



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

**OBTENÇÃO DO PONTO DE MÁXIMO CARREGAMENTO EM
SISTEMAS DE POTÊNCIA VIA FLUXO DE
CARGA COM OTIMIZAÇÃO DE PASSO**

Autora: Beatriz de Lima Tavares

Orientador: Prof. Dr. Carlos de Castro Jr.

Co-Orientador: Dr. Manfred Fritz Bedriñana Aronés

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

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro Jr.

Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva

Dr. Luiz Cláudio de Araújo Ferreira

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

T197o Tavares, Beatriz de Lima
Obtenção do ponto de máximo carregamento em sistemas de potência via fluxo de carga com otimização de passo / Beatriz de Lima Tavares. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.

Orientadores: Carlos Alberto de Castro Junior, Manfred Fritz Bedriñana Aronés.

Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Sistemas de potência. 2. Sistemas de energia elétrica. 3. Sistemas de energia elétrica - Transmissão. I. Castro Junior, Carlos Alberto de. II. Aronés, Manfred Fritz Bedriñana. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

Título em Inglês: Computing the maximum loading point in power systems based on load flow with step size optimization

Palavras-chave em Inglês: Power systems, Electric power systems, Electric power systems - Transmition

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Luiz Carlos Pereira da Silva, Luiz Cláudio de Araújo Ferreira

Data da defesa: 21/06/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidata: Beatriz de Lima Tavares

Data da Defesa: 21 de junho de 2010

Título da Tese: "Obtenção de Ponto de Máximo Carregamento em Sistemas de Potência via Fluxo de Carga com Otimização de Passo"

Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro Júnior (Presidente): _____

Dr. Luiz Claudio de Araujo Ferreira: _____

Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva: _____

Agradecimentos

Seria impossível seguir adiante se não fosse a força daqueles que estão sempre comigo. Por isso, não poderia deixar de reconhecer os que foram fundamentais nessa conquista.

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade recebida de poder estar presente no curso de mestrado em Engenharia Elétrica da FEEC – UNICAMP, e por ter me dado muita persistência, força, coragem e paciência nos momentos mais difíceis.

Ao professor Castro um agradecimento especial pela confiança depositada no meu trabalho e pela oportunidade única em minha vida, sem mencionar todo o conhecimento transmitido e muita dedicação.

Ao Manfred pela co-orientação e amizade, além de todas as horas que dedicou contribuindo para o meu crescimento, inclusive em assuntos não ligados a este trabalho.

À minha mãe Silvelena, ao meu pai Orlando, e às minhas irmãs Thais e Flávia, por todo carinho, amor, principalmente nos momentos em que mais precisava.

Ao Lucas, por todo apoio, compreensão e companheirismo.

Às minhas queridas companheiras de laboratório, por quem desenvolvi uma amizade muito especial durante esta jornada, e a todos os colegas do DSEE.

A todos os professores deste curso, pelo imenso conhecimento adquirido.

A todos os amigos que compartilharam desta caminhada. Sem vocês nada disso seria possível.

Dedico este trabalho a Deus e a meus pais com todo carinho.

Resumo

Neste trabalho são apresentados dois métodos para a obtenção do ponto de máximo carregamento (PMC). Ambos os processos de cálculo baseiam-se nas propriedades do vetor normal à fronteira de factibilidade calculado próximo ao PMC através de um método de fluxo de carga com otimização de passo (FCOP). No primeiro método o processo é caracterizado pela obtenção de sucessivas aproximações do PMC a partir da região de infactibilidade. Pelo fato da fronteira de factibilidade não ser sempre convexa, algumas vezes o ponto obtido poderá cair na região factível. Neste caso, um novo método de cálculo do fator de carregamento que garante que o próximo ponto estará na região infactível é a principal contribuição. Já o segundo é um método rápido e prático para o cálculo do ponto de máximo carregamento (PMC), em que é adicionado um procedimento prático ao processo de cálculo global para incluir a informação do operador da rede com a definição de um erro aceitável no resultado final. O PMC é facilmente obtido após alguns passos, demonstrando a eficácia do método proposto. Os resultados de simulações com sistemas teste do IEEE e sistemas reais são apresentados para validar as duas metodologias.

Palavras-Chaves: Ponto de máximo carregamento, estabilidade de tensão, análise de fluxo de carga, otimização de passo.

Abstract

In this paper, two maximum loading point (MLP) calculation methods are proposed. In both cases, the calculation process is based on the properties of the normal vector to the feasibility boundary computed close to MLP, which is calculated by a load flow method with step size optimization (LFSSO). In the first method the process is characterized by obtaining consecutive approximations of the MLP from the infeasible region. Since the feasibility boundary contour in the neighborhood of the MLP may not be smooth, some of the computed points may fall within the feasible region. In this case, a new load factor calculation method that guarantees that the next solution will lay within the infeasibility region is the main contribution. The second one is a practical and fast method to obtain the MLP, where a practical procedure is added to the overall calculation process to include the operator's information on the acceptable error in the final result. The MLP is accurately obtained after just a few steps, demonstrating the efficiency of the proposed method. Simulation results for IEEE test and realistic systems are shown to validate both proposed methods.

Keywords: Maximum loading point, voltage stability, load flow analysis, step size optimization.

Sumário

| | |
|---|--------------|
| Lista de Figuras | xv |
| Lista de Tabelas..... | xvii |
| Lista de Símbolos..... | xix |
| Lista de Siglas | xxi |
| Trabalhos Publicados Pela Autora | xxiii |
| Capítulo 1 Introdução..... | 1 |
| 1.1 Cenário Atual..... | 1 |
| 1.2 Objetivo do Trabalho..... | 2 |
| 1.3 Estado da Arte | 4 |
| 1.4 Organização do Trabalho..... | 5 |
| Capítulo 2 Conceitos Básicos..... | 7 |
| 2.1 Estabilidade em sistemas elétricos de potência | 7 |
| 2.1.1 Estabilidade de Tensão..... | 8 |
| 2.2 Abordagem Estática do Fluxo de Carga e o Sistema de Potência | 15 |
| 2.3 Redes Mal Condicionadas | 19 |
| 2.4 Teoria de Bifurcação | 19 |
| 2.5 Autovalores e Autovetores | 20 |
| Capítulo 3 Cálculo de Ponto de Máximo Carregamento..... | 23 |
| 3.1 Equações de Fluxo de Carga | 23 |
| 3.2 Fluxo de Carga com Otimização de Passo | 24 |
| 3.3 Aplicações de FCOP na análise de estabilidade de tensão..... | 25 |
| 3.4 Método da Continuação..... | 28 |
| 3.5 Outros Métodos | 31 |
| 3.5.1 Ponto de Colapso..... | 32 |
| 3.5.2 Métodos de Otimização..... | 33 |
| 3.6 Método de Bedriñana (2008)..... | 33 |
| Capítulo 4 Métodos Propostos | 41 |
| 4.1 Método Proposto I..... | 41 |
| 4.1.1 Desempenho do método de Bedriñana (2008) na região factível | 41 |
| 4.1.2 Técnica de Corte de Carga Conservadora | 43 |
| 4.1.3 Técnica de Corte de Carga Estendida | 45 |
| 4.1.4 Testes e Resultados | 46 |
| 4.2 Método Proposto II..... | 52 |

| | | |
|-----------------------------------|---|-----------|
| 4.2.1 | Testes e Resultados | 56 |
| 4.2.2 | Simulações com sistemas reais | 65 |
| 4.2.3 | Simulações Utilizando outros cortes de carga..... | 66 |
| Capítulo 5 | Conclusões..... | 69 |
| 5.1 | Considerações Finais e Sugestões para Trabalhos Futuros | 69 |
| 5.2 | Sugestões para Trabalhos Futuros | 71 |
| Apêndice I | Outra alternativa testada | 73 |
| Referências Bibliográficas | | 77 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1: Classificação de estabilidade de sistemas de potência | 8 |
| Figura 2.2: Ilustração do conceito de estabilidade | 10 |
| Figura 2.3: Queda monotônica de tensão | 11 |
| Figura 2.4: Subdivisões da estabilidade de tensão: pequenas e grandes perturbações | 12 |
| Figura 2.5: Comportamento de diversos índices de estabilidade de tensão | 14 |
| Figura 2.6: (a) Rede Exemplo; (b) Espaço de Parâmetro I; (c) Espaço de Parâmetro II. | 17 |
| Figura 2.7: Curva PV | 18 |
| Figura 2.8: Aproveitamento do autovetor esquerdo..... | 21 |
| Figura 3.1: Características do FCOP no espaço de parâmetros de carga..... | 26 |
| Figura 3.2: Sistema exemplo de duas barras | 27 |
| Figura 3.3: Curva da fronteira de factibilidade e o FCOP | 27 |
| Figura 3.4: Esquema preditor-corretor | 29 |
| Figura 3.5: Características do FCOP no espaço de parâmetro de carga para diferentes ρ | 35 |
| Figura 3.6: Passo de corte de carga no último PMC calculado quando ρ está na região infactível (Σ é convexa)..... | 36 |
| Figura 3.7: Processo de obtenção do PMC através de (3.23)..... | 39 |
| Figura 3.8: Fronteira de factibilidade e a primeira iteração de (Bedriñana, 2008) | 40 |
| Figura 4.1: Processo de cálculo do PMC com o método (Bedriñana, 2008) para o sistema IEEE 57..... | 42 |
| Figura 4.2: Processo de cálculo do PMC com o método de (Bedriñana, 2008) para o sistema IEEE 118 | 43 |
| Figura 4.3: Zoom da figura 4.1 na primeira iteração para o sistema IEEE 57 | 44 |
| Figura 4.4: Zoom da figura 4.2 entre as iterações 4 e 5 para o sistema IEEE 118..... | 44 |
| Figura 4.5: Passo de corte de carga no último PMC calculado quando ρ está na região infactível, apresentando o corte $\Delta S_{cc,2}$ | 45 |
| Figura 4.6: Processo de obtenção do PMC utilizando o método proposto para o sistema teste IEEE 57 barras | 48 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.7: Processo de obtenção do PMC utilizando o método proposto para o sistema teste IEEE 118 barras | 48 |
| Figura 4.8: Processo de obtenção do PMC utilizando (Bedriñana, 2008) no sistema teste IEEE 118 barras com contingência em 8-5..... | 50 |
| Figura 4.9: Processo de obtenção do PMC utilizando o método proposto para o sistema teste IEEE 118 barras com contingência em 8-5..... | 50 |
| Figura 4.10: Zoom no processo de obtenção do PMC utilizando (Bedriñana, 2008) no sistema teste IEEE 118 barras com contingência em 8-5..... | 51 |
| Figura 4.11: Zoom no processo de obtenção do PMC utilizando o método proposto para o sistema teste IEEE 118 barras com contingência em 8-5..... | 52 |
| Figura 4.12: Faixa de soluções aceitáveis | 54 |
| Figura 4.13: Ilustração de um processo iterativo | 55 |
| Figura 4.14: Simulação para o sistema de duas barras usando o algoritmo proposto II | 57 |
| Figura 4.15: Evolução do Processo Iterativo com o Algoritmo Proposto para IEEE 14 barras | 59 |
| Figura 4.16: Evolução do Processo Iterativo com o Algoritmo Proposto para IEEE 30 barras | 59 |
| Figura 4.17: Evolução do Processo Iterativo com o Algoritmo Proposto para IEEE 57 barras | 60 |
| Figura 4.18: Evolução do Processo Iterativo com o Algoritmo Proposto para IEEE 118 barras .. | 60 |
| Figura 4.19: Evolução do Processo Iterativo com o Algoritmo Proposto para IEEE 300 barras .. | 61 |
| Figura 4.20: Evolução do Processo Iterativo com o Algoritmo Proposto para IEEE 118 barras .. | 62 |
| Figura A.1: Corte de carga proposto | 74 |
| Figura A.2: Corte de carga $\Delta S_{cc,3}$ representado na curvatura correta da fronteira de carregamento | 75 |
| Figura A.3: Fronteira de carregamento com todos os cortes de carga estudados | 76 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| TABELA 4.1 Resultado da Simulação para o Sistema Teste IEEE 57 barras..... | 49 |
| TABELA 4.2 Resultado da Simulação para o Sistema Teste IEEE 118 barras..... | 49 |
| TABELA 4.3 Resultado da Simulação para o Sistema Teste IEEE 118 barras com contingência em 8 -5..... | 51 |
| TABELA 4.4 Análise de iterações e fluxo de carga entre o algoritmo proposto e o original | 63 |
| TABELA 4.5 Valores de ρ obtidos por diferentes métodos para $\rho(0)=6$, quando $x=\pm 5\%$ | 64 |
| TABELA 4.6 Comparação entre o algoritmo proposto e original quando $x=\pm 2,5$ para o sistema teste IEEE 118 barras | 64 |
| TABELA 4.7 Comparação entre o algoritmo proposto e original para sistemas reais | 65 |
| TABELA 4.8 Análise comparativa entre os cortes $\Delta S_{cc,1}$ e $\Delta S_{cc,2}$ utilizando o algoritmo proposto II, quando $\eta=1$ | 67 |
| TABELA 4.9 Análise comparativa entre os cortes $\Delta S_{cc,1}$ e $\Delta S_{cc,2}$ utilizando o algoritmo proposto II, quando $\eta=0,9$ | 67 |
| TABELA A.1 Análise Comparativa dos cortes de carga $\Delta S_{cc,1}$, $\Delta S_{cc,2}$ e $\Delta S_{cc,3}$ utilizando o algortimo proposto II..... | 75 |

Lista de Símbolos

| | |
|-------------------|---|
| c | Carga |
| cal | Calculado |
| cb | Caso base |
| cc | Corte de carga |
| esp | Valor especificado |
| g | Geração |
| max | Valor máximo |
| min | Valor mínimo |
| o | Condições iniciais ou solução inicial |
| Σ | Fronteira de factibilidade |
| ρ | Fator de carregamento |
| ρ_{cr} | Carregamento crítico |
| $\Delta S_{cc,1}$ | Corte de carga original (Bedriñana, 2008) |
| $\Delta S_{cc,2}$ | Corte de carga proposto 2 |
| $\Delta S_{cc,3}$ | Corte de carga proposto 3 |

Lista de Siglas

| | |
|-------|---|
| EHV | <i>Extra High Voltage</i> , ou extra alta tensão |
| FCC | Fluxo de carga da continuação |
| FCOP | Fluxo de carga com otimização de passo |
| FCOPP | Fluxo de carga com otimização de passo em coordenadas polares |
| MMET | Mínima margem de estabilidade de tensão |
| PMC | Ponto de máximo carregamento |
| SE | Subestação |
| SIL | <i>Surge impedance loading</i> , ou carregamento característico |

Trabalhos Publicados Pela Autora

Artigos publicados em anais de eventos (congressos)

1. **Beatriz L. Tavares**, Manfred F. Bedriñana, Carlos A. Castro, “New Method Based on Load Flow with Step Size Optimization for Calculating the Maximum Loading Point”, *In Proceedings of 2009 IEEE Bucharest PowerTech Conference*, Bucharest, Romania, 28 Junho – 2 Julho, 2009.
2. **Beatriz L. Tavares**, Manfred F. Bedriñana, Carlos A. Castro, “Método Prático para o Cálculo do Ponto de Máximo Carregamento via Fluxo de Carga com Otimização de Passo”, *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Belém do Pará, PA, Brasil, 18 – 21 Maio 2010.
3. **Beatriz L. Tavares**, Manfred F. Bedriñana, Carlos A. Castro, “Practical Method for Computing the Maximum Loading Point Based on Load Flow with Step Size Optimization”, *In Proceedings of 2010 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Minneapolis, MN, USA, 25 – 29 Julho 2010.

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo apresenta-se o cenário atual no qual o trabalho está inserido, explicando também os objetivos determinados. O estado da arte é apresentado para mostrar a evolução dos trabalhos que foram realizados na área e a organização do trabalho facilita o leitor compreender o que será explicado em cada capítulo.

1.1 Cenário Atual

A operação segura dos sistemas de potência e a estabilidade de tensão, em particular, tem recebido uma maior concentração de esforços dos planejadores e operadores do sistema de potência por aproximadamente duas décadas. Os problemas de instabilidade de tensão têm sido considerados responsáveis por várias perturbações importantes e, para evitá-los, significativos esforços de pesquisa têm sido feitos para a obtenção de procedimentos precisos e eficientes para sua identificação e prevenção (Proceedings, 1994). O colapso de tensão ocorre quando o sistema é incapaz de atender à demanda, havendo como consequência uma perda de controle nos níveis de tensão. Ele geralmente é desencadeado por distúrbios no sistema, tais como variações não previstas da carga, contingências ou ambas. O conhecimento da condição de reserva de potência reativa é de extrema importância na operação de redes de transmissão e pode afetar seriamente a confiabilidade de sistemas de potência (Cañizares, 2002). Alguns desafios aparecem pelo fato de alguns sistemas de potência operarem muito próximos de seus limites de estabilidade (Chakrabarti, 2008). Em especial, alguns destes desafios estão presentes no monitoramento *online* de estabilidade de tensão. Os métodos propostos são complexos, em geral, exigindo

tempos de processamento computacional consideráveis nos centros de operação e controle do sistema (Wang, 2006).

A estabilidade de tensão é um fenômeno essencialmente dinâmico, e o comportamento do sistema depende do comportamento das cargas e de outros componentes do sistema. Entretanto, as análises baseadas em abordagens estáticas apresentam algumas vantagens práticas em relação aos modelos dinâmicos (Dobson, 1994), e elas têm sido amplamente utilizadas, já que fornecem resultados com precisão suficiente e esforço computacional bem menor que as baseadas em abordagens dinâmicas. Além disso, as análises estáticas também fornecem informações ausentes ou mesmo de difícil obtenção nas análises dinâmicas, como por exemplo, barras críticas e margens de carregamento. Estas características são desejáveis em ambientes onde exista restrição do ponto de vista de esforço computacional, como por exemplo, em um ambiente de operação em tempo real.

Em particular, uma dificuldade deste tipo de abordagem refere-se à singularidade da matriz Jacobiana do método de fluxo de carga de Newton-Raphson no limite de estabilidade de tensão. Este limite de estabilidade também é denominado de ponto crítico, e é frequentemente definido como o ponto em que a matriz Jacobiana do fluxo de carga é singular. Em consequência, as tentativas de obtenção de solução de fluxo de carga na vizinhança do ponto crítico são propensas a divergências e erros.

Outro problema difícil refere-se a solucionar sistemas mal-condicionados e determinar a existência de soluções de fluxo de carga. Sempre que o processo iterativo diverge ou oscila utilizando o método convencional de fluxo de carga, não se pode ter certeza se (i) as equações de fluxo de carga não possuem solução em relação à estimativa inicial, ou se (ii) o processo iterativo de fluxo de carga não converge devido a problemas numéricos, apesar de existir uma solução.

1.2 Objetivo do Trabalho

Planejadores e operadores de sistemas de potência têm como objetivo a prevenção de problemas na rede elétrica, como instabilidades de tensão que podem levar a um colapso de tensão, e por isso a busca de ferramentas que proporcionem, além do entendimento e

compreensão do fenômeno, a indicação de onde o sistema está operando com respeito ao ponto de colapso, ou ponto de máximo carregamento (PMC). A obtenção de PMCs para várias direções de aumento de carga permite que seja definida a fronteira de carregamento Σ que divide as regiões de operação estável e instável do sistema.

Para o operador do sistema, a informação sobre a distância precisa ao ponto de colapso, no qual a operação do sistema se encontra do limite de estabilidade de tensão é um assunto preeminente. Por exemplo, dado um determinado distúrbio, este deve saber se o sistema encontrará um ponto de operação seguro para as novas condições de operação, ou seja, se o sistema continuará em um ponto de equilíbrio estável. Além disso, é necessário avaliar se, para o novo ponto de operação estável, haverá alguma margem para o aumento da carga mantendo-se a estabilidade.

É justamente com base nas necessidades apresentadas acima que se propõe este trabalho, com a finalidade de determinar uma ferramenta precisa e eficiente para a obtenção desta distância. São propostos dois métodos com o intuito de calcular o PMC para uma determinada direção de incremento de carga utilizando as características da fronteira de carregamento (Σ) e o FCOP, de acordo com duas abordagens apresentadas a seguir.

A primeira, aqui denominada de “*método 1*” tem como intuito propor um novo corte de carga mais conservador a ser utilizado pelo método de Bedriñana (2008), que será aqui denominado “*método original*”, quando este levar o sistema a um ponto de operação na região factível, o que não é ideal para este método. Nestes casos, Bedriñana (2008) utiliza um mecanismo baseado em busca binária, que, apesar de eficiente, faz com que seja perdida uma grande parcela do corte de carga inicial obtido e perdendo, conseqüentemente, a proximidade do limite de factibilidade, exigindo um maior número de iterações para alcançar a convergência.

A segunda abordagem, chamada de “*método 2*”, tem como objetivo propor um método rápido e prático de obtenção do PMC, com informações fornecidas pelo operador do sistema sobre o erro aceitável no processo de cálculo. Pretende-se combinar uma heurística e o método de (Bedriñana, 2008) para a obtenção de um procedimento muito rápido e robusto.

1.3 Estado da Arte

Devido ao problema de mau condicionamento na determinação da existência de soluções de fluxo de carga, foi proposto em (Iwamoto, 1981) um fator de otimização de passo obtido em cada iteração, que é multiplicado pelo vetor de correção das variáveis de estado (magnitudes e ângulos de fase das tensões), de modo a minimizar uma função quadrática com base nos *mismatches* de potência. Este método funciona muito bem, porém as tensões aparecem em coordenadas retangulares, o que não é uma característica comum em programas comerciais de fluxo de carga. Uma abordagem baseada na representação de tensões em coordenadas polares foi proposta em (Castro, 1997), visto que esta é a situação mais comum encontrada na prática. Em (Braz, 2000) foram demonstradas suas vantagens, onde eram utilizados sistemas mal condicionados, muito carregados e sobrecarregados. Uma comparação foi realizada entre quatro métodos de fluxo de carga Newton, sendo um deles convencional e três deles que envolviam a otimização de passo, e o método de (Castro, 1997) foi considerado como a melhor alternativa em todos os casos.

Em (Tate, 2005), os autores recomendaram a implementação do multiplicador ótimo no método de fluxo de carga de Newton-Raphson em coordenadas polares (ao invés de coordenadas retangulares), com o intuito de obter um desempenho mais rápido, robusto, independentemente do tamanho do sistema ou da existência ou não de solução. Portanto, neste trabalho, o fluxo de carga com otimização de passo em coordenadas polares (FCOPP) foi utilizado.

Outras características do FCOPP têm sido utilizadas para a obtenção do ponto de máximo carregamento (PMC). Bedriñana (2008) propôs um método baseado nas propriedades do vetor normal à fronteira de factibilidade calculado perto do PMC. O vetor é calculado via FCOPP. O processo caracteriza-se pela obtenção de sucessivas aproximações do PMC na região infactível, mas como o contorno da fronteira de factibilidade na vizinhança do PMC pode não ser convexo, é possível que durante o processo de cálculo sejam obtidos pontos de operação na região factível. Assim, um mecanismo baseado em busca binária é utilizado para levar o ponto de operação de volta à região infactível. O método determina o PMC em uma direção de incremento de carga predefinida (a direção usual que normalmente é monitorada pelos operadores do sistema).

Numerosos foram os artigos publicados para discutir e encontrar soluções para este tipo de problema, por exemplo, Tamura et al. (1983), Tiranuchit e Thomas (1986), Kessel e Glavitsch (1986), Sauer et al. (1986), Alvarado e Jung (1989), Galiana e Zeng (1991) e Ajarapu e Christy (1992)

1.4 Organização do Trabalho

O trabalho proposto encontra-se dividido em capítulos, cuja divisão pode ser vista a seguir.

No presente capítulo foi situado o contexto do trabalho com suas características e eventuais problemas. Apresenta-se também o estado da arte, onde são mencionadas as principais pesquisas realizadas neste contexto e as contribuições de cada autor, além do objetivo do trabalho, que estabelece o foco da solução do problema.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão dos conceitos básicos para o entendimento dos métodos propostos no Capítulo 4.

O Capítulo 3 apresenta-se alguns dos métodos que foram inicialmente propostos para a obtenção do ponto de máximo carregamento, e que contribuiriam para desenvolvimento do método proposto.

O Capítulo 4 contempla os dois métodos propostos. O primeiro método obtém o ponto de máximo carregamento com um número de iterações reduzido em relação à metodologia inicial que será tomada como base. Já o segundo método apresenta uma abordagem diferenciada da primeira. Seu foco é a obtenção do ponto de máximo carregamento dentro de uma margem de erro previamente definida, com o intuito de obter um método mais prático.

No Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais deste trabalho, juntamente com as suas conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

O Apêndice I aborda alguns testes que foram realizados durante este trabalho, mas que não apresentaram êxito em suas contribuições.

Capítulo 2

Conceitos Básicos

Este capítulo apresenta uma revisão de alguns conceitos básicos de ferramentas utilizadas em estabilidade de tensão que facilitarão o entendimento dos métodos propostos no capítulo subsequente.

2.1 Estabilidade em sistemas elétricos de potência

Os sistemas elétricos de potência possuem mais de cem anos. Várias inovações e descobertas tecnológicas que surgiram principalmente a partir do início do século XX, a conversão eletromecânica e também a transmissão de grandes blocos de energia por grandes distâncias permitiram que a sociedade se moldasse de acordo com seu consumo, chegando ao atual quadro, de ser dependente completamente dos sistemas elétricos de potência. Esta dependência levou a preocupações com relação à confiabilidade e segurança do serviço de fornecimento de energia elétrica aos consumidores, sendo que um dos aspectos de confiabilidade de sistemas de potência está relacionado à sua estabilidade.

Os estudos de estabilidade foram subdivididos em categorias para que se facilitasse a identificação das causas e pudessem então ser desenvolvidos métodos de análise apropriados. Basicamente tem-se três categorias, sendo elas a estabilidade de ângulo do rotor, a estabilidade de frequência e a estabilidade de tensão, que são apresentados na Figura 2.1.

O trabalho aqui apresentado terá seu foco na estabilidade de tensão dos sistemas elétricos de potência.

