



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“Aplicação do Método de Newton Desacoplado
Para o
Fluxo de Carga Continuado”

ELISABETE DE MELLO MAGALHÃES

Orientador: Prof. Dr. Dílson Amâncio Alves

Dissertação submetida ao Programa de Pós -
graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, para obtenção
do título de Mestre em Engenharia Elétrica.
Área de Conhecimento: Automação.

ILHA SOLTEIRA – SP
Setembro de 2010

FICHA CATALOGRÁFICA

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

M188a Magalhães, Elisabete de Mello.
Aplicação do método de Newton desacoplado para o fluxo de carga
continuado / elisabete de Mello Magalhães. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2010
88 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2010

Orientador: Dílson Amâncio Alves
Inclui bibliografia

1. Método de continuação. 2. Fluxo de carga desacoplado. 3. Técnicas de
parametrização. 4. Ponto de máximo carregamento.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Aplicação do Método de Newton Desacoplado para o Fluxo de Carga Continuado

AUTORA: ELISABETE DE MELLO MAGALHÃES

ORIENTADOR: Prof. Dr. DILSON AMANCIO ALVES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA ELÉTRICA, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:



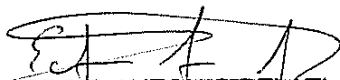
Prof. Dr. DILSON AMANCIO ALVES

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Profa. Dra. ANNA DIVA PLASENCIA LOTUFO

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. EDMARCIO ANTONIO BELATI

Centro de Engenharia e Ciências Sociais Aplicada / Universidade Federal do ABC - Santo André/SP

Data da realização: 23 de setembro de 2010.

Dedico esse trabalho aos meus amados pais, José Magalhães e Maria de Mello Magalhães pelo apoio, amor e incentivo incondicional e aos meus irmãos Cleide, Nilza e Valdir.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me conceder a graça de mais esta conquista.

Agradeço aos meus pais José e Maria pelo firme suporte familiar, aos meus queridos irmãos Cleide, Nilza e Valdir por estarem sempre ao meu lado em todos os momentos e aos meus cunhados Sérgio e Vanderlei.

Um agradecimento especial ao meu cunhado Sérgio pelo apoio providencial prestado em um dos momentos mais críticos desta jornada.

Agradecimentos especiais ao meu orientador, professor Dr. Dílson Amâncio Alves, pela excelente orientação, por me dar a oportunidade de realizar este trabalho, pelo conhecimento transmitido, pela paciência, compreensão, estímulo e dedicação dispensada.

Agradeço especialmente ao meu companheiro de laboratório, Alfredo Bonini Neto, que, além de um grande amigo, foi praticamente um co-orientador durante toda a elaboração deste meu trabalho.

Aos meus amigos pelo apoio, ajuda e incentivos durante este curso de pós-graduação, em especial às minhas queridas amigas: Alessandra, Meire e Márcia, e também aos amigos: Aline, Ana Cláudia, Estélio, Jadiel, João, Luzinete, Mara, Marlon, Marcelo, Melina, Naryane, Newton, Rosane, Stefani...

Um agradecimento especial ao Kazushi pelo apoio e incentivo.

A todos os funcionários do DEE, que de uma forma ou de outra colaboraram para a realização deste trabalho.

Agradecimentos a CAPES pelo suporte financeiro fornecido durante todo o período de pós-graduação.

*“A mente que se abre a uma nova idéia jamais
voltará ao seu tamanho original”*

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho apresenta o método de Newton desacoplado para o fluxo de carga continuado. O método foi melhorado por uma técnica de parametrização geométrica possibilitando assim o traçado completo das curvas P-V, e o cálculo do ponto de máximo carregamento de sistemas elétricos de potência, sem os problemas de mau condicionamento. O objetivo é o de apresentar de forma didática os passos envolvidos no processo de melhoria do método de Newton Desacoplado a partir da observação das trajetórias de solução do fluxo de carga.

A técnica de parametrização geométrica que consiste na adição de uma equação de reta que passa por um ponto no plano formado pelas variáveis: tensão nodal de uma barra k qualquer e o fator de carregamento eliminam os problemas de singularidades das matrizes envolvidas no processo e ampliam o grupo das variáveis de tensão que podem ser usadas como parâmetro da continuação.

Os resultados obtidos com a nova metodologia para o sistema teste do IEEE (14, 30, 57, 118 e 300 barras) e também para os sistemas reais de grande porte, o 638 barras do sistema Sul-Sudeste brasileiro e do sistema de 904 barras do sudoeste Americano, mostram que as características do método convencional são melhoradas na região do ponto de máximo carregamento e que a região de convergência ao redor da singularidade é sensivelmente aumentada.

São apresentados vários testes com a finalidade de prover um completo entendimento do funcionamento do método proposto e também avaliar seu desempenho.

Palavras chave: Método da continuação. Fluxo de carga desacoplado. Técnicas de parametrização. Ponto de máximo carregamento. Curva P-V.

ABSTRACT

This work presents the decoupled Newton method for continuation power flow. The method was improved by using a geometric parameterization technique that allows the complete tracing of P-V curves, and the computation of maximum loading point of a power system, without ill-conditioning problems. The goal is to present in a clear and didactic way the steps involved in the development of the improved decoupled Newton method obtained from the observation of the geometrical behavior of power flow solutions.

The geometric parameterization technique that consists of the addition of a line equation, which passes through a point in the plane determined by the bus voltage magnitude and loading factor variables, can eliminate the ill-conditioning problems of matrices used by the method and can enlarge the set of voltage variables that can be used as continuation parameter to P-V curve tracing.

The method is applied to the IEEE systems (14, 30, 57, 118 and 300 buses) and two large real systems: the south-southeast Brazilian system (638 buses) and the 904-bus southwestern American system. The results show that the best characteristics of the conventional decoupled Newton's method are improved in the vicinity of the maximum loading point and therefore the region of convergence around it is enlarged.

Several tests are presented with the purpose of providing a complete understanding of the behavior of the proposed method and also to evaluate its performance.

Keywords: Continuation method. Decoupled power flow. Parameterization techniques. Maximum load point. P-V Curve.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PMC	ponto de máximo carregamento;
FC	fluxo de carga;
FCC	fluxo de carga continuado;
FCCDP	fluxo de carga continuado desacoplado proposto;
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers;
p.u.	por unidade;
FCCDPM	fluxo de carga continuado desacoplado proposto modificado.
FCCB	fluxo de carga continuado proposto por Bonini

LISTA DE SÍMBOLOS

V	vetor magnitudes das tensões nodais;
θ	vetor ângulo das tensões nodais;
λ	fator de carregamento;
α	coeficiente angular da reta;
G	é o vetor que contém as equações dos balanços de potência ativa e reativa;
J	matriz jacobiana;
V_k	magnitude da tensão nodal (barra k);
θ_k	ângulo da tensão nodal na barra k ;
P_k	potência ativa líquida calculada na barra k ;
Q_k	potência reativa líquida calculada na barra k ;
G	parte real da matriz admitância;
B	parte imaginária da matriz admitância;
g	condutância série da linha de transmissão;
b	susceptância série da linha de transmissão;
Ω_k	conjunto de todas as barras diretamente conectadas à barra k .
K	conjunto formado pela barra k mais todas as barras m conectadas a ela;
PQ	barra de carga;
PV	barra de geração;
$V\theta$	barra de referência (ou slack);
P	vetor das injeções de potência ativa nas barras PQ e PV;
Q	vetor das injeções de potência reativa nas barras PQ;
ΔP	resíduos de potência ativa;
ΔQ	resíduos de potência reativa;
P^{esp}	potência ativa especificada;
Q^{esp}	potência reativa especificada;

P-V	curva da tensão em função da potência ativa ou do fator de carregamento λ ;
Q-V	curva da potência reativa em função da potência reativa;
e_k	vetor linha;
\mathbf{J}_m	matriz jacobiana modificada;
σ	tamanho do passo;
\mathbf{t}	vetor tangente;
\mathbf{G}_λ	correspondente à derivada de G em relação a λ ;
P θ	subproblema ativo;
QV	subproblema reativo.

LISTA DE TABELAS

4.1 – Desempenho do FCCDP considerando o centro do feixe de retas em ($\lambda^0=0$, $V^0=0$) e passo de $\Delta\alpha=0,02$	66
4.2 – Desempenho do FCCDP considerando o centro do feixe de retas em ($\lambda^0=0$, $V^0=0,4$) e passo $\Delta\alpha=0,02$	67
4.3 – Desempenho do FCCDP considerando o centro do feixe de retas em ($\lambda^0=0$, $V^0=0,4$) e passo $\Delta\alpha=0,04$	67
4.4 – Desempenho do FCCDP considerando a atualização das matrizes H e L_{eq} a cada iteração	70
4.5 – Desempenho do FCCDP considerando a atualização das matrizes H e L_{eq} somente quando necessário	70

LISTA DE FIGURAS

2.1 – Curva P-V.....	25
2.2 – Curva Q-V.....	26
2.3 – Margem de Carregamento.....	28
2.4 – Margem de carregamento segura de pré e pós-contingência.....	29
3.1 – Método iterativo de Newton-Raphson.....	36
3.2 – Comparação entre os métodos da continuação com preditor tangente e com preditor secante.....	41
3.3 – Controle automático do passo σ	43
3.4 – Técnica de Parametrização Local.....	45
3.5 – Desempenho do FCCB para o sistema IEEE-14: reta inicial que passa por um ponto escolhido O (λ_0, V_0) e o de caso base P (λ_1, V_1) no plano λV	48
3.6 – Desempenho do FCCB para o IEEE-14: (a) magnitude da tensão da barra crítica (V_{14}) em função de λ	49
4.1 – Método de Newton desacoplado simultâneo.....	53
4.2 – Diagrama de blocos do método de Newton desacoplado alternado.....	54
4.3 – Tensão como função do Carregamento (curva PV com redução de passo).....	58
4.4 – Desempenho do método desacoplado simultâneo para a barra crítica do IEEE 14 barras usando λ parâmetro.....	58
4.5 – Tensão como função do fator de carregamento l (curva P-V) para a barra crítica do IEEE-14 barras.....	59
4.6 – Desempenho do método desacoplado alternado.....	59
4.7 – Curva PV usando a tensão (V) da barra crítica do sistema teste 14 barras como parâmetro.....	60

4.8 – Desempenho do método desacoplado simultâneo parametrizado por tensão(V).....	60
4.9 – Procedimento geral para o traçado da curva P-V	63
4.10 – Desempenho do FCCDP para o sistema IEEE-14: (a) curva P-V da barra crítica (14), (b) número de iterações do algoritmo simultâneo, (c) número de iterações P θ do algoritmo alternado, (d) número de iterações QV do algoritmo alternado	64
4.11 – Desempenho dos FCCDP para o sistema IEEE-300: (a) curva P-V da barra crítica (236), (b) número de iterações do algoritmo simultâneo, (c) número de iterações P θ , (d) número de iterações QV do algoritmo alternado.....	65
4.12 – Desempenho do FCCDP, algoritmo alternado, para sistema IEEE-30: (a) curva P-V da barra 11, (b) curva P-V da barra crítica, (c) número de iterações P θ , (d) número de iterações QV.....	68
4.13 – Desempenho do FCCDP para a barra PV (barra 259) sistema IEEE-300: (a) curva P-V, (b) número de iterações P θ , (c) número de iterações QV	69
4.14 – Desempenho do FCCDPM para o IEEE-300 e 904 barras: (a) magnitude da tensão (V_{526}) da barra crítica do IEEE-300 barras como função de λ , (b) tensão da barra (V_{138}) do IEEE-904 como função de λ , (c) e (d) respectivos números de iterações.....	74
4.15 – Desempenho do FCCDPM para o IEEE-638 barras: (a) magnitude da tensão (V_{346}) em função de λ , (b) região do PMC ampliada, (c) número de iterações para os subproblemas ativo e reativo	75
4.16 – Desempenho do FCCDPM para o IEEE-300 barras: (a) curva λ - V_{46} , (b) número de iterações para os subproblemas ativo e reativo, (c) curvas P-V da barra crítica (526) e da barra (46) cuja magnitude de tensão (V_{46}) foi usada na composição da equação da reta	76
4.17 – Desempenho do FCCDPM para uma configuração de 638 barras do sistema Sul-Suldeste Brasileiro: (a) curva λ - V_{403} , (b) detalhe da região em torno do PMC, (c) curva P-V da barra crítica, (d) número de iterações	78
4.18 – Desempenho do MDNM para o sistema sudoeste Americano de 904 barras: (a) curva λ - V_{43} , (b) detalhe da região entorno do PMC, (c) curva P-V da barra crítica, (d) número de iterações	79

SUMÁRIO

1 – Introdução	16
1.1 Introdução Geral.....	16
1.2 Objetivos do Trabalho	19
1.3 Estrutura do Trabalho	20
2 – Estabilidade Estática de tensão.....	21
2.1 – Introdução	21
2.2 – Estabilidade de Tensão de um Sistema Elétrico de Potência	21
2.3 – Técnicas de Análise da Estabilidade de Tensão.....	22
2.3.1 – A Análise Estática	23
2.3.1.1 – Métodos de Curvas P-V e Q.....	24
2.3.1.2 – Curvas P-V.....	24
2.3.1.3 – Curvas Q-V.....	26
2.4 – Margem de Carregamento.....	27
2.4.1 – Margem de Carregamento Pós – Contingência	28
2.4.2 – Métodos Utilizados para a Obtenção da Margem de Carregamento	29
3 – Fluxo de Carga Continuado e suas Técnicas de Parametrização	31
3.1 – Introdução	31
3.2 – Fluxo de Carga Convencional.....	32
3.2.1 – Passo Preditor	38
3.2.1.1 – Preditor Tangente	39

3.2.1.2 – Preditor Secante	40
3.2.1.3 – Preditor Polinomial Modificado de Ordem Zero	41
3.2.2 – Controle do Passo Preditor (σ)	42
3.2.3– Passo Corretor e Parametrização	43
3.2.4 – Técnica de Comprimento de Arco	45
3.2.5 – Técnica da Perpendicularidade	46
3.2.6 – Técnica de Parametrização Geométrica para o Fluxo de Carga Continuado Baseado nas Variáveis Tensão e fator de Carregamento	47
4 – Metodologia	50
4.1 – Introdução	50
4.2 – Método de Newton Desacoplado	50
4.2.1 – Desacoplamento P θ -QV	50
4.2.2 – Algoritmo Simultâneo do Método de Newton Desacoplado	51
4.2.3 – Algoritmo Alternado do Método de Newton Desacoplado	51
4.3 – Metodologia Proposta	55
4.3.1 – Introdução	55
4.3.2 – Fluxo de Carga Continuado Desacoplado Proposto (FCCDP)	56
4.3.2.1 – Desacoplamento P θ -QV	57
4.3.2.2 – Algoritmo simultâneo	61
4.3.2.3 – Algoritmo Alternado	61
4.3.2.4 – Procedimento Geral para o Traçado da Curva P-V	62
4.4 – Testes e Resultados	63
4.4.1 – Desempenho do Método Proposto para o IEEE-14	63
4.4.2 – Desempenho do Método Proposto para o IEEE-300	65
4.4.3 – Desempenho do FCCDP para os Sistemas IEEE de 14, 30, 57, 118 e 300 Barras	66
4.4.4 – Influência da Atualização das Matrizes H e Leq Durante o Procedimento Geral	69
4.5 – Desempenho do Fluxo de Carga Continuado Desacoplado Proposto Modificado	71
4.5.1 – Procedimento Geral para a Mudança de Reta Durante o Traçado da Curva P-V	71
4.5.2 – Resultados Ilustrativos obtidos com o Método Proposto modificado	72
5 – Conclusões	80

5.1 Conclusão Geral.....	80
5.2 Motivação para Trabalhos Futuros.....	81
Referências	82
Apêndice A	87
A1 – Publicações.....	87

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Introdução Geral

A crescente preocupação com os problemas relacionados com a estabilidade estática de tensão se deve à sua importância para o planejamento e a operação dos sistemas elétricos de potência. Fatores como o crescente aumento do consumo de energia elétrica, a imposição de restrições de ordens ambientais e econômicas dificultando a construção de novas usinas de geração e linhas de transmissão têm, em geral, levado os sistemas a operarem próximos de seus limites, com reduzidas margens de carregamento. A consequência direta dessa situação é uma maior possibilidade de ocorrências de problemas relacionados com a instabilidade de tensão.

Visando assegurar uma condição de operação segura para os sistemas elétricos, surgem vários métodos de análise da estabilidade estática de tensão. Esses métodos de análise estática possibilitam avaliar as condições de operação do sistema e de sua margem de segurança ou margem de estabilidade.

A margem de estabilidade é definida como o maior aumento de carga que o sistema pode ter, sem provocar o colapso de tensão (KUNDUR, 1993). Essa análise pode ser realizada a partir da obtenção do perfil de tensão das barras em função de seu carregamento (curvas P-V e Q-V). Estas curvas são importantes, pois permitem a compreensão das condições de operação do sistema para diferentes carregamentos, e têm sido recomendadas pelas empresas do setor elétrico nacional (FORÇA TAREFA COLAPSO DE TENSÃO - FTCT, 1999) e internacional (WESTERN SYSTEM COORDINATING COUNCIL - WSCC, 1998) para a avaliação da estabilidade de tensão.

Cabe ressaltar que o levantamento da curva P-V é considerado procedimento mais adequado para a determinação das margens de estabilidade. Assim, entre os objetivos

fundamentais dos métodos de análise da estabilidade estática de tensão está a obtenção do ponto de máximo carregamento (PMC) dos sistemas de potência.

