa gerada		
		Caso base	Final	Aumento	Caso base	Final	Redução
IEEE-300	7049	5837,05	6324,37	487,32	6838,17	6114,34	723,84
OTS-904	882	7175,91	7307,14	131,23	13438,94	13148,66	290,28

As Figuras 4.31 e 4.32 apresentam para o sistema IEEE-300 e OTS-904, as curvas PV para as respectivas barras críticas 526 e 138, cujas magnitudes de tensão foram utilizadas como parâmetro da continuação durante o traçado da curva PV, para o caso base e para os casos após a redução das perdas. Das figuras e da Tabela 4.16 pode-se verificar o aumento da margem de carregamento de ambos os sistemas.

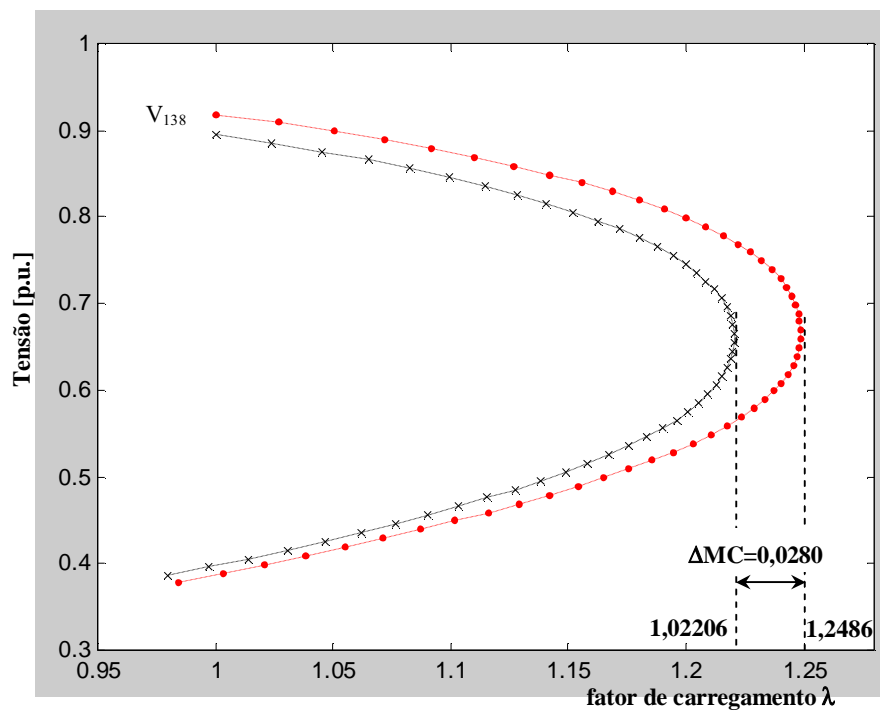
Tabela 4.16 – Margem de carregamento.

Sistema	Barra de folga	Margem de carregamento (MC)			
		Ponto de máximo carregamento (p.u.)		Aumento da MC (ΔMC)	
		Caso base	Após a redução	(p.u.)	%
IEEE-300	7049	1,0552	1,1079	0,0527	95,5
OTS-904	882	1,2206	1,2486	0,0280	12,7



×××× caso base (barra 7049 como barra de folga sem redução de perdas)
 •••• após o procedimento de redução das perdas

Figura 4.31 - Curva PV's do sistema IEEE-300 barras.



- ×××× caso base (barra 882 como barra de folga sem redução de perdas)
- após o procedimento de redução das perdas

Figura 4.32 - Curvas PV's do sistema OTS-904 barras.

Capítulo 5

CONCLUSÕES

5.1 Introdução

Os métodos da continuação são considerados como poderoso ferramental na análise de fluxo de carga, podendo ser utilizados quando são encontradas dificuldades de convergência, traduzidas pela singularidade da matriz Jacobiana, dos métodos convencionais. Esses métodos permitem a determinação do ponto de máximo carregamento e de máxima transferência de potência, bem como de todas as possíveis soluções das equações de fluxo de carga, ou seja, a curva PV completa, constituindo-se a base para a avaliação da segurança e da estabilidade de tensão (MANSOUR, 1993).