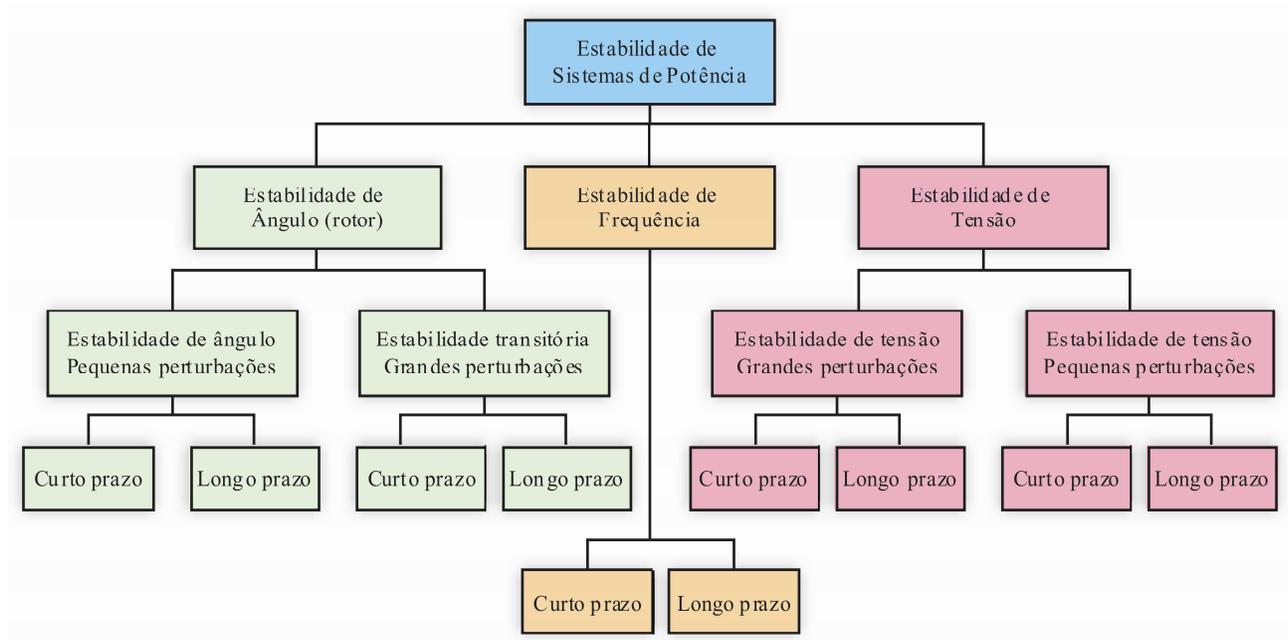


Figura 2.1: Classificação de estabilidade de sistemas de potência

2.1.1 Estabilidade de Tensão

Com o surgimento dos sistemas elétricos de potência, e suas vantagens inerentes, surgem também, em consequência, problemas ligados a ele, como, por exemplo, os de estabilidade de tensão, que geram uma grande preocupação nas empresas de energia em todo o mundo. Os fenômenos relacionados à estabilidade de tensão estão intrinsecamente ligados ao fluxo de potência reativa na rede, ao comportamento das cargas na ocorrência de variações de tensão, à limitação de sobre-excitação dos geradores, dentre outros.

Os problemas na estabilidade de tensão surgem quando há uma mudança progressiva e descontrolada na tensão de determinada rede, principalmente quando se trata de um sistema extremamente carregado, com pouca reserva de potência reativa ou quando submetido a contingências, distúrbios, aumento de carga não previstos, etc.

Os colapsos de tensão são prejudiciais como um todo para a sociedade, não somente pela perda ocasionada no momento da falta, mas também pelos prejuízos financeiros que estes acarretam, como ocorreu no maior blecaute dos Estados Unidos, em 14 de agosto de 2003, que afetou oito estados do nordeste dos EUA, além da província de Ontário no Canadá. Foram 50 milhões de pessoas sem energia, e com um prejuízo estimado em US\$ 6 bilhões.

O Brasil também vivenciou este fenômeno de grande escala. Podem ser citados alguns eventos importantes, como o ocorrido nos dias 24 e 25 de abril de 1997. As perturbações ocorridas nesses dias às 18h21min e 18h17min, respectivamente, a despeito de sua gravidade, não levaram o Sistema S/SE/CO ao colapso total, graças à ação do Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC) e aos cortes de carga realizados manualmente. Assim, cerca de 85 % da carga total permaneceu em serviço em ambos distúrbios. Por outro lado, estes eventos similares entre si foram revestidos de condições inéditas no país, particularmente no que se refere ao comportamento da tensão. As análises constataram um afundamento da tensão na região da grande São Paulo, compatível com um colapso parcial de tensão, mesmo sem o registro de qualquer perturbação ou anormalidade que desse origem ao fenômeno.

Recentemente pode-se citar o acontecimento em dez de novembro de 2009, às 22h e 13 minutos, onde 40% do território brasileiro e 90% do território do Paraguai foram atingidos, provocando até sete horas de escuridão. A ocorrência se deu a partir do desligamento das linhas de transmissão de 765kV entre Ivaiporã e Itaberá devido a três curtos-circuitos monofásicos praticamente simultâneos, próximo a SE Itaberá, comprovados pelos registradores de perturbações.

A acentuada queda de tensão resultante causou o desligamento dos bipolos de corrente contínua e das interligações em 500 e 230 kV entre as regiões Sul e Sudeste/Centro-Oeste provocando o “colapso de tensão” no sistema SE/CO, tendo como consequência desligamentos seqüenciais em grande parte do sistema de alta tensão e usinas do sistema interligado, com interrupção de 24.436 MW, atingindo principalmente os Estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais.

São diversas as alterações que acontecem nas condições de operação de um determinado sistema de potência que podem levar à ocorrência de um colapso de tensão. O reflexo destas alterações pode ter efeitos importantes, principalmente na geração, transmissão e no consumo de potência reativa, como por exemplo, falta de compensação reativa das cargas, a saída de linhas e

geradores, a variação automática dos taps de transformadores, os sistemas estressados devido à falta de reforço de transmissão e falta de investimentos em geração, geradores, condensadores síncronos e controladores estáticos de reativos em seus limites máximo de potência reativa (principal fator para ocasionar a instabilidade).

A estabilidade de tensão é um fator totalmente dependente da capacidade de um determinado sistema de potência em manter ou até mesmo restaurar o equilíbrio existente entre a demanda de carga e o fornecimento da mesma. Este conceito fica mais nítido com o auxílio da Figura 2.2 a seguir.

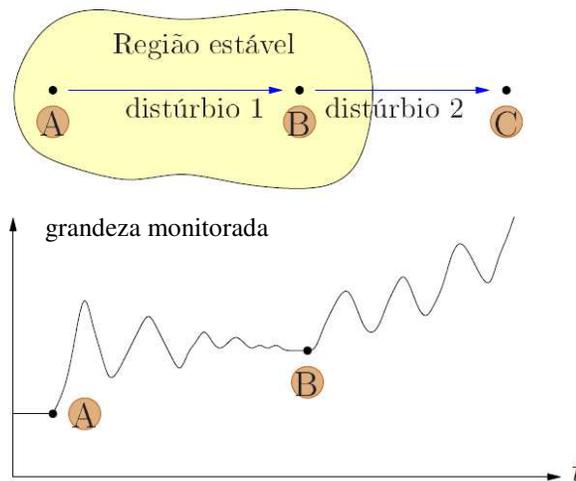


Figura 2.2: Ilustração do conceito de estabilidade

Considere que um sistema possua um ponto de equilíbrio A no qual ele esteja operando. Um primeiro distúrbio, denominado distúrbio 1 ocorre e leva o sistema a operar em um segundo ponto denominado de ponto B, que corresponde a um ponto de operação estável. A ocorrência de um segundo distúrbio, denominado distúrbio 2, é suficientemente severo para levar o sistema à instabilidade (Fujisawa, 2008).

Considere um sistema elétrico de potência que esteja operando em condições normais de equilíbrio estável e que, em um determinado momento ocorra um aumento da demanda, considerado como uma pequena perturbação. Este aumento de carga resulta em um aumento das perdas de potência na transmissão, que afeta diretamente as magnitudes de tensão e aberturas angulares. Com uma reserva de potência reativa e capacidade de transmissão suficientes, o processo pode levar a um novo ponto de equilíbrio estável, isto é, um novo ponto de operação estável (Fujisawa, 2008). No caso da não existência desta reserva de reativos ou uma capacidade

de transmissão insuficiente, o processo tenderá à instabilidade. Neste caso a tensão tenderá a cair de maneira monotônica, conforme pode ser visto na Figura 2.3.

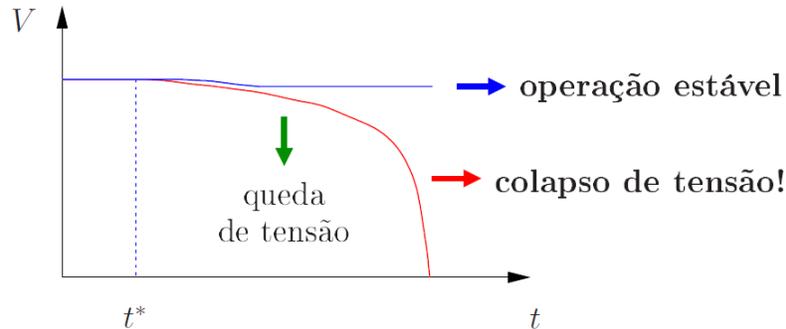


Figura 2.3: Queda monotônica de tensão

Segundo Cañizares (2001), “um ponto de operação de um sistema de potência é estável a um pequeno distúrbio se, seguido de qualquer pequeno distúrbio, o sistema de potência retorna ou fica próximo do mesmo ponto de operação pré- distúrbio”, assumindo que o ponto de operação pré-distúrbio seja estável e possua margens consideradas suficientemente adequadas e que o ponto pós-distúrbio (próximo do ponto de operação inicial) ainda permaneça dentro da margem adotada como segura.

Como exemplo de situações que possam provocar de uma instabilidade pode citar-se um aumento de carga concentrada em uma área, interação indesejada de controles ou uma perda de linhas de transmissão ou demais elementos, devido ao sistema de proteção, podendo estas situações também ser decorrentes do fenômeno. Eventos em cascata poderão ocorrer, incluindo perda de sincronismo dos geradores e condições de operação pós instabilidade que violem o atual limite de corrente (Kundur, 1994).

Com bastante frequência também utiliza-se o conceito de colapso de tensão, que refere-se ao processo onde uma sequência de eventos acompanhados da instabilidade de tensão conduzem a uma baixa tensão anormal em uma parte significativa do sistema de potência ou até mesmo a um blecaute (Castro, 1997; Alvarado, 1989; Ajarapu, 1991).

Embora a forma mais comum de instabilidade de tensão é a progressiva queda de tensão nas barras, o risco de instabilidade de sobretensão também existe e tem sido experimentado pelo menos com um sistema (Van Cutsem, 1997). É causada por um comportamento capacitivo da rede (linhas de transmissão EHV operando abaixo do SIL (do inglês "surge impedance loading", ou

carregamento característico), bem como por limitadores de subexcitação que impedem equipamentos de controle de absorver o excesso de potência reativa. Neste caso, a instabilidade está associada com a inabilidade do sistema de geração e transmissão de operar abaixo de algum nível e carga. Em sua tentativa de restaurar o suprimento de potência para a carga, o tap do transformador causa, a longo prazo, a instabilidade de tensão.

Para melhor compreensão, é útil classificar a estabilidade de tensão referente a grandes perturbações e a pequenas perturbações, conforme já visto na Figura 2.1 e ressaltado na Figura 2.4.

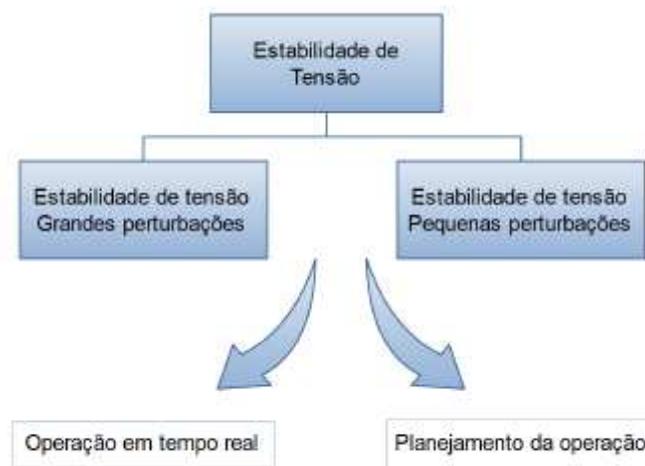


Figura 2.4: Subdivisões da estabilidade de tensão: pequenas e grandes perturbações

Estabilidade de tensão a grandes perturbações refere-se à capacidade do sistema de manter-se estável quando da perda intempestiva de elementos da rede ou da carga. A capacidade é determinada pelas características do sistema e de carga, e sua interação com os controles e proteções contínuas e discretas. A determinação de estabilidade de tensão a grandes perturbações requer o exame da resposta não linear do sistema de potência ao longo de um período de tempo suficiente para capturar o desempenho e interações de tais dispositivos como os motores, mudança de taps de transformadores, e os limites das correntes de campo dos geradores. O período de estudo de interesse pode ter duração a partir de alguns segundos a dezenas de minutos.

Estabilidade de tensão a pequenas perturbações refere-se à capacidade do sistema de manter uma tensão constante quando submetidos a pequenas perturbações, tais como mudanças incrementais na carga do sistema. Este tipo de estabilidade é influenciado pelas características das cargas, controle contínuo e/ou discreto de controles em um determinado instante de tempo. Este

conceito é útil para determinar, em qualquer instante, como as tensões do sistema irão responder às pequenas mudanças. Com hipóteses adequadas, as equações do sistema podem ser linearizadas para a análise, permitindo cálculo de informação valiosa da sensibilidade, útil para identificar fatores que influenciam a estabilidade. Esta linearização, no entanto, não leva em conta os efeitos não-lineares, como controles de mudança dos taps (zonas inoperantes, passos discretos dos taps e os atrasos). Portanto, uma combinação de análise linear não-linear é utilizada de forma complementar (Morison, 1993).

Como mencionado anteriormente, o tempo de interesse para os problemas de estabilidade de tensão pode variar de alguns segundos a dezenas de minutos. Assim, a estabilidade de tensão pode ser um fenômeno de curto prazo ou um fenômeno de longo prazo, tal como identificadas na Figura 2.1.

Estabilidade de tensão a curto prazo envolve a dinâmica de componentes de ação rápida, tais como motores de indução, cargas controladas eletronicamente e conversores HVDC. O período de estudo de interesse é da ordem de vários segundos, e a análise exige solução adequada do sistema de equações diferenciais, que é semelhante à análise de estabilidade de ângulo do rotor. A modelagem dinâmica de cargas é frequentemente essencial. Os curtos-circuitos perto de cargas são eventos importantes.

Estabilidade de tensão a longo prazo envolve ação mais lenta dos equipamentos tais como a mudança de tap dos transformadores, controle de cargas termostáticas, e os limites de corrente nos geradores. O período de estudo de interesse pode estender-se desde alguns até vários minutos, e as simulações de longo prazo são necessárias para a análise do desempenho do sistema dinâmico (Morison, 1993). A estabilidade geralmente é determinada pelas falhas resultantes do equipamento ou da interação dos dispositivos de controle, mais do que a gravidade da perturbação inicial. A instabilidade é devida à perda do equilíbrio a longo prazo (por exemplo, quando a carga tenta restaurar sua potência além da capacidade da rede de transmissão e geração conectada), ponto de operação estado estacionário pós-perturbação sendo uma pequena perturbação instável, ou uma falta de atração em direção ao equilíbrio estável pós-perturbação (por exemplo, quando uma ação corretiva é aplicada demasiado tarde) (Taylor, 1994). A perturbação também poderia ser um acúmulo de carga sustentada. Em muitos casos, a análise estática (Morison, 1993 e 1996) pode ser usada para estimar as margens de estabilidade, identificar fatores que influenciam a estabilidade, e uma ampla gama de condições do sistema e um grande número de cenários. Quando o tempo das

ações de controle é importante, isso deve ser complementado por simulações de estado quase-estacionário no domínio do tempo (Van Cutsem, 2000).

Com o auxílio da Figura 2.5, ilustra-se de maneira simplificada o problema que envolve a estabilidade de tensão (Castro, 2007).

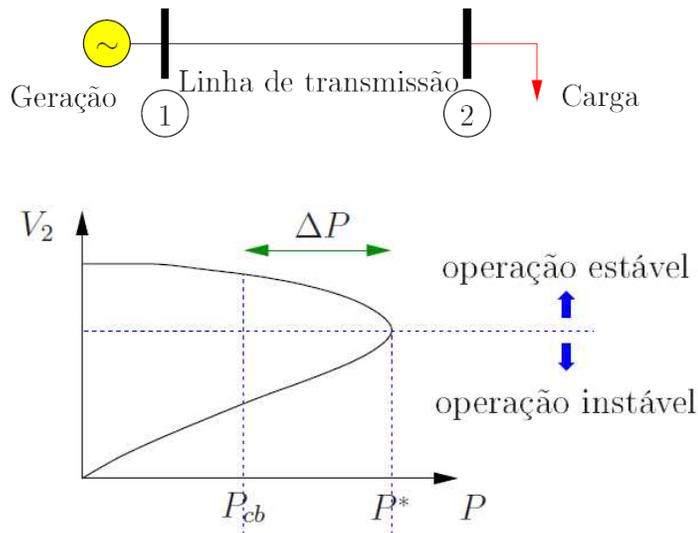


Figura 2.5: Comportamento de diversos índices de estabilidade de tensão

Em um determinado instante, a demanda em determinado barramento é igual ao caso base (cb), $P=P_{cb}$. A magnitude de tensão V_2 no barramento de carga será igual a um valor que depende da própria demanda e dos parâmetros da linha de transmissão. Conforme ocorre a variação da carga, varia também a magnitude de tensão. Existe um valor de carga máxima, neste caso denominado de P^* , que o sistema em questão consegue atender. Neste caso tem-se a singularidade da matriz Jacobiana das equações de fluxo de carga, considerando que a carga seja modelada como potência constante (Cañizares, 1996).

É possível calcular a *margem de estabilidade*, ou *margem de segurança ao colapso de tensão*, que é dada por:

$$ME = \Delta P = P^* - P_{cb}, \quad (2.1)$$

ou em termos percentuais:

$$ME = \left(\frac{P^*}{P_{cb}} - 1 \right) \cdot 100\% .$$

Caso a carga solicite uma potência maior que P^* , a rede entrará em um modo de operação instável.

2.2 Abordagem Estática do Fluxo de Carga e o Sistema de Potência

O planejamento e a operação dos sistemas elétricos de potência têm no programa de fluxo de carga uma ferramenta básica e bastante importante, cujo objetivo é o de determinar o estado de operação da rede, como a magnitude e ângulo das tensões nodais e os fluxos de potência pela rede, entre outras grandezas de interesse, referente a um determinado ponto de operação. A modelagem do sistema neste tipo de problema é estática, sendo a rede representada por um conjunto de equações e inequações algébricas. A abordagem estática é interessante em eventos onde se tem uma variação muito lenta dos parâmetros com o tempo, permitindo que sejam ignorados os efeitos transitórios que, se fossem considerados, exigiriam uma abordagem dinâmica que envolvesse equações diferenciais além das equações algébricas (Monticelli, 1983).

O método de resolução de fluxo de carga de Newton mostrou ser eficiente e robusto, apesar de apresentar alguns problemas de convergência, mesmo que o sistema seja factível, como por exemplo, no caso de sistemas mal condicionados. O fluxo de carga convencional não fornece uma solução para condições de operação na região infactível, que ocorre quando se tem, por exemplo, contingências severas ou incrementos de carga imprevistos sem o correspondente incremento no fornecimento de reativos ou na capacidade das redes de transmissão, levando a uma perda de estabilidade e conseqüentemente a um colapso de tensão. Nesta situação o fluxo de carga não converge ou atinge o limite máximo de iterações especificado e os resultados não têm significado físico (Stott, 1974).

Um sistema elétrico de potência pode ser modelado através do seguinte sistema de equações:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, p) = 0, \quad (2.2)$$

sendo \mathbf{x} o vetor das tensões nodais, com magnitude e ângulo, \mathbf{u} o vetor das variáveis de controle e p o vetor dos parâmetros, como as injeções de potência ativa e reativa nas barras de carga, gerações de potência ativa nas barras de geração e as magnitudes das tensões em barras de

geração. O vetor representado por \mathbf{g} corresponde às equações de *mismatches* de potências nodais, conforme explicado adiante.

As injeções de potência especificadas P_{esp} e Q_{esp} representam a diferença entre geração e carga em cada barra. As injeções líquidas de potência ativa e reativa, $P(V,\theta)$ e $Q(V,\theta)$, são dadas por:

$$P_k(V, \theta) = V_k \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \quad (2.3)$$

$$Q_k(V, \theta) = V_k \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}), \quad (2.4)$$

para cada uma das k barras da rede, sendo n o número de barras da rede. G e B representam as partes real (condutância) e imaginária (susceptância) da matriz admitância nodal, respectivamente, e dependem da topologia da rede. As equações apresentadas acima representam um conjunto de equações algébricas não lineares e podem ser resolvidas por vários métodos, conforme mostrado em (Stott, 1974). O método de Newton foi adotado como padrão, desde quando fora apresentado em (Tinney, 1967), devido às suas boas características, como a robustez e eficiência. O método de Newton corresponde a um processo iterativo em que as equações não lineares são linearizadas sucessivamente. O seguinte sistema de equações lineares é resolvido a cada iteração:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

sendo $(\Delta P, \Delta Q)$ os *mismatches* de potência, que são obtidos pela diferença entre os valores especificados e calculados em cada iteração; $(\Delta \theta, \Delta V)$ são as correções no estado da rede, correspondendo, respectivamente, aos ângulos de fase e magnitude de tensão. J é a matriz Jacobiana do fluxo de carga, que fornece as informações sobre as sensibilidades entre potências e tensões. Ela pode ser decomposta em quatro sub-matrizes, como pode ser visto em (2.5).

O método de fluxo de carga consiste de um processo iterativo para a obtenção de um ponto de operação do sistema, isto é, a obtenção do estado das variáveis (V, θ) . Nos estudos de estabilidade de tensão, o monitoramento da matriz Jacobiana resulta em uma técnica útil pelo fato da matriz Jacobiana tornar-se singular à medida que o sistema aproxima-se do ponto de máximo carregamento.

A Figura 2.6 (a) representa uma rede elétrica que é composta por uma barra de geração (V,θ) e uma barra de carga (PQ) conectadas entre si por uma linha de transmissão. Já a Figura 2.6 (b) apresenta o espaço de parâmetros, composto pelos parâmetros correspondentes às potências

ativa e reativa consumidas na barra de carga PQ. Subdivide-se o espaço de parâmetros em duas regiões, denominadas região de factibilidade ou factível e região de infactibilidade ou infactível.

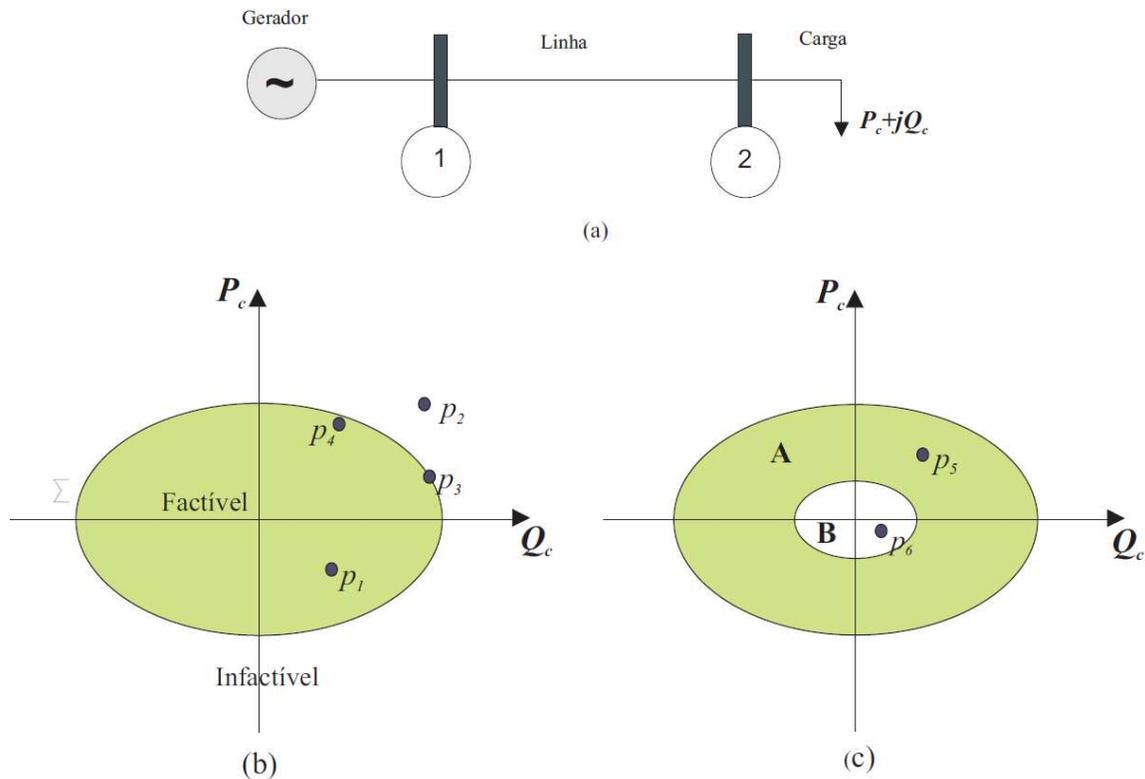


Figura 2.6: (a) Rede Exemplo; (b) Espaço de Parâmetro I; (c) Espaço de Parâmetro II.

A região factível é a região onde os parâmetros são tais que é possível a obtenção de solução para o sistema de equações (2.2). A região infactível é a região onde os parâmetros são tais que não é possível a obtenção de solução para o sistema de equações (2.2).