A importância do PMC reside no fato de que ele define a fronteira entre as regiões de operação estável e instável, além disso, é neste ponto que se faz a análise modal e são fornecidas informações para medidas efetivas de reforço do sistema (SEYDEL, 1994; MONTICELLI, 1983).

O cálculo do Fluxo de Carga (FC) consiste na obtenção das condições de operação (magnitude e fase das tensões nas barras do sistema, fluxos de potência nas linhas de transmissão e transformadores) de uma rede elétrica em função da sua topologia e dos níveis de demanda e geração de potência (MONTICELLI, 1983).

No FC se utiliza de uma modelagem estática da rede elétrica, a qual é representada por um conjunto de equações e inequações algébricas dependendo do grau de complexidade do sistema em análise. Esse conjunto de equações do fluxo de carga representa um limite para a região de operação dos sistemas elétricos de potência, logo, essenciais para o estudo da estabilidade estática de tensão.

Assim, na análise estática se obtém o estado de operação da rede em regime permanente, ou seja, o comportamento dinâmico não é considerado. Quando as equações do FC não apresentam solução para uma dada condição de carregamento, conclui-se que a geração e a rede não são fisicamente capazes de suprir esta demanda, exigindo modificações ou no despacho da geração ou na topologia da rede de transmissão, ou em ambas, para que tal demanda possa ser atendida com segurança.

Os métodos mais utilizados para o traçado das curvas P-V são o fluxo de carga convencional (FC) e o fluxo de carga continuado (FCC) (SEYDEL, 1994; KUNDUR, 1993; VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998; CAÑIZARES et al., 1992; ALVES, 2000; AJJARAPU; CHRISTY et al., 1992; CHIANG et al., 1995; LONG; AJJARAPU, 1996; IBA et al., 1991;) que associa o método de Newton a um método da continuação (SEYDEL, 1994). O primeiro converge quase sempre e com poucas iterações, mas devido à singularidade da matriz Jacobiana no PMC, este não possibilita precisar o PMC.

Muito embora o uso de métodos de FC convencionais possibilite o cálculo de pontos de operação muito próximos ao PMC, sempre será necessário ponderar se os problemas de não convergência são devidos a problemas numéricos ou a limitações físicas do sistema. Em geral, as diferenças não são óbvias.

Cabe observar, entretanto, que a singularidade da matriz Jacobiana do método de Newton no PMC, devida à redução do posto (*rank*) da matriz Jacobiana, de n para $n-1$, não

significa que no PMC o sistema não tenha solução. Na realidade ela existe, é única, e bem definida. Portanto, para se obter a solução, é necessário acrescentar a informação perdida com a redução do *rank*.

O traçado completo do perfil de tensão (curva P-V) é efetuado variando automaticamente o valor de um determinado parâmetro do sistema, sem preocupação com as singularidades das equações do fluxo de carga.

A diferença entre os FCC está no modo como o novo parâmetro da continuação é escolhido. Um procedimento padrão comumente usado é a adição de equações parametrizadas ao conjunto básico de equações do FCC (SEYDEL, 1994). As técnicas de parametrização mais utilizadas pelos FCC para eliminar a singularidade da matriz Jacobiana são a local (AJJARAPU e CHRISTY, 1992) e a geométrica (CAÑIZARES et al., 1992), (CHIANG et al., 1995). A técnica de parametrização local consiste na troca de parâmetro próximo ao PMC. Em Iba, (1991) foi proposta uma técnica para contornar a singularidade da matriz Jacobiana sem a necessidade de parametrização e posteriormente, associada a um controle de passo. Esta técnica consiste em definir um vetor perpendicular ao vetor tangente e foi aplicada com êxito em vários sistemas em Cañizares et al., (1992).

A visualização da geometria da trajetória de solução das equações do FC (curva P-V) é útil não só do ponto de vista didático, posto que esta facilite a compreensão do fenômeno em si, mas também auxilia no desenvolvimento de novas técnicas (ALVES; COSTA et al., 2002; GARBELINI et al., 2005; BONINI; ALVES, 2006).

Tomando por base esse contexto, neste trabalho é apresentado um método baseado na adaptação de outros métodos de FC para o traçado das curvas P-V's. Esse método, derivado do FC convencional e presente na literatura, é o método de Newton Desacoplado. O interesse pelo uso desse método desacoplado em particular, se deve à necessidade de redução do tempo computacional exigido pelos FCC para o traçado das curvas P-V e conseqüentemente a obtenção do PMC. Nesse trabalho são feitas comparações preliminares entre os desempenhos do Fluxo de Carga Continuado Desacoplado Proposto (FCCDP), considerando os algoritmos de resolução simultâneo e alternado. O FCCDP é obtido pela adição de uma equação de reta formada no plano pelas variáveis fator de carregamento e tensão nodal de uma barra k qualquer e é associada a essa estratégia o uso das propriedades (1), (2), (3) e (4) demonstradas em Monticelli (1990). Cabe ressaltar que o desacoplamento altera o processo de convergência, modificando o caminho percorrido entre o ponto inicial e a solução, mas não provoca alterações significativas na solução final do problema original de fluxo de carga (MONTICELLI, 1983).

Os resultados foram obtidos para os sistemas do IEEE (14, 30, 57, 118 e 300 barras), e para os sistemas reais Sul-Sudeste brasileiro 638 barras e do sudoeste Americano 904 barras, utilizando os algoritmos simultâneo e alternado. São realizados vários testes os quais buscam proporcionar uma melhor compreensão e avaliação do desempenho da técnica de parametrização proposta.

1.2 Objetivos do Trabalho

Os principais objetivos do trabalho são:

- Apresentar um estudo a respeito da estabilidade de tensão, e situar o trabalho desenvolvido no contexto geral do assunto.
- Expor o estudo de algumas técnicas de parametrização para os métodos da continuação existentes na literatura.
- Apresentar o método de Newton desacoplado modificado visando o traçado da curva P-V e obtenção do ponto de máximo carregamento de sistemas elétricos de potência.
- Comparar entre si os resultados obtidos com a metodologia proposta, não só no traçado das curvas, mas também na utilização da matriz Jacobiana.

1.3 Estrutura do Trabalho

Além da introdução geral o trabalho contém mais quatro capítulos, os quais buscam fornecer um bom entendimento da proposta central, através da apresentação da teoria envolvida.

Capítulo 2: É feita uma revisão bibliográfica com o objetivo de esclarecer de maneira geral o estudo da estabilidade de tensão em sistemas elétricos. Procura-se no decorrer deste capítulo criar subsídios necessários não só para a compreensão do problema em si, mas das técnicas utilizadas em sua análise.

Capítulo 3: Aborda os métodos de resolução do problema de Fluxo de Carga entre os quais aquele que utiliza o método de Newton-Raphson, bem como o seu algoritmo; o Fluxo de Carga Continuado e algumas técnicas de parametrização existentes na literatura.

Capítulo 4: Tem por finalidade apresentar o método proposto e seus algoritmos de resolução: simultâneo e alternado e relatar seu desempenho na obtenção do PMC e no traçado da curva P-V, através da realização de testes e comparação de resultados do método entre si utilizando os dois algoritmos de resolução.

Capítulo 5: Apresenta as conclusões gerais deste trabalho, bem como sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 2

Estabilidade Estática de Tensão

2.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é fornecer informações gerais com relação à importância do assunto estabilidade estática de tensão, no que diz respeito à operação e planejamento de sistemas elétricos de potência, buscando compreender os mecanismos que causam a instabilidade e estudar as ferramentas capazes de diminuir este problema.

2.2 Estabilidade de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência

Nos últimos anos tem-se intensificado os estudos com relação ao assunto estabilidade de tensão, isto se deve ao fato desta questão estar relacionada com a operação e planejamento de sistemas elétricos de potência, pois são cada vez mais frequentes situações em que os sistemas operam em situações altamente estressadas. No sistema elétrico brasileiro esta situação se apresenta de forma mais incisiva devido a recursos hidrelétricos (usinas hidrelétricas) cada vez mais distantes dos principais centros consumidores exigindo a transmissão de energia elétrica por longas distâncias, ou seja, linhas de transmissão mais longas, propiciando uma maior probabilidade de ocorrência de problemas de instabilidade de tensão.

Existem na literatura várias abordagens para o estudo do problema de estabilidade de tensão (YOUNG-HUEI et al., 1997; MOGHAVVEMI; JASMON, 1997; AJJARAPU; CHRISTY, 1992; FLATABO et al., 1990; TIRANUCHIT; THOMAS, 1986; TAMURA et al., 1983; KESSEL; GLAVITSCH, 1986; GALIANA, 1984; ALVARADO; JUNG, 1989; AJJARAPU, 1991; SAUER et al., 1986).

Um sistema é estável do ponto de vista da estabilidade estática de tensão se as magnitudes de tensão de todas as suas barras aumentam, caso as respectivas injeções de potência reativa nelas aumentem. Um sistema é instável se, em pelo menos uma de suas barras, a magnitude de tensão diminui se injeção de potência reativa aumenta (KUNDUR, 1993). O problema da instabilidade em um sistema elétrico pode manifestar-se de diferentes formas, dependendo da sua configuração e de como está operando. Um sistema sofre instabilidade de tensão quando ocorre um distúrbio ou contingência (evento em que um ou mais equipamentos saem de operação de forma inesperada), aumento de carga, alteração nas condições do sistema, provocando um declínio progressivo e incontrolável da magnitude das tensões em uma ou mais barras do sistema. O principal fator que causa o fenômeno da instabilidade é a incapacidade do sistema de responder à necessidade de injeção de potência reativa. Num sistema elétrico de potência altamente carregado, quando a magnitude dos valores de tensão atinge valores inaceitáveis (perfil de tensão muito baixo), o sistema elétrico de potência apresenta um comportamento instável caracterizado como o fenômeno do colapso de tensão tornando o sistema incapaz de atender à demanda.

Este fenômeno pode causar sérios problemas entre os quais os blecautes, acarretando sérios prejuízos financeiros. Para evitar que tais problemas ocorram planejadores e operadores de sistemas estão constantemente procurando por ferramentas que possibilitem o conhecimento preciso de quão distante o atual ponto de operação se encontra de seu limite de estabilidade, buscam o entendimento e a compreensão de onde o sistema está operando com relação ao PMC (também denominado ponto de colapso ou ponto crítico).

O conhecimento do PMC como mencionado anteriormente é importante porque fornece informações para a determinação de medidas efetivas para o reforço do sistema, já que o PMC define a fronteira entre as regiões de operação estável e instável do sistema (GAO et al., 1996).

A análise do problema da estabilidade de tensão tornou-se uma medida necessária, já que tem se mostrado um fator de limitação na operação de sistemas elétricos de potência.

2.3 Técnicas de Análise da Estabilidade de Tensão

Diante das dificuldades em se identificar os mecanismos que levam à instabilidade ou colapso de tensão devido ao grande número de componentes envolvidos no fenômeno e as constantes de tempo, tornou-se necessário aprofundar os estudos a respeito da estabilidade de

tensão, o que propiciou o desenvolvimento de técnicas capazes de detectar o fenômeno colapso de tensão em redes complexas, fornecendo exatamente as margens de estabilidade e os limites de transferência de potência, identificando os pontos críticos de tensão do sistema elétrico de potência e áreas propensas à instabilidade e identificando os principais fatores para sua contribuição e sensibilidade que forneçam características do sistema elétrico de potência para a adoção de ações corretivas (KUNDUR et al., 2004). Essas técnicas de análise da estabilidade de tensão são classificadas em duas categorias:

- **Análise dinâmica:** tem por objetivo esclarecer os mecanismos envolvidos na instabilidade de tensão, através do detalhamento dos efeitos de todos os equipamentos de controle, possui por inconveniente a complexidade e o fato de exigir elevado tempo computacional.
- **Análise estática:** tem por funções obter o PMC do sistema e também avaliar a margem de estabilidade de tensão, bem como mecanismos de instabilidade, detectando e evitando episódios de colapso de tensão. Este tipo de análise reproduz as principais características do fenômeno, sem que seja necessário recorrer à complexidade numérica no domínio do tempo. Este trabalho se apóia na parte estática.

2.3.1 A Análise Estática

A análise estática é recomendada para o estudo da estabilidade de tensão de sistemas elétricos de potência em particular na análise em tempo real devido ao baixo custo computacional exigido, já que nessa situação é necessário analisar um vasto número de condições e/ou distúrbios na rede, detectando e prevenindo o colapso de tensão.

A análise estática da estabilidade de tensão pode ser realizada, inicialmente, com as equações de fluxo de carga ou alguma generalização adequada destas. Estas análises relacionam a ocorrência do colapso de tensão com o problema conhecido das equações de fluxo de carga apresentar múltiplas soluções.

Dentre as abordagens estáticas têm-se os métodos baseados na obtenção das curvas P-V e Q-V para barras de interesse do sistema. Essas curvas são obtidas através de cálculos do FC convencional ou através do FCC (AJJARAPU; CHRISTY, 1992; ALVES, 2000; CHIANG et al., 1995; IBA et al., 1991; CAÑIZARES et al., 1992; GARBELINI, 2005; BONINI; ALVES, 2006) e são amplamente utilizadas pelas empresas do setor elétrico para determinar a

máxima demanda que o sistema elétrico de potência pode atender. O conhecimento deste fato possibilita identificar em que momento poderá ocorrer problemas no fornecimento de energia elétrica desde os mais simples até os mais severos como o colapso de tensão.

2.3.1.1 Métodos de Curvas P-V e Q-V

Os métodos de curvas P-V e Q-V são métodos de análise estática utilizados na avaliação da estabilidade de tensão dos sistemas elétricos de potência para diferentes condições operativas (TAYLOR, 1994). O levantamento de ambas as curvas, P-V e Q-V, é a metodologia recomendada pelo (WSCC, 1998) para assegurar que a margem mínima requerida seja atendida. Já o Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro (ONS, 2001), considera o traçado da curva P-V como a metodologia mais apropriada para a determinação da margem de estabilidade, e o levantamento da curva Q-V como uma metodologia complementar para avaliar as margens de potência reativa e os locais para o reforço do sistema. Como resultados deste estudo definem-se as ações preventivas e corretivas necessárias para se garantir a estabilidade (MATARUCCO, 2006).

2.3.1.2 Curvas P-V

As curvas P-V ou curvas de máxima transferência de potência são definidas como sendo a relação entre a magnitude da tensão e a potência ativa em um determinado barramento para uma condição determinada de fator de potência e tensão no mesmo barramento. Essas curvas são obtidas através de sucessivas soluções de fluxos de carga a partir de um ponto de operação inicial (caso base $\lambda=1$), levando em consideração gradativos incrementos de carga em uma determinada barra, numa área ou em todo o sistema.

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

Traçada a curva P-V identifica-se o PMC, para um dado ponto de operação, a distância ao ponto de máximo carregamento (distância do “nose” ou “nariz” da curva P-V) indica a margem de estabilidade de tensão do sistema elétrico de potência. O conhecimento desta margem é importante para o operador do sistema elétrico de potência, pois permite

avaliar se após a ocorrência de um pequeno distúrbio (aumento gradativo do carregamento do sistema elétrico de potência) existirá outro ponto de operação estável.

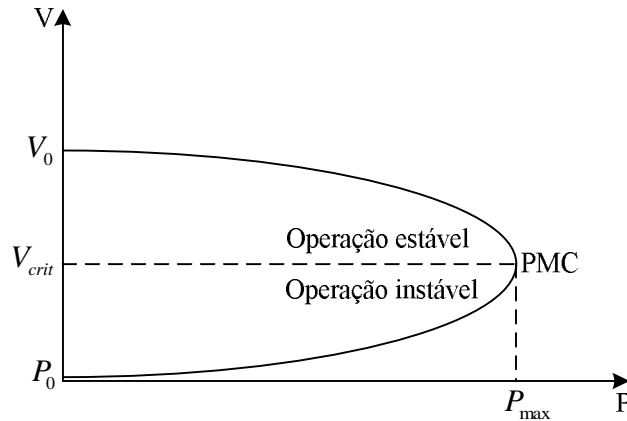


Figura 2.1: Curva P-V.

Na figura 2.1, V_{crit} é a tensão crítica e P_{max} é a potência ativa máxima.

Destaca-se a utilização das curvas P-V:

- Na análise estratégica de planejamento e operação de sistemas elétricos de potência;
- Na obtenção de limites de transferência de potência;
- No ajuste das margens.

São apontadas como desvantagens:

- O problema da não convergência do problema de fluxo de carga próximo ao PMC impossibilitando o traçado completo da curva P-V, quando se faz uso do FC convencional;
- O fato das curvas P-V serem obtidas através de sucessivas soluções de fluxos de carga consumindo assim um elevado tempo computacional.

A curva P-V apresenta a variação da tensão numa barra em função do aumento de carga considerada no sistema.

2.3.1.3 Curvas Q-V

As curvas Q-V são obtidas por meio de um procedimento semelhante ao utilizado na obtenção das curvas P-V, ou seja, através da solução sucessiva de fluxos de carga simulando a introdução de um condensador síncrono sem limites de reativo a cada barra escolhida para análise. Esta simulação é feita diminuindo-se gradativamente a tensão na barra à medida que se determina a injeção de potência reativa através das soluções de fluxos de carga.

Computacionalmente isto é realizado convertendo-se a barra *PQ* (barra de carga) em questão em barra *PV* (barra de geração) sem limites de reativos (TAYLOR, 1994).