5.2 Contribuições

A deficiência de potência reativa numa região do sistema pode causar um aumento das perdas tanto nesta região como no sistema todo. Isso porque o suprimento desses reativos deve ser efetuado por geradores muitas vezes mais distantes da região de interesse, fazendo com que correntes elevadas percorram o sistema. Com base nisso, nesta tese foi proposto a modificação do fluxo carga continuado para efetuar-se a redução da perda total de potência

ativa visando com isso aumentar a margem de carregamento do sistema. A redução das perdas é alcançada por intermédio do redespacho de potência reativa.

O fluxo de carga continuado proposto difere em alguns aspectos do fluxo de carga continuado usado para obter o ponto de máximo carregamento. No fluxo de carga continuado o objetivo é obter o ponto de máximo carregamento da curva PV. Por outro lado, no fluxo de carga continuado proposto, o objetivo é o de melhorar a margem de carregamento por meio da redução das perdas usando o método da continuação.

Ao contrário do fluxo de carga continuado, no qual os valores da carga e da geração de potência ativa do caso base são aumentadas em uma direção preestabelecida, no método proposto elas permanecem fixas. No fluxo de carga continuado as barras PV são tratadas como simples barras PV e, enquanto suas respectivas potências reativas geradas estão entre seus respectivos limites, suas respectivas equações não estão presentes na matriz Jacobiana. Assim, suas magnitudes de tensões permanecem fixas nos seus respectivos valores especificados, sendo tratadas como variáveis independentes. No caso de violação, a barra PV é alterada para tipo PQ, com Q sendo especificado no valor limite e a sua magnitude de tensão é considerada como uma incógnita do problema. Por outro lado, no fluxo de carga continuado proposto as magnitudes de tensões nas barras PV podem variar e são calculadas para o valor especificado de perda total de potência ativa, sendo tratadas portanto, como variáveis dependentes.

Na metodologia proposta a geração de potência ativa nas barras de controle de tensão são mantidas constantes nos respectivos valores do caso base, enquanto que o valor da perda total de potência ativa é pré-ajustado através de um novo parâmetro. Após se obter a solução do caso base por meio de um fluxo de carga convencional e se ter definido um passo para redução das perda total de potência ativa, o fluxo de carga continuado proposto é usado para calcular as demais soluções até que um ponto, neste trabalho definido como ponto de mínima

perda, seja atingido. A técnica de previsão adotada foi a trivial, ou polinomial modificada de ordem zero, na qual o valor do parâmetro da continuação é prefixado. Assim, através do método proposto, é possível se especificar o valor desejado de variação na perda ativa total na transmissão, e a sua solução provê o ponto de operação para o qual a perda ocorre. A geração de potência ativa da barra adotada como barra de folga é reprogramada para fechar o balanço de potência ativa do sistema, ou seja, o seu valor variará a fim de acomodar, além da diferença entre a potência ativa gerada e a consumida de todo o sistema, a redução da perda total de potência ativa na transmissão.

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que a utilização do método proposto proporciona não só uma redução das perdas e, conseqüentemente, dos custos operacionais, mas também um aumento do ponto de máximo carregamento, isto é, da margem de estabilidade do sistema.

O aumento da margem de estabilidade de tensão é alcançado juntamente com a melhoria do perfil da tensão e com o aumento das reservas de reativos nos geradores, não tendo, no entanto, ocorrido mudanças relevantes na tensão crítica. Manter o valor da tensão crítica tão baixa quanto esta possa ser em relação à tensão normal de operação sem comprometer, conseqüentemente, o perfil geral de tensão é uma característica recomendada em (WECC, 1998); (FTCT, 1999). Observa-se que as melhorias na margem de carregamento, conseguidas através da redução das perdas, são significativas, uma vez que estas foram obtidas sem nenhuma alteração nas injeções de potência ativa, exceção feita à barra de folga.

Foram esclarecidos como se dá o balanço de reativo do sistema elétrico de potência durante o processo de redução da perda ativa total. Em geral, há uma redução da potência reativa total gerada pela barra de folga e as barras de geração como conseqüência direta dos aumentos da potência reativa fornecida pelos *shunts* das linhas de transmissão e de barras,

bem como da redução da perda de potência reativa nos elementos séries das linhas de transmissão.

O fluxo de carga continuado proposto possibilita a redução das perdas a partir de um caso base, assim, não se faz necessário realizar um processo de tentativa e erro para atingir o critério desejado. Por outro lado, as análises mostram que há a necessidade de se escolher uma barra de folga para se realizar o processo de redução da perda ativa total, uma vez que sua escolha influenciara o estado final obtido. Um outro ponto importante é que com o método proposto é possível se obter pontos de operação muito próximos aos obtidos por meio de um programa de fluxo de carga ótimo, o que mostra que o método proposto pode ser uma alternativa viável para a aplicações de estudos da operação para reforçar a estabilidade estática de tensão.