O ponto \mathbf{p}_1 localiza-se na região de factibilidade. Desta maneira, existe um nível de carga que permite a operação da rede. Existe a solução da equação (2.2) e o processo iterativo de Newton converge para a solução. O ponto \mathbf{p}_2 localiza-se na região de infactibilidade, isto é, a rede não consegue operar com este nível de carregamento, levando o processo iterativo à divergência. O ponto \mathbf{p}_3 localiza-se na fronteira de carregamento representada por Σ , a qual divide as regiões factível e infactível. Neste ponto a matriz Jacobiana é singular, e, portanto não permite que o processo de resolução de fluxo de carga convirja. O ponto \mathbf{p}_4 localizado na região factível permite a operação segura da rede. Entretanto, devido à sua proximidade da fronteira de factibilidade Σ

podem ocorrer problemas numéricos durante a resolução do problema de fluxo de carga, causados por problemas de condicionamento da matriz Jacobiana (J), conforme será abordado no item 2.3.

Na Figura 2.6 (c) tem-se a ilustração da região de factibilidade subdividida em duas outras regiões. A região A indica que a operação da rede é possível, entretanto existe a violação de alguns limites operacionais. Por exemplo, é possível que as tensões nodais estejam abaixo de um limite mínimo que garanta a qualidade de fornecimento de energia à rede. Tem-se o ponto p_5 nesta região. Para a região B a operação da rede é possível e, além disso, todos os limites operacionais são respeitados. O ponto p_6 encontra-se nesta região.

Na Figura 2.7 tem-se a conhecida curva PV para a barra de carga, que representa a magnitude de tensão na barra de carga em função do carregamento da rede. São apresentados alguns pontos de operação e as regiões que foram apresentadas na Figura 2.6. O ponto p_3 corresponde ao *ponto de máximo carregamento da rede* (PMC). Este ponto também pode representar em alguns casos o *limite de estabilidade de tensão*, isto é, caso exista um carregamento maior que este, o sistema sofrerá de problemas de instabilidade de tensão, levando a um colapso de tensão e um possível blecaute.

Além disso, na formulação adotada, os limites de geração de potência reativa foram levados em conta, de maneira que as barras de geração (PV) são transformadas em barras de carga (PQ) quando um dos seus respectivos limites de potência reativa é alcançado, e podem retornar para o tipo PV se possível.

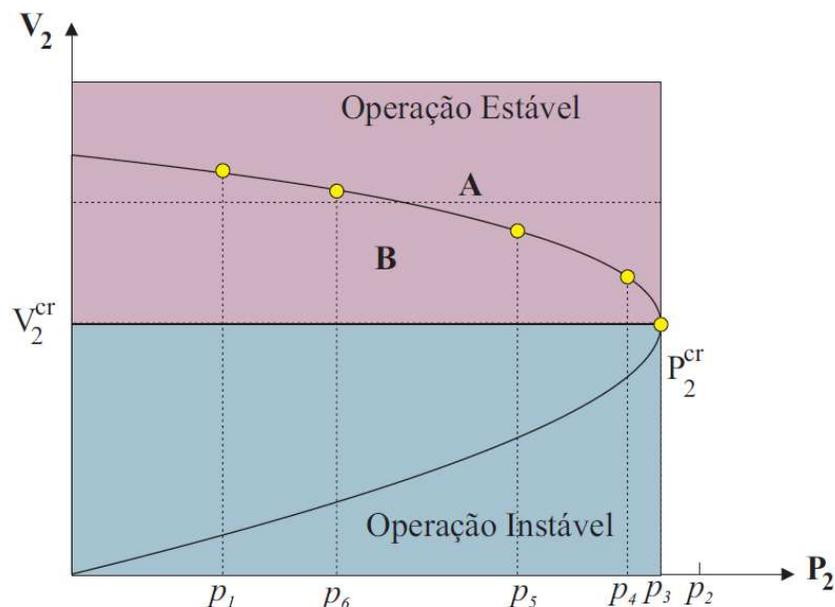


Figura 2.7: Curva PV

2.3 Redes Mal Condicionadas

Considerando a evolução do ponto p_1 , longe do limite de estabilidade até p_4 , muito próximo do limite de estabilidade, mostrados na Figura 2.7, não são raros os casos onde os sistemas apresentam um carregamento dentro da região de factibilidade, e, portanto um ponto de operação estável, porém o fluxo de carga convencional não é capaz de apresentar uma solução de regime permanente. Estas redes são denominadas de redes *mal condicionadas*. Existem alguns métodos na literatura que solucionam este tipo de problema, entretanto os mais comuns aqui são o método de *otimização de passo* e o *método da continuação*.

Através da metodologia de otimização de passo apresentada em (Braz, 2000), sempre é possível a obtenção de resultados correspondentes à solução estável da rede, independentemente dos valores iniciais utilizados para a tensão, carregamento e distância deste até o ponto de colapso de tensão. O esforço adicional quando comparado com o método convencional de Newton não é muito grande, e tem-se um método muito mais robusto.

O método da continuação de Ajjarapu (1992), quando desenvolvido, foi até considerado uma ferramenta definitiva para o problema, sobrepondo-se aos demais métodos então existentes. Ele utiliza uma matriz Jacobiana modificada e soluciona o problema evitando a singularidade da matriz Jacobiana do fluxo de carga convencional.

Os dois métodos mencionados anteriormente serão apresentados com mais detalhes no Capítulo 3.

2.4 Teoria de Bifurcação

A teoria de bifurcação produz ferramentas que permitem classificar, estudar e fornecer informação quantitativa e qualitativa do comportamento não linear na proximidade dos pontos de equilíbrios críticos, devido a mudança de parâmetros do sistema (Seydel, 2010).

Geralmente classifica-se a bifurcação em duas classes principais:

- Bifurcação local, onde as análises são feitas exclusivamente por mudanças nas propriedades de estabilidade local do ponto de equilíbrio, órbitas periódicas ou outros conjuntos invariantes, como parâmetros que passam por limites críticos, e
- Bifurcação global, que ocorre frequentemente quando grandes conjuntos invariantes do sistema chocam-se com outros, ou até mesmo com o equilíbrio do sistema. Com apenas uma análise de estabilidade (pontos fixos) não é possível de detectá-la.

Neste trabalho, quando se refere à bifurcação, aborda-se a bifurcação local. Este tipo de bifurcação ocorre quando uma alteração de parâmetro faz com que a estabilidade de um ponto de equilíbrio (ou ponto fixo) mude. Em sistemas contínuos, corresponde a parte real de um autovalor de um ponto de equilíbrio que passa pelo zero. Em sistemas discretos corresponde a um ponto fixo que tem o módulo do multiplicador de Floquet igual a um. Em ambos os casos o equilíbrio é não-hiperbólico no ponto de bifurcação.

Em sistemas de potência, as bifurcações mais estudadas são a sela-nó (*saddle-node*) (Guckenheimer, 1986), de Hopf (Cañizares, 2004) e a induzida por limite (Dobson, 1992).

2.5 Autovalores e Autovetores

A matriz Jacobiana pode ser reescrita como:

$$J = \mathbf{v} \cdot \Lambda \cdot \mathbf{w}^T \quad (2.6)$$

onde \mathbf{v} representa os autovetores direitos de J , Λ representa o conjunto de autovalores de J e \mathbf{w} corresponde aos autovetores esquerdos de J .

São os autovetores direitos (\mathbf{v}) que estão relacionados com as possíveis alterações nas variáveis estáticas, como a magnitude e o ângulo da tensão, na direção do colapso de tensão. As suas maiores componentes referem-se às barras onde as magnitudes de tensão tiveram uma queda mais rápida (Kundur, 1994; Alvarado, 1994). Já quando analisa-se o autovetor esquerdo (\mathbf{w}), tem-se informações sobre as variáveis estáticas que têm maior efeito no colapso de tensão e também qual é a direção mais crítica de incremento de carga que causa a bifurcação. O autovetor esquerdo

indica quais são as medidas mais eficientes com o objetivo de controlar a perda de estabilidade. É o autovetor esquerdo que será utilizado nos métodos propostos neste trabalho, em busca do PMC.

Uma maneira de utilizar os autovetores esquerdos da matriz Jacobiana pode ser vista na Figura 2.8 para melhor compreensão.

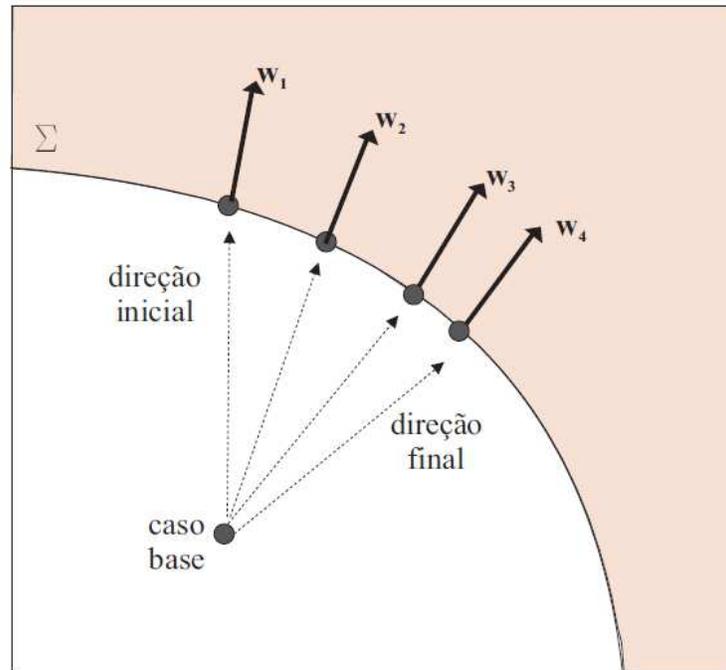


Figura 2.8: Aproveitamento do autovetor esquerdo

O autovetor esquerdo correspondente ao autovalor nulo da matriz Jacobiana pode ser interpretado como um vetor normal à superfície da fronteira de factibilidade Σ . São apresentados quatro autovetores esquerdos (w_1 , w_2 , w_3 , w_4) que são normais à fronteira Σ . O caso base corresponde ao atual ponto de operação da rede e a direção correspondente ao autovetor w_1 refere-se a uma direção inicial de incremento de carga. A direção final representa o pior cenário de incremento de carga (Bedoya, 2007). Esta direção é paralela ao próprio autovetor w_4 . O método proposto por Bedoya (2007) baseia-se na atualização gradativa da direção de incremento de carga, a partir de uma direção inicial, com base no autovetor esquerdo, até que a condição de paralelismo entre o autovetor e a direção de incremento de carga seja atendida.

Capítulo 3

Cálculo de Ponto de Máximo Carregamento

Neste capítulo são apresentados alguns dos métodos que foram inicialmente propostos para a obtenção do ponto de máximo carregamento, e que contribuíram para desenvolvimento do método proposto.

3.1 Equações de Fluxo de Carga

As equações de fluxo de carga são formuladas como (Bedriñana, 2009):

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \rho) = 0, \quad (3.1)$$

sendo que $\mathbf{x} \in \mathfrak{R}^{(2n_{PQ}+n_{PV})}$ é o vetor de variáveis de estado do sistema, dado por $\mathbf{x} = [\boldsymbol{\theta}^t \mathbf{V}^t]^t$, sendo $\boldsymbol{\theta} \in \mathfrak{R}^{n_{PQ}+n_{PV}}$ e $\mathbf{V} \in \mathfrak{R}^{n_{PQ}}$ os vetores de ângulos de fase e magnitudes de tensão, respectivamente; $\rho \in \mathfrak{R}$ é o fator de carregamento, n_{PQ} e n_{PV} são os números de barras PQ e PV , respectivamente; $\mathbf{g}(\mathbf{x}, \rho)$ é definido como $\mathbf{g} = [\Delta \mathbf{P}^t \ \Delta \mathbf{Q}^t]^t$, onde $\Delta \mathbf{P} \in \mathfrak{R}^{n_{PQ}+n_{PV}}$ e $\Delta \mathbf{Q} \in \mathfrak{R}^{n_{PQ}}$ são os *mismatches* de potência ativa e reativa, respectivamente. A equação (3.1) pode ser reescrita como:

$$\begin{bmatrix} \Delta P(\mathbf{x}, \rho) \\ \Delta Q(\mathbf{x}, \rho) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho \cdot P_{esp}(\rho) - P_{cal}(\mathbf{x}) \\ \rho \cdot Q_{esp}(\rho) - Q_{cal}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

onde os subscritos *esp* e *cal* correspondem aos termos "especificado" e "calculado", respectivamente. Além disso, na formulação adotada, os limites de geração de potência reativa foram levados em conta, de maneira que as barras PV são modificadas para PQ quando os seus respectivos limites de potência reativa são alcançados, e podem retornar para PV se possível.

3.2 Fluxo de Carga com Otimização de Passo

O FCOP foi originalmente proposto para solucionar as equações de fluxo de carga para sistemas de potência mal condicionados. Para estes, os métodos de fluxo de carga convencionais apresentam um desempenho ruim, ou simplesmente divergem, embora o sistema de fato opere em um ponto de equilíbrio estável. Esta idéia foi apresentada pela primeira vez em (Iwamoto, 1981), onde as tensões foram representadas em coordenadas retangulares. Em (Castro, 1997), uma abordagem baseada na representação das tensões em coordenadas polares (FCOPP) foi proposta, e em (Braz, 2000) foram demonstradas suas vantagens, inclusive em situações onde os limites de geração de potência reativa foram levados em conta.

Em uma iteração r do FCOPP (assumindo ρ fixo), o vetor das variáveis de estado $\mathbf{x}^{(r+1)}$ é calculado por:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^{(r+1)} &= \mathbf{x}^{(r)} + \mu^{(r)} \Delta \mathbf{x}^{(r)} \text{ e} \\ \Delta \mathbf{x}^{(r)} &= -[\nabla_{\mathbf{x}} \mathbf{g}]^{-1} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^{(r)}} \mathbf{g}(\mathbf{x}^{(r)}, \rho), \end{aligned} \quad (3.3)$$

onde $\mu^{(r)}$ é o multiplicador ótimo, que multiplica o vetor de correção das variáveis de estado $\Delta \mathbf{x}^{(r)}$; $\nabla_{\mathbf{x}} \mathbf{g}$ é a matriz Jacobiana de \mathbf{g} e μ é calculado de forma a minimizar a seguinte função quadrática baseada nos *mismatches* de potência.

$$\min F(\mu) = \frac{1}{2} \|\mathbf{g}_{st}\|_2^2 = \frac{1}{2} \sum_{i \in \Omega_{\mathbf{g}}} \mathbf{g}_{ts,i}^2, \quad (3.4)$$

sendo que $\Omega_{\mathbf{g}}$ indica os componentes de \mathbf{g} que são levados em consideração (*mismatches* de potência ativa e reativa das barras PQ e de potência ativa das barras PV); \mathbf{g}_{st} é \mathbf{g} expandido em Série de Taylor considerando os termos até segunda ordem:

$$\mathbf{g}_{ts}(\mu) = \mathbf{g}(\mathbf{x}^{(r)}, \rho) + \mu \nabla_{\mathbf{x}} \mathbf{g}(\mathbf{x}^{(r)})^t \Delta \mathbf{x}^{(r)} + \mu^2 T(\mathbf{x}^{(r)}), \quad (3.5)$$

$T(\mathbf{x})$ corresponde ao termo de segunda ordem de \mathbf{g} , dado por:

$$T(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \left(\sum_{i \in \Omega_{\mathbf{g}}} \Delta x_i \frac{\partial}{\partial x_i} \right)^2 \mathbf{g}(\mathbf{x}), \quad (3.6)$$

Substituindo (3.5) em (3.4) e aplicando a condição de mínimo local $\partial F / \partial \mu = 0$, uma equação cúbica é obtida e resolvida para μ .

Para sistemas bem condicionados, μ assume valores próximos de 1 e não afeta o processo

iterativo de maneira significativa. No caso de sistemas mal condicionados, μ assume valores tais que o processo iterativo é melhorado, e a solução é obtida, ao contrário do método de Newton convencional, que poderia ter falhado (Castro, 1997).

Para os pontos de operação inactíveis (seja devido a uma carga excessiva ou a uma contingência), μ assume valores muito baixos (teoricamente $\mu \rightarrow 0$). Em (Overbye, 1994) foi mostrado que o FCOP leva a um ponto sobre a fronteira de factibilidade Σ , ao invés de simplesmente divergir. Note que a matriz Jacobiana é singular em Σ , portanto, os tamanhos de passo $\Delta \mathbf{x}$ são grandes em sua proximidade. Entretanto, a convergência do FCOP não é afetada graças a μ ($\mu \Delta \mathbf{x} \rightarrow 0$).

3.3 Aplicações de FCOP na análise de estabilidade de tensão

Em função de suas características, discutidas na seção anterior, novas aplicações do FCOP podem ser vislumbradas, como por exemplo no cálculo do PMC e das margens de segurança para estabilidade de tensão. A Figura 3.1 apresenta o comportamento geral do FCOP para um valor grande de ρ (i.e. $\rho > \rho_{cr}$, em que ρ_{cr} é o maior fator de carga possível de forma que a rede ainda opere de maneira estável) no espaço de parâmetros de carga com a direção \mathbf{s}_{esp} , que é um vetor unitário de direção de incremento de carga definido pelo vetor \mathbf{S}_{esp} , onde $\mathbf{S}_{esp} = [\mathbf{P}_{esp}^t \ \mathbf{Q}_{esp}^t]^t$. Em outras palavras, tem-se $\mathbf{S}_{esp} = \frac{\|\mathbf{S}_{esp}\|_2}{\|\mathbf{S}_{esp}\|_2} \cdot \mathbf{s}_{esp}$.

Em (Dobson, 1993) foi proposto um método iterativo para cálculo do ponto mais próximo da fronteira Σ a partir de um determinado ponto de operação factível. A distância entre estes dois pontos de operação é denominada mínima margem de estabilidade de tensão (MMET). Em cada passo, o PMC é calculado a partir de uma direção predefinida de incremento de carga. Em seguida, a direção é atualizada usando as informações do vetor normal a Σ calculadas no PMC anterior. Este vetor normal \mathbf{w} é calculado a partir de (3.2) como:

$$\begin{aligned} \nabla_{\mathbf{x}} \mathbf{g}(\mathbf{x}_{pmc})^t \mathbf{w} &= \mathbf{0} \\ \|\mathbf{w}\|_2 &= 1 \end{aligned} \quad , \quad (3.7)$$

sendo \mathbf{x}_{pmc} o vetor das variáveis de estado no último PMC; $\|\mathbf{w}\|_2$ é a norma euclidiana de \mathbf{w} , logo, \mathbf{w} é um vetor unitário. Na verdade, (3.7) representa as condições de singularidade da bifurcação sela-nó, e então neste caso \mathbf{w} representa o autovalor esquerdo associado ao autovalor crítico (teoricamente $\lambda_{cr} = 0$). Uma estratégia similar foi usada por (Overbye, 1994) para o cálculo de MMET medido a partir de um ponto de operação infactível. Bedoya (2007) também propôs um método de cálculo da MMET, já apresentado no capítulo anterior.

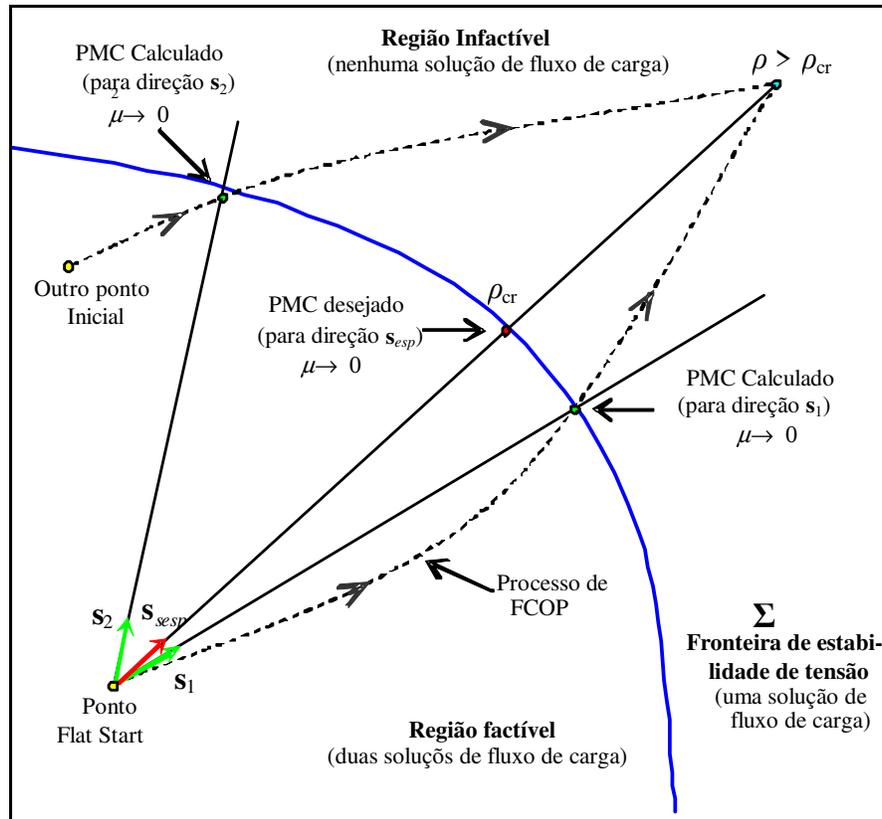


Figura 3.1: Características do FCOP no espaço de parâmetros de carga

Um sistema simples, composto de duas barras, uma de geração (*slack*) e uma de carga (PQ) foi extraído de (Bedriñana, 2009) e será utilizado ao longo deste trabalho para que sejam ilustrados os procedimentos e facilitar a compreensão do problema. A barra 1 (*slack*) possui um gerador com tensão $E=1$ p.u. e a barra 2 (PQ) tem uma carga com potências ativa e reativa P_c e Q_c , cujos valores são iguais a 0,5 p.u. e 0,3 p.u., respectivamente. A linha transmissão 1–2 não possui perdas e apresenta uma reatância $x=0,25$ p.u. O gerador na barra 1 não tem limites de potência

reativa, assumindo-se, portanto, uma reserva de reativos ilimitada. O sistema mencionado pode ser visto na Figura 3.2 a seguir.

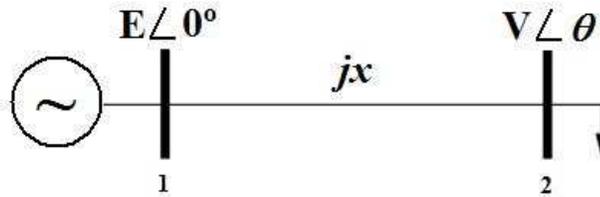


Figura 3.2: Sistema exemplo de duas barras

Foi realizada uma simulação considerando um ponto inicial infactível, que pode ser visto na Figura 3.3, denominado de ponto 1.

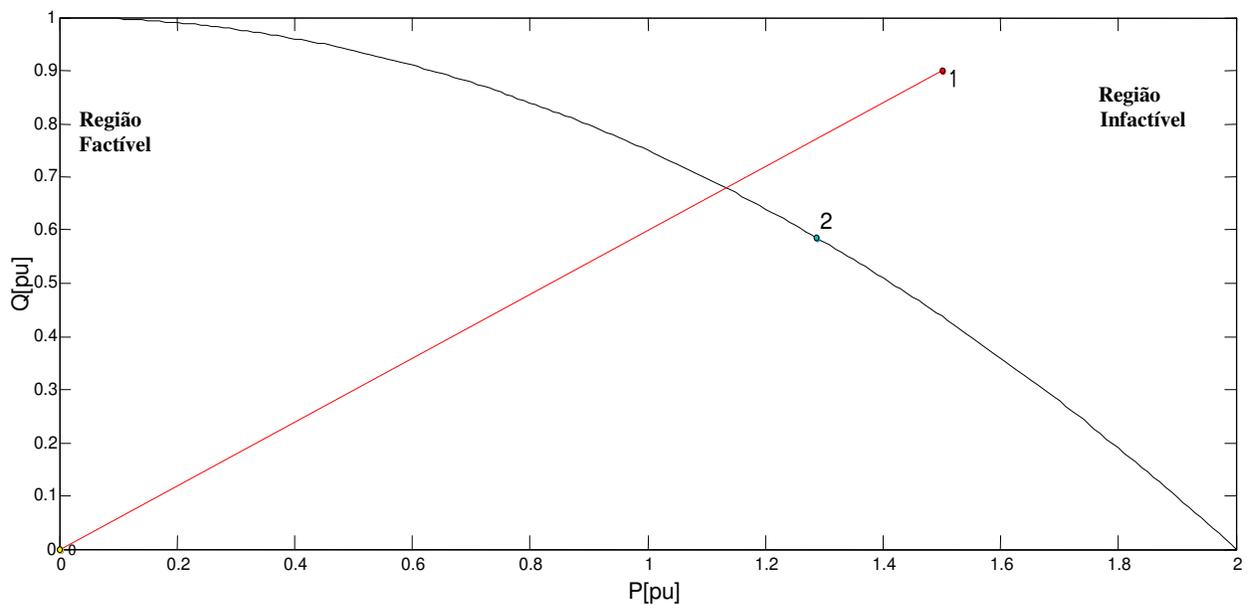


Figura 3.3: Curva da fronteira de factibilidade e o FCOP

Neste ponto, pela sua característica infactível, o fluxo de carga de Newton convencional teria divergido e nenhuma solução poderia ser obtida. O que acontece aplicando-se o FCOP é que torna-se possível a obtenção de uma solução (que obviamente não é a solução no sentido de se ter um ponto de operação de regime permanente, visto que este não existe, mas uma solução que forneça informações úteis para a análise do problema), muito próxima à fronteira de carregamento Σ , ao invés da simples divergência, representado na figura pelo ponto 2. Nota-se, porém, que o

valor obtido como resposta não pode ser considerado como solução final do problema. Em primeiro lugar, porque o ponto especificado é infactível, portanto, a distância entre os pontos 1 e 2 corresponde aos *mismatches* de potência. Em segundo lugar, o ponto localiza-se em uma direção de incremento de carga diferente da direção inicial desejada, representada na figura pela linha vermelha, portanto, não apresenta fator de potência igual ao fator de potência do ponto inicial. Este ponto obtido é muito próximo da fronteira de carregamento e será de extrema importância nos estudos descritos a seguir, que visam à obtenção do PMC.