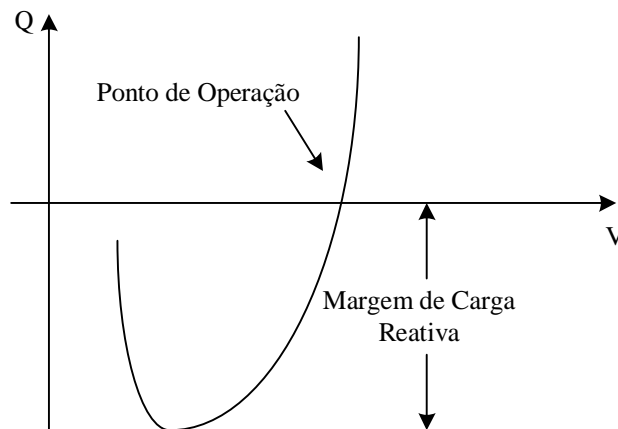


Figura 2.2: Curva Q-V.

Na representação gráfica da curva Q-V (figura 2.2) no eixo das abscissas são representados os valores de tensão e no eixo das ordenadas os valores da potência reativa injetada. Esta curva fornece a variação da magnitude de tensão numa determinada barra com relação à potência reativa injetada nessa mesma barra.

Pode-se observar na figura 2.2 que a margem de reativos disponível na barra, é a diferença entre a potência reativa de saída nula do condensador síncrono e a potência de saída do mesmo na base da curva Q-V, que representa o limite de estabilidade de tensão ($dQ/dV=0$).

A utilização da curva Q-V apresenta como vantagem o fato de possibilitar a determinação da margem reativa em barras críticas de forma simples e rápida. Entretanto,

uma das suas limitações é o fato de aumentar a carga reativa em apenas uma barra do sistema, podendo assim, levar a falsos resultados (KUNDUR, 1994).

2.4 Margem de Carregamento

Os operadores de sistemas monitoram usualmente grandezas como fluxos de potência ativo e reativo com o objetivo de se garantir que essas grandezas permaneçam dentro dos limites aceitáveis na atual configuração, ou em qualquer outra das configurações subsequentes a uma contingência (saída de uma linha de transmissão, variação súbita do carregamento do sistema, aumento da transferência de potência entre áreas).

A noção de capacidade de transmissão deverá estar sempre presente para o operador, já que uma quantificação mais direta e explícita da capacidade de transmissão é a margem estática de estabilidade de tensão, também denominada margem de carregamento.

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

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

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

Para se calcular o grau de segurança com relação à estabilidade de tensão, é importante obter meios de calcular a distância de certo ponto de operação do sistema ao ponto crítico. Esta distância é dada por grandezas físicas, como a potência consumida (MW, MVar). A figura 2.3 exemplifica como poderia ser obtida a margem de carregamento (ΔP):

$$\Delta P = P_{cr} - P_0$$

em que ΔP representa o maior aumento possível de consumo de forma a manter a rede operando ainda na região estável.

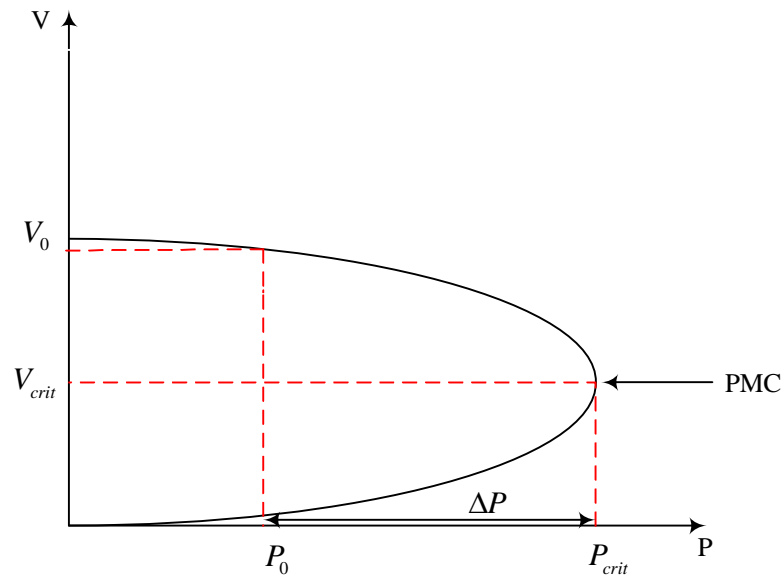


Figura 2.3: Margem de Carregamento.

2.4.1 Margem de Carregamento Pós-Contingência

Os sistemas elétricos de potência operando em tempo real estão sujeitos à ocorrência de alguma contingência ou algum outro imprevisto como um aumento na tensão podendo provocar o colapso de tensão. Assim, nas etapas de planejamento e operação de um sistema elétrico de potência, devem ser definidas as margens de estabilidade de tensão e as ações de controle necessárias para as condições normais de operação (caso base, também denominado pré-contingência) e também para condições de pós-contingência.

O ponto (O) é considerado o ponto de operação estável denominado de caso base. Este ponto é obtido por um programa de FC convencional. A margem de carregamento para as condições de pós-contingência é definida como sendo a diferença entre o ponto de operação de pré-contingência (O) e o ponto de máximo carregamento de pós-contingência ($P_{\max\text{-pós}}$) conforme se pode observar na figura 2.4 (MALANGE, 2008).

O WESTERN SYSTEM COORDINATING COUNCIL requer que seus membros garantam pelo menos 5% de margem de potência ativa em qualquer situação de contingência simples (WSCC, 1998). Essa política também tem sido recomendada pelas empresas do setor elétrico nacional.

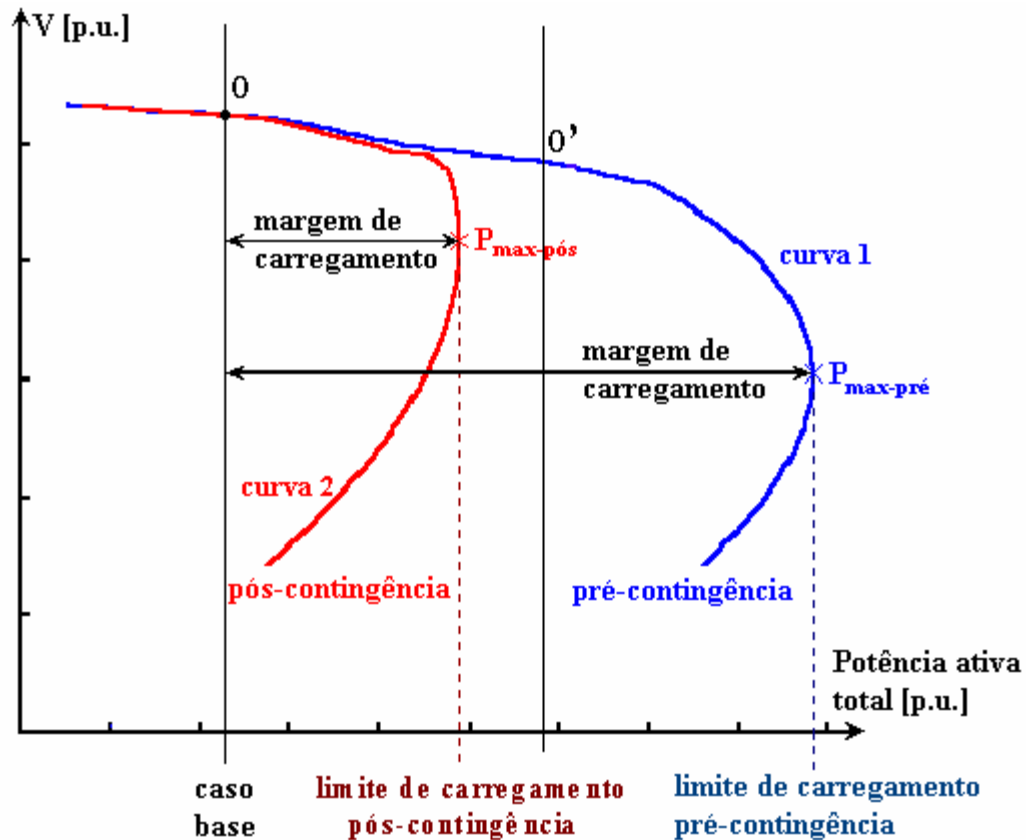


Figura 2.4: Margem de carregamento segura de pré e pós-contingência.

Considerando que o sistema esteja operando no ponto “O” da curva 1 e que o mesmo seja submetido, por exemplo, a um aumento de carga, ele passaria a operar no ponto “O”. Nesse caso, o sistema entraria em colapso se ocorresse à contingência conforme mostra a curva 2, porém permaneceria operando com uma margem de segurança reduzida, mas na condição normal conforme apresentado pela curva 1 (MALANGE, 2008).

2.4.2 Métodos Utilizados para a Obtenção da Margem de Carregamento

A. Fluxo de Carga Convencional

É um método que se restringe aos cálculos dos pontos de operação estáveis (também chamado caso base) do sistema de potência, e da margem de carregamento através de sucessivas soluções. Este método baseia-se no progressivo aumento da carga até que o estado do sistema atinja pontos suficientemente próximos do ponto de colapso, ou seja, em que não há mais solução do FC.

B. Método da Continuação

Esse método tem como principal característica o fato de não apresentar o problema de singularidade da matriz Jacobiana, tal problema é contornado com o uso das técnicas de parametrização associadas a esse método, em virtude disso, permite o traçado completo da curva P-V.

C. Métodos Diretos

Estes métodos recebem esta denominação devido o fato de possibilitarem o cálculo direto do PMC, sem a obtenção dos demais pontos existentes entre o caso base e o PMC e se subdividem em:

C 1 Ponto de Colapso

Método proposto inicialmente em (ALVARADO; JUNG, 1989) e posteriormente adaptado em (CAÑIZARES et al., 1992), (CAÑIZARES; ALVARADO, 1993). Este método é baseado na teoria da bifurcação e na singularidade da matriz Jacobiana, e é usado para detectar o ponto de máximo carregamento para certa direção de crescimento de carga.

C 2 Métodos de Otimização

Técnicas de otimização propostas para obter diretamente o PMC (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998). Os tópicos A e B serão vistos mais detalhadamente no capítulo seguinte, por se tratarem da base na qual se apóia o desenvolvimento deste trabalho.

Capítulo 3

Fluxo de Carga Continuado e suas Técnicas de Parametrização

3.1 Introdução

Ao longo dos anos os sistemas elétricos de potência foram tornando-se mais complexos passando a exigir métodos de resolução mais robustos e eficientes, neste contexto surge o método de Newton-Raphson ou Fluxo de Carga convencional e que se constitui uma importante ferramenta na solução do problema do fluxo de carga. Entretanto, ele é considerado ineficiente para a obtenção do PMC dos sistemas elétricos de potência. A determinação do PMC é realizada por meio da resolução das equações do fluxo de carga considerando sucessivos incrementos da carga. Esse procedimento é efetuado até quando não é mais possível encontrar solução para o problema, ou seja, o método diverge. Isso ocorre em virtude da singularidade da matriz Jacobiana no PMC e, portanto, aos problemas numéricos em torno deste.

Diante da necessidade de se obter o PMC com maior precisão e das dificuldades apresentadas pelo Fluxo de Carga convencional na obtenção deste ponto, foi proposto o uso do denominado Fluxo de Carga Continuado (AJJARAPU; CHRISTY, 1992). O Fluxo de Carga Continuado procura garantir através da parametrização, a não singularidade da matriz Jacobiana no PMC, possibilitando com isso, a determinação precisa do mesmo.

Encontrada a solução do fluxo de carga para o caso base pelo método convencional, usa-se um método da continuação para calcular soluções adicionais até que o PMC seja obtido.

Diversos autores propuseram diferentes implementações dos métodos da continuação para superar as dificuldades numéricas introduzidas pela singularidade da matriz Jacobiana e

com isso, possibilitar a determinação do PMC (AJJARAPU; CHRISTY, 1992; CHIANG et al., 1995; ALVES et al., 2002).

O objetivo desse capítulo é apresentar os métodos de resolução do fluxo de carga em particular, os métodos: fluxo de carga convencional e o fluxo de carga continuado. Também são apresentadas algumas técnicas de parametrização. As técnicas de parametrização mais utilizadas pelos FCC para eliminar a singularidade de da matriz Jacobiana (**J**) são a local (AJJARAPU; CHRISTY, 1992) e a geométrica (CAÑIZARES et al., 1992; CHIANG et al., 1995).

3.2 Fluxo de Carga Convencional

Tradicionalmente, a obtenção de sucessivas soluções do fluxo de carga tem sido feita através da variação manual do carregamento do sistema. Este procedimento é realizado até que o processo iterativo deixe de convergir. Para fins práticos, este ponto é considerado como sendo o PMC. Entretanto, sabe-se que os problemas de convergência encontrados pelo FC convencional para a obtenção do PMC são decorrentes das dificuldades numéricas associadas à singularidade da matriz Jacobiana. Assim sendo, o uso dos métodos convencionais de FC para a obtenção das curvas P-V fica restrito à sua parte superior (correspondendo à região de operação estável). Os métodos convencionais possibilitam o cálculo de pontos de operação muito próximos ao PMC. A proximidade a que se pode chegar do PMC dependerá do método convencional que se está utilizando: método de Newton, método desacoplado de Newton, método desacoplado rápido.

De forma geral, na formulação do problema fluxo de carga as equações para um sistema elétrico de potência podem ser escritas da seguinte forma:

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

Em que:

$\boldsymbol{\theta}$ é o vetor dos ângulos das tensões das barras de carga *PQ* e de geração *PV*;

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

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

De acordo com Monticelli (MONTICELLI, 1983), a cada barra da rede são associadas quatro variáveis, sendo que duas entram no problema como conhecidas (dados) e duas como incógnitas:

V_k - magnitude da tensão nodal da barra k ;

θ_k - ângulo da tensão nodal na barra k ;

P_k - potência ativa líquida calculada na barra k ;

Q_k - potência reativa líquida calculada na barra k .

São conhecidas inicialmente duas variáveis em cada barra do sistema elétrico de potência, as outras duas são incógnitas e serão obtidas mediante solução das equações do fluxo de carga. Assim

(I) – Barras PQ também conhecidas por barras de carga:

- São especificados P_k e Q_k ;
- São calculados V_k e θ_k ;

(II) – Barras PV ou barras de geração:

- São especificados P_k e V_k ;
- São calculados Q_k e θ_k ;

(III) – Barra $V\theta$ ou barra de referência (ou *slack*):

- São dados V_k e θ_k ;
- São calculados P_k e Q_k .

No fluxo de carga utilizando o método de Newton-Raphson, para a resolução do conjunto de equações do fluxo de carga para o denominado caso base, determinam-se os valores de V_k para todas as barras PQ e θ_k para todas as barras, exceto a barra de referência.

A equação (3.1) também pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{P} &= \mathbf{P}^{\text{esp}} - \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) = 0 \\ \Delta \mathbf{Q} &= \mathbf{Q}^{\text{esp}} - \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) = 0\end{aligned}\tag{3.2}$$

sendo \mathbf{P} o vetor das injeções de potência ativa nas barras PQ e PV , e \mathbf{Q} , o das injeções de potência reativa nas barras PQ ; $\mathbf{P}^{\text{esp}} = \mathbf{P}_g^{\text{esp}} - \mathbf{P}_c^{\text{esp}}$ é a diferença entre as potências ativas geradas e consumidas para as barras PQ e PV , e $\mathbf{Q}^{\text{esp}} = \mathbf{Q}_g^{\text{esp}} - \mathbf{Q}_c^{\text{esp}}$ é a diferença entre as potências reativas geradas e consumidas para as barras PQ .

$\Delta \mathbf{P}$ e $\Delta \mathbf{Q}$ são denominados como resíduos (*mismatches*) de potência ativa e reativa, respectivamente. \mathbf{V} é o vetor das magnitudes de tensão nodais, $\boldsymbol{\theta}$ é o vetor dos ângulos de fase nodais.

O sistema de equações (3.2) possui dimensão $2n_{PQ} + n_{PV}$.

Sendo n_{PQ} e n_{PV} respectivamente o número de barras PQ e PV da rede e n representa o número de incógnitas.

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

$$\begin{aligned} P_k(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) &= V_k \sum_{l \in K} V_l (G_{kl} \cos \theta_{kl} + B_{kl} \sin \theta_{kl}) \\ Q_k(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) &= V_k \sum_{l \in K} V_l (G_{kl} \sin \theta_{kl} - B_{kl} \cos \theta_{kl}) \end{aligned} \quad (3.3)$$

em que: G_{kl} é parte real da matriz admitância, B_{kl} é a parte imaginária da matriz admitância, e K é o conjunto de todas as barras l adjacentes à barra k , incluindo a própria barra k .

Algoritmo do método iterativo do fluxo de carga convencional.

i) Fazer $v = 0$ e escolher os valores iniciais dos ângulos das tensões das barras PQ e PV ($\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta}^0$), e as magnitudes das tensões das barras PQ ($\mathbf{V} = \mathbf{V}^0$).

ii) Calcular $P_k(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v)$ para as barras PQ e PV , e $Q_k(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v)$ para as barras PQ , e determinar os resíduos ΔP_k^v e ΔQ_k^v .

(iii) Testar a convergência: se $\text{Max} \{ |\Delta P_k^v| \} \leq \epsilon_p$ e $\{ |\Delta Q_k^v| \} \leq \epsilon_q$, o processo iterativo convergiu para a solução ($\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v$); caso contrário passar para (iv).