Outro aspecto importante é o de que o método proposto é de fácil incorporação a qualquer programa de Fluxo de Carga.

5.3 Sugestões para futuros trabalhos

Algumas sugestões para dar continuidade aos trabalhos iniciados por esta tese:

- Tendo em vista que para se realizar o processo de redução da perda ativa total a partir de um caso base há a necessidade de se escolher uma barra de folga, uma vez que sua escolha influenciará o estado final obtido, uma necessidade seria a de se investigar e definir um critério para se estabelecer qual barra seria a mais apropriada como barra de folga;

- A escolha do valor ótimo para o passo do parâmetro da continuação objetivando a redução do número de pontos e de iterações necessárias para a obtenção do ponto de mínimas perdas;
- Em (ZAMBRONI, 1998) é mostrado que a redução da perda total de potência ativa num grande sistema de potência não afeta muito sua margem de carregamento, mas que o controle das perdas em uma área crítica do sistema pode apresentar resultados mais satisfatórios. Seria interessante avaliar os efeitos produzidos na margem de carregamento do sistema realizando a redução das perdas em uma área específica do sistema, no caso a área crítica, e compará-los com os obtidos com a redução da perda total de potência ativa;
- Analisar a utilização de fatores de participação dos geradores a fim de definir um redespacho que proporcione um melhor ganho de margem. Os fatores de participação poderiam ser obtidos pela análise de sensibilidade, dos autovalores e os correspondentes autovetores, direito e esquerdo, da matriz Jacobiana modificada do fluxo de carga continuado proposto, procurando determinar os geradores que mais contribuem para a redução das perdas e o aumento da margem de carregamento;
- Considerar na metodologia proposta para a redução da perda total de potência ativa na transmissão, além da equação da perda ativa total na transmissão, a equação da potência reativa injetada das barras cuja magnitude de tensão sejam reguladas por transformadores com controle automático de *tap*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(AFFONSO, 2004) AFFONSO, C. M. AFFONSO, C. M. **Planejamento de curto prazo da operação incluindo critérios de estabilidade de tensão**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

(AJJARAPU; CHRISTY, 1992) AJJARAPU, V.; CHRISTY, C. AJJARAPU, V.; CHRISTY, C. The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 7, n.1, p. 416-423, 1992.

(AJJARAPU; LAU; BATTULA 1994) AJJARAPU, V.; LAU, P.L.; BATTULA S. An optimal reactive power planning strategy against voltage collapse. **IEEE Transactions Power Systems**, New York, v. 9, n. 2, p. 906-917, 1994.

(ALVES et al. 1999) ALVES, D. A.; DA SILVA, L. C. P.; CASTRO, C. A.; DA COSTA, V. F. Modified Newton and fast decoupled load flows for tracing the power systems bifurcations diagrams. In: PROCEEDINGS OF THE IEEE POWER TECH'99, 1999, Budapest – Hungary. **Proceedings of the...** Budapest: IEEE, 1999. p.1-6. (paper BPT99).

(ALVES, 2000) ALVES, D. A. **Obtenção do ponto de máximo carregamento em sistemas elétricos de potência utilizando novas técnicas de parametrização para o método de continuação**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

(ALVES et al. 2000) ALVES, D. A.; DA SILVA, L. C. P.; CASTRO, C. A.; DA COSTA, V. F. Continuation load flow method parameterized by power losses. In: PROCEEDINGS OF THE IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY, Winter Meeting, 2000, Singapore. **Proceedings of the...** Singapore: IEEE, 2000. v.1, p.1123-1128.

(ALVES et al. 2002-I) ALVES, D. A.; DA SILVA, L. C. P.; CASTRO, C. A.; DA COSTA, V. F. Esquemas alternativos para o passo de parametrização do método da continuação baseados em parâmetros físicos. **Controle & Automação-SBA**, Campinas, v. 13, n. 3, p. 275-289, 2002.

(ALVES et al. 2002-II) ALVES, D. A.; DA COSTA, G. R. M. A ALVES, D. A.; DA COSTA, G. R. M. A Geometric interpretation for transmission real losses minimization through the optimal power flow and its influence on voltage collapse. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, v. 62, p. 111-116, 2002.