3.4 Método da Continuação

O método da continuação foi desenvolvido por Ajjarapu (1992). O seu propósito era o de obter uma continuidade de soluções de fluxo de carga a partir de um caso base até obter um estado estável de limite de tensão, ou PMC. Sua principal característica, que se torna uma vantagem diante de outras metodologias, é que mesmo quando o ponto de operação encontra-se em torno do ponto crítico tem-se um fluxo de carga bem condicionado, evitando possíveis divergências.

Os resultados intermediários do processo são utilizados para desenvolver um índice de estabilidade de tensão e identificar as áreas do sistema mais propensas a um colapso de tensão, caso haja a garantia de factibilidade destes pontos. Através da reformulação das equações do fluxo de carga e com a aplicação de uma técnica de continuação parametrizada pode-se evitar os problemas causados pela singularidade da matriz Jacobiana (Ajjarapu, 1992).

O trajeto do caso base até o limite de carregamento é calculado através de um método preditor-corretor incrementando um *parâmetro de continuação*, que geralmente utiliza a potência ativa ou reativa com o início no valor do caso base. É o *parâmetro de continuação* que identifica o problema de convergência próximo à solução desejada e o contorna através de uma lógica própria que identifica este problema mudando o parâmetro.

A maneira de inicializar o processo é muito importante, pois é ela quem irá garantir a qualidade da solução final obtida. Caso isso não aconteça, o algoritmo estará propenso a uma convergência para soluções não desejadas ou até uma não convergência do método. Assim

considera-se uma característica necessária para o método o fato de sua região de convergência ser tão ampla quanto possível, diminuindo desta maneira a ocorrência de erros e divergências.

A metodologia traça o perfil de tensão completo a partir da variação do valor do parâmetro ρ (associado à carga do sistema), sem se preocupar com possíveis singularidades do sistema, como por exemplo, da matriz Jacobiana, já que esta é modificada. O parâmetro de bifurcação ρ é incluído nas equações de fluxo de carga de maneira reformulada, como segue:

$$f(\mathbf{x}, \rho) = 0 \quad (3.8)$$

sendo ρ o parâmetro que conduz o sistema de um ponto de equilíbrio para outro, usualmente um fator aplicado à carga total, e \mathbf{x} o vetor das variáveis de estado (módulo e ângulo das tensões nodais).

Conforme Ajarapu (1992), são quatro os elementos básicos que compõem este método:

- Um passo preditor
- Um controle de passo
- Um procedimento de parametrização
- Um passo corretor

O passo preditor-corretor pode ser visto na Figura 3.4. Inicialmente tem-se um ponto de equilíbrio (\mathbf{x}_1, ρ_1) que é usado para o cálculo da direção do vetor $\Delta \mathbf{x}_1$ e para a variação $\Delta \rho_1$ do parâmetro do sistema. A nova solução obtida é então corrigida através de um fluxo de carga modificado.

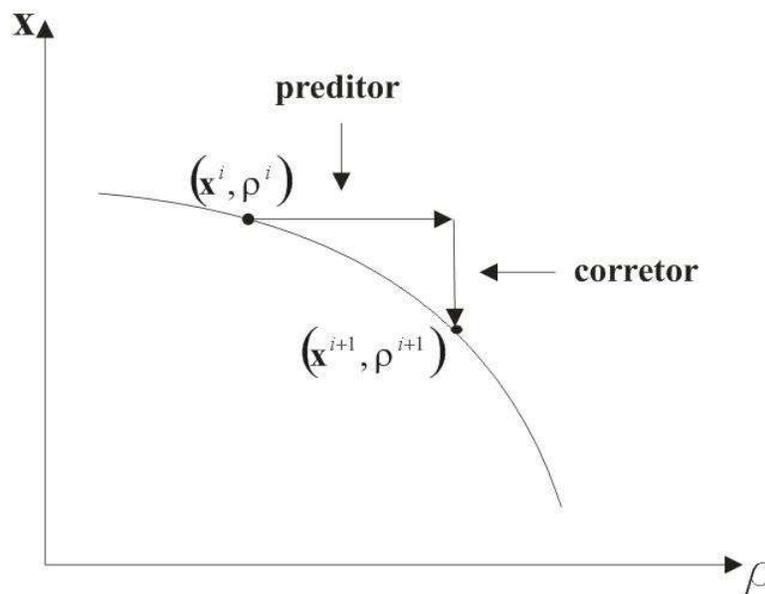


Figura 3.4: Esquema preditor-corretor

Conforme (Ferreira, 2008), no passo predictor há um incremento de carga para um novo estado da rede de acordo com o novo nível de carregamento. Ele realiza-se na direção do vetor tangente à função no ponto e com passo pré-definido. Obtém-se a direção do vetor e o tamanho do passo através da normalização do vetor tangente, cuja magnitude aumenta à medida que aumenta a proximidade do PMC. Uma boa correção depende do controle dinâmico de passo, pois se este for muito grande poderá acarretar um problema de convergência na correção, e caso seja demasiadamente pequeno, pode haver um aumento desnecessário do esforço computacional, mesmo que os pontos de operação encontrem-se longe do PMC.

Existem diversos estudos sobre qual a técnica de controle de passo mais apropriada e eficiente no método da continuação, devido à sua já mencionada importância. Em (Seydel, 1988) foi sugerido como parâmetro o número de iterações na etapa de correção. Em (Cañizares, 1993) é proposto que o passo seja dividido pela metade todas as vezes que alguma falha for encontrada nesta etapa, permitindo assim que a estimativa deste passo não seja muito pequena de início. Em (Zambroni, 1996) é recomendada uma técnica que baseia-se no vetor tangente para a determinação do tamanho de passo ideal. Uma boa medida de tamanho de passo proposta foi a que considera o inverso da norma, pois permite que, quando distante do PMC, possa ser dado um passo maior e, à medida que o PMC aproxima-se, o inverso da norma fornece valores cada vez menores.

A principal vantagem da parametrização no método da continuação ocorre quando se tem dificuldade para o cálculo do vetor tangente devido ao mau condicionamento da matriz Jacobiana. Quando a matriz Jacobiana torna-se próxima da singularidade devido à proximidade do PMC, é a parametrização que irá remover tal singularidade através da mudança do parâmetro de continuação ρ por um valor de tensão ou ângulo. Analisa-se a variação dos estados entre os dois últimos pontos da curva e adota-se como parâmetro da continuação aquele que apresentou uma maior variação.

Em (Cañizares, 2007) explica-se que é possível dispensar a utilização da parametrização caso o método utilize uma redução automática no passo todas as vezes que alguma dificuldade de convergência ocorrer.

Meireles (2005) explica o processo iterativo básico do método da continuação de maneira simples, cujo parâmetro é a tensão de uma barra PQ que é variada, obtendo-se o carregamento ρ aos poucos, até que seja definida a curva PV e seja obtido o PMC.

O método da continuação consiste em utilizar as equações do método de Newton convencional, porém com a inserção do fator de carregamento ρ , como mostra a equação (3.9). As potências especificadas serão multiplicadas por este fator de carregamento, o que significa que será feito o balanço de potência ativa e reativa tanto nas barras de carga quanto nas barras de geração (Meireles, 2005).

$$\begin{aligned}\rho P_{esp} - P(\theta, V) &= 0 \\ \rho Q_{esp} - Q(\theta, V) &= 0\end{aligned}\quad (3.9)$$

Trata-se a magnitude de tensão de uma barra PQ pré-selecionada como uma variável conhecida e ρ como uma variável desconhecida, de maneira que a equação descrita acima pode ser linearizada, obtendo as seguintes equações do fluxo de carga:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N' & -P_{esp} \\ M & L' & -Q_{esp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V' \\ \Delta \rho \end{bmatrix} = J_V \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V' \\ \Delta \rho \end{bmatrix}, \quad (3.10)$$

sendo J_V a matriz Jacobiana expandida. O vetor $\Delta V'$ não contém o elemento ΔV_k que corresponde à barra PQ pré-selecionada, sendo substituído por $\Delta \rho$. Desta maneira, os elementos da coluna k das matrizes N' e L' passam a ser derivadas das potências em relação a ρ . São estas modificações que permitirão que a matriz Jacobiana não seja singular nas regiões próximas do PMC, como acontecia anteriormente, permitindo que o processo de convergência não seja afetado por este problema.

Define-se uma variação na tensão da barra k , encontrando o estado do sistema para cada valor de V_k , visto que o fator de carregamento, neste caso, é uma variável desconhecida.

Quando se escolhe a barra k para este método, é essencial que esta apresente uma ampla variação da tensão, para que o método consiga traçar as curvas PV de todas as barras da rede.

3.5 Outros Métodos

Além dos métodos já mencionados, podem ser citados ainda outros métodos, por exemplo, aqueles que são conhecidos como métodos diretos. Eles foram assim denominados pelo fato de permitirem que fosse realizado um cálculo direto do PMC, sem que fossem determinados outros

pontos existentes entre o caso base e o PMC, justamente o fator responsável pela falha destes métodos, quando o propósito é o da obtenção da margem de carga. Os métodos diretos podem ser subdivididos em métodos do ponto de colapso e métodos de otimização.

3.5.1 Ponto de Colapso

Foi em (Alvarado, 1989) que houve a proposição do método direto, também conhecido como método do PMC, que posteriormente fora adaptado em (Cañizares, 1992 e 1993). Este método foi desenvolvido baseado na teoria da bifurcação e na singularidade da matriz J , e é utilizado para detectar uma bifurcação sela-nó para uma determinada direção de incremento de carga. Ele consiste na resolução das equações abaixo, para \mathbf{z} , ρ e \mathbf{w} (autovetor à direita) obtidos do PMC (z^*, ρ^*) , a qual fornece a determinação direta da margem de carregamento para o colapso $\Delta\rho = \rho^* - \rho$, qualquer que seja o ponto definido por ρ , sem que outros pontos entre o caso base e a extremidade da curva sejam calculados.

$$\begin{aligned} F(\mathbf{z}, \rho) &= 0 \\ D_{\mathbf{z}}F(\mathbf{z}, \rho)^T \mathbf{w} &= 0 \\ \|\mathbf{w}\|_{\infty} &= 1 \end{aligned} \tag{3.11}$$

Quando se utiliza a norma infinita na terceira equação tem-se um modo muito confiável de encontrar o ponto de colapso de tensão. Apesar de sua eficiência na determinação do PMC, este método requer um esforço computacional bastante alto, visto que a dimensão total do sistema de equações é de $2n+1$, o dobro da matriz Jacobiana convencional, impondo maiores requisitos de memória e de tempo de CPU.

3.5.2 Métodos de Otimização

Segundo (Van Cutsem, 1998), foram várias as técnicas de otimização propostas para a obtenção direta do PMC. Estas propostas baseavam-se na eliminação da singularidade da matriz Jacobiana através de uma modificação do método convencional de Newton. As equações utilizadas são similares aos métodos diretos, porém com a inserção de problemas de otimização (Irisarri, 1997). O problema consiste em:

$$\begin{aligned} \max \quad & \rho \\ \text{sujeito a} \quad & F(z, \rho) = 0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

A solução é obtida usando a função Lagrangiana:

$$L(z, \rho, \omega) = \rho + \omega^T \times F(z, \rho), \quad (3.13)$$

sendo ω o vetor dos multiplicadores de Lagrange. Assim, a satisfação das condições necessárias de primeira ordem é obtida da solução do sistema 3.16:

$$\begin{aligned} D_{\omega}L &= F(z, \rho) = 0 \\ D_z L &= D_z F(z, \rho)^T \omega = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial \rho} &= \omega^T \frac{\partial F}{\partial \rho}(z, \rho) + 1 = 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

São várias as técnicas de otimização que podem ser empregadas para a obtenção do PMC quando se expressa o problema de colapso como um problema de otimização. Por ter alta capacidade de manipulação de variáveis canalizadas, considera-se o método de pontos interiores especialmente atraente (Silveira, 2003). Porém, a representação da atuação discreta dos controles (como por exemplo, taps e shunts), pode ser difícil nestes métodos, o que dificulta o estudo de pontos de operação intermediários.

3.6 Método de Bedriñana (2008)

O método de obtenção do ponto de máximo carregamento proposto por Bedriñana (2008),

tratado aqui como método original, baseia-se nos pontos discutidos a seguir.

1. Foi mostrado em (Overbye, 1994) que, para um carregamento excessivo (i.e. $\rho > \rho_{cr}$), o FCOP converge para um ponto muito próximo da fronteira Σ quando $\mu \rightarrow 0$. Dependendo do ponto inicial (*flat start* ou outro), um PMC diferente é obtido em Σ , levando a um PMC em outra direção de incremento de carga (i.e. s_1 e s_2 para *flat start* ou outro ponto inicial, respectivamente, de acordo com a Figura 3.1), que é diferente da direção inicial s_{esp} (veja Figura 3.1).

2. O último PMC calculado se move para o PMC desejado conforme ρ se aproxima de ρ_{cr} . A Figura 3.5 mostra esta situação. Também, para $\rho > \rho_{cr}$, o FCOP resulta em um PMC; e para $\rho < \rho_{cr}$, o FCOP resulta em um ponto de operação factível.

3. Ainda de acordo com (Dobson, 1993), é possível, calcular o vetor normal w no último PMC (representado pelo ponto S' na fronteira), através do cálculo do autovetor esquerdo associado ao menor autovalor da matriz Jacobiana. Em seguida, as características da fronteira Σ podem ser reproduzidas de maneira aceitável usando as informações do vetor no espaço de parâmetros de carga.

4. A potência fornecida pelo FCOP no último PMC calculado é ΔS (veja Figura 3.6). ΔS também representa a distância, em termos de potência, entre o último PMC e S_{esp} . Usando as informações de ΔS e propriedades geométricas do vetor normal, é possível obter o corte de carga $\Delta\rho$ de modo que se obtenha PMC desejado ao longo da direção de incremento de carga s_{esp} (veja Figura 3.5), como explicado adiante.

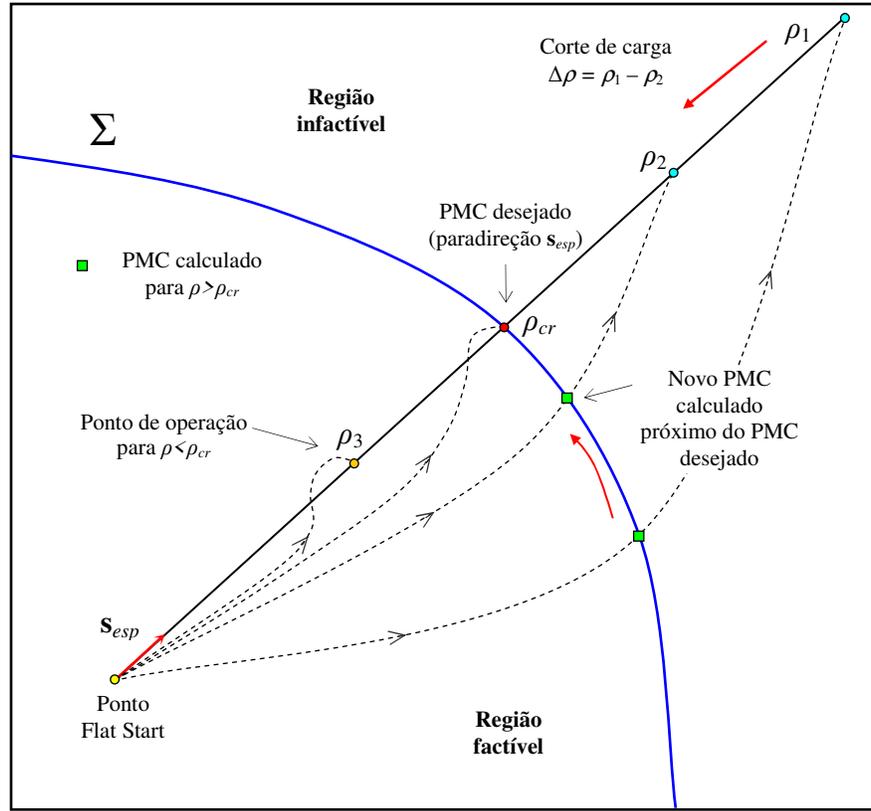


Figura 3.5: Características do FCOP no espaço de parâmetro de carga para diferentes ρ

Considere o espaço de parâmetros de carga em duas dimensões mostrado na Figura 3.6. As informações do último PMC e a equação (3.7) podem ser usadas para calcular o vetor unitário \mathbf{w} normal à fronteira Σ neste ponto.

Para o ponto de operação correspondente ao caso base tem-se o vetor de potências \mathbf{S}_{esp} que pode ser representado por:

$$\mathbf{S}_{\text{esp}} = \|\mathbf{S}_{\text{cb}}\|_2 \cdot \mathbf{s}_{\text{esp}}, \quad (3.15)$$

sendo $\|\mathbf{S}_{\text{esp}}\|_2$ a norma do vetor, \mathbf{S}_{cb} as potências do caso base e \mathbf{s}_{esp} um vetor unitário que representa a direção de incremento de carga.

Aplicando um fator de carregamento ρ à carga do caso base, tem-se um ponto de operação dado por:

$$\mathbf{S}_{\text{esp}} = \rho \cdot \mathbf{S}_{\text{cb}}. \quad (3.16)$$

Eventualmente o valor atribuído a ρ pode ser um valor excessivo (como o ρ^0 mostrado na Figura 3.6), o que resulta em um valor de \mathbf{S}_{esp} localizado na região infactível.

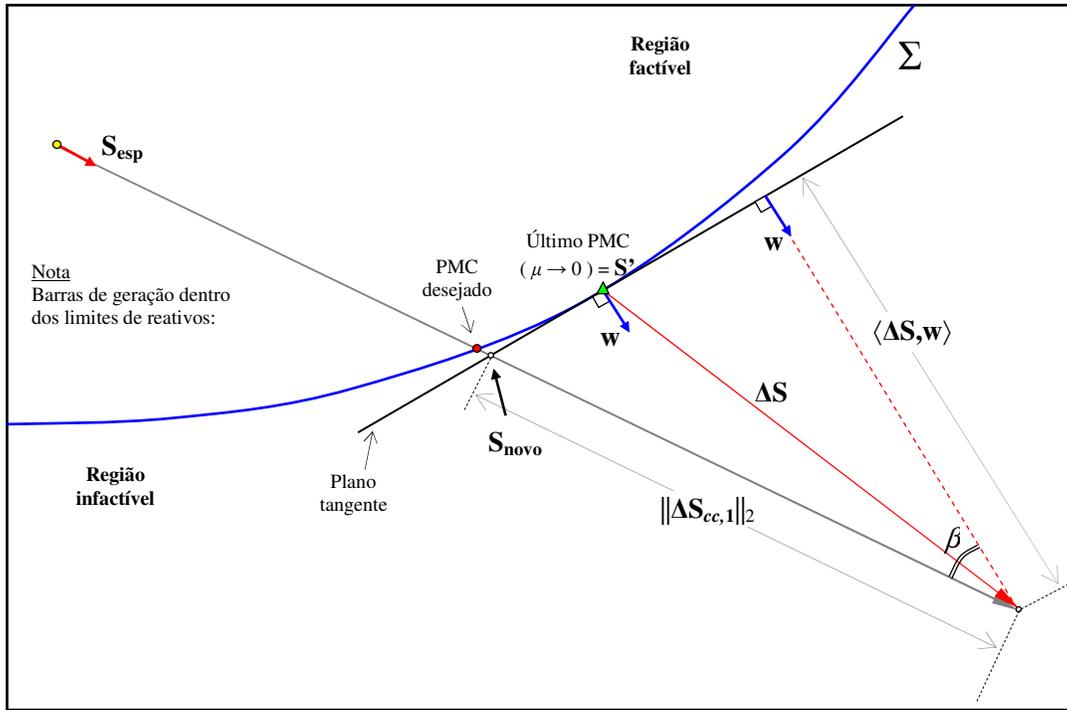


Figura 3.6: Passo de corte de carga no último PMC calculado quando ρ está na região infactível (Σ é convexa)

A partir do valor de ρ^0 , FCOP converge para um ponto localizado sobre a fronteira e representado na figura por $S^?$. Traçada a reta tangente a este ponto tem-se a interseção desta com a linha que representa o aumento de carga. Este ponto na interseção, representado na figura por S_{novo} pode ser representado por:

$$\begin{aligned}
 S_{\text{novo}} &= \rho^{\text{novo}} \cdot S_{\text{cb}} \\
 S_{\text{novo}} &= (\rho - \Delta\rho) \cdot S_{\text{cb}} \\
 S_{\text{novo}} &= S_{\text{esp}} - \Delta\rho \cdot S_{\text{cb}}.
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

Substituindo-se S_{novo} por $\rho^{\text{novo}} \cdot S_{\text{cb}}$:

$$\begin{aligned}
 \rho^{\text{novo}} \cdot S_{\text{cb}} &= (\rho - \Delta\rho) \cdot S_{\text{cb}} \\
 \rho^{\text{novo}} &= (\rho - \Delta\rho)
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

O corte de carga $\Delta S_{\text{cc},1}$ que leva de S_{esp} para S_{novo} é:

$$\begin{aligned}
 \Delta S_{\text{cc},1} &= S_{\text{esp}} - S_{\text{novo}} \\
 \Delta S_{\text{cc},1} &= \|\Delta S_{\text{cc},1}\|_2 \cdot S_{\text{esp}}
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

No ponto S' pode-se obter o autovetor à esquerda da matriz Jacobiana (\mathbf{w}), que neste ponto é singular. Os *mismatches* de potência $\Delta\mathbf{S} = [\Delta\mathbf{P}^t \ \Delta\mathbf{Q}^t]^t$, onde $\Delta\mathbf{S} \in \mathfrak{R}^{(2n_{PQ} + n_{PV})}$, fornecidos pelo FCOP são iguais a:

$$\Delta\mathbf{S} = \mathbf{S}_{\text{esp}} - \mathbf{S}' \quad (3.20)$$

Projetando-se $\Delta\mathbf{S}$ sobre uma linha perpendicular à reta tangente, tem-se $\langle \Delta\mathbf{S}, \mathbf{w} \rangle$ que é o produto escalar de $\Delta\mathbf{S}$ e \mathbf{w} , conforme visto na figura.

Além disso:

$$\begin{aligned} \cos \beta &= \frac{\langle \Delta\mathbf{S}, \mathbf{w} \rangle}{\|\Delta\mathbf{S}_{\text{cc},1}\|_2} \\ \|\Delta\mathbf{S}_{\text{cc},1}\|_2 &= \frac{\langle \Delta\mathbf{S}, \mathbf{w} \rangle}{\cos \beta} \\ \Delta\mathbf{S}_{\text{cc},1} &= \frac{\langle \Delta\mathbf{S}, \mathbf{w} \rangle}{\cos \beta} \cdot \mathbf{s}_{\text{esp}} \end{aligned} \quad (3.21)$$

O ângulo β também é o ângulo entre \mathbf{s}_{esp} e \mathbf{w} , então $\cos \beta = \langle \mathbf{s}_{\text{esp}}, \mathbf{w} \rangle$.

Substituindo-se o valor do $\cos \beta$ em (3.17), tem-se:

$$\Delta\mathbf{S}_{\text{cc},1} = \frac{\langle \Delta\mathbf{S}, \mathbf{w} \rangle}{\langle \mathbf{s}_{\text{esp}}, \mathbf{w} \rangle} \cdot \mathbf{s}_{\text{esp}} \quad (3.22)$$

Com o intuito de obter o valor de $\Delta\rho$, procede-se à substituição de $\Delta\mathbf{S}_{\text{cc},1}$ em (3.18):

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{\text{esp}} - \mathbf{S}_{\text{novo}} &= \frac{\langle \Delta\mathbf{S}, \mathbf{w} \rangle}{\langle \mathbf{s}_{\text{esp}}, \mathbf{w} \rangle} \cdot \mathbf{s}_{\text{esp}} \\ \mathbf{S}_{\text{esp}} - (\mathbf{S}_{\text{esp}} - \Delta\rho \cdot \mathbf{S}_{\text{cb}}) &= \frac{\langle \Delta\mathbf{S}, \mathbf{w} \rangle}{\langle \mathbf{s}_{\text{esp}}, \mathbf{w} \rangle} \cdot \mathbf{s}_{\text{esp}} \\ \Delta\rho \cdot \mathbf{S}_{\text{cb}} &= \frac{\langle \Delta\mathbf{S}, \mathbf{w} \rangle}{\langle \mathbf{s}_{\text{esp}}, \mathbf{w} \rangle} \cdot \mathbf{s}_{\text{esp}} \\ \Delta\rho \cdot \|\mathbf{S}_{\text{cb}}\|_2 \cdot \mathbf{s}_{\text{esp}} &= \frac{\langle \Delta\mathbf{S}, \mathbf{w} \rangle}{\langle \mathbf{s}_{\text{esp}}, \mathbf{w} \rangle} \cdot \mathbf{s}_{\text{esp}} \\ \Delta\rho &= \frac{\langle \Delta\mathbf{S}, \mathbf{w} \rangle}{\langle \mathbf{s}_{\text{esp}}, \mathbf{w} \rangle} \cdot \frac{1}{\|\mathbf{S}_{\text{cb}}\|_2}, \text{ ou} \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\Delta\rho = \frac{\langle \Delta\mathbf{S}, \mathbf{w} \rangle}{\langle \mathbf{S}_{\text{esp}}, \mathbf{w} \rangle}$$

Então, a nova estimativa para ρ será $\rho_{\text{novo}} = \rho - \Delta\rho$.

Uma característica interessante deste método é que o valor inicial de ρ deve ser grande o suficiente para que se possa garantir um ponto localizado na região de infactibilidade. Obviamente, este tipo de escolha não seria possível em um método convencional de fluxo de carga. No entanto, o FCOP fornece uma solução do PMC (diferente daquela desejada) quando $\mu \rightarrow 0$. Portanto, a sequência de pontos, desde o primeiro PMC calculado em direção ao PMC calculado é basicamente pela região de infactibilidade, pelo fato de Σ ser localmente convexa. A Figura 3.7 ilustra este processo. Começando de ρ^0 , o FCOP é executado levando ao PMC^0 , que é um PMC para outra direção de incremento de carga. Utilizando (3.23), ρ^1 é obtido e um novo FCOP leva a PMC^1 . O processo continua até que o PMC desejado seja obtido para a direção de incremento de carga definida.