(iv) Calcular a matriz Jacobiana (\mathbf{J})

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

As componentes dessas submatrizes jacobianas correspondem às derivadas das potências ativa e reativa em relação ao ângulo de fase das tensões das barras PQ e PV , e em relação à magnitude das tensões nas barras PQ e são expressas por:

$$\mathbf{H} \begin{cases} H_{kl} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_l} = V_k V_l (G_{kl} \text{sen} \theta_{kl} - B_{kl} \text{cos} \theta_{kl}) \\ H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 B_{kk} - V_k \sum_{l \in K} V_l (G_{kl} \text{sen} \theta_{kl} - B_{kl} \text{cos} \theta_{kl}) \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{N} \begin{cases} N_{kl} = \frac{\partial P_k}{\partial V_l} = V_k (G_{kl} \text{cos} \theta_{kl} + B_{kl} \text{sen} \theta_{kl}) \\ N_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_k G_{kk} + \sum_{l \in K} V_l (G_{kl} \text{cos} \theta_{kl} + B_{kl} \text{sen} \theta_{kl}) \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{M} \begin{cases} M_{kl} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_l} = -V_k V_l (G_{kl} \text{cos} \theta_{kl} + B_{kl} \text{sen} \theta_{kl}) \\ M_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{l \in K} V_l (G_{kl} \text{cos} \theta_{kl} + B_{kl} \text{sen} \theta_{kl}) \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{L} \begin{cases} L_{kl} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_l} = V_k (G_{kl} \text{sen} \theta_{kl} - B_{kl} \text{cos} \theta_{kl}) \\ L_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -V_k B_{kk} + \sum_{l \in K} V_l (G_{kl} \text{sen} \theta_{kl} - B_{kl} \text{cos} \theta_{kl}) \end{cases} \quad (3.8)$$

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

$$\boldsymbol{\theta}^{v+1} = \boldsymbol{\theta}^v + \Delta \boldsymbol{\theta}^v$$

$$\mathbf{V}^{v+1} = \mathbf{V}^v + \Delta \mathbf{V}^v$$

Sendo $\Delta \boldsymbol{\theta}^v$ e $\Delta \mathbf{V}^v$ obtidos resolvendo-se o sistema linear

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) \\ \Delta \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) & \mathbf{N}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) \\ \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) & \mathbf{L}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta}^v \\ \Delta \mathbf{V}^v \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

(iv) Fazer $v = v+1$ e voltar para o passo (ii)

Esquema do método iterativo de Newton-Raphson aplicado ao problema de FC:

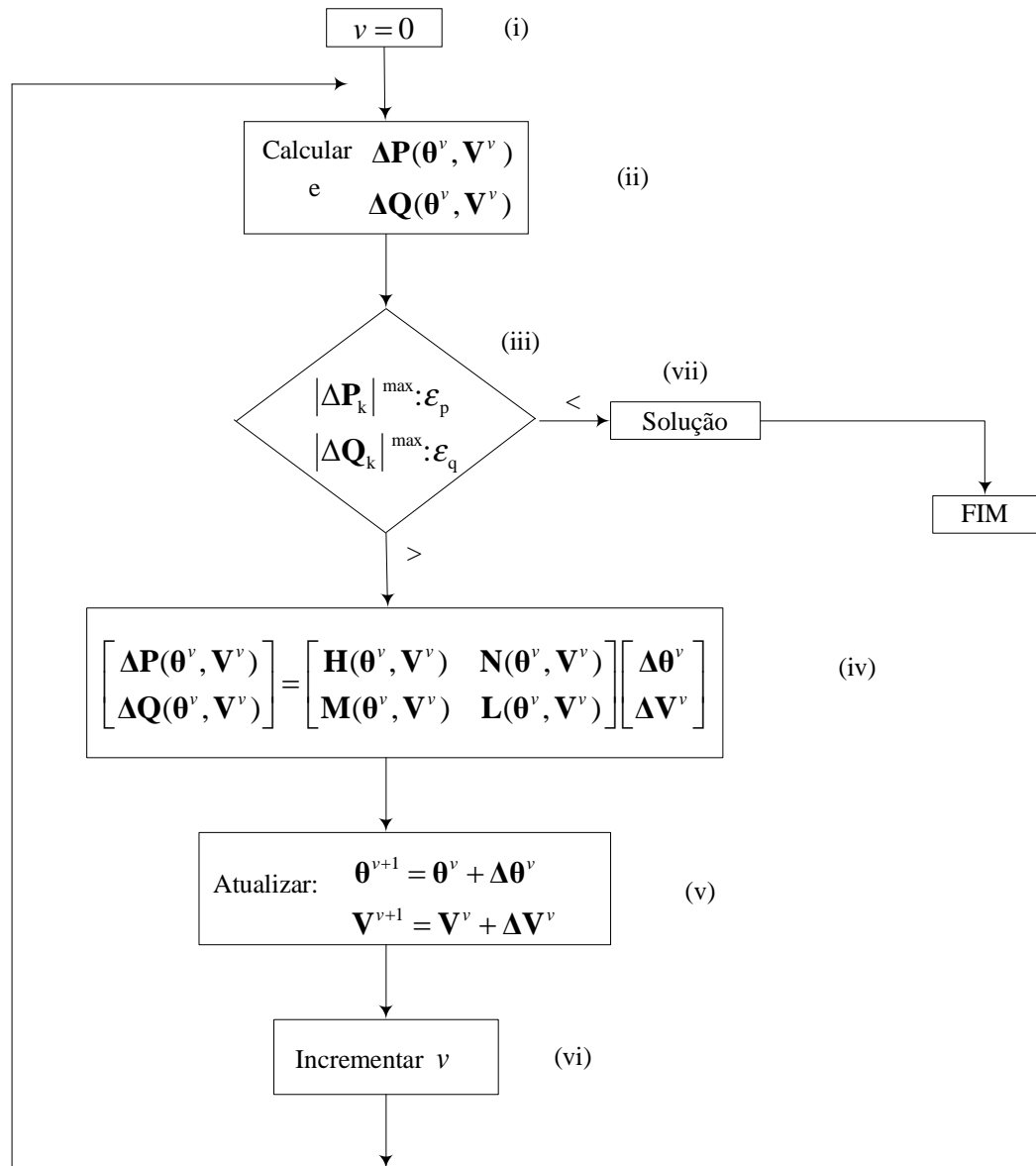


Figura 3.1: Método iterativo de Newton-Raphson.

A operação dos sistemas elétricos de potência possui determinadas restrições entre as quais os limites (máximo e mínimo) na geração de potência reativa das barras *PV*, a violação de um desses limites durante o processo iterativo implicará na transformação da barra *PV* em *PQ* o que significa que a magnitude da tensão da barra *PV* não pode mais ser mantida no valor especificado; eventualmente em uma iteração seguinte a barra poderá voltar a ser do tipo *PV*.

As curvas P-V podem ser obtidas por meio de sucessivas soluções de FC convencional, a partir de um caso base até o PMC, para incrementos graduais da carga numa direção predefinida. Isto normalmente é suficiente para a resolução do problema fluxo de

carga convencional, desde que a matriz \mathbf{J} tenha posto completo, ou seja, não apresente problemas de singularidade, caso contrário associa-se ao FC convencional um método da continuação para reformular as equações do fluxo de carga e assim superar as dificuldades numéricas provocadas pela singularidade da matriz \mathbf{J} no PMC, permitindo o traçado completo da curva P-V.

Em geral a equação do fluxo de carga, equação (3.1) ou (3.2) podem ser reescritas como:

$$\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda) = 0 \quad (3.10)$$

Ou ainda

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{P} &= \mathbf{P}^{\text{esp}}(\lambda) - \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) = 0 \\ \Delta \mathbf{Q} &= \mathbf{Q}^{\text{esp}}(\lambda) - \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) = 0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\mathbf{P}^{\text{esp}}(\lambda) = \mathbf{P}_{\text{ger}}(\lambda) - \mathbf{P}_{\text{carga}}(\lambda) \text{ e } \mathbf{Q}^{\text{esp}}(\lambda) = \mathbf{Q}_{\text{ger}} - \mathbf{Q}_{\text{carga}}(\lambda), \mathbf{P}_{\text{carga}}(\lambda) = \lambda \mathbf{k}_{\text{pc}} \mathbf{P}_{\text{carga}}^{\text{esp}}, \mathbf{P}_{\text{ger}}(\lambda) = \lambda \mathbf{k}_{\text{pg}} \mathbf{P}_{\text{ger}}^{\text{esp}}$$

e $\mathbf{Q}_{\text{carga}}(\lambda) = \lambda \mathbf{k}_{\text{qc}} \mathbf{Q}_{\text{carga}}^{\text{esp}}$

Estas equações diferem das equações (3.1) e (3.2) pelo acréscimo da variável λ , em que λ é o fator de carregamento.

$\mathbf{P}_{\text{carga}}^{\text{esp}}$, $\mathbf{Q}_{\text{carga}}^{\text{esp}}$ e $\mathbf{P}_{\text{ger}}^{\text{esp}}$ são respectivamente os valores especificados no caso base ($\lambda=1$) das potências ativa e reativa das barras PQ , e das potências ativa das barras PV . \mathbf{k}_{pg} , \mathbf{k}_{pc} e \mathbf{k}_{qc} são parâmetros prefixados usados para caracterizar um cenário de carga específico. Eles descrevem as taxas de variação de potência ativa (\mathbf{P}_{ger}) nas barras de geração (barras PV), e das potências ativa (\mathbf{P}) e reativa (\mathbf{Q}) nas barras de carga (barras PQ). Assim, é possível realizar uma variação de carregamento individual, isto é, para cada barra do sistema, considerando para cada uma, um crescimento de carga com fatores de potência diferentes aos do caso base. Tradicionalmente, entretanto, assume-se que o aumento de carga de uma determinada área é feito com fator de potência constante e proporcional ao carregamento do caso base com modelo de carga de potência constante (nesse caso \mathbf{k}_{pg} , \mathbf{k}_{pc} e \mathbf{k}_{qc} são todos iguais a um), visto que este fornece a condição operacional mais segura para o sistema (WSCC, 1998).

As principais razões para se adotar essa modelagem para a carga são apresentadas em (CAÑIZARES, 1995; FLATAB; 1990; CHIANG et al., 1999).

Conforme visto anteriormente a resolução de (3.11) utilizando-se o FC convencional é feita através da especificação do valor do λ , neste caso λ não é tratado como uma variável dependente. Entretanto no procedimento em que se faz uso dos métodos da continuação, λ é considerado como variável dependente o que possibilita variá-lo de forma automática.

Assim o conjunto de equações (3.11) que possui dimensão $N = 2n_{PQ} + n_{PV}$ passará a ter $n + 1$ incógnitas, exigindo uma equação adicional. Desse modo, qualquer uma das $n+1$ incógnitas pode ser definida como parâmetro. A diferença entre os métodos de FCC está no modo como esse novo parâmetro é escolhido e em como eliminar a singularidade da matriz \mathbf{J} . A inclusão de equações parametrizadas é um procedimento padrão para a obtenção de curvas P-V (SEYDEL, 1994). A parametrização fornece uma forma de identificar cada solução ao longo da trajetória a ser obtida.

Entre os vários métodos de fluxo de carga continuado o mais amplamente utilizado consiste de quatro elementos básicos:

- (I) Um passo preditor;
- (II) Um procedimento de parametrização;
- (III) Um controle de passo;
- (IV) Um passo corretor.

São descritos a seguir as características de cada um desses elementos básicos, associados a algumas técnicas existentes na literatura.

3.2.1 Passo Preditor

Encontrada a solução da equação (3.10) para o caso base (θ_0, \mathbf{V}_0 e $\lambda_0 = 1$) executa-se um passo preditor para encontrar um ponto aproximado para a próxima solução ($\theta_n, \mathbf{V}_n, \lambda_n$).

Entre as várias técnicas de previsão existentes na literatura as mais utilizadas são a tangente (AJJARAPU; CHRISTY, 1992; AJJARAPU; BATTULA et al., 1994) e a secante (CHIANG et al., 1995), (CHIANG et al., 1999).

3.2.1.1 Preditor Tangente

No preditor tangente, a estimativa da próxima solução pode ser encontrada dando um passo, de tamanho apropriadamente escolhido, na direção do vetor tangente à curva P-V, no ponto correspondente à solução atual. A técnica do preditor pelo vetor tangente é usualmente mais precisa do que a da secante.

Quando se está utilizando os métodos de Newton, o cálculo do vetor tangente não implica num aumento significativo do custo computacional, já que se pode usar a última matriz Jacobiana fatorada.

O cálculo deste vetor tangente é obtido tomando-se as derivadas parciais da equação (3.10).

$$[\mathbf{G}_\theta \quad \mathbf{G}_V \quad \mathbf{G}_\lambda] \begin{bmatrix} \partial\theta \\ \partial\mathbf{V} \\ \partial\lambda \end{bmatrix} = [\mathbf{J} \quad \mathbf{G}_\lambda] \mathbf{t} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

em que \mathbf{G}_θ , \mathbf{G}_V e \mathbf{G}_λ são as derivadas parciais de \mathbf{G} em relação a θ , \mathbf{V} , e λ , respectivamente.

\mathbf{G}_θ e \mathbf{G}_V compõem a matriz \mathbf{J} do fluxo de carga convencional. O vetor \mathbf{t} é denominado vetor tangente é o que se procura determinar.

Incrementa-se uma coluna (\mathbf{G}_λ) em \mathbf{J} correspondente à nova variável λ . Com o incremento da nova coluna o número de incógnitas passa a ser maior do que o número de equações. Assim, para possibilitar-se a solução do problema especifica-se uma variável do vetor tangente com um valor diferente de zero. Esta variável é denominada “parâmetro da continuação”. Com a especificação do parâmetro da continuação é necessário acrescentar-se uma nova equação ($\mathbf{e}_k \mathbf{t} = \mathbf{t}_k = \pm 1$) à equação 3.10.

A equação (3.13), feitas às devidas modificações, se apresenta da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_\theta & \mathbf{G}_V & \mathbf{G}_\lambda \\ & \mathbf{e}_k & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial\theta \\ \partial\mathbf{V} \\ \partial\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_\theta & \mathbf{G}_V & \mathbf{G}_\lambda \\ & \mathbf{e}_k & \end{bmatrix} \mathbf{t} = \mathbf{J}_m \mathbf{t} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

em que \mathbf{e}_k é um vetor linha apropriadamente dimensionado com todos os elementos iguais a zero exceto o k -ésimo, que é igual a 1. A escolha do índice k é feita de modo que o vetor \mathbf{t}

tenha uma norma não nula e garanta que a matriz Jacobiana modificada (\mathbf{J}_m) seja não singular no PMC. O número 1 deverá ser posto na coluna da variável escolhida como parâmetro da continuação (θ_k , V_k ou λ). A escolha do sinal + ou - dependerá de como a variável escolhida como parâmetro estará variando, positivo se ela estiver aumentando de valor, e negativo se estiver decrescendo.

Obtido o vetor tangente resolvendo-se (3.13), a estimativa para a próxima solução é dada por:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}^e \\ \mathbf{V}^e \\ \lambda^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}_j \\ \mathbf{V}_j \\ \lambda_j \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} \partial \boldsymbol{\theta} \\ \partial \mathbf{V} \\ \partial \lambda \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

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

σ é um escalar que define o tamanho do passo preditor, cujo valor deve ser especificado de forma que a solução prevista esteja dentro do raio de convergência do passo corretor (CHIANG et al., 1995).

3.2.1.2 Preditor Secante

O preditor secante é um dos preditores mais utilizados devido ao reduzido esforço computacional exigido e por não apresentar problemas de singularidade da matriz \mathbf{J} . Destaca-se o preditor secante de ordem um e o polinomial modificado de ordem zero (SEYDEL, 1994; CHIANG et al., 1995).

O método do preditor secante de ordem um é uma aproximação do vetor tangente e utiliza a solução atual e anterior para estimar a solução seguinte. Os dois primeiros pontos são obtidos com o uso do preditor tangente.

Os métodos polinomiais estão baseados em um polinômio de ordem variada que corta a solução atual ($\boldsymbol{\theta}^j$, \mathbf{V}^j , λ^j) e as soluções prévias ($\boldsymbol{\theta}^{j-1}$, \mathbf{V}^{j-1} , λ^{j-1}), para obter um ponto de aproximação para a próxima solução ($\boldsymbol{\theta}^{j+1}$, \mathbf{V}^{j+1} , λ^{j+1}).

$$(\boldsymbol{\theta}^{j+1}, \mathbf{V}^{j+1}, \lambda^{j+1}) = (\boldsymbol{\theta}^j, \mathbf{V}^j, \lambda^j) + \sigma (\boldsymbol{\theta}^j - \boldsymbol{\theta}^{j-1}, \mathbf{V}^j - \mathbf{V}^{j-1}, \lambda^j - \lambda^{j-1}) \quad (3.15)$$

A figura (3.2) ilustra a etapa de previsão pelo vetor tangente (reta contínua) e pelo vetor secante (reta tracejada), respectivamente obtidas usando λ como parâmetro da continuação.

Observe que no ponto “A” o passo corretor não encontrará solução quando λ for o parâmetro utilizado e também não será possível vencer a singularidade da matriz Jacobiana modificada (\mathbf{J}_m) no PMC. Para que esse ponto seja obtido com maior precisão o tamanho do passo deverá ser reduzido à medida que os pontos se aproximarem dele.