(ALVES et al. 2003) ALVES, D. A.; DA SILVA, L. C. P.; CASTRO, C. A.; DA COSTA, V. F. Continuation fast decoupled power flow with secant predictor. **IEEE Transactions Power Systems**, New York, v. 18, p. 1078-1085, 2003.

(ALVES et al. 2004-I) ALVES, D. A.; DA SILVA, L. C. P.; CASTRO, C. A.; DA COSTA, V. F. Parameterized fast decoupled power flow methods for obtaining the maximum loading point of power systems-part-i: mathematical modeling. **Electric Power Systems Research**, Lusanne, v. 69, p. 93-104, 2004.

(ALVES et al. 2004-II) ALVES, D. A.; DA SILVA, L. C. P.; CASTRO, C. A.; DA COSTA, V. F. Parameterized fast decoupled power flow methods for obtaining the maximum loading point of power systems-part-ii: performance avaluation. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, v. 69, p. 105-109, 2004.

(CAÑIZARES et al. 1992) CAÑIZARES, C. A.; ALVARADO, F. L.; DEMARCO, C. L.; DOBSON, I.; LONG, W. F. Point of collapse methods applied to ac/dc power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 7, n. 2, p. 673-683, 1992.

(CAÑIZARES, 1995) CAÑIZARES, C. A. Conditions for saddle-node bifurcations in AC/DC power systems. **Electrical Power and Energy Systems**, Guildford, v. 17, p. 61-68, 1995.

(CHEN; WANG, 1997) CHEN, J. F.; WANG, W.M. Stability limit and uniqueness of voltage solutions for radial power networks. **Electric Machines and Power Systems**, Washington, v. 25, p. 247-261, 1997.

(CHEN; HSU, 2000) CHEN, M.; HSU, C. Reactive power planning and operations in the deregulates power utilities. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRIC UTILITY DEREGULATION AND RESTRUCTURING AND POWER TECHNOLOGIES, 2000, London. **Proceedings of the...** London: S.n., 2000. p. 4-7.

(CHIANG et al. 1995) CHIANG, H. D.; FLUECK, A.; SHAH, K. S.; BALU, N. CPFLOW: A practical tool for tracing power system steady state stationary behavior due to load and generation variations. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 10, n. 2, p. 623-634, 1995.

(CHIANG et al. 1999) CHIANG, LI, H.; YOSHIDA, H.; FUKUYAMA Y.; NAKANISHI, Y. The generation of zipv curves for tracing power system steady state stationary behavior due to load and generation variations. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY, SUMMER MEETING, 1999, Edmonton. **Proceedings of the...** Edmonton: IEEE, 1999. v.2, p. 647-651.

(CIGRE, 1989) CIGRE STUDY COMMITTEE 38 WORKING GROUP 01 TASK FORCE 03 Reactive power compensation analyses and planning procedure. **CIGRE Publication**, p.90, 1989.

(CIGRE, 1992) CIGRE WORKING GROUP TASK FORCE Modelling of voltage collapse including dynamic phenomena. **Technical report of task force**, 1992.

(DA COSTA; LANGONA; ALVES, 1998) DA COSTA, G. R. M.; LANGONA, K.; ALVES, D. A. A new approach to the solution of the optimal power flow problem based on the modified newton's method associated to an augmented lagrangian function. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY, 1998, Beijing. **Proceedings of the...** Beijing: IEEE, 1998. p. 909-913.

(DOMMEL; TINNEY, 1968) DOMMEL, H. W.; TINNEY, W.F. Optimal power flow solutions. **IEEE Transactions Power Apparatus and System**, New York, v. 87, p. 1866-1876, 1968.

(FETTE; VOSS, 1999) FETTE, M.; VOSS, J. Calculation of all algebraic solutions of electrical power systems by continuation method. In: [INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRIC POWER ENGINEERING POWERTECH, 1999, Budapest. Abstracts records... Budapest: IEEE, 1999.](#) p. 419-516. (Paper BPT99).

(FLATABO; OGNEDAL; CARLSEN, 1990) FLATABO, N.; OGNEDAL, R.; CARLSEN, T. Voltage stability condition in a power transmission system calculated by sensitivity methods.

IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 5, n. 4, p. 1286-1293, 1990.

(FLUECK; DONDETTI, 2000) FLUECK, A. J.; DONDETTI, J. R. A new continuation power flow tool for investigating the nonlinear effects of transmission branch parameter variations. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 15, p. 223-227, 2000.