Outra característica importante relaciona-se com os limites de potência reativa nos geradores. Logo na primeira iteração, as informações sobre os geradores que atingiram seus limites estão disponíveis. Esta informação é reutilizada nas próximas iterações, economizando tempo computacional (o processo de convergência de qualquer método de fluxo de carga considerando os limites de potência reativa pode utilizar mais tempo computacional do que aqueles que não consideram tais limites).

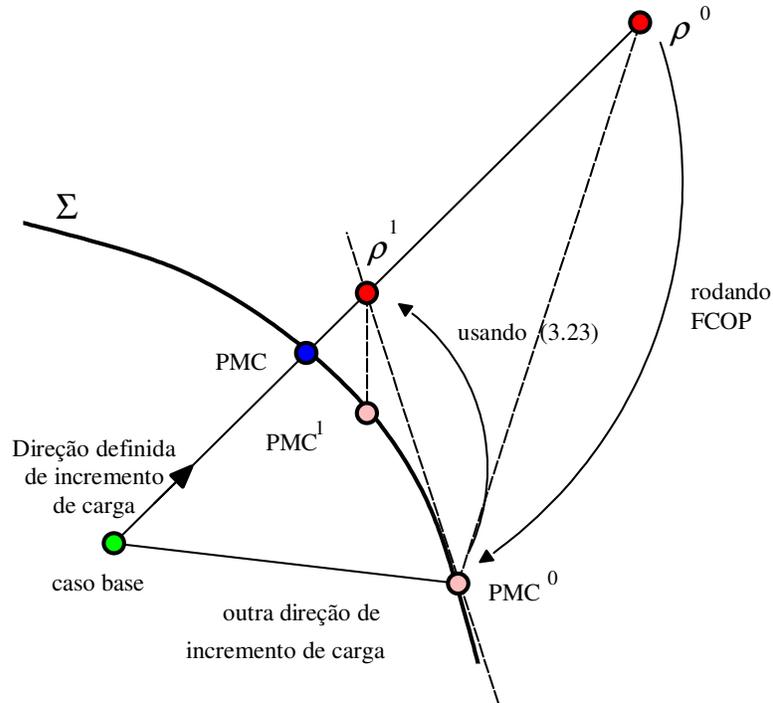


Figura 3.7: Processo de obtenção do PMC através de (3.23)

O mesmo sistema de duas barras apresentado na Seção 3.3 foi utilizado para ilustrar o procedimento de obtenção do PMC de (Bedriñana, 2008). O ponto 1 da Figura 3.8 a seguir foi o ponto inicial escolhido, inactivável e com $\rho=3$. Na primeira iteração o algoritmo realiza um FCOP que devolve como resposta o ponto 2 já apresentado. O ponto 2 localiza-se muito próximo da fronteira de factibilidade, entretanto não está localizado na direção de incremento de carga desejada, representada pela linha vermelha. O método de (Bedriñana, 2008) trabalha com este ponto obtido. Obtém-se uma reta tangente a este ponto e à fronteira de carregamento em direção à reta que representa a direção de incremento de carga. Posteriormente é obtido o vetor \mathbf{w} , normal à superfície, e por fim, através das propriedades geométricas obtém-se o ponto 3 ($\rho_1=2,2746$) que localiza-se na direção desejada. Nota-se que o corte de carga é bastante eficiente, visto que sua proximidade do PMC desejado é bastante grande. Após obtido o ponto 3, novamente inactivável, o procedimento é repetido, obtendo-se o ponto 4 na fronteira através do FCOP. Novamente traça-se a tangente e com as propriedades geométricas obtém-se o ponto 5 da figura, o qual representa o PMC desejado ($\rho_{sol}=2,2648$).

Este método será tomado como base para as propostas feitas neste trabalho.

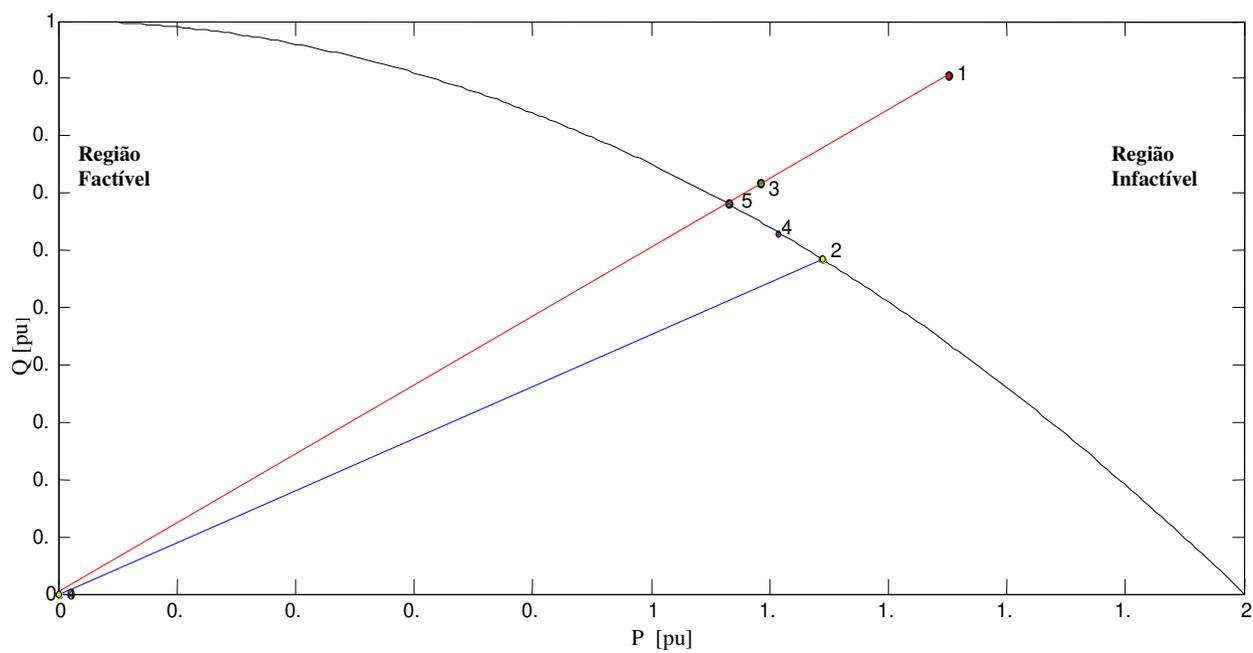


Figura 3.8: Fronteira de factibilidade e a primeira iteração de (Bedriñana, 2008)

Capítulo 4

Métodos Propostos

No decorrer deste trabalho foram propostos dois métodos distintos e com diferentes abordagens para a obtenção da solução do PMC. Eles são denominados de Método Proposto I, que obtém com precisão o PMC e Método Proposto II, que encontra o PMC com uma margem de erro para abordagens em tempo real. Ambos são apresentados neste capítulo.

4.1 Método Proposto I

Os resultados das simulações para os sistemas testes do IEEE até 300 barras mostraram que o método original (Bedriñana, 2008) apresenta bom desempenho e permite o cálculo PMC com menor número de iterações, quando comparado com outros métodos. No entanto, uma análise detalhada do desempenho do método mencionado mostra que é possível melhorá-lo.

4.1.1 Desempenho do método de Bedriñana (2008) na região factível

A principal característica do método original é que a sequência de pontos de operação está quase sempre na região infactível. No entanto, há situações em que o corte de carga frequentemente leva o ponto de operação para a região factível. O resultado disso é um aumento do esforço computacional, uma vez que um procedimento de busca binária é usado para o retorno à região de infactibilidade. As Figuras 4.1 e 4.2 mostram alguns resultados de simulações para os

sistemas IEEE de 57 e 118 barras respectivamente (POWER SYSTEMS TEST CASE), utilizando o método de (Bedriñana, 2008), a partir de três valores de ρ iniciais (6, 8 e 10).

Nota-se que logo na primeira iteração um ponto muito próximo de ρ_{cr} é obtido, mostrando a eficiência do método. No entanto, considerando o sistema IEEE 57 barras e $\rho^{(0)} = 8$, o ponto é levado para a região factível, como pode ser visto na Figura 4.1. A Figura 4.3 mostra esta situação de forma mais clara, pelo fato de mostrar a primeira iteração de maneira ampliada. Para $\rho^{(0)} = 8$, o ponto calculado pelo método original está abaixo da linha contínua correspondente a ρ_{cr} , isto é, dentro da região factível. Analogamente, a Figura 4.4 corresponde a uma ampliação de parte da Figura 4.2, onde o ponto também está localizado na região factível. De acordo com este método, sempre que um ponto factível é obtido, uma busca binária é usada para encontrar um novo ponto na região de infactibilidade. O principal objetivo deste trabalho é lidar com estas situações de forma mais eficiente, uma vez que a busca binária pode resultar em um maior número de iterações. Desta maneira, uma nova técnica de corte de carga é proposta para as situações onde o ponto de operação é levado para a região de factibilidade.

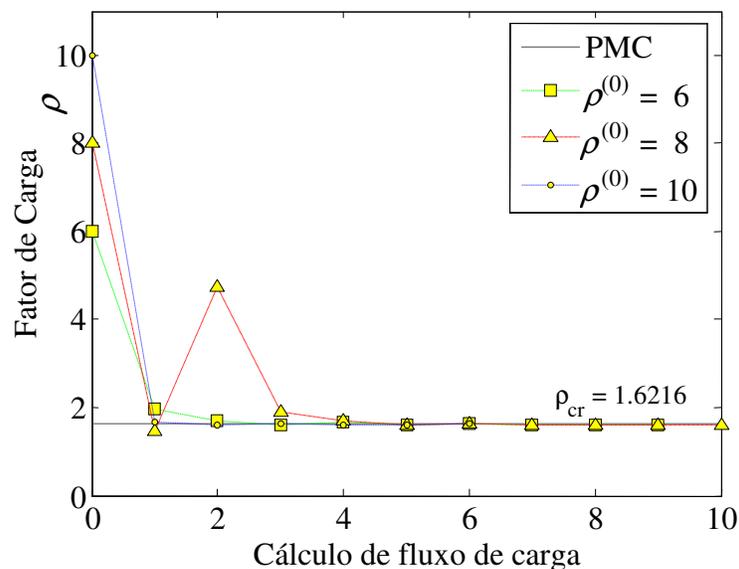


Figura 4.1: Processo de cálculo do PMC com o método (Bedriñana, 2008) para o sistema IEEE 57

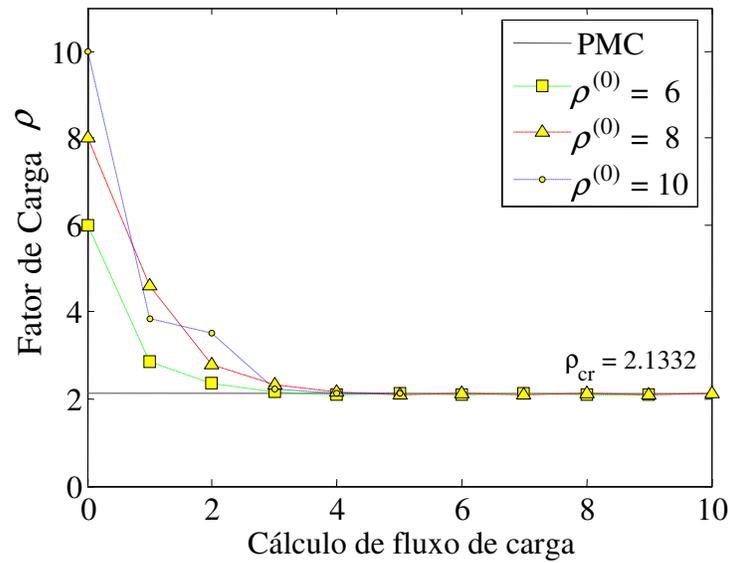


Figura 4.2: Processo de cálculo do PMC com o método de (Bedriñana, 2008) para o sistema IEEE 118

4.1.2 Técnica de Corte de Carga Conservadora

Em função das características da fronteira Σ , é possível que um corte de carga $\Delta\rho$ calculado por (3.23) conduza a um ponto na região factível. Neste caso, um corte de carga estendido é realizado.

Como mostrado na Figura 4.5, o corte de carga $\Delta\mathbf{S}_{cc,2}$ pode ser obtido utilizando informações similares, e calculado por:

$$\Delta\mathbf{S}_{cc,2} = \langle \Delta\mathbf{S}, \mathbf{s}_{esp} \rangle \mathbf{s}_{esp}, \quad (4.1)$$

sendo $\langle \Delta\mathbf{S}, \mathbf{s}_{esp} \rangle$ o produto escalar de $\Delta\mathbf{S}$ e \mathbf{s}_{esp} .

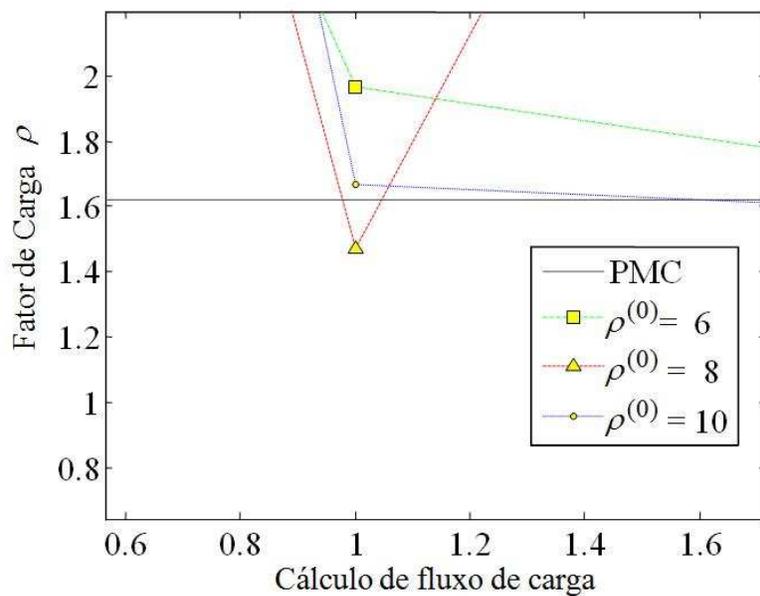


Figura 4.3: Zoom da figura 4.1 na primeira iteração para o sistema IEEE 57

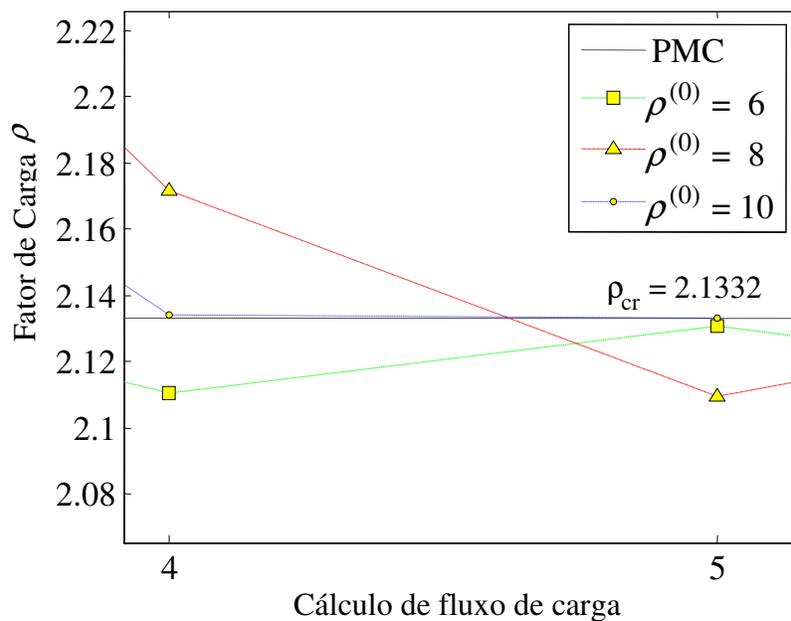


Figura 4.4: Zoom da figura 4.2 entre as iterações 4 e 5 para o sistema IEEE 118

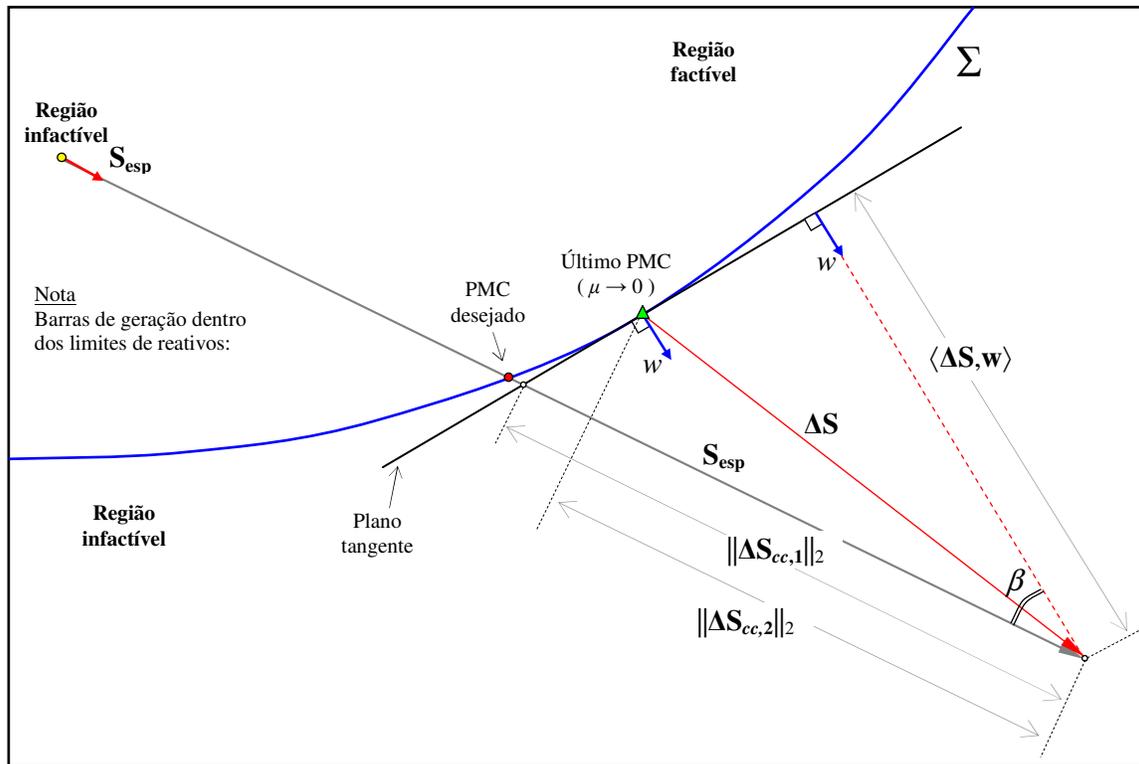


Figura 4.5: Passo de corte de carga no último PMC calculado quando ρ está na região infactível, apresentando o corte $\Delta S_{cc,2}$

Dependendo da curvatura de Σ , pode haver um $\|\Delta S_{cc,2}\|_2$ menor ou maior que $\|\Delta S_{cc,1}\|_2$, mas para os sistemas testados neste trabalho, $\|\Delta S_{cc,2}\|_2 < \|\Delta S_{cc,1}\|_2$ foi obtida na maioria dos casos.

As simulações mostraram que o processo usando $\Delta S_{cc,2}$ resulta sempre em pontos dentro da região infactível e seu desempenho é pior do que o método de (Bedriñana, 2008). Mesmo sendo $\Delta S_{cc,2}$ conservador, algumas características do seu desempenho podem ser usadas para melhorar a estabilidade numérica do método original.

4.1.3 Técnica de Corte de Carga Estendida

A técnica de corte de carga estendida é baseada na combinação de (3.11) e (4.1):

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{S}_{cc,novo} &= \frac{1}{2} (\Delta \mathbf{S}_{cc,1} + \Delta \mathbf{S}_{cc,2}) \\ \Delta \mathbf{S}_{cc,novo} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\langle \Delta \mathbf{S}, \mathbf{w} \rangle}{\cos \beta} + \langle \Delta \mathbf{S}, \mathbf{s}_{esp} \rangle \right) \mathbf{s}_{esp},\end{aligned}\quad (4.2)$$

e resultando em um novo fator de carga $\Delta \rho$ devido às novas restrições de carga, tornando-se

$$\Delta \rho = \frac{\|\Delta \mathbf{S}_{cc,novo}\|_2}{\|\mathbf{S}_{esp-cb}\|_2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\langle \Delta \mathbf{S}, \mathbf{w} \rangle}{\langle \mathbf{S}_{esp-cb}, \mathbf{w} \rangle} + \frac{\langle \Delta \mathbf{S}, \mathbf{s}_{esp} \rangle}{\|\mathbf{S}_{esp-cb}\|_2} \right). \quad (4.3)$$

A fim de garantir que o processo de corte de carga permanecerá na região infactível, a seguinte modificação em (4.3) é realizada:

$$\Delta \rho = \frac{1}{2} \left(\frac{\langle \Delta \mathbf{S}, \mathbf{w} \rangle}{\langle \mathbf{S}_{esp-cb}, \mathbf{w} \rangle} + \eta \frac{\langle \Delta \mathbf{S}, \mathbf{s}_{esp} \rangle}{\|\mathbf{S}_{esp-cb}\|_2} \right), \quad (4.4)$$

sendo η um parâmetro que depende do sistema.

A implementação das mudanças (4.2) –(4.4) no algoritmo de FCOP original é bastante simples.

É importante salientar que o corte de carga (4.4) será aplicado somente quando o processo cair na região de factibilidade, portanto (4.4) é utilizado para calcular um novo ρ_{RI} (fator de carga localizado na região infactível), que substituirá a busca binária.

Este ajuste de carga resulta em um ponto de operação próximo à fronteira Σ , resultando em um processo de obtenção de PMC mais eficiente, com um menor número de iterações, quando o ponto localiza-se na região factível. O desempenho considerando os limites de geração de potência reativa é semelhante ao desempenho quando estes limites não são considerados.

4.1.4 Testes e Resultados

O método proposto foi testado por vários sistemas teste do IEEE. A tolerância do Fluxo de Carga com Otimização de Passo (FCOP) ε_s foi fixada em 0,001 MW/MVAr, o fator de tolerância de carga ε_ρ foi fixado em 10^{-2} e o tamanho do passo μ_{min} foi fixado em 10^{-2} para o sistema

IEEE 57 barras, 0,2 para o IEEE 118 barras e 0,5 para o IEEE 118 barras no caso de rede alterada, por motivos de convergência do método. Os limites de geração de potência reativa nas barras de geração foram considerados. O parâmetro η vale um, exceto nos casos em que seja mencionado o contrário.

Resultados do método proposto I para a rede exemplo (sistema de duas barras) extraída de (Bedriñana, 2009) não serão apresentados, pois quando utiliza-se o procedimento de (Bedriñana, 2008) para esse sistema, o ponto de operação não é levado nenhuma vez para a região de factibilidade, e, portanto, não é necessário utilizar um corte de carga mais conservador, o que é a ideia principal do método proposto I.

Para fins simulação, diferentes pontos iniciais localizados na região infactível $\rho^{(0)}$ foram escolhidos, sendo iguais a 6, 8 e 10. Simulações com o sistema IEEE de 57 e 118 barras foram realizadas, uma vez que para estes sistemas o método original frequentemente leva a pontos dentro da região factível. O sistema IEEE 118 barras também foi testado para o caso de rede alterada. É importante salientar que a eficiência do método original baseia-se na obtenção de pontos na região de infactibilidade. A ideia do método proposto é a de manter os pontos na região infactível, sempre que possível, a fim de obter uma redução no esforço computacional global.

As Figuras 4.6 e 4.7 mostram o processo de obtenção do PMC para os sistemas IEEE de 57 e 118 barras, respectivamente, utilizando o método proposto com a técnica de corte de carga estendida. O ganho é evidente, uma vez que o número de pontos localizados na região factível (abaixo da linha horizontal) é bem menor, bem como o número de iterações, quando o método proposto é utilizado. A precisão dos resultados foi satisfatória quando comparados aos resultados do fluxo de carga da continuação (Ajjarapu, 1992), embora este último resultasse em um grande esforço computacional.

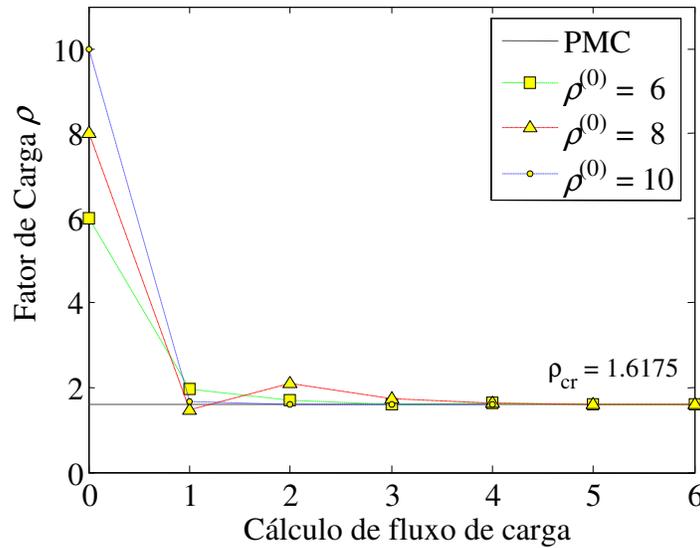


Figura 4.6: Processo de obtenção do PMC utilizando o método proposto para o sistema teste IEEE 57 barras

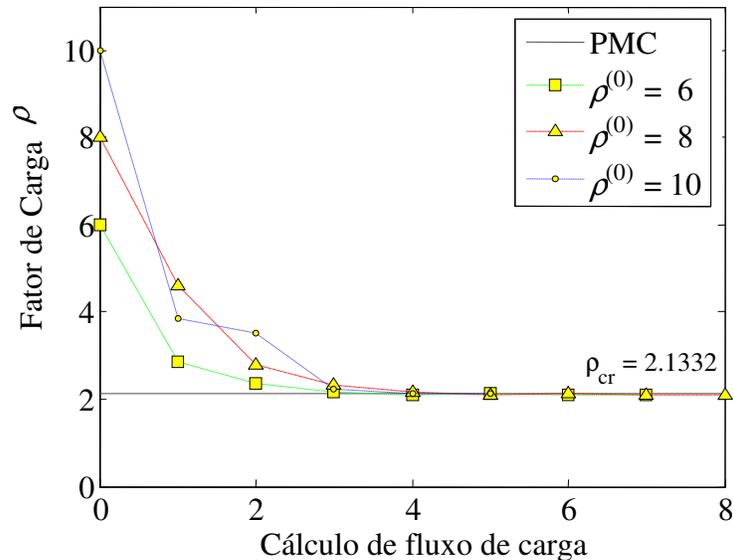


Figura 4.7: Processo de obtenção do PMC utilizando o método proposto para o sistema teste IEEE 118 barras

As Tabelas 4.1 e 4.2 mostram o desempenho do método proposto e uma comparação com o método de (Bedriñana, 2008) para os sistemas IEEE 57 e 118 barras, respectivamente. Também é apresentada uma comparação com o fluxo de carga da continuação (FCC) de Ajarapu (1992), para analisar a precisão dos resultados obtidos. Note que quanto mais $\rho^{(0)}$ se aproximar de ρ_{cr} , melhor será o desempenho do método proposto. O número de pontos na região factível (RF) e na região infactível (RI) também é apresentado.