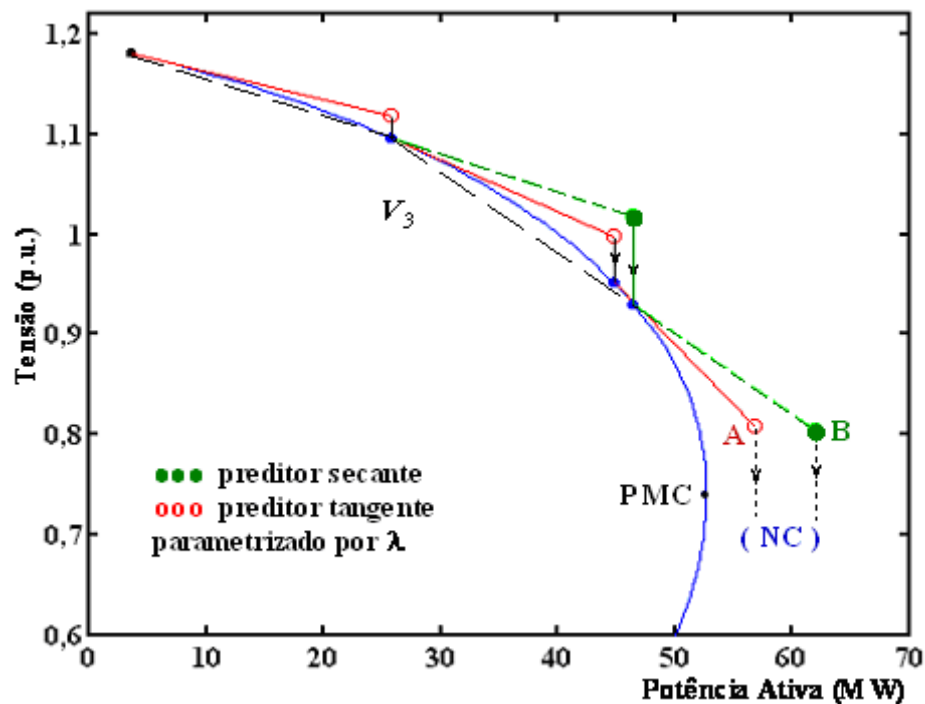


Figura 3.2. Comparação entre os métodos da continuação com preditor tangente e com preditor secante.

3.2.1.3 Preditor Polinomial Modificado de Ordem Zero

O preditor polinomial modificado de ordem zero (CHIANG et al., 1995) é a técnica de previsão adotada para o passo preditor na metodologia proposta neste trabalho, esta técnica é também conhecida por previsão trivial. Esta técnica usa a solução atual e um incremento fixo num determinado parâmetro (λ , θ_k ou V_k), como uma estimativa para a próxima solução.

Especificado um incremento fixo no parâmetro (λ , θ_k ou V_k) como uma estimativa para a próxima solução, é necessária fazer a correção, a partir da solução atual, para obter a

solução final correta. Geralmente o incremento adotado pelo passo preditor exige poucas iterações para que a próxima solução seja obtida dentro da precisão desejada.

Este é o preditor utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

3.2.2 Controle do passo preditor (σ)

A eficiência do método da continuação para o traçado da curva P-V está intimamente relacionada com a estratégia adotada no controle do passo preditor. Em geral a escolha do passo depende do sistema em análise. Para uma situação de carga leve (sistema pouco carregado), uma variação de carga resultará em uma pequena mudança no ponto de operação e o tamanho do passo poderá ser maior. Já em sistemas altamente carregados uma pequena mudança na carga resultará em grandes variações do ponto de operação, exigindo nesse caso que o tamanho do passo seja menor. O ideal seria se o tamanho do passo se adequasse às condições reais de convergência.

Uma técnica de controle de passo considerada simples, baseada no número de iterações do passo corretor é utilizada para controlar o tamanho do passo preditor (SEYDEL, 1994), se o número de iterações for pequeno, trata-se de carga leve ou normal e o passo pode ser maior. Caso o número de iterações aumente o sistema estará numa região de alto carregamento e o tamanho do passo deve ser reduzido.

Outra opção interessante é o uso da magnitude de tensão (V_k) como parâmetro durante todo o traçado da curva P-V, isto acarretará em um controle automático do passo de λ . Tal ocorrência se deve ao fato de um passo fixo na tensão corresponder geralmente a passos largos na variação do λ para carga leve ou normal, onde a tensão varia pouco, e a passos reduzidos para altos carregamentos, conforme pode ser visto na figura (3.3).

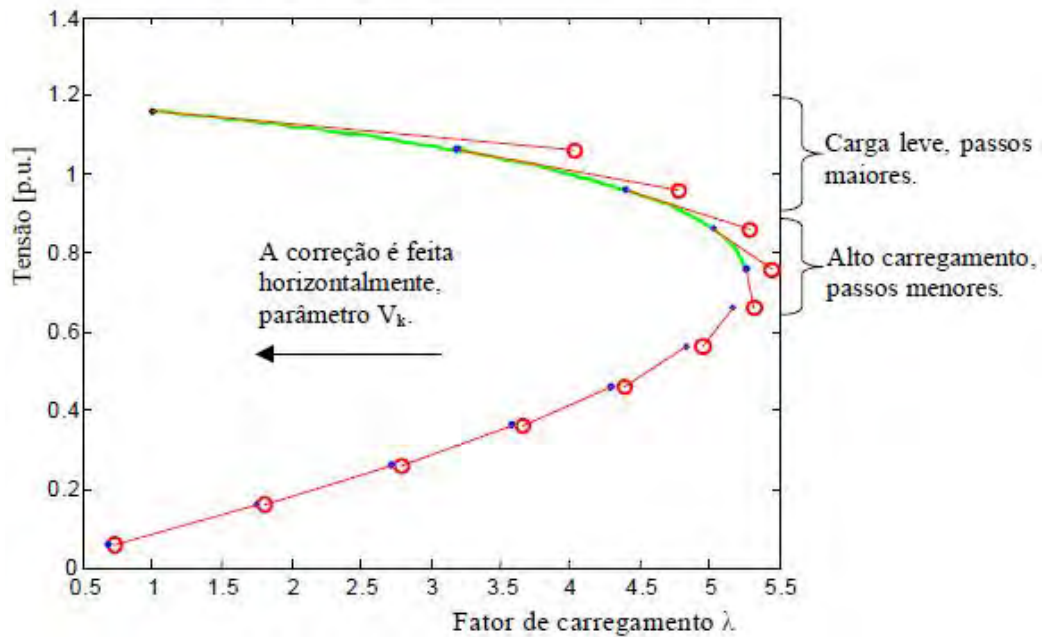


Figura 3.3: Controle automático do passo σ .

Outro método de controle do tamanho do passo é baseado no vetor \mathbf{t} normalizado (ZAMBRONI et al., 1997). Nesse método o tamanho do passo é dado por:

$$\sigma = \frac{\sigma^0}{\|\mathbf{t}\|_2} \quad (3.16)$$

Em que $\|\mathbf{t}\|_2$ é a norma Euclidiana do vetor tangente e σ^0 é um escalar predefinido.

Conforme o sistema torna-se carregado, a magnitude do vetor \mathbf{t} aumenta e σ diminui. O bom desempenho do processo depende de uma boa escolha de σ^0 . Seu valor está condicionado ao sistema elétrico considerado Cañizares e Alvarado (1993) alcançaram bons resultados para sistemas de diferentes tamanhos, assumindo $\sigma^0 = 1$.

3.2.3 Passo Corretor e Parametrização

Feita a previsão da solução é necessário fazer a correção, já que a solução prevista não é a solução correta, o que pode ser observado na figura (3.4). Este procedimento evita o acúmulo de erro. Quanto mais próxima a solução prevista estiver da solução correta, menor será o número de iterações necessárias para a obtenção da curva trajetória de soluções (curva P-V) dentro da precisão desejada.

Neste passo é adicionada à equação (3.10) uma equação do tipo $y - y^e = 0$, em que y e y^e correspondem respectivamente à variável escolhida como parâmetro da continuação e seu valor previsto. Logo, o sistema de equações da fase de correção passa a ser:

$$\begin{aligned} G(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda) &= 0 \\ y - y^e &= 0 \end{aligned} \quad (3.17)$$

Na resolução desse sistema de equações do passo corretor o método de Newton-Raphson ligeiramente modificado é o mais utilizado, mas outros métodos numéricos também podem ser utilizados.

O número de iterações nesta etapa geralmente é muito pequeno. No caso do uso de λ como parâmetro, a matriz \mathbf{J}_m apresentará singularidade no PMC, assim, para que o método não divirja, o passo deverá ser reduzido à medida que os pontos se aproximam do PMC.

Esta singularidade pode ser eliminada com o uso em ambos os passos, preditor e corretor, da técnica conhecida por parametrização local (AJJARAPU; CHRISTY, 1992), (AJJARAPU et al., 1994; SEYDEL, 1994), que consiste na troca de parâmetro próximo do PMC. Quando aplicada ao método baseado no preditor tangente, a variável escolhida é aquela que apresentar a maior variação, assim λ passa a ser tratada como variável dependente, enquanto a variável escolhida passa a ser o novo parâmetro p , do conjunto de $n+1$ variáveis (AJJARAPU; CHRISTY, 1992; AJJARAPU et al., 1994).

O novo parâmetro p será dado por:

$$p \leftarrow \max \{|t_1|, |t_2|, \dots, |t_{n+1}|\} \quad (3.18)$$

Já no método que toma por base o preditor secante, p é escolhido como sendo o elemento que apresentar a máxima variação relativa (SEYDEL, 1994):

$$p \leftarrow \max \left\{ \left(\frac{|\boldsymbol{\theta}^{j+1} - \boldsymbol{\theta}^j|}{|\boldsymbol{\theta}^{j+1}|} \right), \left(\frac{|V^{j+1} - V^j|}{|V^{j+1}|} \right), \left(\frac{|\lambda^{j+1} - \lambda^j|}{|\lambda^{j+1}|} \right) \right\} \quad (3.19)$$

em que j refere-se ao ponto da curva. A escolha de p baseada nas duas equações (3.18) e (3.19) torna o processo confiável, mas não garante ao processo maior rapidez (SEYDEL, 1994).

A equação (3.18) tem sido utilizada no método do vetor tangente, demonstrando que ao aproximar-se do PMC, p muda de λ para a magnitude de tensão que apresenta a maior variação, retornando novamente para λ depois de calculados alguns pontos.

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

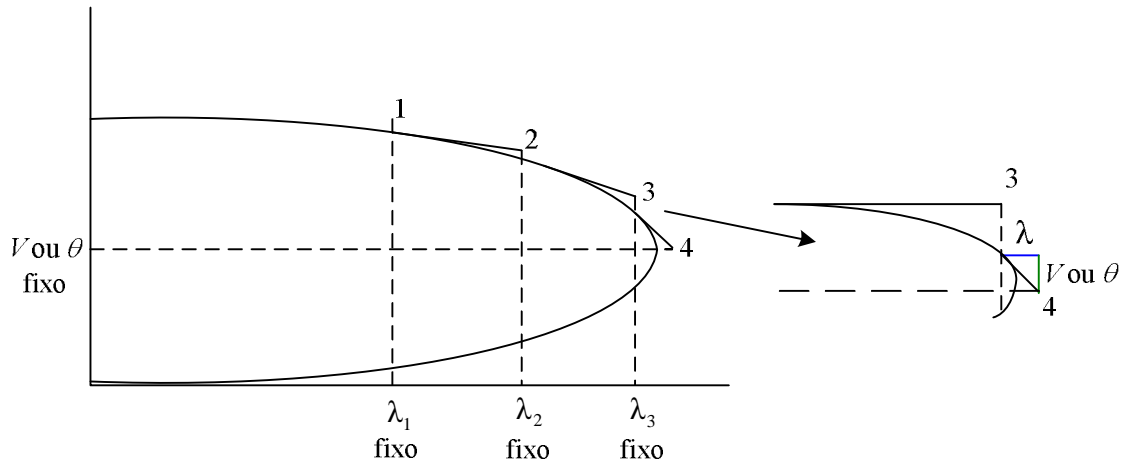


Figura 3.4: Técnica de Parametrização Local.

3.2.4 Técnica de Comprimento de Arco

Esta técnica foi proposta por Chiang et al. (1995) com a finalidade de eliminar a singularidade da matriz \mathbf{J} é baseada no comprimento do parâmetro do arco (s). Os dois primeiros pontos são obtidos pelo vetor tangente, e ao invés de acrescentar a equação ($\mathbf{e}_k \times \mathbf{t} = \pm 1$), adiciona-se à equação (3.12) a seguinte equação:

$$\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{dx_i}{ds} \right)^2 \right] + \left(\frac{d\lambda}{ds} \right)^2 = 1 \quad (3.20)$$

em que $x = [\boldsymbol{\theta}^T \mathbf{V}^T]$. Para o passo corretor é acrescentada à equação (3.20) a seguinte equação:

$$\mathbf{L}(\mathbf{x}, \lambda) = \sum_{i=1}^n \left[(x_i - x_i(s))^2 \right] + (\lambda - \lambda(s))^2 - (\Delta s)^2 = 0 \quad (3.21)$$

Em que o comprimento de arco é:

$$\Delta s = \left\{ \sum_{i=1}^n [(x_i - x_i(s))^2] + (\lambda - \lambda(s))^2 \right\}^{0.5} \quad (3.22)$$

Dessa forma pode ser mostrado que o conjunto de equações do fluxo de potência aumentada é bem condicionado, mesmo no PMC, obtendo o traçado completo da curva P-V sem problemas de mau-condicionamento.

A expansão das equações (3.10) e (3.21) em série de Taylor, resulta em:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_x & -\mathbf{G}_\lambda \\ \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{G} \\ \Delta \mathbf{L} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

em que \mathbf{G}_x é igual a matriz \mathbf{J} do fluxo de carga convencional.

3.2.5 Técnica da Perpendicularidade

Esta técnica é utilizada para contornar o problema da singularidade de \mathbf{J} sem a necessidade de utilizar a parametrização. Foi associada a um controle de passo e quando aplicada a vários sistemas em Cañizares et. al (1992) apresentou um bom desempenho.

A técnica consiste em determinar um vetor perpendicular ao vetor tangente passando pelos pontos previstos subsequentes $(\theta^e, \mathbf{V}^e, \lambda^e)$ e outro que se encontra sobre a curva da trajetória de soluções $(\theta, \mathbf{V}, \lambda)$ (SEYDEL, 1994). A equação a ser adicionada ao sistema (3.11) será dada pelo produto escalar:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_j \\ \Delta \mathbf{V}_j \\ \Delta \lambda_j \end{bmatrix}^T \bullet \begin{bmatrix} \theta - \theta_j - \Delta \theta_j \\ \mathbf{V} - \mathbf{V}_j - \Delta \mathbf{V}_j \\ \lambda - \lambda_j - \Delta \lambda_j \end{bmatrix} = 0 \quad (3.24)$$

em que $(\Delta \theta_j, \Delta \mathbf{V}_j, \Delta \lambda_j)^T = (\theta^e - \theta_j, \mathbf{V}^e - \mathbf{V}_j, \lambda^e - \lambda_j)$. Partindo da solução fornecida pelo passo preditor, o sistema resultante da expansão em série de Taylor do sistema (3.10) acrescido da equação anterior converge para o ponto $(\theta, \mathbf{V}, \lambda)$ da curva P-V.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_\theta & \mathbf{G}_V & \mathbf{G}_\lambda \\ \frac{\partial L}{\partial \theta} & \frac{\partial L}{\partial V} & \frac{\partial L}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta L \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

3.2.6 Técnica de Parametrização Geométrica para o Fluxo de Carga Continuado Baseado nas Variáveis Tensão e Fator de Carregamento

Esta técnica desenvolvida por Bonini e Alves (2006) apresenta uma nova estratégia de parametrização geométrica para o fluxo de carga continuado a qual permite o traçado completo das curvas P-V, e a obtenção do ponto de máximo carregamento de sistemas de potência, sem os problemas de mau condicionamento.

O fluxo de carga continuado proposto por BONINI (FCCB), consiste em acrescentar à equação (3.10) uma equação de reta que passa por um ponto escolhido $O(\lambda^0, V_k^0)$ no plano formado pelas variáveis fator de carregamento (λ) e magnitude (V_k) da tensão nodal de uma barra k qualquer, ver figura (3.5) (BONINI; ALVES, 2008).

$$\begin{aligned} G(\theta, V, \lambda) &= 0 \\ W(\theta, V, \lambda, \alpha) &= \alpha(\lambda - \lambda^0) - (V_k - V_k^0) = 0 \end{aligned} \quad (3.26)$$

em que o parâmetro α é o coeficiente angular da reta. Com a adição de mais uma equação, λ pode ser tratado como uma variável dependente e α é considerada uma variável independente, ou seja, escolhida como parâmetro da continuação (seu valor é prefixado). Assim, o número de incógnitas é igual ao de equações, isto é, a condição necessária para que se tenha solução é atendida, desde que a matriz Jacobiana tenha posto máximo (seja não singular).

Observa-se que a prefixação do valor de α , conforme já comentado, corresponde à técnica de previsão trivial ou polinomial modificada de ordem zero (SEYDEL, 1994). Com a solução do caso base $(\theta^1, V^1 \text{ e } \lambda^1)$, obtida com um FC onde $\lambda^1 = 1,0$, calcula-se o valor de α a partir do ponto inicial escolhido $O(\lambda^0, V_k^0)$ e dos seus respectivos valores obtidos no caso base P (λ^1, V_k^1) .

$$\alpha^1 = (V_k^1 - V_k^0) / (\lambda^1 - \lambda^0) \quad (3.27)$$

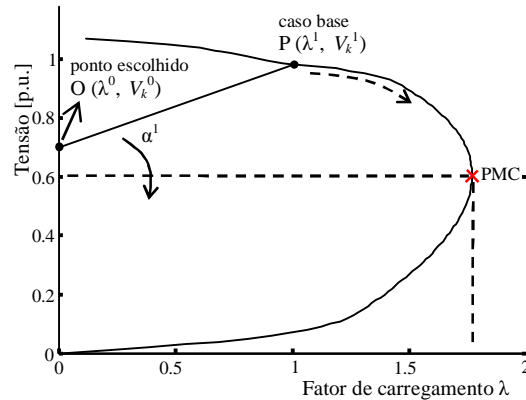


Figura 3.5: Desempenho do FCCB: reta inicial que passa por um ponto escolhido $O(\lambda^0, V_k^0)$ e o de caso base $P(\lambda^1, V_k^1)$ no plano λV .