(FTCT, 1999) PRADA, R. B. ; MARTINS, A. C. B. (FORÇA TAREFA “COLAPSO DE TENSÃO”) critérios e metodologias estabelecidas 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. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, XV SNPTEE, 1999, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: S.n., out, 1999.

(FRERIS; SASSON, 1968) FRERIS, L. L.; SASSON, A. M. Investigation of the load-flow problem. **Proceedings of IEE**, New York, v. 115, n. 10, p. 1459-1470, 1968.

(GALIANA; ZENG, 1992) GALIANA, F. D., ZENG, Z. C. Analysis of the load flow behavior near a jacobian singularity. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v.7, n.3, p 1362-1369, 1992.

(GAO; MORISON; KUNDUR, 1996) GAO, B.; MORISON, G. K.; KUNDUR, P. Towards the development of a systematic approach for voltage stability assessment of large-scale power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 11, n. 3, p. 1314-1324, 1996.

(GARBELINI et al. 2005) GARBELINI, E.; BONINI, A. N.; ALVES, D. A.; RIGHETO, E.; SILVA, L. C. P.; CASTRO, C. A. Fluxo de carga continuado: uma nova técnica de parametrização geométrica. In: LATIM-AMERICAM CONGRESS: ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 6, 2005, Mar del Plata. **Congress of the...** Mar del Plata: IEEE, 2005. p.1-8.

(GLOVER; SARMA, 1989) GLOVER, J. D.; SARMA, M. **Power system analysis and design**. Boston: MA: PWS-Kent, 1989.

(IBA et al. 1991) IBA, K.; SUZUKI, H.; EGAWA, M.; WATANABE, T. Calculation of Critical Loading Condition with Nose Curve Using Homotopy Continuation Method. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 6, n. 2, p. 585-593, 1991.

(KUNDUR, 1994) KUNDUR, P. **Power system stability and control**. New York: McGraw-Hill, 1994. 1176p.

(KUNDUR et al. 2004) KUNDUR, P.; PASERBA, J.; AJJARAPU, V.; ANDERSSON, G.; BOSE, A.; CAÑIZARES, C.; HATZIARGYRION, N.; HILL, D.; STANKOVIC, A.; TAYLOR, C.; VAN CUTSEM, T.; VITTAL, V. Definition and classification of power system stability, IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v.19, n.2, p.1387-1401, 2004.

(LEE; KIM, 2002) LEE, S. J.; KIM, K. J. Re-construction of Jacobian matrix by angle reference transposition and application to new penalty factor calculation. **IEEE Power Engineering Review**, New York, v. 22, p. 47-50, 2002.

(MENEZES, 2002) MENEZES, V. T. **Melhoria na margem de estabilidade de tensão no pré-despacho da operação de sistemas de energia elétrica via otimização de reativos.** 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

(MOGHAVVEMI; JASMON, 1997) MOGHAVVEMI, M.; JASMON, G. B. New method for indicating voltage stability condition in power system. In: PROCEEDINGS OF THE IEE INTERNATIONAL POWER ENGINEERING CONFERENCE, 1997, Singapore. **Proceedings of the...** Singapore: S.n., 1997.

(MONTICELLI, 1983) MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica.** São Paulo: Blucher, 1983.

(ONS, 2001) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). *Diretrizes e critérios para estudos elétricos, procedimentos de rede, submódulo 23.3*, julho 2001. disponível em: <www.ons.org.br>. Acesso em: 15 jun. 2006.

(PETERSON; MEYER, 1971) PETERSON, N. M.; MEYER, W. S. Automatic adjustment of transformer and phase-shifter taps in the Newton power flow. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v.90, n. 1, p. 103-108, 1971.

(SEKINE, et al. 1992) SEKINE, Y.; TAKAHASHI, K.; ICHIDA, Y.; OHURA, Y. ; TSUCHIMORI, N. Method of analysis and assessment on power system voltage phenomena, and improvements including control strategies for greater voltage stability margins. In: PROCEEDINGS OF THE CIGRE, 1992. **Proceedings of the...** Paris: IEEE, 1992. p.38-206, 1992.

(SEYDEL, 1994) SEYDEL, R. **From Equilibrium to chaos: practical bifurcation and stability analysis**. 2. ed. New York: Springer - Verlag, 1994. 407p.

(SHARIF, et al. 2000) SHARIF S. S.; TAYLOR J. H.; HILL E. F.; SCOTT B. ; DALEY D. Real – time implementation of reactive power flow. **IEEE Power Engineering Review**, New York, p. 47-51, 2000.