TABELA 4.1

Resultado da Simulação para o Sistema Teste IEEE 57 Barras

| ρ Inicial | Número de Fluxo de Carga | | | | | | | | ρ FCC |
|-------------------|--------------------------|----|-------|------------------|-----------------|----|-------|------------------|---------------|
| | Método Original | | | | Método Proposto | | | | |
| | RF | RI | Total | ρ Obtido | RF | RI | Total | ρ Obtido | |
| 6 | 4 | 5 | 9 | 1,6173 | 2 | 4 | 6 | 1,6025 | 1,6168 |
| 8 | 4 | 6 | 10 | 1,6097 | 2 | 4 | 6 | 1,6075 | |
| 10 | 3 | 3 | 6 | 1,6216 | 2 | 2 | 4 | 1,6175 | |

TABELA 4.2

Resultado da Simulação para o Sistema Teste IEEE 118 Barras

| ρ Inicial | Número de Fluxo de Carga | | | | | | | | ρ FCC |
|-------------------|--------------------------|----|-------|------------------|-----------------|----|-------|------------------|---------------|
| | Método Original | | | | Método Proposto | | | | |
| | RF | RI | Total | ρ Obtido | RF | RI | Total | ρ Obtido | |
| 6 | 3 | 6 | 9 | 2,1134 | 2 | 5 | 7 | 2,1116 | 2,11 |
| 8 | 3 | 7 | 10 | 2,1153 | 2 | 6 | 8 | 2,112 | |
| 10 | 0 | 5 | 5 | 2,1332 | 0 | 5 | 5 | 2,1332 | |

Nota-se na Tabela 4.2, que para $\rho^{(0)} = 10$ o número de iterações foi igual em ambos os métodos, devido ao fato que todos os pontos obtidos pelo método original encontram-se na região infactível. Portanto, o método proposto de corte de carga não foi utilizado.

Comparando as Figuras 4.5 e 4.6 para $\rho^{(0)} = 8$, nota-se que o método proposto leva a um melhor ponto na segunda iteração, o que implica em um melhor desempenho.

As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam alguns resultados para o sistema IEEE 118 barras após uma contingência que consiste na saída de operação do transformador 8-5, utilizando o método original e do método proposto.

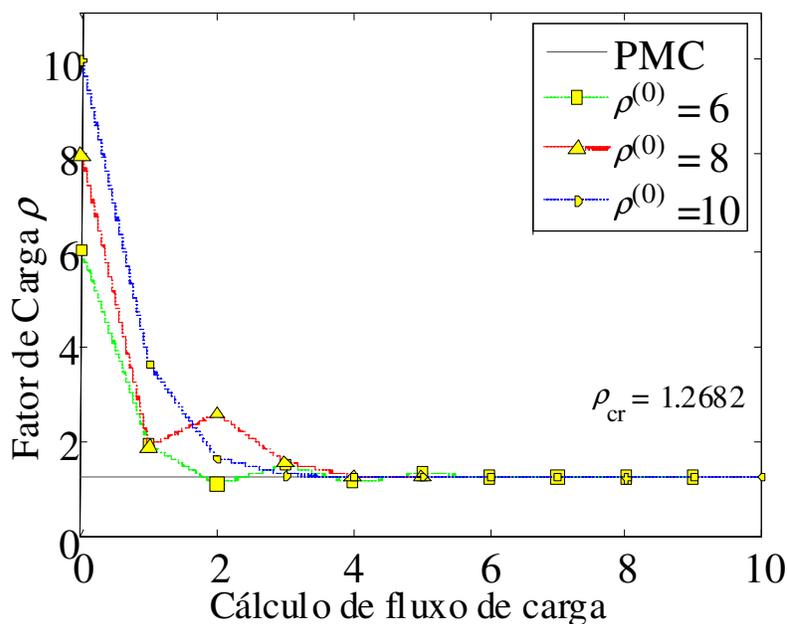


Figura 4.8: Processo de obtenção do PMC utilizando (Bedriñana, 2008) no sistema teste IEEE 118 barras com contingência em 8-5

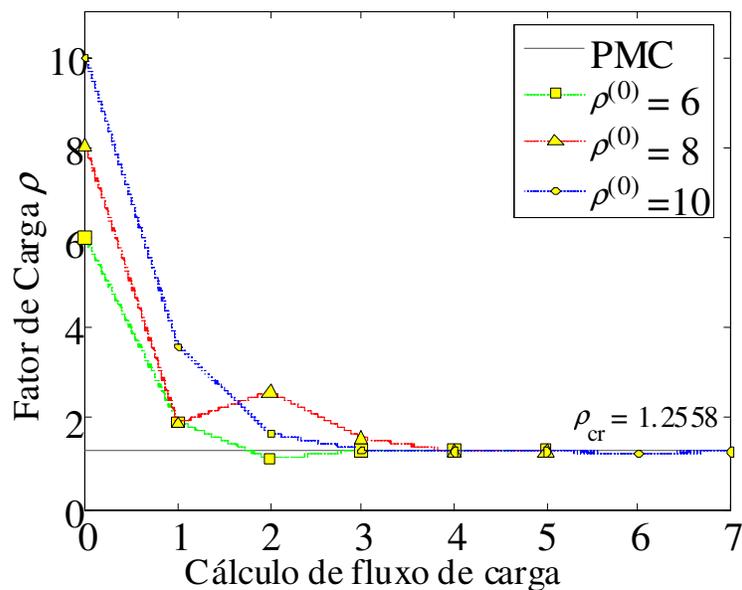


Figura 4.9: Processo de obtenção do PMC utilizando o método proposto para o sistema teste IEEE 118 barras com contingência em 8-5

A Tabela 4.3 sintetiza todos os resultados. O melhor desempenho do método proposto é evidenciado. Quando o método de (Bedriñana, 2008) é utilizado em situações de contingência, tornam-se mais frequentes os casos onde o ponto opera em uma região de factibilidade. Como

mencionado anteriormente, este fato leva a um maior número de iterações. O método proposto resultou em menos iterações. As Figuras 4.10 e 4.11 mostram detalhes com uma ampliação das Figuras 4.7 e 4.8 em algumas iterações. O ganho fornecido pelo método proposto é evidente após a segunda iteração, quando a região de factibilidade é alcançada. O corte de carga proposto é mais eficiente, uma vez que conduz a um ponto na região infactível, mais perto da fronteira de factibilidade.

TABELA 4.3

Resultados das Simulações para o Sistema Teste IEEE 118 Barras com Contingência em 8-5

| ρ Inicial | Número de Fluxo de a Carga | | | | | | | |
|-------------------|----------------------------|---|-------|------------------|-----------------|---|-------|------------------|
| | Método Original | | | | Método Proposto | | | |
| | RF | R | Total | ρ Obtido | RF | R | Total | ρ Obtido |
| 6 | 4 | 5 | 9 | 1,2717 | 2 | 3 | 5 | 1,2702 |
| 8 | 0 | 5 | 5 | 1,2629 | 0 | 5 | 5 | 1,2629 |
| 10 | 4 | 6 | 10 | 1,2682 | 2 | 5 | 7 | 1,2558 |

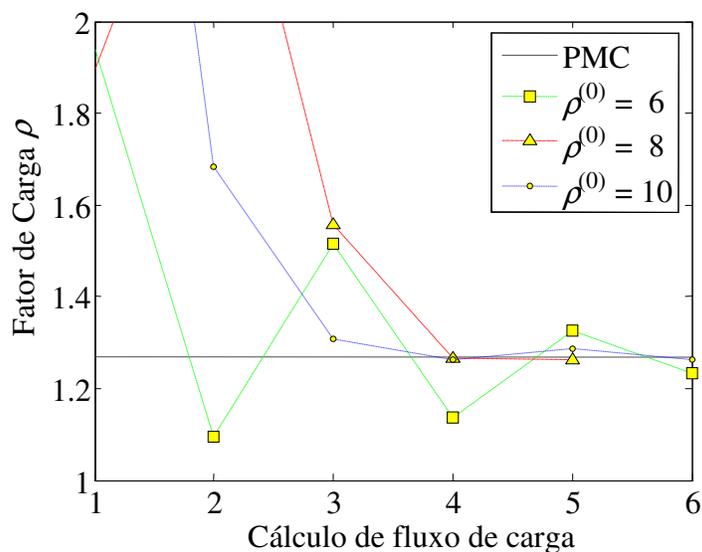


Figura 4.10: Zoom no processo de obtenção do PMC utilizando (Bedriñana, 2008) no sistema teste IEEE 118 barras com contingência em 8-5

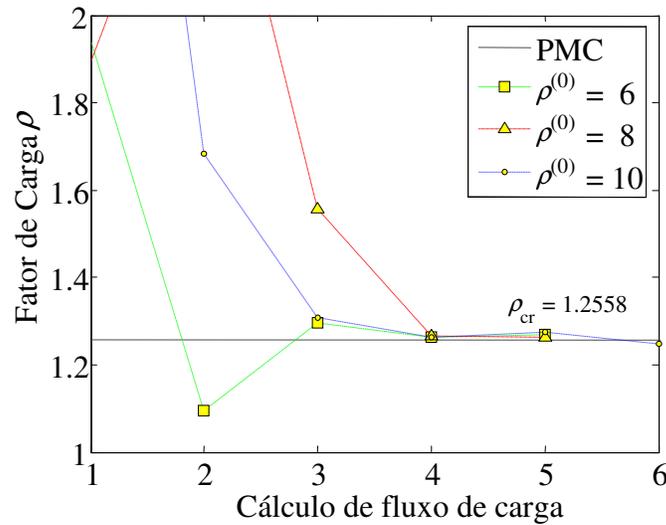


Figura 4.11: Zoom no processo de obtenção do PMC utilizando o método proposto para o sistema teste IEEE 118 barras com contingência em 8-5

O método de (Bedriñana, 2008) conduz a pontos muito próximos à fronteira de factibilidade, no entanto, há sempre o risco de um possível ponto factível ser obtido durante o processo. Ao invés de usar busca binária, o algoritmo proposto utiliza um corte de carga estendido que utiliza uma medida mais conservadora ($\|\Delta S_{cc,2}\|_2$) em relação a $\|\Delta S_{cc,1}\|_2$, resultando em uma melhor estimativa para o ponto seguinte. Esta contribuição foi muito importante para a eficiência do método proposto.

Em geral, o método proposto é mais eficiente do que o método original, resultando em um menor número de iterações. Isto é especialmente verdade para sistemas grandes ou em situações de contingências severas.

4.2 Método Proposto II

A ideia principal para a criação de um novo modelo de algoritmo parte do princípio que, em análise em tempo real de sistemas de potência, não há a necessidade de se determinar com exatidão qual o ponto de máximo carregamento que pode levar ao colapso da rede devido a uma instabilidade. O fornecimento de uma margem de carregamento razoavelmente precisa ao

operador é suficiente para que se possam tomar as decisões e precauções devidas. Saber que o ponto de colapso fornecido possui um erro de $\pm x\%$ em relação ao valor exato, é suficientemente satisfatório, de acordo com um valor de “ x ” pré-determinado.

Dessa maneira, utiliza-se o método apresentado em (Bedriñana, 2008) como uma sub-rotina do método geral para a determinação do PMC, que dentre as suas inúmeras vantagens apresenta uma rapidez devido aos eficientes cortes de carga que realiza.

O método aqui proposto utiliza as excelentes características do método original e adiciona outras duas muito convenientes:

(a) Inclui-se a informação prática, geralmente definida por cada empresa, sobre o erro aceitável no resultado final do carregamento crítico. O critério de parada de (Bedriñana, 2008) pode ser baseado, por exemplo, na diferença entre dois valores consecutivos de ρ . Mesmo que a convergência para ρ_{cr} seja muito rápida, é difícil associar este tipo de critério de convergência a um sistema mais prático. Dependendo do erro aceitável pela empresa, definido em função do tipo de análise a ser realizada, a convergência poderia ter sido ainda mais rápida caso outros critérios, com base na prática cotidiana, fossem considerados.

(b) O desempenho do método proposto não depende da escolha de um ponto de operação infactível. Portanto, a escolha de ρ inicial não se torna uma questão crítica neste caso.

Por exemplo, algumas empresas podem definir que “o erro aceitável para ρ_{cr} é 5%”. Assim, qualquer valor entre $0,95\rho_{cr}$ e $1,05\rho_{cr}$ é considerado como um bom resultado para efeitos práticos, em relação ao monitoramento e controle. A Figura 4.12 ilustra esta idéia usando a conhecida curva PV.

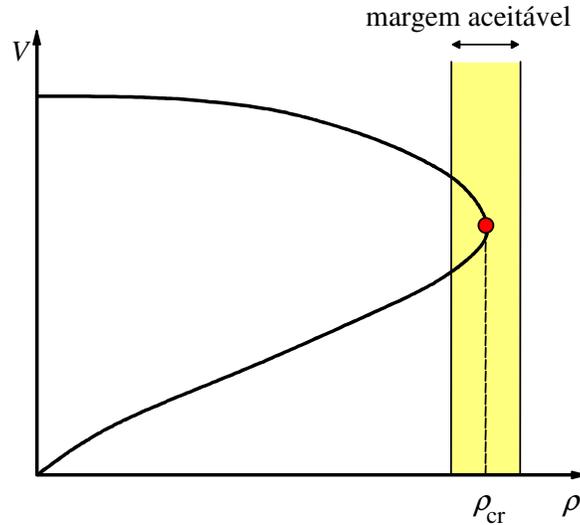


Figura 4.12: Faixa de soluções aceitáveis

A empresa deverá estipular qual a margem de erro que é aceitável para a sua rede, estabelecendo, desta maneira, o valor de “ x ”. O valor que representará esta margem dentro do algoritmo é o parâmetro α , que é um coeficiente definido de forma a simbolizar os níveis máximos e mínimos aceitáveis. Por exemplo, quando se aceita um erro de $\pm 5\%$ na margem de carregamento, tem-se o seguinte valor de α :

$$\alpha = \frac{1.05 \cdot PMC}{0.95 \cdot PMC} \quad (4.5)$$

Genericamente o coeficiente α pode assumir a seguinte forma:

$$\alpha = \frac{\left(1 + \frac{x}{100}\right)}{\left(1 - \frac{x}{100}\right)} \quad (4.6)$$

Assim, no caso em que se deseja um PMC cujo erro pode estar em $\pm 5\%$:

$$\alpha = \frac{\left(1 + \frac{5}{100}\right)}{\left(1 - \frac{5}{100}\right)} \Rightarrow \alpha = \frac{(1,05)}{(0,95)} \Rightarrow \alpha = 1,1053$$

A Figura 4.13 ilustra possíveis situações que podem ser encontradas em um processo iterativo utilizando a equação (3.23). A partir de um ponto de operação na iteração ($i-1$), a iteração i consiste em utilizar (3.23), levando a um novo ponto de operação. Os pontos A (infactível) e D

(factível) são inaceitáveis, pelo fato de estarem fora do intervalo aceitável pré-determinado. Por outro lado, os pontos B (infactível) e C (factível) são aceitáveis, já que estão dentro de um intervalo aceitável. Portanto, ρ_B e ρ_C fornecem uma boa estimativa prática do PMC e podem ser utilizados em processos de análise de segurança.

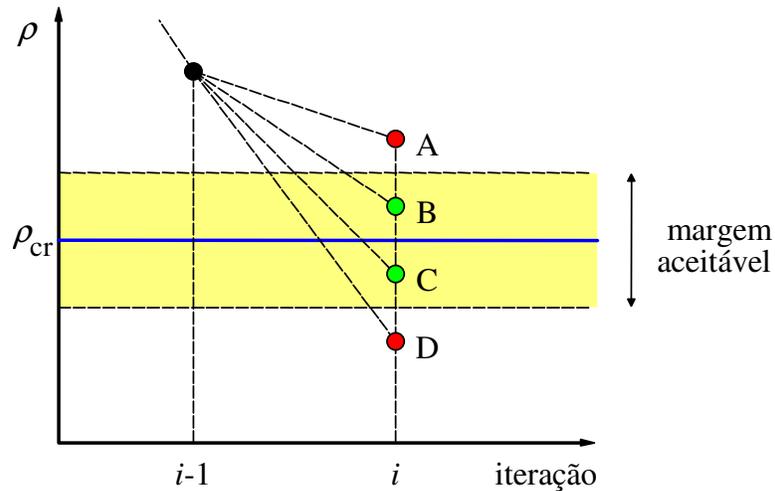


Figura 4.13: Ilustração de um processo iterativo

O valor inicial a ser utilizado pelo algoritmo proposto deverá preferencialmente configurar uma situação de infactibilidade, para extrair a maior eficiência do método. Ao escolher um valor de $\rho^{(0)}$ na região infactível, pretende-se que este ρ seja atualizado até que atinja um valor dentro de uma margem de erro que seja aceitável pela empresa. Assim, caso o ponto em algum momento da simulação esteja localizado na região factível, o algoritmo tenderá a levá-lo para a região de infactibilidade. Procedimento semelhante ocorre quando o ponto está localizado na região infactível, levando o ponto cada vez mais perto da fronteira.

Os passos que são realizados pelo algoritmo são descritos a seguir.

- i. Inicializar o contador $i=0$. Definir um valor inicial para ρ^i , grande o suficiente para configurar uma situação de infactibilidade;
- ii. Rodar um FCOP para ρ^i . Se o ponto estiver na região infactível, siga para o passo iii; Caso contrário, passar para o passo v;
- iii. Com o método de (Bedriñana, 2008), estima-se um novo valor de ρ^{temp} ;

iv. Rodar um FCOP para ρ^{temp} . Se o novo ponto de operação estiver na região factível, ir para o passo v. Se estiver localizado na região infactível, ir para o passo vi;

v. Região factível: $\rho^{i+1} = \rho^{temp} \cdot \alpha$; Rodar FCOP. Se isso levar a um ponto de operação na região infactível, obtenha a média entre ρ^{temp} e ρ^{i+1} e adote como a solução. Fim. Se não, fazer uma média entre o último valor (com o incremento da margem) e o último ponto obtido na região infactível, ou seja, $\rho^{i+1} = \frac{(\rho^i + \rho^{i+1})}{2}$. Incremente o contador $i \leftarrow i + 1$ e retorne ao passo ii;

vi. Região infactível: $\rho^{i+1} = \frac{\rho^{temp}}{\alpha}$; Rodar FCOP. Se isso levar a um ponto de operação na região factível, obtenha a média entre ρ^{temp} e ρ^{i+1} e adote como a solução. Fim. Se não, incremente o contador $i \leftarrow i + 1$ e retorne ao passo iii;

4.2.1 Testes e Resultados

O método proposto foi testado por vários sistemas teste do IEEE. A tolerância do FCOP ε_s foi fixada em 0,001 MW/MVAr, o fator de tolerância de carga ε_ρ foi fixado em 10^{-2} e o tamanho do passo μ_{min} foi fixado em 10^{-2} para os sistemas IEEE 30, 57, 118 barras, e μ_{min} em 10^{-1} para o IEEE 14 e 300 barras. Os limites de geração de potência reativa nas barras de geração foram considerados e o redespacho para atender o crescimento de carga é feito pela barra *slack*. e o redespacho para atender o crescimento da carga é feito de maneira proporcional pelos geradores da rede.

Primeiramente foi testado o sistema exemplo de duas barras. Em apenas uma iteração foi possível a obtenção da solução, como pode ser visto na Figura 4.14 a seguir. O valor de ρ inicial igual a 3,0 (ponto 1 da figura) foi mantido. Através do FCOP obtém-se um ponto sobre a fronteira (representado pelo ponto 2 na figura) e com o corte de carga $\Delta S_{cc,1}$ obtém-se o valor de 2,2746 (ponto 3 da figura), o que ainda não é o PMC. No método original ele foi conduzido a uma nova iteração. Neste método, ao descontar o fator α deste valor, obtém-se o ponto factível 2,0579 (ponto 4 da figura). A solução então é obtida através da média entre os pontos factível e infactível,

chegando-se ao valor de 2,1662 (representado pelo ponto 5 na figura). Por realizar o procedimento em apenas uma iteração e com uma economia de esforço computacional.

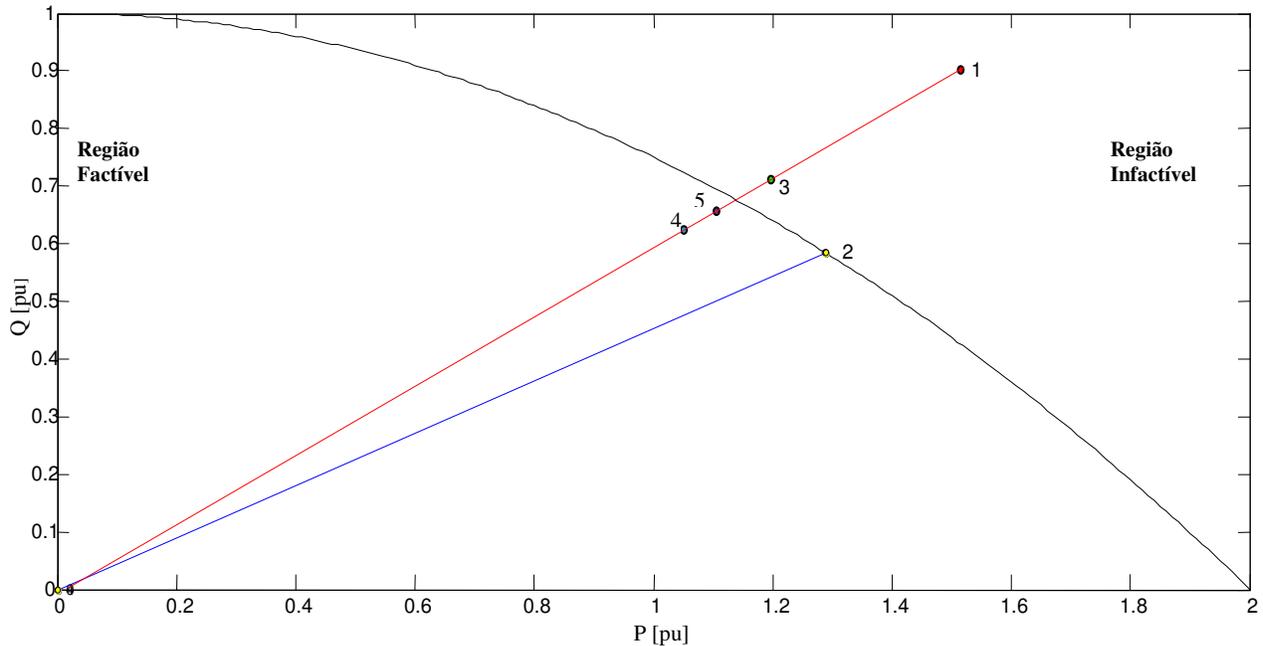


Figura 4.14: Simulação para o sistema de duas barras usando o algoritmo proposto II

Existe a possibilidade de modificação da margem adotada, de acordo com critérios e necessidades da análise. Como neste caso a margem foi de $\pm 5\%$, o valor de α utilizado no algoritmo foi 1,1053.

Para fins ilustrativos, um exemplo passo a passo do método proposto será mostrado a seguir para o sistema teste IEEE 14 barras. Um carregamento inicial de $\rho=8$ (levando a um ponto de operação infactível) será definido, como propõe (Bedriñana, 2008).

Passo 1: $i=0$ e $\rho^{(0)}=8$.

Passo 2: De acordo com FCOPP, trata-se de um ponto infactível. Vá para o passo (3).

Passo 3: De (3.23), $\rho_{temp}=2,8382$.

Passo 4: De acordo com FCOPP, trata-se de um ponto infactível. Vá para o passo (6).

Passo 6: $\rho^{(1)}=2,5678$. De acordo com FCOPP, trata-se de um ponto infactível. $i=1$ e vá para o passo (3).

Passo 3: De (3.23), $\rho_{temp}=1,8404$.

Passo 4: De acordo com FCOPP, trata-se de um ponto infactível. Vá para o passo (6).

Passo 6: $\rho^{(2)}=1,6651$. De acordo com o FCOPP este é um ponto factível, e o resultado final é dado por $\rho_{cr}=(\rho^{(2)}+\rho_{temp})/2$, e logo $\rho_{cr}=1,7527$.

Para fins de comparação, o mesmo problema também foi resolvido pelo método de fluxo de carga da continuação (FCC) de (Ajarapu, 1992), já que se trata de um método de grande precisão, apesar do grande esforço computacional requerido. O FCC fornece como solução para este problema o valor de 1,7781. Considerando a margem de erro de $\pm 5\%$, a solução fornecida pelo método proposto deveria estar no intervalo [1,6892 - 1,8670], o que ocorreu de fato.

Para os sistemas testados, diferentes valores de ρ iniciais foram escolhidos, sempre tentando um ponto que estivesse localizado na região de infactibilidade. Nas simulações que serão apresentadas, os valores de $\rho^{(0)}$ foram 2, 3, 6, 8 e 10, afim de analisar o comportamento do algoritmo quando o ponto $\rho^{(0)}$ localiza-se próximo ao PMC e quando esta distância é consideravelmente grande.