Logo em seguida o fluxo de carga continuado proposto por Bonini e Alves (2006) é utilizado para calcular as demais soluções através de sucessivos incrementos de $(\Delta\alpha)$ no valor de α , figura (3.6) (BONINI; ALVES, 2008). Para $\alpha = \alpha^1 + \Delta\alpha$. A solução de (3.26) fornecerá o novo ponto de operação $(\theta^2, \mathbf{V}^2$ e $\lambda^2)$ correspondente à interseção da trajetória de soluções (curva P-V) com a reta cujo novo valor de coeficiente angular $(\alpha^1 + \Delta\alpha)$ foi especificado. Para $\alpha = \alpha^1$, a solução convergida deverá resultar em $\lambda = 1$. A linearização do sistema (3.26) pelos dois primeiros termos da série de Taylor, considerando o valor prefixado no valor do parâmetro α calculado para o caso base, resulta em:

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{J} & \mathbf{G}_\lambda \\ -\partial\mathbf{W}/\partial\mathbf{x} & -\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{x} \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \mathbf{J}_m \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{x} \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{G} \\ \Delta\mathbf{W} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

em que $\mathbf{x} = [\boldsymbol{\theta}^T \mathbf{V}^T]^T$, \mathbf{J} é a matriz Jacobiana do fluxo de carga e \mathbf{G}_λ corresponde à derivada de \mathbf{G} em relação a λ , $\Delta\mathbf{G}$ e $\Delta\mathbf{W}$ representam os fatores de correção (*mismatches*) das respectivas funções em (3.2). É preciso observar que estes serão iguais a zero (ou praticamente nulos, ou seja, inferior à tolerância adotada para o caso base convergido). Logo, somente $\Delta\mathbf{W}$ será diferente de zero devido à variação de α , através do incremento $\Delta\alpha$.

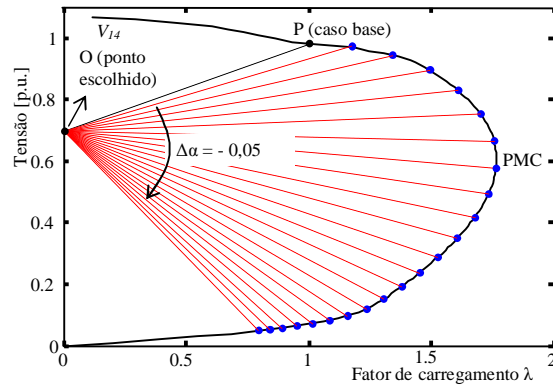


Figura 3.6: Desempenho do FCCB para o IEEE-14: (a) magnitude da tensão da barra crítica (V_{14}) em função de λ .

Para todos os testes realizados em Bonini e Alves (2006) o uso deste método mostrou que não havia necessidade de realizar-se a troca de parâmetro ao longo de todo o traçado da curva P-V, faz-se apenas algumas vezes uma mudança de coordenadas do centro do feixe de retas, o que não implica em mudanças na estrutura da \mathbf{J}_m , mas apenas do valor do elemento correspondente a derivada de \mathbf{W} em relação a λ , ou seja, no valor de α .

Entretanto, embora o uso desta técnica tenha proporcionado uma ampliação do grupo das variáveis de tensão que podem ser adotadas como parâmetro sem provocar modificações na ordem da matriz Jacobiana do método proposto em (AJJARAPU; CHRISTY, 1992), pesquisas posteriores usando sistemas maiores mostraram que em alguns casos havia necessidade de troca de parâmetro ao longo do traçado da curva P-V.

Capítulo 4

Metodologia

4.1 Introdução

Os métodos de fluxo de carga desacoplado e desacoplado rápido convencionais são considerados inadequados para a obtenção do ponto de máximo carregamento de sistemas elétricos de potência, devido a problemas de mau-condicionamento neste ponto crítico e na sua vizinhança.

O objetivo deste capítulo é abordar a aplicação do método desacoplado continuado de Newton, ou seja, o método desacoplado associado a um método da continuação à resolução do fluxo de carga. Este método constitui-se o foco deste trabalho.

4.2 Método de Newton Desacoplado

4.2.1 Desacoplamento P θ -QV

O método desacoplado deriva do método de Newton-Raphson, ou seja, é uma versão modificada do método de Newton convencional. Essa versão baseia-se no desacoplamento [P θ -QV], ou seja, é obtida considerando-se o fato de que existe um forte acoplamento entre [P e θ], [Q e V] e um fraco acoplamento entre [Q e θ], [P e V]. Esse fato é verificado para redes de transmissão de extra-alta-tensão (magnitudes das tensões acima de 230 KV) e ultra-alta-tensão (acima de 750KV) (MONTICELLI, 1983).

O método desacoplado ignora a existência das submatrizes jacobianas **N** e **M**, ou seja, são consideradas nulas (MONTICELLI, 1983).

Nesse método o desacoplamento permite o uso de duas técnicas de resolução para os subproblemas $\mathbf{P}\boldsymbol{\theta}$ e $\mathbf{Q}\mathbf{V}$: a simultânea e a alternada. Com relação à convergência, esse método exige um número maior de iterações quando comparado com o método de Newton original, mas os resultados são praticamente os mesmos.

4.2.2 Algoritmo Simultâneo do Método de Newton Desacoplado

As equações na forma de resolução simultânea (MONTICELLI, 1983) se apresentam da seguinte forma:

$$\begin{cases} \Delta\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) = \mathbf{H}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v)\Delta\boldsymbol{\theta}^v \\ \Delta\mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) = \mathbf{L}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v)\Delta\mathbf{V}^v \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\theta}^{v+1} = \boldsymbol{\theta}^v + \Delta\boldsymbol{\theta}^v \\ \mathbf{V}^{v+1} = \mathbf{V}^v + \Delta\mathbf{V}^v \end{cases} \quad (4.2)$$

Aplicando o FCC, as equações (4.1) e (4.2) podem ser reescritas como:

$$\begin{cases} \Delta\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v, \lambda^v) = \mathbf{H}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v)\Delta\boldsymbol{\theta}^v \\ \Delta\mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v, \lambda^v) = \mathbf{L}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v)\Delta\mathbf{V}^v \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\theta}^{v+1} = \boldsymbol{\theta}^v + \Delta\boldsymbol{\theta}^v \\ \mathbf{V}^{v+1} = \mathbf{V}^v + \Delta\mathbf{V}^v \\ \lambda^{v+1} = \lambda^v + \Delta\lambda^v \end{cases} \quad (4.4)$$

No método de resolução simultâneo, $\boldsymbol{\theta}$ e \mathbf{V} são atualizados simultaneamente.

4.2.3 Algoritmo Alternado do Método de Newton Desacoplado

Neste algoritmo de resolução as equações são colocadas na seguinte forma:

$$\begin{cases} \Delta\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) = \mathbf{H}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v)\Delta\boldsymbol{\theta}^v \\ \boldsymbol{\theta}^{v+1} = \boldsymbol{\theta}^v + \Delta\boldsymbol{\theta}^v \end{cases} \quad (4.5)$$

$$\begin{cases} \Delta\mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}^{v+1}, \mathbf{V}^v) = \mathbf{L}(\boldsymbol{\theta}^{v+1}, \mathbf{V}^v)\Delta\mathbf{V}^v \\ \mathbf{V}^{v+1} = \mathbf{V}^v + \Delta\mathbf{V}^v \end{cases} \quad (4.6)$$

Aplicando o FCC, as equações (4.5) e (4.6) são reescritas como:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v, \lambda^v) = \mathbf{H}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) \Delta \boldsymbol{\theta}^v \\ \boldsymbol{\theta}^{v+1} = \boldsymbol{\theta}^v + \Delta \boldsymbol{\theta}^v \end{cases} \quad (4.7)$$

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}^{v+1}, \mathbf{V}^v, \lambda^v) = \mathbf{L}(\boldsymbol{\theta}^{v+1}, \mathbf{V}^v) \Delta \mathbf{V}^v \\ \mathbf{V}^{v+1} = \mathbf{V}^v + \Delta \mathbf{V}^v \\ \lambda^{v+1} = \lambda^v + \Delta \lambda^v \end{cases} \quad (4.8)$$

Desta forma as variáveis $\boldsymbol{\theta}$ e \mathbf{V} são atualizadas a cada meia iteração, sendo (4.7) correspondente à meia-iteração ativa responsável pela atualização dos ângulos de fase das tensões e (4.8) à meia iteração reativa responsável pela atualização das magnitudes de tensão, com isso os subproblemas $\mathbf{P}\boldsymbol{\theta}$ e $\mathbf{Q}\mathbf{V}$ podem ter velocidades de convergência distintas para cada subproblema (CASTRO, 2009).

São apresentados nas figuras (4.1) e (4.2) os respectivos esquemas do método de Newton desacoplado considerando os algoritmos simultâneo e alternado.

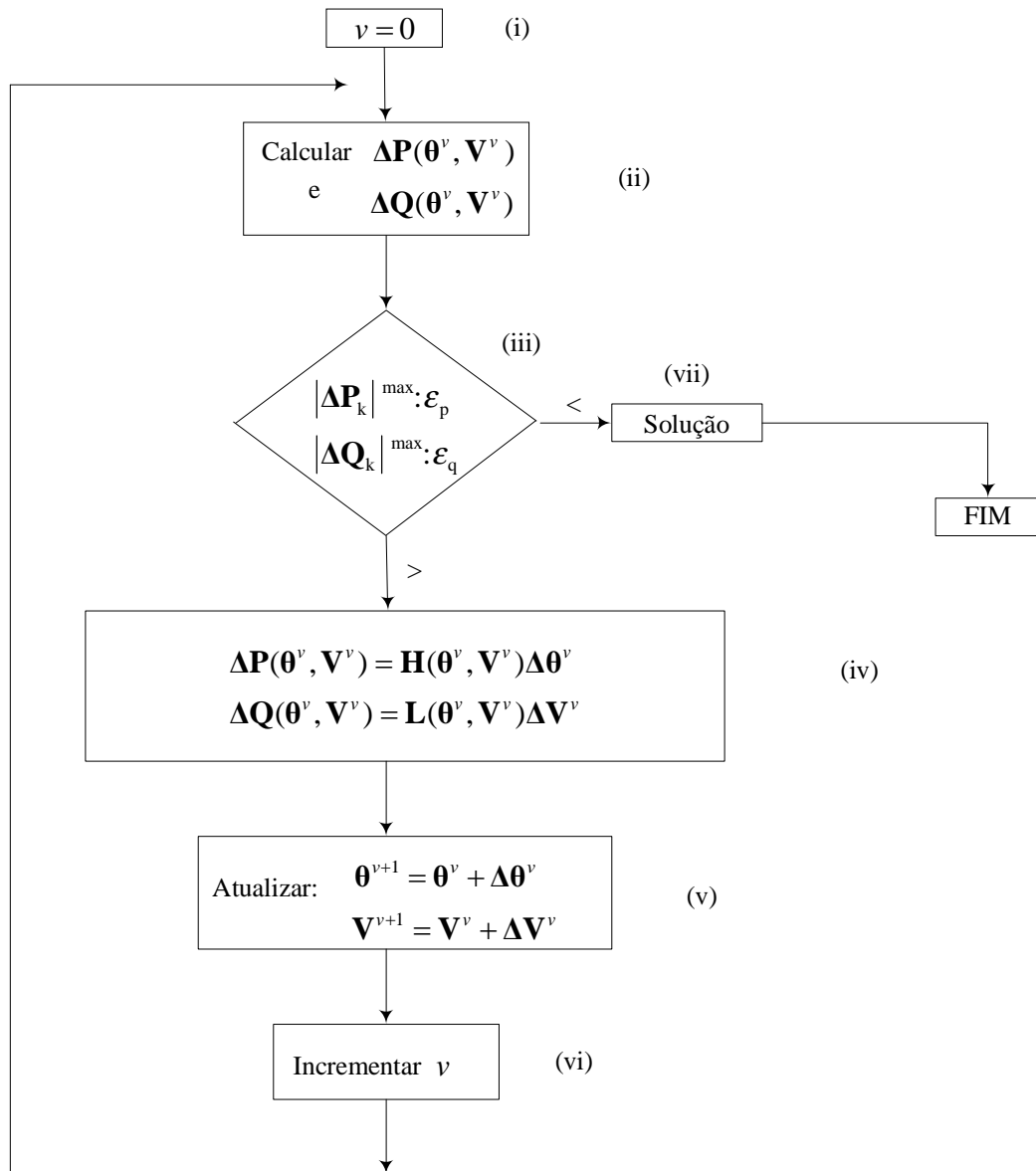


Figura 4.1: Método de Newton desacoplado simultâneo.

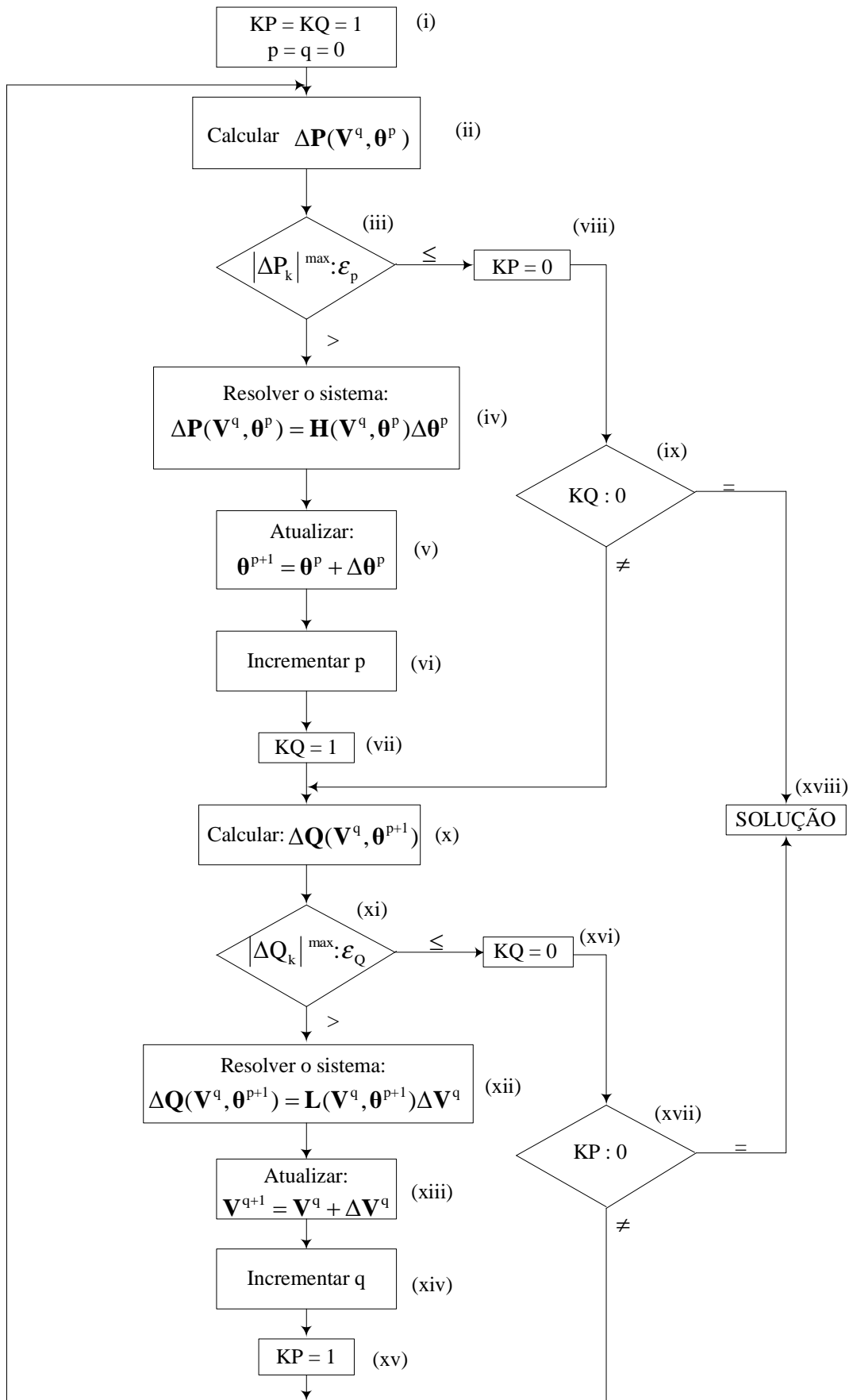


Figura 4.2: Diagrama de blocos do método de Newton desacoplado alternado.

4.3 Metodologia Proposta

4.3.1 Introdução

Conforme mencionado no capítulo 1 problemas como massivas interconexões de sistemas elétricos, aumento da demanda, geração insuficiente, expansão da transmissão e fatores de ordem econômica e ambiental tem levado os sistemas elétricos de potência a operarem muito próximo de seus limites, tais fatores tem provocado uma crescente preocupação com a estabilidade de tensão dos sistemas elétricos de potência.

Essa preocupação tem motivado a busca por ferramentas de análise estática dos sistemas elétricos, já que essas análises se propõem a diagnosticar margens de estabilidade de tensão e mecanismos de instabilidade (ZARATE, 2004).