(STOT; ALSAC, 1974) STOT B.; ALSAC O. Fast decoupled load flow. *IEEE Transactions on PAS*, New York, v. 93, p. 859-869, 1974.

(TARE; BIJWE, 1997) TARE R. S.; BIJWE P. R. Look-ahead approach to power system loadability enhancement. **IEE Proceedings–Generation Transmission and Distribution**, New York, v. 144, n. 4, p. 357-362, 1997.

(TAYLOR, 1994) TAYLOR, C. W. **Power system voltage stability**. New York: MacGraw-Hill, 1994. 273p.

(TOGNETE, 1997) TOGNETE, A. L. **Um método de cálculo de margem de segurança ao colapso de tensão utilizando análise de sensibilidade**. 1997. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

(VAN CUTSEM; MAILHOT, 1997) VAN CUTSEM T. ; MAILHOT R., Validation of a fast voltage stability analysis method on the hydro-québec system. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 12, p. 282-292, 1997.

(VAN CUTSEM, 1998) VAN CUTSEM, T.; VOURNAS, C. **Voltage stability of electric power system**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998. 376p.

(VAN CUTSEM, 2000) VAN CUTSEM, T. Voltage instability: phenomena, countermeasures and analysis methods. **Proceedings of the IEEE**, New York, v. 88, n. 2, p. 208-227, 2000.

(WANG; DA SILVA; XU, 2000) WANG Y.; DA SILVA L. C. P.; XU, W. Investigation of the relationship between ill-conditioned power flow and voltage collapse. **IEEE Power Engineering Review**, New York, PER-20, p. 43-45, 2000.

(WECC, 1998) WECC - Reactive power reserve work group. **Final report, voltage stability criteria, undervoltage load shedding strategy, and reactive power reserve monitoring methodology**, 158 p. 1998 disponível em: http://www.wecc.biz/documents/library/procedures/operating/PCC_ReactiveReserve_07-11-03.pdf. Acesso em: 15 ago. 2007.

(WGVS, 1993) (WGVS, 1993) IEEE special publication 93TH0620-5-PWR. *Suggested techniques for voltage stability analysis*. Prepared by IEEE Working Group on Voltage Stability, Publication, 1993.

(XU; MASOUR; HARRINGTON, 1993) XU, W.; MASOUR, Y.; HARRINGTON, P. G. Planning methodologies for voltage stability limited power systems. **Electric Power & Energy Systems**, New York, v. 15, n. 4, p.221-228, 1993.

(YONG-HUEI; CHING-TSAI; WEN-WEI, 1997) YONG-HUEI, H.; CHING-TSAI, P.; WEN-WEI, L. Fast calculation of a voltage instability index of power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v.12, n. 4, p. 424-429, 1997

(ZAMBRONI, 1998) ZAMBRONI, A. C. S. Tangent vector applied to voltage collapse and loss sensitivity studies., **Electric Power Systems Research**, v. 47, p.65-70, 1998.

Apêndice A

ARTIGOS PUBLICADOS INERENTES AO DOUTORADO

MALANGE, F. C. V., ALVES D. A., DA SILVA L. C. P., CASTRO C. A., DA COSTA G. R.

M., Real Power Losses Reduction and Load Margin Improvement via Continuation Method. In: *IEEE Transactions on Power Systems*, EUA, v. 19 (3), p 1690-1692, 2004

MALANGE, F. C. V., ALVES D. A., DA SILVA L. C. P., CASTRO C. A., DA COSTA G.

R. M., Alternative Continuation Method for Loading Margin Improvement and Transmission Losses Reduction. In: *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2004 IEEE/PES*, São Paulo (SP), AR–Power System Analysis, v. 1, pp. 11-16, 2004.

MALANGE, F. C. V., AMORIN E. S., ALVES D. A., Melhoria na Margem de Carregamento

Através da Redução das Perdas de Potência Ativa na Transmissão Utilizando Método da Continuação. In: *3^o Congresso Temático de Aplicações de Dinâmica e Controle da SBMAC*, Ilha Solteira (SP), Editoração Eletrônica – CD: pp. 1133-1140, 2004.

MALANGE, F. C. V., ALVES D. A., DA COSTA G. R. M., Redução de Perdas de

Transmissão Através do Método da Continuação In: *World Congress on Engineering*

and Technology Education – WCETE, Guarujá/Santos (SP), Editoração Eletrônica –
CD: pp. 689-693, 2004.