Nas Figuras de 4.15 a 4.19 são apresentados os resultados das simulações para os sistemas testes IEEE 14, 30, 57, 118 e 300 barras. Cada valor de ρ obtido não representa necessariamente uma nova iteração, pois em uma mesma iteração vários valores de ρ são obtidos. Pode-se perceber que em todos os casos, logo na primeira iteração, há um corte de carga bastante considerável. Isso acontece pelo fato de utilizar o método proposto por Bedriñana (2008) para esta estimativa, o que permite a eficiência do algoritmo proposto, independente de qual ponto inicial seja adotado. São apresentados os valores de $\rho^{(0)}$, que representam os pontos iniciais adotados e também o valor de $\rho_{(cr)}$, que representa o valor solução para o PMC e que fora obtido através do FCC, afim de se realizar uma análise comparativa.

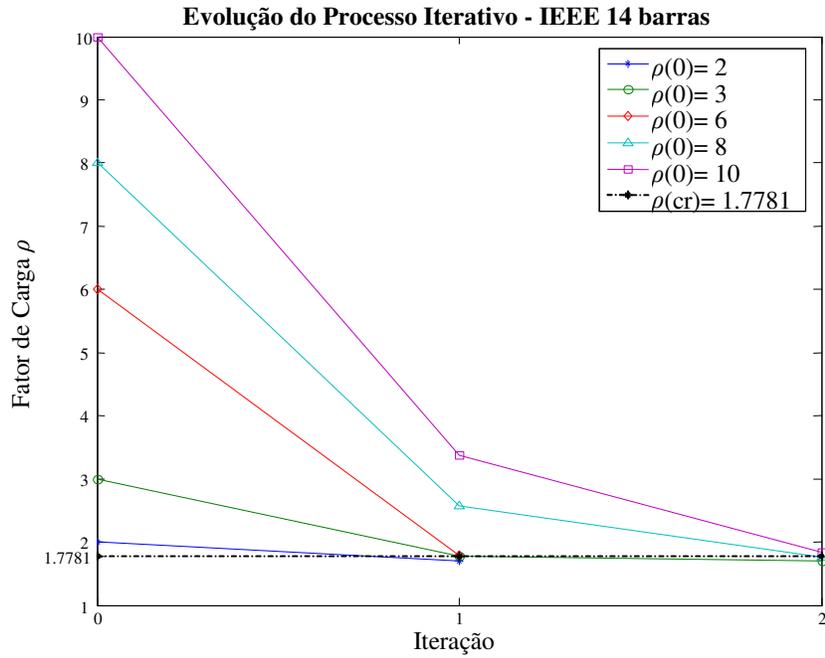


Figura 4.15: Evolução do Processo Iterativo com o Algoritmo Proposto para IEEE 14 barras

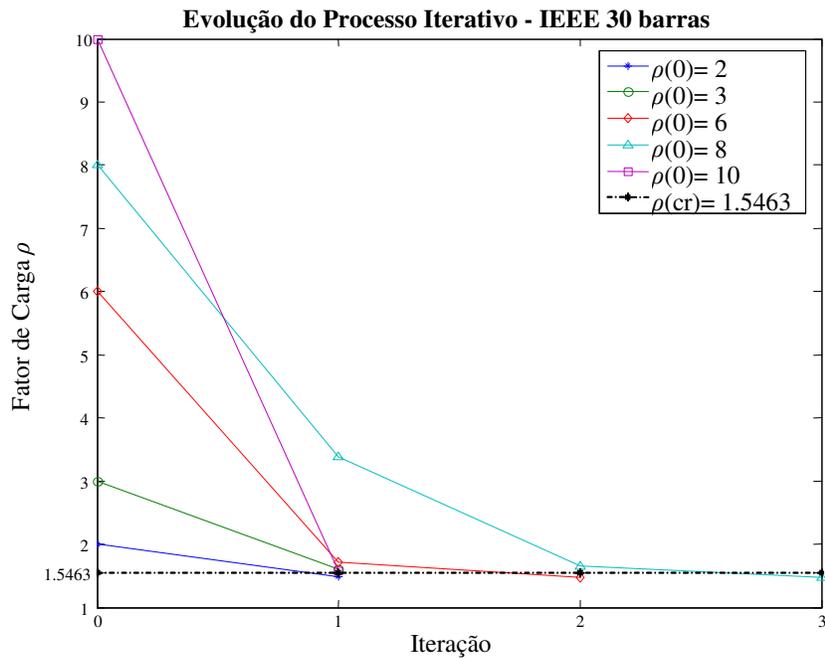


Figura 4.16: Evolução do Processo Iterativo com o Algoritmo Proposto para IEEE 30 barras

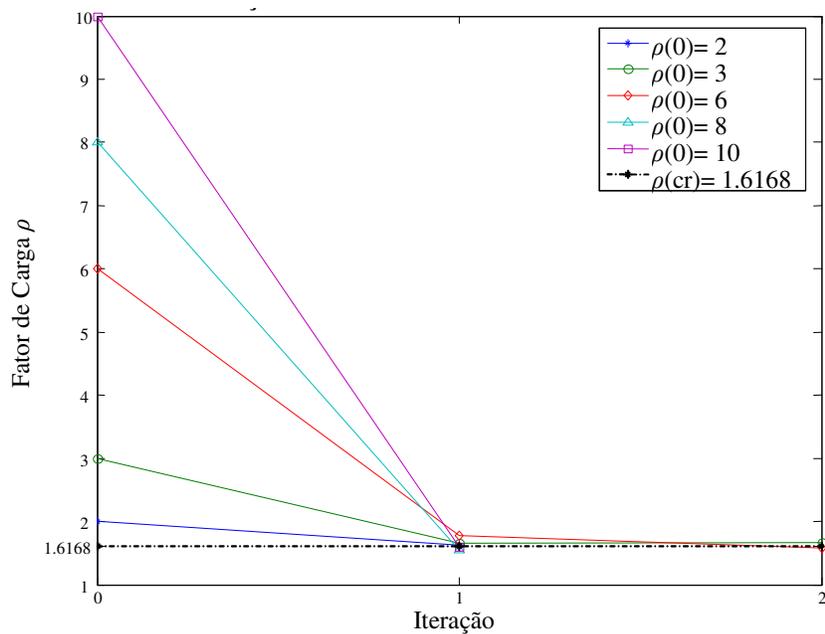


Figura 4.17: Evolução do Processo Iterativo com o Algoritmo Proposto para IEEE 57 barras

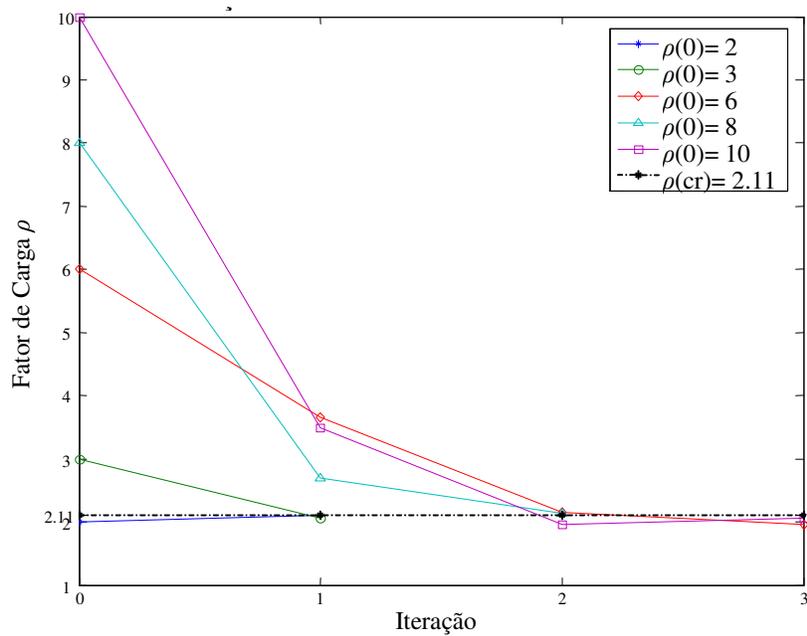


Figura 4.18: Evolução do Processo Iterativo com o Algoritmo Proposto para IEEE 118 barras

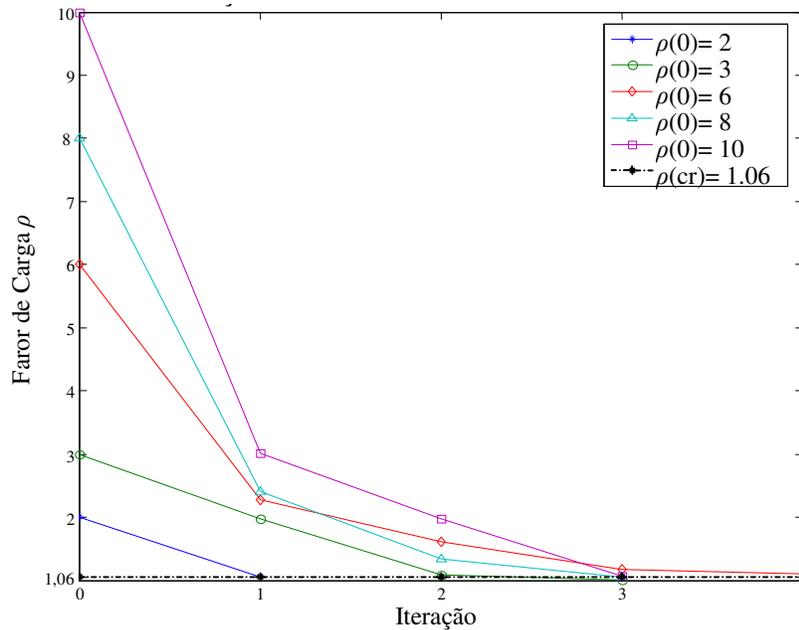


Figura 4.19: Evolução do Processo Iterativo com o Algoritmo Proposto para IEEE 300 barras

Caso seja escolhido ou calculado um valor de ρ inicial localizado na região factível, ao contrário do método original, o método proposto II não apresenta dificuldade para obter a solução. Um exemplo foi simulado para o sistema teste IEEE 118 barras, cuja solução dada pelo FCC é 2,11. Um ponto inicial $\rho=2$ foi escolhido, e, ao contrário do que ocorre em (Bedriñana, 2008), o método aqui proposto consegue obter a solução correta. Esta situação está representada na Figura 4.20. De acordo com o fluxo de carga da continuação, o PMC deste sistema é $\rho=2,11$. Nos valores de $\rho^{(0)}$ testados, inclui-se o valor 2. Assim, a estimativa inicial não encontrava-se na região de infactibilidade, e sim na região factível, o que não corresponde à proposta do método utilizado de (Bedriñana, 2008). Ao contrário do método original, a que é aqui proposta pôde obter uma solução correta para o caso, levando este ponto para a região infactível e posteriormente obtendo o PMC. Isso ocorreu devido ao fato de que na formulação do algoritmo novo contempla-se a hipótese da estimativa inicial ter sido feito de maneira diferente da esperada inicialmente. A partir daí, o algoritmo leva o ponto de operação atual para a região de infactibilidade, onde o algoritmo utilizado apresenta alto desempenho e a solução é obtida normalmente. O algoritmo proposto é capaz de lidar com inicializações inesperadas. Então, obtém-se um ponto de operação infactível e a solução é obtida sem nenhuma dificuldade.

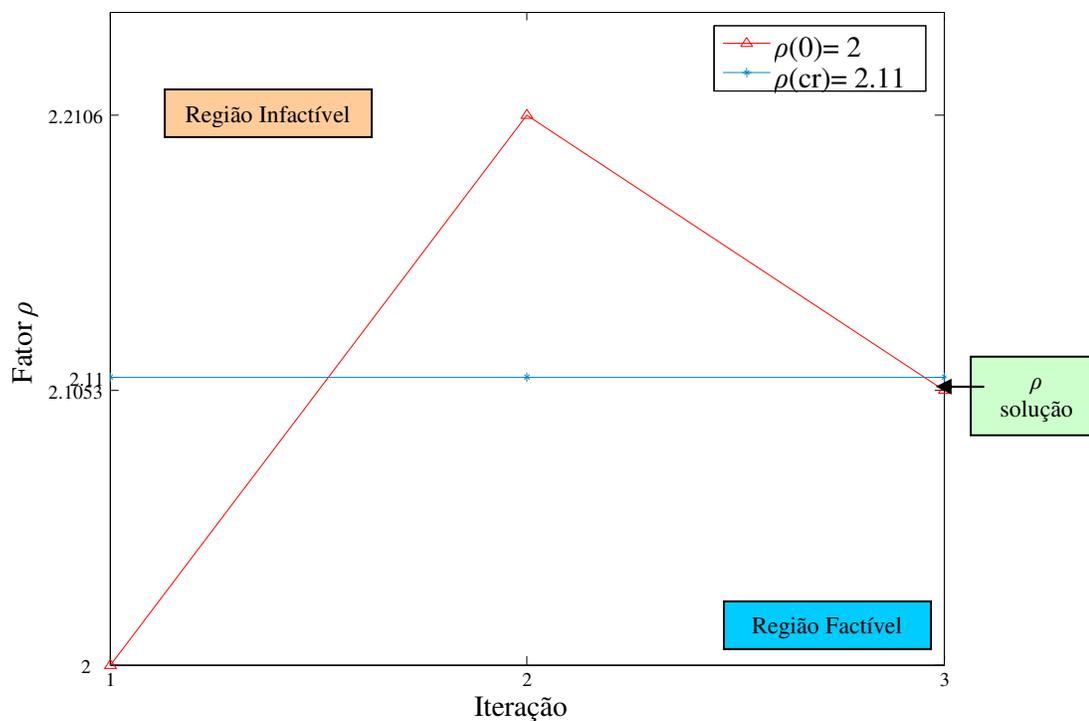


Figura 4.20: Evolução do Processo Iterativo com o Algoritmo Proposto para IEEE 118 barras

O número total de iterações do método proposto em relação à apresentada em (Bedriñana, 2008) é reduzido, apesar de requerer um número de cálculos de fluxo de carga igual ou superior. A Tabela 4.4 apresenta o número de iterações realizadas pelo o algoritmo proposto, o número de fluxos de carga que este realiza e apresenta também o número de fluxos de carga (igual ao número de iterações) realizado pelo método original, considerando como critério de parada a mesma margem de $\pm 5\%$ em ambos os casos. Evidentemente, o critério de parada do método original não se baseia em uma margem aceitável de erro, mas na diferença entre dois valores de carregamentos consecutivos. Para realizar uma análise comparativa justa, os resultados apresentados na Tabela 4.4 foram simulados para o método de (Bedriñana, 2008) considerando um erro muito pequeno entre os valores de carregamento. Posteriormente, uma verificação manual da iteração na qual ocorreu o início do erro aceitável foi armazenada. Como as abordagens são diferentes para cada método, considera-se bastante eficiente o método aqui proposto, caso o aspecto prático da definição de um erro aceitável seja levada em conta.

TABELA 4.4

Análise de iterações e fluxos de carga entre o algoritmo proposto e (Bedriñana, 2008)

| | ρ Inicial | 2 | 3 | 6 | 8 | 10 |
|----------|-----------------------|---|---|---|---|----|
| IEEE 14 | Nº Iterações | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| | Nº FCOP | 3 | 5 | 3 | 5 | 5 |
| | Nº Iterações original | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| IEEE 30 | Nº Iterações | 1 | 1 | 2 | 3 | 1 |
| | Nº FCOP | 3 | 3 | 5 | 7 | 3 |
| | Nº Iterações original | 2 | 3 | 3 | 5 | 2 |
| IEEE 57 | Nº Iterações | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| | Nº FCOP | 3 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| | Nº Iterações original | 3 | 3 | 4 | 6 | 2 |
| IEEE 118 | Nº Iterações | 1 | 1 | 3 | 2 | 3 |
| | Nº FCOP | 2 | 3 | 7 | 5 | 7 |
| | Nº Iterações original | * | 2 | 7 | 3 | 5 |
| IEEE 300 | Nº Iterações | 1 | 3 | 4 | 3 | 3 |
| | Nº FCOP | 3 | 7 | 9 | 7 | 7 |
| | Nº Iterações original | 2 | 4 | 6 | 3 | 8 |

(*) Não foi possível obter solução, pois para o método original é necessário que o ponto inicial estimado esteja localizado na região de infactibilidade.

A Tabela 4.5 resume os valores do PMC obtidos por diferentes métodos citados neste trabalho, ou seja, o FCC, o método apresentado em (Bedriñana, 2008) e o método aqui proposto. Como os métodos apresentam soluções diferentes, de acordo com o valor inicial de ρ escolhido, adotou-se arbitrariamente o caso em que $\rho^{(0)}=6$. Note que os valores obtidos com o método proposto encontram-se todos dentro da margem especificada como aceitável (neste caso de $\pm 5\%$).

Também foram realizadas simulações para margens mais restritivas. Na Tabela 4.6 podem ser vistos os resultados para o sistema teste IEEE de 118 barras, com uma margem $x=\pm 2,5\%$.

Como mencionado anteriormente, o método original não apresenta convergência para um valor de $\rho^{(0)}$ localizado na região factível. Também, restringindo-se a margem, percebe-se que há casos em que o método original, apesar de apresentar convergência, não apresenta uma solução dentro de uma margem desejada. Um exemplo disso pode ser visto no caso apresentado anteriormente, em $\rho^{(0)}=3$, cuja solução obtida foi $\rho=2,1795$ e respectivo erro igual a 3,29%. O método aqui proposto pode atender qualquer margem de erro desejada. Em relação ao número de

iterações realizadas, pode-se dizer que, independentemente da margem x escolhida, as características de convergência do método são as mesmas.

TABELA 4.5

Valores de ρ obtidos por diferentes métodos para $\rho^{(0)}=6$, quando $x=5\%$

| Sistema | ρ FCC | ρ Método Original | ρ Método Proposto |
|----------|------------|------------------------|------------------------|
| IEEE 14 | 1,7780 | 1,7789 | 1,7848 |
| IEEE 30 | 1,5467 | 1,5547 | 1,4745 |
| IEEE 57 | 1,6168 | 1,6031 | 1,5793 |
| IEEE 118 | 2,11 | 2,2075 | 2,0552 |
| IEEE 300 | 1,057 | 1,0968 | 1,1017 |

TABELA 4.6

Comparação entre o algoritmo proposto e (Bedriñana, 2008) quando $x=2,5\%$ para o sistema teste IEEE 118 barras

| ρ Inicial \rightarrow | 2 | 3 | 6 | 8 | 10 |
|------------------------------|---|----|---|---|----|
| Iterações FCOP | 2 | 1 | 3 | 3 | 4 |
| Iterações original | * | ** | 4 | 6 | 5 |

(*) Impossível obter solução, pois para o método original é necessário que o ponto inicial esteja na região de infactibilidade.

(**) A solução obtida pelo método original apresenta um erro de 3,20%, portanto não atende a especificações.

4.2.2 Simulações com sistemas reais

Nesta seção são apresentadas simulações com dois sistemas reais, sendo um peruano e um brasileiro.

Os dados do sistema peruano correspondem a um ponto de operação de 2006. O sistema é composto por 460 barras, 542 ramos e 50 geradores, e a carga total (caso base) neste caso é igual a 2,959 GW e 1,033 GVar. O total de geração no caso base, sem a inclusão da barra *slack* é 3,158 GW, e o máximo e mínimo de geração de potência reativa, sem a inclusão da barra *slack*, é de 1,785 GVar e -1,339 GVar, respectivamente.

Os dados do sistema brasileiro correspondem a um ponto de operação de 2004. O sistema é composto por 1081 barras, 1654 ramos e 147 geradores, e a carga total do caso base, é igual a 22,576 GW e 5,683 GVar.

A Tabela 4.7 apresenta o número de iterações e fluxos de carga obtidos pelo método proposto e pelo método de (Bedriñana, 2008).

É importante notar que a característica de convergência para os sistemas teste e para os sistemas reais é a mesma, isto é, a evolução do algoritmo acontece da mesma maneira, com um número de iterações bastante reduzido.

TABELA 4.7

Comparação entre o algoritmo proposto e o original para sistemas reais

| Sistema | ρ Inicial \rightarrow | 2 | 3 | 6 | 8 | 10 |
|--------------------|------------------------------|---|----|---|----|----|
| Sistema Peruano | Iterações | 3 | 4 | 3 | 5 | 5 |
| | FCOP | 8 | 10 | 7 | 13 | 11 |
| | Iterações original | 4 | 5 | 6 | 3 | 17 |
| Sistema Brasileiro | Iterações | 1 | 1 | 2 | 3 | 1 |
| | FCOP | 3 | 3 | 5 | 7 | 3 |
| | Iterações original | 2 | 3 | 3 | 5 | 2 |

O PMC dos sistemas reais peruano e brasileiro testados é de 1,091 e 1,0051, respectivamente. Através do método proposto e sendo considerada uma margem x adotada de $\pm 5\%$, a solução obtida para os casos citados anteriormente foi de 1,058 para o sistema peruano e de 0,957 para o sistema brasileiro, considerando um valor de $\rho(0) = 6$, atendendo as especificações

desejadas. No caso particular do sistema brasileiro, nota-se que os resultados são coerentes ($\rho_{cr} < 1$), considerando a margem de erro aceitável. Ao assumir a margem de erro de $\pm 5\%$, os resultados mostram que, na prática, o sistema pode estar à beira de um colapso de tensão.

Outra característica importante é que o critério de parada de (Bedriñana, 2008) é baseado na diferença de dois carregamentos consecutivos. Por outro lado, o critério de parada do método proposto é baseado em parâmetros definidos pelo operador. Portanto, ele pode ficar confiante que o PMC fornecido através deste método atende aos requisitos de precisão.

4.2.3 *Simulações Utilizando outros cortes de carga*

Outros cortes de carga além dos apresentados aqui também foram testados, com o intuito de se realizar uma análise e poder obter, por exemplo, um melhor desempenho do algoritmo proposto II. Um deles, aqui denominado de $\Delta S_{cc,3}$ está explicitado no Apêndice pelo fato de não ter resultado em melhora no método. Outro denominado de $\Delta S_{cc,2}$ tem seu desenvolvimento e resultados apresentados a seguir.

O intuito deste corte de carga era o de combinar a equação (5.4) com o algoritmo II proposto, para que um “passo” um pouco maior que $\Delta S_{cc,1}$ fosse dado, e a solução pudesse ser obtida de maneira mais ágil. Para que os testes fossem realizados, considerou-se inicialmente o valor de $\eta=1$, o que significa que o algoritmo daria o passo um pouco além de $\Delta S_{cc,1}$. Testou-se tantos os sistemas testes do IEEE, quanto os sistemas reais utilizados neste trabalho (brasileiro e peruano). O resultado dos testes pode ser visto na Tabela 4.8 a seguir, onde também realiza-se uma comparação para o corte $\Delta S_{cc,1}$ já apresentado.

Quando se trata, principalmente de sistemas pequenos, não foram evidenciados ganhos significativos, ficando a critério a utilização de um deles para o método. Porém, à medida que os sistemas aumentam, o corte $\Delta S_{cc,2}$ realizou o procedimento em um número menor de iterações e de FCOP, sendo, portanto, mais recomendado.

TABELA 4.8

Análise comparativa entre os cortes $\Delta S_{cc,1}$ e $\Delta S_{cc,2}$ utilizando o algoritmo proposto II, quando $\eta=1$

| | $\Delta S_{cc,1}$ | | | $\Delta S_{cc,2}$ | | |
|------------|-------------------|----------|------|-------------------|----------|------|
| | It. | Valor | FCOP | It. | Valor | FCOP |
| IEEE 14 | 1 | 1,72091 | 3 | 1 | 1,77523 | 3 |
| IEEE 30 | 1 | 1,49134 | 3 | 1 | 1,6114 | 3 |
| IEEE 57 | 2 | 1,610456 | 6 | 2 | 1,558404 | 6 |
| IEEE 118 | 1 | 2,447672 | 3 | 1 | 2,447672 | 3 |
| IEEE 300 | 3 | 1,119288 | 8 | 1 | 1,10327 | 3 |
| Brasileiro | 2 | 0,96298 | 6 | 1 | 1,052632 | 3 |
| Peruano | 2 | 1,372846 | 6 | 2 | 1,052632 | 5 |

Posteriormente a este teste, pensou-se em utilizar a equação (3.4), porém desta vez variando-se o parâmetro η de 0 a 1, com passos de 0,1, para que fosse verificado qual tamanho de passo retornaria um melhor resultado ao algoritmo. Inúmeras simulações foram realizadas e todos os sistemas citados no teste anterior foram novamente utilizados, inclusive variando a margem x definida pelas empresas, de 5% e uma mais restritiva de 2,5%. Ao término das simulações e considerando todos os fatores de η utilizados, pode-se concluir que para os casos em que $\eta=0,9$ o algoritmo apresentou uma convergência mais rápida no que diz respeito à redução do número de iterações ou quantidade de FCOP, conforme pode ser visto na Tabela 4.9 a seguir.

TABELA 4.9

Análise comparativa entre os cortes $\Delta S_{cc,1}$ e $\Delta S_{cc,2}$ utilizando o algoritmo proposto II, quando $\eta=0,9$

| | $\Delta S_{cc,1}$ | | | $\Delta S_{cc,2}$ | | |
|------------|-------------------|----------|------|-------------------|----------|------|
| | It. | Valor | FCOP | It. | Valor | FCOP |
| IEEE 14 | 1 | 1,72091 | 3 | 1 | 1,787911 | 3 |
| IEEE 30 | 1 | 1,49134 | 3 | 1 | 1,615091 | 3 |
| IEEE 57 | 2 | 1,610456 | 6 | 2 | 1,567182 | 6 |
| IEEE 118 | 1 | 2,447672 | 3 | 1 | 2,386264 | 3 |
| IEEE 300 | 3 | 1,119288 | 8 | 1 | 1,264115 | 3 |
| Brasileiro | 2 | 0,96298 | 6 | 2 | 1,052632 | 5 |
| Peruano | 2 | 1,372846 | 6 | 1 | 1,052632 | 3 |

Em linhas gerais, o desempenho independe do corte ($\Delta S_{cc,1}$ ou $\Delta S_{cc,2}$) utilizado quando emprega-se o algoritmo proposto II, visto que o ganho em número de iterações ou mesmo de FCOP não é significativo.