O intuito é diagnosticar de forma rápida e segura algum distúrbio que possa causar problemas no fornecimento de energia elétrica, para tanto a obtenção do ponto de máximo carregamento se faz necessária. Visto que esse ponto determina o grau de segurança do sistema com relação à estabilidade de tensão, possibilitando aos operadores de sistemas tomarem as medidas necessárias para manter os sistemas elétricos de potência funcionando normalmente após sofrer alguma contingência.

Vimos que os métodos FC convencional ou método de Newton e o FCC são amplamente utilizados nas análises estáticas. Neste trabalho propomos outra ferramenta de análise estática o método desacoplado anteriormente citado agora com novas implementações. O interesse pelo uso de métodos desacoplados em geral, se deve à necessidade de redução do tempo computacional exigido pelos FCC para o traçado das curvas P-V. Nesse trabalho são feitas comparações preliminares entre os desempenhos do Fluxo de Carga Continuado Desacoplado Proposto, considerando os algoritmos de resolução simultâneo e alternado. O FCCDP é obtido pela adição de uma equação de reta no plano formado pelas variáveis fator de carregamento, λ , e a magnitude de tensão (V_k) de uma barra k qualquer.

Os resultados foram obtidos para os sistemas do IEEE (14, 30, 57, 118 e 300 barras), utilizando os algoritmos simultâneo e alternado.

4.3.2 Fluxo de Carga Continuado Desacoplado Proposto (FCCDP)

No método proposto se acrescenta ao conjunto básico de equações do fluxo de carga continuado, equação (3.10) uma equação de reta que passa por um ponto escolhido $O(\lambda^0, V^0)$ formada no plano λV (variáveis fator de carregamento λ e magnitude de tensão nodal de uma barra k qualquer V_k) (BONINI et al., 2006).

$$R(V_k, \lambda, \alpha) = (V_k - V_k^0) - \alpha(\lambda - \lambda^0) = 0 \quad (4.9)$$

Assim o sistema de equações (3.11) passa a ser dado por

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda) &= \lambda \mathbf{P}^{\text{esp}} - \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) = 0 \\ \Delta \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda) &= \lambda \mathbf{Q}^{\text{esp}} - \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) = 0 \\ \Delta R(V_k, \lambda, \alpha) &= (V_k - V_k^0) - \alpha(\lambda - \lambda^0) = 0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

em que α é o coeficiente angular da reta.

O ponto central do processo de resolução da equação (3.10) consiste em se determinar o vetor de correções $\Delta \mathbf{x}$, o que exige a resolução do seguinte sistema linear:

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}) = -\mathbf{J}(\mathbf{x})\Delta \mathbf{x} \Rightarrow \Delta \mathbf{x} = -[\mathbf{J}(\mathbf{x})]^{-1} \mathbf{G}(\mathbf{x})$$

sendo $\mathbf{x} = [\boldsymbol{\theta}^T \mathbf{V}^T \lambda]^T$ e $\mathbf{G}(\mathbf{x}) = [\Delta \mathbf{P}^T \Delta \mathbf{Q}^T \Delta R]^T$.

Tomando por base as expressões dos vetores $\Delta \mathbf{P}$ e $\Delta \mathbf{Q}$ em (3.10) pode-se representar a matriz Jacobiana (\mathbf{J}) do FCC da seguinte forma:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial \mathbf{V}} & -\mathbf{P}^{\text{esp}} \\ \frac{\partial \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial \mathbf{V}} & -\mathbf{Q}^{\text{esp}} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{e}_k & \alpha \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

em que \mathbf{e}_k é um vetor com todos os elementos iguais a zero exceto na coluna da tensão da barra k que é igual a 1 utilizada para formar a reta.

Considerando-se a expressão (4.10) e a equação matricial (4.11) obtém-se a equação (4.12).

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \\ \Delta R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} & -\mathbf{P}^{\text{esp}} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} & -\mathbf{Q}^{\text{esp}} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{e}_k & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \mathbf{V} \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

4.3.2.1 Desacoplamento P θ e QV

O desacoplamento é o objetivo principal deste trabalho, cujo foco central conforme já mencionado é o desempenho do método da continuação baseado no método desacoplado de Newton.

Da equação (4.12), obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \\ \Delta R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} & -\mathbf{P}^{\text{esp}} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} & -\mathbf{Q}^{\text{esp}} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{e}_k & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \mathbf{V} \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

que pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N}' \\ \mathbf{M}' & \mathbf{L}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \mathbf{V}' \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

sendo $\Delta \mathbf{Q}' = [\Delta \mathbf{Q}^T \ \Delta R]^T$ e $\Delta \mathbf{V}' = [\Delta \mathbf{V}^T \ \Delta \lambda]^T$. Como já foi visto o desacoplamento permite o uso de duas técnicas de resolução, a simultânea e a alternada para os subproblemas P θ (ativo) e QV (reativo). As submatrizes \mathbf{N} e \mathbf{M} são simplesmente ignoradas (MONTICELLI, 1983). O desacoplamento é introduzido apenas no algoritmo de resolução, sem afetar o modelo da rede, i.e., o problema resolvido permanece o mesmo ($\Delta \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}') = \mathbf{0}$ e $\Delta \mathbf{Q}'(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}') = \mathbf{0}$). Entretanto, os Fluxos de Carga Continuado Desacoplado utilizando λ ou V_k como parâmetro da continuação, desenvolvidos a partir dessa premissa, mostram-se ineficientes para o traçado das curvas P-V, ver figuras (4.3); (4.4); (4.5), (4.6), (4.7) e (4.8).

A figura 4.3 apresenta a curva P-V da barra crítica (barra 14) do sistema IEEE 14 usando o algoritmo simultâneo o qual diverge próximo ao PMC, ou seja, não consegue

precisar o PMC devido à singularidade da matriz \mathbf{J} . Então para uma melhor aproximação do PMC volta-se à solução anterior e reduz-se o passo de 1/10. A figura 4.4 mostra o número de iterações gasto na obtenção de cada ponto da curva P-V. Nota-se que a partir do oitavo ponto, onde começa a redução de passo, ocorre uma pequena redução do número de iterações, e a seguir volta a aumentar gradativamente. Esse aumento se deve à proximidade com o PMC.

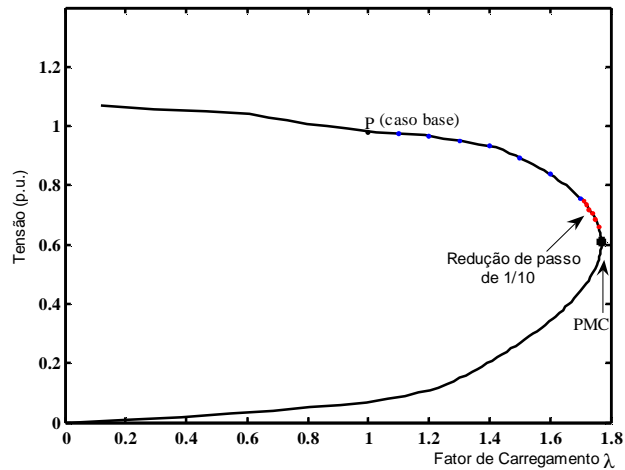


Figura 4.3: Tensão como função do Carregamento (curva PV com redução de passo).

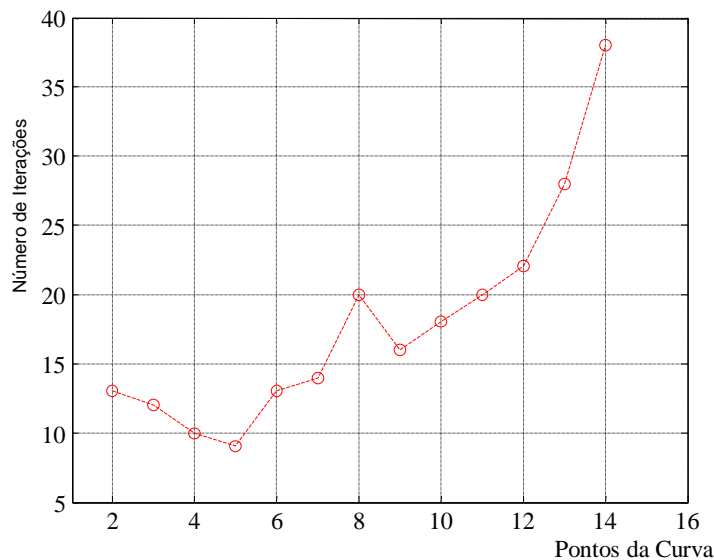


Figura 4.4: Desempenho do método desacoplado simultâneo para a barra crítica do IEEE 14 barras usando λ parâmetro.

Mostra-se que mesmo fazendo uso da estratégia de redução de passo no método desacoplado alternado parametrizado por λ , figura 4.3, não é possível determinar este ponto e nem obter soluções além deste. A figura 4.5 fornece o desempenho do método desacoplado

alternado para o mesmo caso apresentado na figura 4.3. Observa-se que para os dois subproblemas P θ e QV o método gasta aproximadamente o mesmo número de iterações para a convergência das soluções, embora este número de iterações possa ser distinto de acordo com a convergência de cada subproblema (MONTICELLI, 1983). Também se pode verificar que o número de iterações segue o mesmo padrão do apresentado na figura (4.3).

A figura 4.7 mostra que utilizando a magnitude de tensão (V_{14}) da barra crítica como parâmetro é possível determinar o PMC e também obter soluções na parte inferior da curva P-V (região de operação instável). Embora o problema de mau-condicionamento das matrizes no PMC tenha sido superado, verifica-se na figura 4.8 que ainda é necessário um alto número de iterações para a obtenção de cada solução da curva.

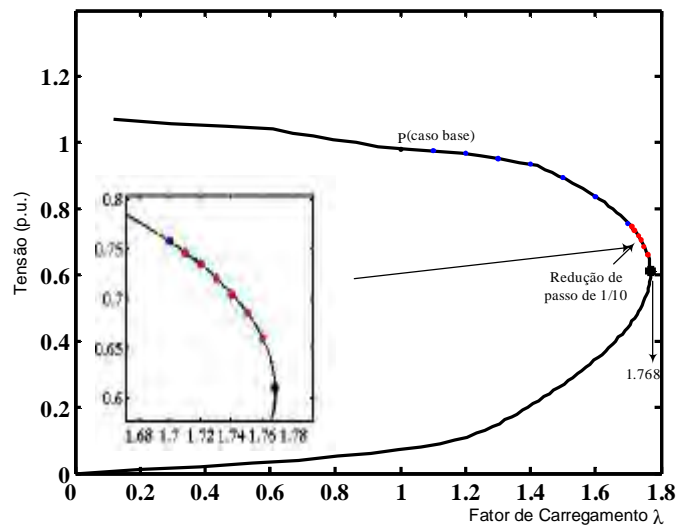


Figura 4.5: Tensão como função do fator de carregamento λ (curva P-V) para a barra crítica do IEEE-14 barras.

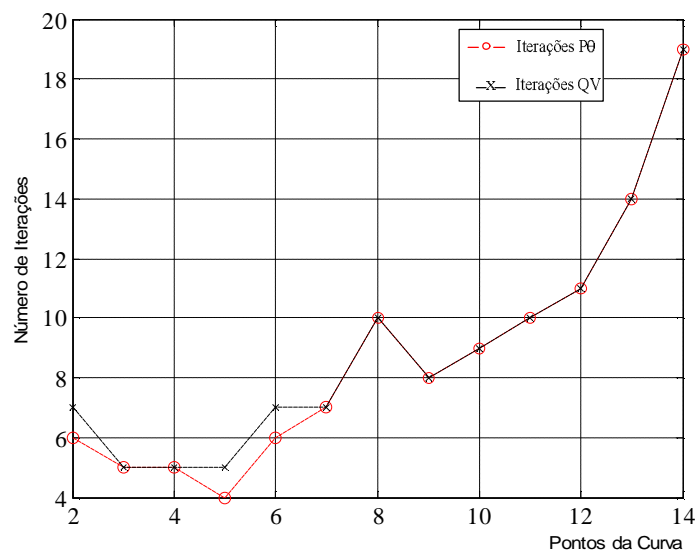


Figura 4.6: Desempenho do método desacoplado alternado.

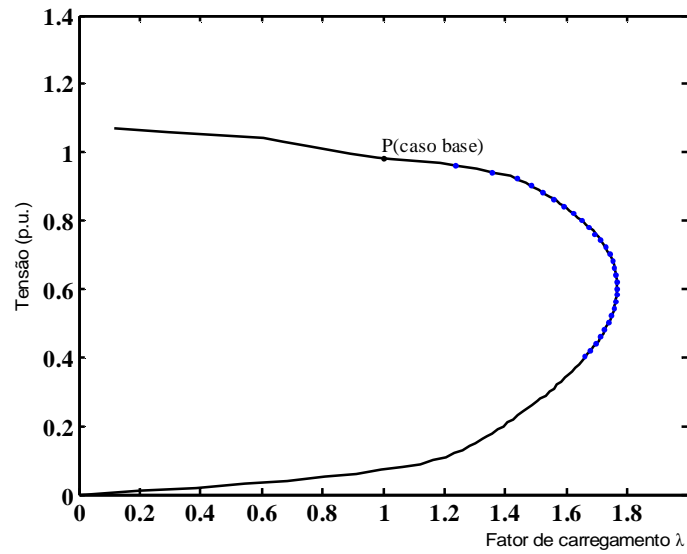


Figura 4.7: Curva P-V usando a tensão (V_{14}) da barra crítica do sistema teste 14 barras como parâmetro.

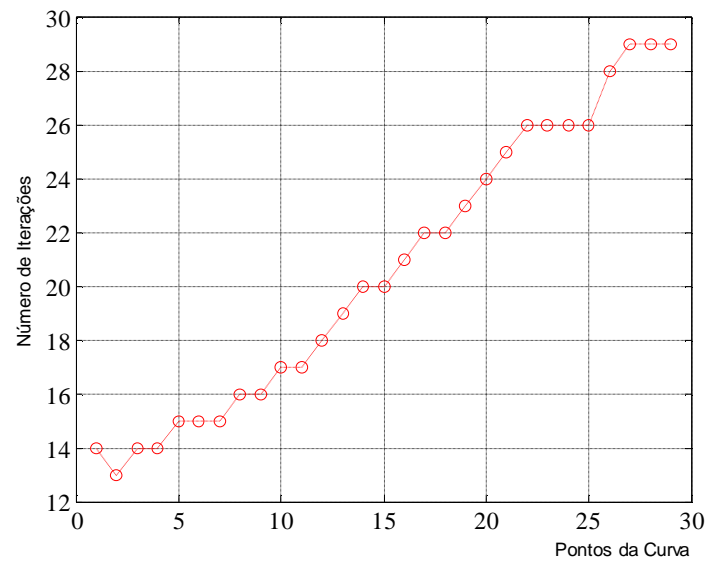


Figura 4.8: Desempenho do método desacoplado simultâneo parametrizado por tensão (V_{14}).

Assim, neste trabalho considerará o procedimento apresentado em (MONTICELLI, 1990). Para isso, considere a equação (4.14). Premultiplicando a linha de $\Delta \mathbf{P}$ por $-\mathbf{M}'\mathbf{H}^{-1}$ e somando o resultado às equações $\Delta \mathbf{Q}'$, tem-se o seguinte sistema:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q}' - \mathbf{M}'\mathbf{H}^{-1}\Delta \mathbf{P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N}' \\ \mathbf{0} & \mathbf{L}_{\text{eq}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \mathbf{V}' \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

sendo a matriz $\mathbf{L}_{eq} = \mathbf{L}' - \mathbf{M}'\mathbf{H}^{-1}\mathbf{N}'$. Nesse caso a resolução da equação (4.15) exige a fatoração de duas matrizes: \mathbf{H} e \mathbf{L}_{eq} . Observe que (4.14) e (4.15) são equivalentes, pois os vetores de solução $\Delta\boldsymbol{\theta}$ e $\Delta\mathbf{V}'$ são os mesmos para ambos os sistemas, com a diferença que (4.15) pode ser resolvida numa forma desacoplada, porém em três passos (MONTICELLI, 1990). Em (MONTICELLI, 1990) é demonstrado que o cálculo dos resíduos $\Delta\mathbf{Q}'$ no ponto $(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta} + \mathbf{H}^{-1}\Delta\mathbf{P})$ é equivalente ao cálculo de $\Delta\mathbf{Q} - \mathbf{M}'\mathbf{H}^{-1}\Delta\mathbf{P}$. Isso garante que, ao resolver (4.15) desacopladamente se está levando em conta o acoplamento da matriz \mathbf{M}' . Em (MONTICELLI, 1990) também é demonstrado que durante o processo iterativo, a correção de ângulos $\Delta\boldsymbol{\theta}_N = -\mathbf{H}^{-1}\mathbf{N}\Delta\mathbf{V}'$ é automaticamente levada em conta na próxima iteração. Isso explica o fato de o uso do algoritmo alternado apresentar um melhor desempenho que o simultâneo, como se verá a partir dos resultados apresentados mais a diante.