Capítulo 5

Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais deste trabalho, juntamente com as suas conclusões e algumas sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Considerações Finais e Sugestões para Trabalhos Futuros

A ideia principal desta dissertação de mestrado foi estudar os métodos para a obtenção do PMC em sistemas de potência e também propor métodos novos para que fossem melhorados os existentes no que diz respeito à eficiência e precisão dos resultados. Como resultados foram propostos dois métodos, denominados de método proposto I e método proposto II.

O método proposto I teve como objetivo promover uma melhora no método de (Bedriñana, 2008) através da mudança do processo de corte de carga, preservando sua principal característica que se baseia na obtenção de uma sequência de pontos na região inactível.

Foram utilizadas as informações obtidas no último PMC calculado através do FCOP e com o vetor normal à fronteira de factibilidade para obter o corte de carga proposto. Geralmente o próximo ponto encontra-se também localizado na região de inactibilidade, o que confere ao método a sua eficiência. Sempre que o ponto estudado cair na região factível, um novo corte de carga foi utilizado para melhorar a eficiência global do processo. Como resultado tem-se um processo de cálculo extremamente eficiente, com um número bastante reduzido de iterações, sem que os resultados fossem comprometidos, já que estes foram validados com o método da continuação de Ajjarapu (1992). Observou-se também que o método proposto é ainda mais eficiente quando se trata de sistemas robustos e de impedimentos de elementos importantes da

rede (rede alterada), pelo fato de, nestas situações, o método original entrar várias vezes na região de factibilidade, perdendo a boa estimativa inicial conferida pelo método.

Já o método proposto II tem como ideia básica a determinação do PMC baseado no método apresentado em (Bedriñana, 2008). A ideia fundamental é adicionar uma margem aceitável de erro ao valor final obtido, visto que nas análises práticas de sistemas de potência normalmente não há a necessidade de se determinar com exatidão qual é o carregamento que pode levar a uma instabilidade, e sim o carregamento aproximado (dentro de uma faixa aceitável), suficiente para que possam ser tomadas as decisões e precauções devidas.

O método permite decidir qual é a margem aceitável para a rede, e ganhar agilidade necessária para aplicações de operações em tempo real na obtenção de solução do ponto de máximo carregamento da rede.

Por ser um método originado de (Bedriñana, 2008), preserva-se sua principal característica que lhe confere a eficácia, incluindo a ideia de que a estimativa inicial esteja localizada na região de infactibilidade. Entretanto, ao contrário de (Bedriñana, 2008), o método proposto II apresenta também uma boa característica de convergência quando a estimativa inicial localiza-se na região factível, levando o ponto de operação para fora da fronteira de factibilidade, e obtendo a solução sem problemas. Assim, caso o usuário opte por um valor localizado na região factível, o algoritmo obterá o PMC da mesma maneira. Esta também é uma importante contribuição do método proposto.

O algoritmo proposto apresenta boas características de convergência para sistemas testes e sistemas reais, e também para margens reduzidas, como a apresentada neste trabalho ($x=2,5\%$).

A característica principal do trabalho consistiu no grande corte inicial conferido pela equação (3.23). O número total de iterações é consideravelmente pequeno, embora seja necessária a mesma quantidade de fluxos de carga de (Bedriñana, 2008). O método proposto II mostrou-se mais rápido e preciso, sendo assim, bastante adequado para a incorporação em aplicativos de simulação e tomada de decisão em tempo real.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

No decorrer do trabalho surgiram ideias e sugestões que complementam o trabalho aqui apresentado, ou até mesmo o utiliza como ferramenta para outros estudos.

Uma destas proposições é a determinação e monitoramento das barras críticas do sistema analisado, para que assim seja possível a tomada de ações de controle. Depois de determinadas as barras críticas por diferentes métodos, analisar, por exemplo, a influência da consideração da margem de erro da metodologia proposta II, em sistemas de grande porte.

Realizar uma avaliação do desempenho das metodologias propostas quando ocorre um aumento de carga localizado, ou por área de concessão. Poderiam ser considerados em alguns estudos a inclusão de redespacho de geradores, considerando o fator de carga.

Outra análise a ser feita seria a análise das metodologias propostas nas redes de distribuição, visto que pesquisas recentes apontam para a necessidade de desenvolvimento de métodos relativos à estabilidade de tensão para estas redes.

Apêndice I

Outra alternativa testada

Com o propósito de obter um método de corte de carga que pudesse levar a um menor número de iterações para o algoritmo proposto II, apresentado neste trabalho, vários foram os métodos testados, porém não foram todos que demonstraram ser eficientes, proporcionando resultados satisfatórios e conseqüentemente uma redução no número de iterações.

Um exemplo disso é apresentado a seguir. O intuito destes testes realizados era de obter um corte de carga diferente do apresentado na equação (3.23) e conseguir uma possível redução no número de iterações. O corte de carga proposto neste caso é denominado de $\Delta\mathbf{S}_{cc,3}$ e pode ser visto na Figura A.1 a seguir. Ao realizar uma análise visual na figura apresentada, teve-se como objetivo a obtenção de um corte de carga que fosse maior do que o $\Delta\mathbf{S}_{cc,1}$, reduzindo-se assim o número de iterações que fosse necessário para que o ponto estipulado chegasse próximo da fronteira de carregamento Σ .

Analisando o triângulo formado pelo corte de carga $\Delta\mathbf{S}_{cc,1}$ e pelo corte $\Delta\mathbf{S}_{cc,3}$, percebe-se que $\Delta\mathbf{S}_{cc,3}$ é a hipotenusa deste triângulo, e como consequência, sua medida é maior do que um dos catetos representados por $\Delta\mathbf{S}_{cc,1}$. Desta maneira procedeu-se à obtenção de $\Delta\mathbf{S}_{cc,3}$, através da semelhança de triângulos, chegando-se a:

$$\frac{\|\Delta\mathbf{S}_{cc,2}\|_2}{\|\Delta\mathbf{S}\|_2} = \frac{\|\Delta\mathbf{S}_{cc,1}\|_2}{\|\Delta\mathbf{S}_{cc,3}\|_2}. \quad (\text{A.1})$$

Isolando-se o termo desejado $\Delta\mathbf{S}_{cc,3}$, tem-se:

$$\|\Delta\mathbf{S}_{cc,3}\|_2 = \frac{\|\Delta\mathbf{S}_{cc,1}\|_2}{\|\Delta\mathbf{S}_{cc,2}\|_2} \cdot \|\Delta\mathbf{S}\|_2. \quad (\text{A.2})$$

Também sabe-se que:

$$\Delta\mathbf{S}_{cc,3} = \|\Delta\mathbf{S}_{cc,3}\|_2 \cdot \mathbf{s}_{esp}. \quad (\text{A.3})$$

Para a obtenção de $\Delta\rho$:

$\Delta S_{cc,3}$, tem-se ao invés de um ponto mais próximo da fronteira de carregamento, um ponto localizado na região de factibilidade, o que não se tornou uma característica vantajosa ao utilizá-lo no algoritmo.

TABELA A.1

Análise comparativa dos cortes de carga $\Delta S_{cc,1}$, $\Delta S_{cc,2}$ e $\Delta S_{cc,3}$ utilizando o algoritmo proposto II

| | $\Delta S_{cc,3}$ | | | $\Delta S_{cc,2}$ | | | $\Delta S_{cc,1}$ | | |
|------------|-------------------|----------|------|-------------------|----------|------|-------------------|----------|------|
| | It. | Valor | FCOP | It. | Valor | FCOP | It. | Valor | FCOP |
| IEEE 14 | 3 | 1,78794 | 9 | 1 | 1,77523 | 3 | 1 | 1,72091 | 3 |
| IEEE 30 | 3 | 1,57824 | 9 | 1 | 1,6114 | 3 | 1 | 1,49134 | 3 |
| IEEE 57 | 2 | 1,61558 | 6 | 2 | 1,558404 | 6 | 2 | 1,610456 | 6 |
| IEEE 118 | 3 | 2,12657 | 8 | 1 | 2,447672 | 3 | 1 | 2,447672 | 3 |
| IEEE 300 | 2 | 1,05263 | 6 | 1 | 1,10327 | 3 | 3 | 1,119288 | 8 |
| Brasileiro | 1 | 1,052632 | 3 | 1 | 1,052632 | 3 | 2 | 0,96298 | 6 |
| Peruano | 1 | 1,052632 | 3 | 2 | 1,052632 | 5 | 2 | 1,372846 | 6 |

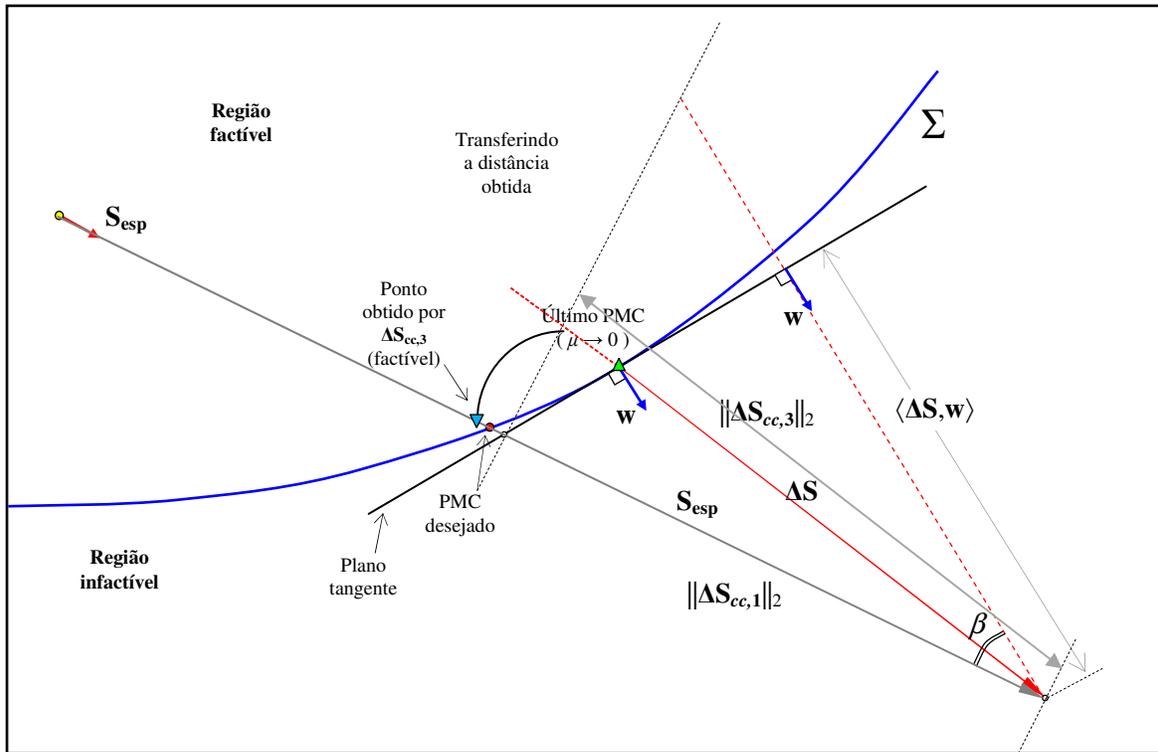


Figura A.2: Corte de carga $\Delta S_{cc,3}$ representado na curvatura correta da fronteira de carregamento

A Figura A.3 a seguir representa um gráfico com todos os cortes de carga apresentados neste trabalho e com a respectiva fronteira de carregamento correta. Nota-se que o corte de carga que aproxima-se com mais facilidade da fronteira é o corte $\Delta S_{cc,1}$. O corte representado por $\Delta S_{cc,2}$ é o

corte de carga mais conservador, fato que evita que o ponto esteja localizado na região factível. Já o corte de carga $\Delta S_{cc,3}$ sempre localizou-se na região factível para todos os sistemas testados neste trabalho.

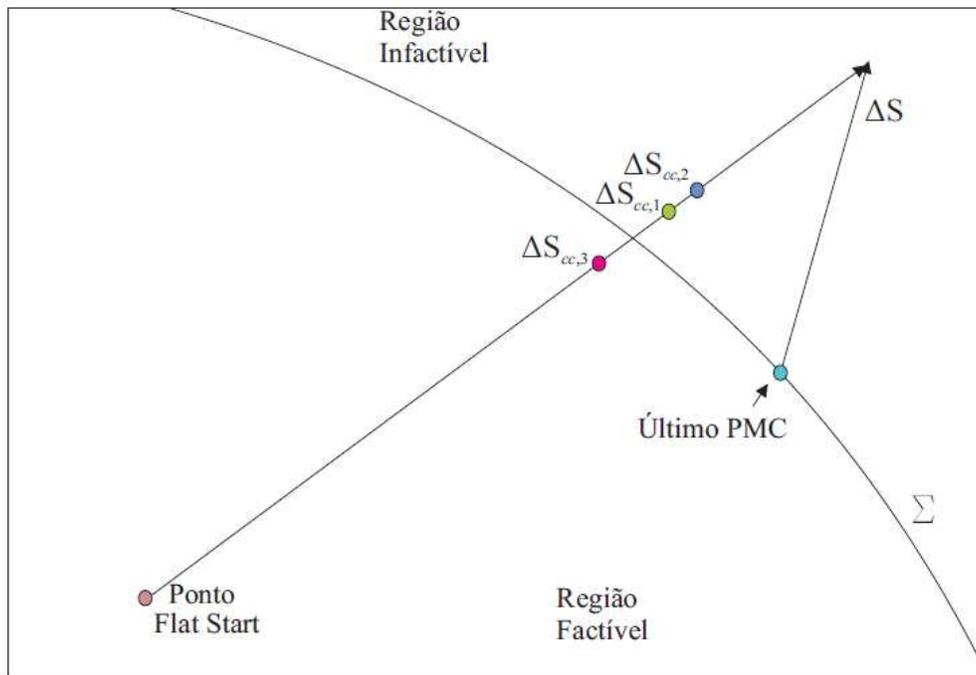


Figura A.3: Fronteira de carregamento com todos os cortes de carga estudados

Referências Bibliográficas

- (AJJARAPU, 1991) AJJARAPU, V., Identification of steady-state Voltage Stability in Power Systems. *International Journal of Energy Systems*, vol.11, n.1, 1991, p.43-46.
- (AJJARAPU, 1992) AJJARAPU, V. and CHRISTY, C., “The continuation power flow: A tool for steady state voltage stability analysis”, *IEEE Transactions Power Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 416-423, Feb. 1992.
- (ALVARADO, 1989) ALVARADO, F.L., JUNG, T.H., Direct Detection of Voltage Collapse Conditions. *Bulk Power System Voltage Phenomena-Voltage Stability and Security*, Potosi, Missouri, 1989.
- (ALVARADO, 1994) ALVARADO, F.L., DOBSON, I., HU, Y., Computation of closest bifurcations in Power systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 2, 1994.
- (BEDOYA, 2007) BEDOYA, D.R., Obtenção da Margem Mínima de Estabilidade de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência. 2007. 90f. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Campinas.
- (BEDRIÑANA, 2008) BEDRIÑANA, M.F., CASTRO, C.A., "Maximum Loading Point Computation based on Load Flow with Step Size Optimization," 2008 PES General Meeting, July 20-24, Pittsburgh, PA, 2008.
- (BEDRIÑANA, 2009) BEDRIÑANA, M.F., Desenvolvimento de uma metodologia robusta e eficiente para o fluxo de carga da continuação ótimo multiobjetivo. 2009. 144f. Tese de Doutorado – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Campinas.
- (BRAZ, 2000) BRAZ, L.M., CASTRO, C.A. and MURARI, C.A.F., “A critical evaluation of the size optimization based load flow methods”, *IEEE Transactions Power Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 202 – 207, Feb. 2000.

- (CAÑIZARES, 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*, vol.7, n.2, 1992, p.673-683.
- (CAÑIZARES, 1993) CAÑIZARES, C.A., ALVARADO, F.L., Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 8, n.1, p.1-8, Feb. 1993.
- (CAÑIZARES, 1996) CAÑIZARES, C.A., SOUZA, A.C.Z., and QUINTANA, V.H., Comparison of performance indices for detection of proximity to voltage collapse. *IEEE Transactions on Power Systems*. 11(3):1141-1450, August 1996.
- (CAÑIZARES, 2001) CAÑIZARES, C.A., (Ed.). Voltage stability assessment, procedures and guides. New York: IEEE, 2001. (*IEEE/PES Power system stability subcommittee special publication*).
- (CAÑIZARES, 2002) CAÑIZARES, C.A., DOBSON I., MILLER, N., AJJARAPU,V. and HAMADANIZADEH, H., “Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools”, *IEEE/PES Power Systems Stability Subcommittee*, Tech. Rep. SP101PSS, Aug. 2002.
- (CAÑIZARES, 2004) CAÑIZARES, C.A., MITHULANANTHAN, N., MILANO, F. and REEVE, J., “Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools”, *IEEE/PES Power Systems Stability Subcommittee*, Tech. Rep. SP101PSS, Aug. 2002.
- (CAÑIZARES, 2007) CAÑIZARES, C.A., *Power System Stability and Blackouts*, short course at Federal University of Itajubá, August 2007.
- (CASTRO, 1997) CASTRO, C.A. and BRAZ, L.M.C., “A new approach to the polar Newton power flow using step optimization”, in *Proceedings 29th North Amer. Power Symp.*, Laramie, WY, USA, 1997.
- (CASTRO, 2007) CASTRO, C.A., Cálculo de fluxo de potência. Disponível em <http://www.dsee.fee.unicamp.br/~ccastro/it601.html>, 2007.

- (CHAKRABARTI, 2008) CHAKRABARTI, S., JEYASURYA, B., "Multicontingency voltage stability monitoring of a power system using an adaptive radial basis function network," *Int. J. Electric Power and Energy Systems*, vol. 30, n. 1, pp. 1-7, Jan. 2008.
- (CHIANG, 1995) CHIANG, H.D., FLUECK, A., SHAH, K., BALU, N., Cpflow: a practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations. *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 10, n.2, p. 623-634, may 1995.
- (DOBSON, 1989) DOBSON, I., CHIANG, H.D., Towards a theory of voltage collapse in electric power systems. *Systems and control letters*, vol. 13, no. 4, 1989.
- (DOBSON, 1992) DOBSON, I., LU, L., "Voltage collapse precipitated by the immediate change in stability when generator reactive power limits are encountered", *IEEE Trans. Circuits Systems I, Fundam. Theory Appl.*, vol. 39, no. 9, pp. 762-766, Sep. 1992.
- (DOBSON, 1993) DOBSON, I. and LU, L., "New methods for computing a closest saddle node bifurcation and worst case load power margin for voltage collapse", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.8, no.3, pp. 905-913, Aug. 1993.
- (DOBSON, 1994) DOBSON, I., "The irrelevance of load dynamics for the loading margin to voltage collapse and its sensitivities", in [1], pp. 509-518, 1994.
- (FERREIRA, 2008) FERREIRA, L.C.A., Análise a Longo-Termo da Estabilidade de Tensão Utilizando Métodos Estáticos e um Sistema Especialista Fuzzy para Representação de Ações de Controle. 2008. 330f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- (FUJISAWA, 2008) FUJISAWA, C.H., Cálculo da Margem de Segurança de Estabilidade de Tensão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. 2008. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Campinas.
- (GALIANA, 1991) GALIANA, F.D., ZENG, Z.C., "Analysis of the load flow behavior near a Jacobian singularity", *Power Industry Computer Application Conference*, pp. 149-155, May 1991.

- (GAO, 1996) GAO, B., MORISON, G.K., and KUNDUR, P., “Toward the development of a systematic approach for voltage stability assessment of large-scale power systems,” *IEEE Transactions Power Systems*, vol. 11, pp.1314-1324, Aug. 1996.
- (GUCKENHEIMER, 1986) GUCKENHEIMER, J. and HOLMES, P., *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields*, New York: Springer-Verlag, 1986.
- (IEEE, 1990) IEEE Special Publication 90TH0358-2PWR, *Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tool, and Industry Experience, 1990*.
- (IEEE/CIGRE, 2004) IEEE/CIGRE Join Task Force on Stability Terms and Definitions. Definition and classification of power system stability, *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(2):1387-1401, May 2004.
- (IRISARRI, 1997) IRISARRI, G.D., WANG, X., TONG, J., MOKTARI, S.. “Maximum loadability of power system using interior point non-linear optimization method”. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, n. 1, p. 162-172, Feb 1997.
- (IWAMOTO, 1981) IWAMOTO, S., TAMURA, Y., “A load flow calculation method for ill-conditioned power systems”, *IEEE Transactions Power Apparatus Systems*, vol. PAS-100, pp. 1736 – 1743, Apr. 1981.
- (KESSEL, 1986) KESSEL, J., GLAVITSCH, H., Estimating the voltage stability of power system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.1, n.3, 1986.
- (KUNDUR, 1994) KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*, EPRI Power System Engineering Series. New York: McGraw-Hill, 1994.
- (MEIRELES, 2005) MEIRELES, E.D., Uma contribuição ao estudo do problema de mal condicionamento de redes elétricas de potência sob o ponto de vista de estabilidade de tensão. 2005. 82f. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Campinas.
- (MONTICELLI, 1983) MONTICELLI, A.J, *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*, 1ed., São Paulo, Editora Edgard Ltda, 1983.

- (MORISON, 1993) MORISON, G.K., GAO, B., and KUNDUR, P., “Voltage stability analysis using static and static dynamic approaches,” *IEEE Transactions Power Systems*, vol. 8, pp. 1159-1171, Aug. 1993.
- (OVERBYE, 1994) OVERBYE, T.J., “A power flow measure for unsolvable cases”, *IEEE Transactions Power Systems*, vol.9, no.3, pp. 1359-1365, Aug. 1994.
- (POWER SYSTEMS TEST CASE) POWER SYSTEMS TEST CASE ARCHIVE, University of Washington College of Engineering [Online]. Available: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.
- (PROCEEDINGS, 1994) PROCEEDINGS of the Bulk Power System Voltage Phenomena - III Seminar on Voltage Stability, Security & Control, ECC/NSF workshop, Davos, Switzerland, August 22-26, 1994.
- (SAUER, 1986) SAUER, P.W., RAJAGOPALAN, C., PAI, M.A., and VERGHESE, A., Critical Modes and Voltage Instability in Power Systems. *IEEE ISCAS 3*, may, 1986, p.1019-1022.
- (SEYDEL, 1988) SEYDEL, R., From Equilibrium to Chaos: Practical Bifurcations and Stability Analysis, North-Holland, Elsevier Science Publishers, 1988.
- (SEYDEL, 2010) SEYDEL, R., Practical Bifurcation and Stability Analysis, 3rd Edition, Interdisciplinary Applied Mathematics, vol. 5, Springer-Verlag, Berlin.
- (SILVEIRA, 2003) SILVEIRA, C.S. Estudo de máximo carregamento em sistemas de energia elétrica. 2003. 100f. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo.
- (STOTT, 1974) STOTT, B., Review of load-flow calculation methods, *Proceedings of the IEEE*, vol.62, n.7, 1974.
- (TAMURA, 1983) TAMURA, Y., IBA, K., IWAMOTO, S., Relationship between Voltage Instability and Multiple Load Flow Solutions in Electric Power Systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-102, 1983: p.1115-1125.
- (TAYLOR, 1994) TAYLOR, C., Power System Voltage Stability. McGraw-Hill, 1994.

- (TATE, 2005) TATE, J.E., OVERBYE, T.J., “A comparison of the optimal multiplier in polar and rectangular coordinates”, *IEEE Transactions Power Systems*, vol. 20, no. 4, pp. 1667 – 1674, Nov. 2005.
- (TAVARES, 2009) TAVARES, B.L., BEDRIÑANA, M.F. and CASTRO, C.A., “New Method Based on Load Flow with Step Size Optimization for Calculation the Maximum Loading Point” *In Proceedings of 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference*, Bucharest, Romania, 28Jun.-2Jul., 2009.
- (TAVARES, 2010) TAVARES, B.L., BEDRIÑANA, M.F. and CASTRO, C.A., “Practical Method for Computing the Maximum Loading Point Based on Load Flow with Step Size Optimization” *In Proceedings of 2010 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Minneapolis, MN, USA, 25 – 29 Julho 2010.
- (TINNEY, 1967) TINNEY, W.F, C.E. Hart, Power flow solution by Newton’s method, *IEEE Transactions On Power Apparatus Sytems.*, vol. PAS-86, 1967
- (TIRANUCHIT, 1986) TIRANUCHIT, A., and THOMAS, R.J., VAR Support and Voltage Instabilities in Electric Power Networks, *Proceedings of the North American Power Symposium*, October 13-14, 1986, Ithaca, NY: 21-29.
- (VAN CUTSEM, 1997) VAN CUTSEM, T. and MAILHOT, R., “Validation of a fast voltage stability analysis methods on the Hydro-Quebec System,” *IEEE Transactions Power Systems*, vol. 12, pp. 282-292, Feb. 1997.
- (VAN CUTSEM, 1998) VAN CUTSEM, T., VOURNAS, C., Voltage Stability of Electric Power System, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998, 376p.
- (VAN CUTSEM, 2000) VAN CUTSEM, T., “Voltage instability: Phenomenon, countermeasures and analysis methods,” *Proceedings IEEE*, vol. 88, pp. 208-227, 2000.
- (WANG, 2006) WANG, L., MORISON, K., "Implementation of online security assessment," *IEEE Power Energy Magazine*, vol. 4, n. 5, pp 47-59, 2006.

- (WEBER, 1994) WEBER, E., *The Evolution of Electrical Engineering-A Personal Perspective*. New York,USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 1994.
- (ZAMBRONI, 1996) ZAMBRONI, A.C.S., CAÑIZARES, C. A., QUINTANA, V.H., “Critical Bus and Point of Collapse Determination Using Tangent Vectors”, In: *28th North American Power Symposium*, Cambridge, 1996, pp. 329-333.
- (ZAMBRONI, 1997) ZAMBRONI, A.C.S., CAÑIZARES, C.A., QUINTANA, V.H., “New Techniques to Speed Up Voltage Collapse Computations Using Tangent Vectors”. *IEEE Transactions on Power Systems*. vol.12,No.3,1997,pp.1380-1387.