4.3.2.2 Algoritmo Simultâneo

Neste algoritmo de resolução, $\boldsymbol{\theta}$, \mathbf{V} e λ são atualizados simultaneamente, conforme visto anteriormente, então as equações na forma de resolução simultânea se apresentam da seguinte forma:

$$\begin{cases} \Delta\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) = \mathbf{H}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v)\Delta\boldsymbol{\theta}^v \\ \Delta\mathbf{Q}'(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v, \lambda^v) = \mathbf{L}_{eq}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v, \lambda^v)\Delta\mathbf{V}^v \end{cases} \quad (4.16)$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\theta}^{v+1} = \boldsymbol{\theta}^v + \Delta\boldsymbol{\theta}^v \\ \mathbf{V}^{v+1} = \mathbf{V}^v + \Delta\mathbf{V}^v \\ \lambda^{v+1} = \lambda^v + \Delta\lambda^v \end{cases} \quad (4.17)$$

4.3.2.3 Algoritmo Alternado

Neste algoritmo as equações são colocadas na forma:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) = \mathbf{H}(\boldsymbol{\theta}^v, \mathbf{V}^v) \Delta \boldsymbol{\theta}^v \\ \boldsymbol{\theta}^{v+1} = \boldsymbol{\theta}^v + \Delta \boldsymbol{\theta}^v \end{cases} \quad (4.18)$$

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{Q}^i(\boldsymbol{\theta}^{v+1}, \mathbf{V}^v, \lambda^v) = \mathbf{L}_{\text{eq}}(\boldsymbol{\theta}^{v+1}, \mathbf{V}^v, \lambda^v) \Delta \mathbf{V}^v \\ \mathbf{V}^{v+1} = \mathbf{V}^v + \Delta \mathbf{V}^v \\ \lambda^{v+1} = \lambda^v + \Delta \lambda^v \end{cases} \quad (4.19)$$

Como visto anteriormente as variáveis $\boldsymbol{\theta}$, \mathbf{V} e λ são atualizadas a cada meia iteração.

4.3.2.4 Procedimento Geral para o Traçado da curva P-V

O procedimento para o traçado da curva P-V da figura 4.9 é o seguinte:

1. Com a solução do caso base ($\boldsymbol{\theta}^1$, \mathbf{V}^1 e $\lambda^1=1$) obtida com um FC convencional, calcule o valor inicial do coeficiente angular da reta (α^1) que passa pelas coordenadas do ponto inicial escolhido $O(V_k^0, \lambda^0)$ e do ponto $P(V_k^1, \lambda^1)$ obtido no caso base, utilizando-se para isso a equação:

$$\alpha^1 = (V_k^1 - V_k^0) / (\lambda^1 - \lambda^0).$$
2. Obtenha os próximos pontos da curva P-V diminuindo gradualmente o valor de α , $\alpha^{i+1} = \alpha^i - \Delta\alpha$ ($\Delta\alpha$: variação angular);
3. Prossiga com o passo 2 até que o PMC seja obtido. A identificação do PMC se dá pela mudança de sinal de $\Delta\lambda$.

são respectivamente os valores especificados no caso base ($\lambda=1$) das potências ativa e reativa das barras PQ , e das potências ativa das barras PV . \mathbf{k}_{pg} , \mathbf{k}_{pc} e \mathbf{k}_{qc} são parâmetros prefixados usados para caracterizar um cenário de carga específico. Eles descrevem as taxas de variação de potência ativa (\mathbf{P}_{ger}) nas barras de geração (barras PV), e das potências ativa (\mathbf{P}) e reativa (\mathbf{Q}) nas barras de carga (barras PQ). Assim, é possível realizar uma variação de carregamento individual, isto é, para cada barra do sistema, considerando para cada uma, um crescimento de carga com fatores de potência diferentes aos do caso base. Tradicionalmente, entretanto, assume-se que o aumento de carga de uma determinada área é feito com fator de potência constante e proporcional ao carregamento do caso base com modelo de carga de potência

constante (nesse caso \mathbf{k}_{pg} , \mathbf{k}_{pc} e \mathbf{k}_{qc} são todos iguais a um), visto que este fornece a condição operacional mais segura para o sistema (WSCC, 1998)

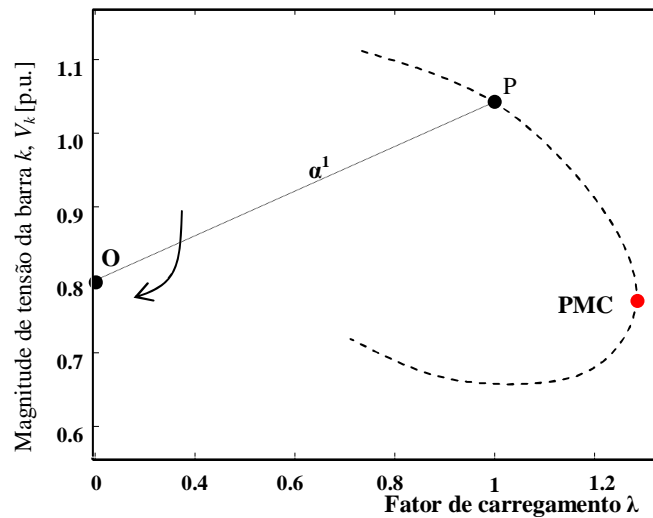


Figura 4.9: Procedimento geral para o traçado da curva P-V.

4.4. Testes e Resultados

Para todos os testes realizados, a tolerância adotada para os *mismatches* de potência foi de 10^{-4} p.u., α é adotado como parâmetro da continuação. A solução inicial é obtida para o caso base partindo-se do *flat-start*, i.e., considerando-se a estimativa inicial em que todos os ângulos são assumidos iguais a 0 (zero) graus, e as magnitudes de tensão (\mathbf{V}) iguais a 1,0 p.u. Os demais pontos da curva são obtidos, a partir da solução anterior, variando-se o valor de α , ou seja, usando o preditor de ordem zero.

4.4.1 Desempenho do Método Proposto para o IEEE-14

A figura 4.10 apresenta resultados para o sistema teste do IEEE-14, com o feixe de retas centrado no ponto $V_0=0,0$ e $\lambda_0=0,0$. Na figura 4.10(a) é apresentada a curva P-V da barra crítica (barra 14) obtida utilizando-se o algoritmo de resolução simultâneo. O valor de λ para o PMC foi de 1,719 p.u., obtendo assim uma margem de carregamento de 0,719 em relação ao caso base ($\lambda=1$). O número de iterações para o traçado da curva P-V utilizando o algoritmo simultâneo é mostrado na figura 4.10 (b), enquanto na figura 4.10 (c) e 4.10 (d) mostra-se o número de iterações quando se faz uso do algoritmo alternado.

Observe que apesar de ser possível se obter o PMC utilizando o algoritmo simultâneo, o número de iterações aumenta sensivelmente próximo a região do PMC. Por outro lado, conforme se pode observar das figuras 4.10 (b) e (c) e (d), o mesmo não ocorre para o algoritmo alternado, cujo número de meias iterações permanece reduzido durante todo o traçado da curva P-V. A principal razão desse reduzido número de iterações está relacionado com a utilização dos valores recém calculados na subiteração anterior, na subiteração seguinte, i.e., do uso de θ^{v+1} no cálculo de V^v , e de V^{v+1} no cálculo de θ^v .

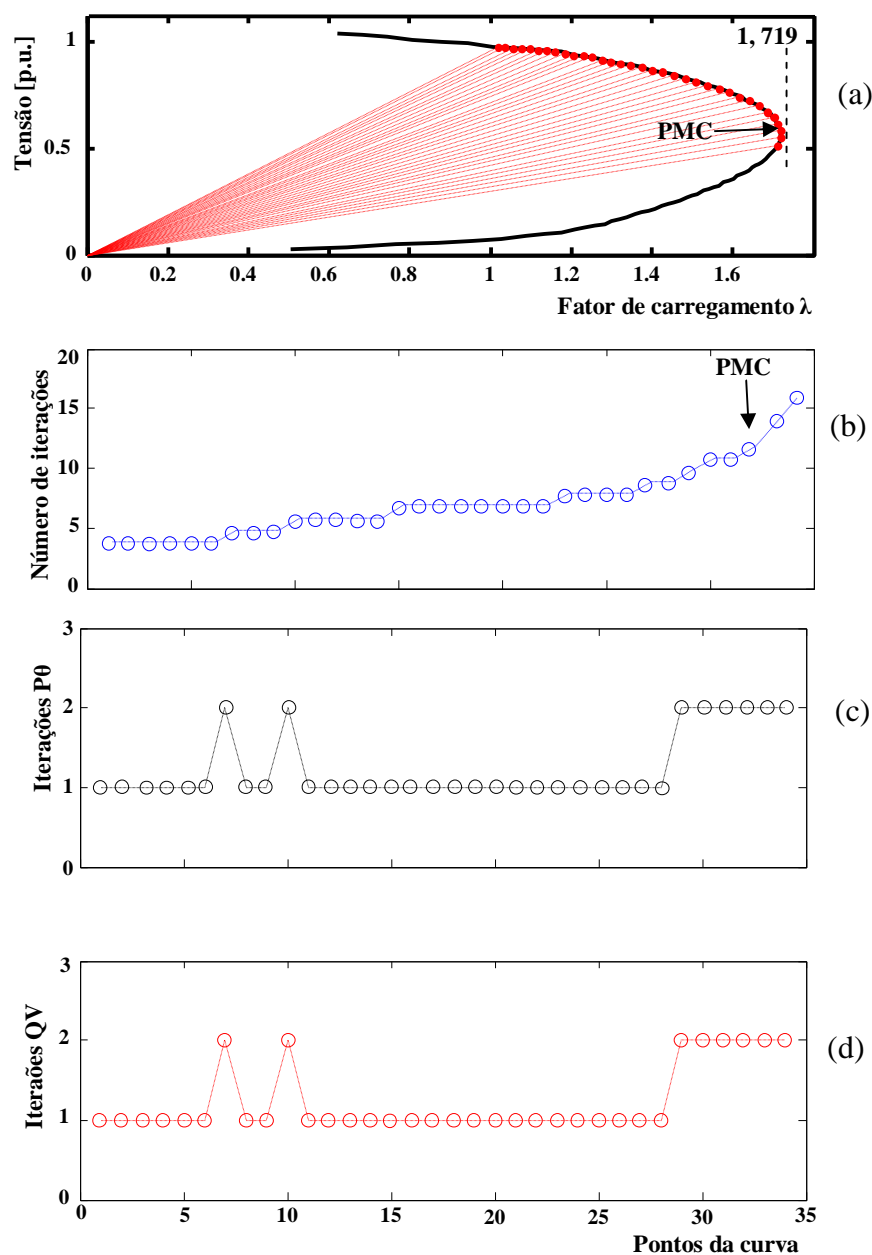


Figura 4.10: Desempenho do FCCDP para o sistema IEEE-14: (a) curva P-V da barra crítica (14), (b) número de iterações do algoritmo simultâneo, (c) número de iterações $P\theta$ do algoritmo alternado (d) número de iterações QV do algoritmo alternado.

4.4.2 Desempenho do Método Proposto para o IEEE-300

A figura 4.11 apresenta resultados para o sistema teste do IEEE-300, com o feixe de retas centrado no ponto $V_0=0,4$ e $\lambda_0=0,0$. Na figura 4.11 (a) é apresentada a curva P-V da barra crítica (barra 236) obtida utilizando-se o algoritmo de resolução simultâneo. O valor de λ para o PMC foi de 1,055 p.u., obtendo assim uma margem de carregamento de 0,055 em relação ao caso base ($\lambda=1$). O número de iterações para o traçado da curva P-V utilizando o algoritmo simultâneo é mostrado na figura 4.11 (b), enquanto nas figura 4.11 (c) e (d) mostram-se o número de iterações quando se faz uso do algoritmo alternado.

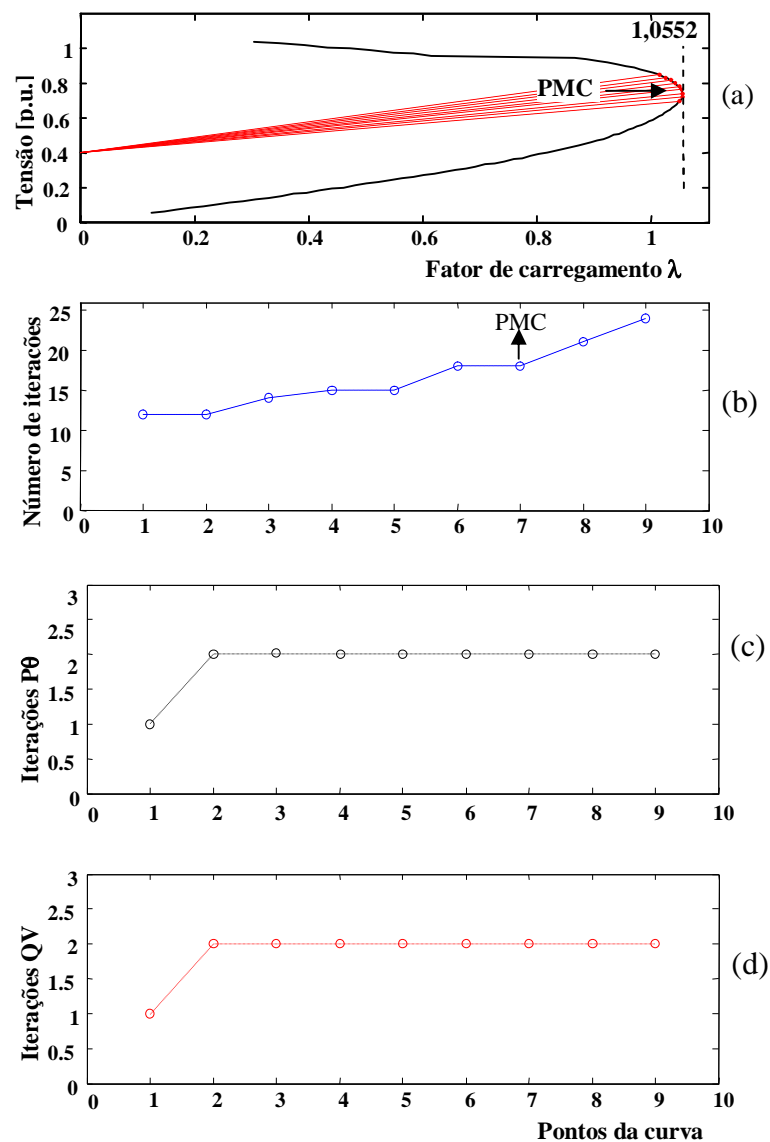


Figura 4.11: Desempenho dos FCCDP para o sistema IEEE-300: (a) curva P-V da barra crítica (236), (b) número de iterações do algoritmo simultâneo, (c) número de iterações Pθ (d) número de iterações QV do algoritmo alternado.

Note que embora seja possível obter o PMC utilizando o algoritmo simultâneo, também nesse caso o número de iterações aumenta significativamente próximo à região do PMC. Por outro lado, conforme se pode observar das figuras 4.11(b), 4.11(c) e (d), o mesmo não ocorre para o algoritmo alternado, cujo número de meias iterações permanece reduzido durante todo o traçado da curva P-V. A principal razão desse reduzido número de iterações está relacionado com a utilização dos valores recém calculados na subiteração anterior, a subiteração seguinte, i.e., do uso de θ^{v+1} no cálculo de V^v , e de V^{v+1} no cálculo de θ^v .

4.4.3 Desempenho do FCCDP para os Sistemas IEEE de 14, 30, 57, 118 e 300 Barras

As tabelas 4.1 e 4.2 mostram o desempenho do FCCDP para os sistemas IEEE de 30, 57, 118 e 300 barras. Na tabela 4.1 foi utilizado o feixe de reta com centro em $V^0=0,0$ e $\lambda^0=0,0$ e passo 0,02 e na tabela 4.2 foi utilizado o feixe de reta com centro em $V^0=0,4$ e $\lambda^0=0,0$ e passo 0,02. Observe que o número de iterações total gasto para se ir do caso base até o PMC são significativamente maiores para o algoritmo simultâneo do que para o alternado. Nota-se também que a mudança no centro do feixe de retas praticamente não interfere no valor do PMC obtido. Por outro lado, a mudança interfere ligeiramente no desempenho de ambos os algoritmos de resolução (simultâneo e alternado). Ocorre uma pequena redução do número total de iterações.

A tabela 4.3 apresenta o desempenho do FCCDP considerando o centro do feixe de retas em $V^0=0,4$ e $\lambda^0=0,0$ e passo 0,04. Nesse caso se deseja avaliar o desempenho do método com relação à variação do tamanho do passo, no caso, duplicado em relação ao anterior. Observam-se agora, uma sensível redução no número total de iterações de ambos os algoritmos, porém, sem um sensível prejuízo tanto do desempenho, quanto da precisão do cálculo do PMC.

Tabela 4.1: Desempenho do FCCDP considerando o centro do feixe de retas em ($\lambda^0=0, V^0=0$) e passo de $\Delta\alpha=0,02$.

Sistemas	Simultâneo		Alternado		
	Iterações	PMC	Iterações		PMC
			P θ	QV	
IEEE-14	219	1,7193	38	38	1,7192
IEEE-30	215	1,5337	44	39	1,5354
IEEE-57	237	1,7248	48	46	1,7287
IEEE-118	222	1,8665	64	69	1,8664
IEEE-300	112	1,0486	13	13	1,0551

Tabela 4.2: Desempenho do FCCDP considerando o centro do feixe de retas em ($\lambda^0=0$; $V^0=0,4$) e passo $\Delta\alpha=0,02$.

Sistemas	Simultâneo		Alternado		
	Iterações	PMC	Iterações		PMC
			P0	QV	
IEEE-14	204	1,7196	31	34	1,7200
IEEE-30	198	1,5334	34	39	1,5355
IEEE-57	247	1,7241	38	34	1,7284
IEEE-118	145	1,8661	50	52	1,8661
IEEE-300	104	1,0550	13	13	1,0552

Tabela 4.3: Desempenho do FCCDP considerando o centro do feixe de retas em ($\lambda^0=0$; $V^0=0,4$) e passo $\Delta\alpha=0,04$.

Sistemas	Simultâneo		Alternado		
	Iterações	PMC	Iterações		PMC
			P0	QV	
IEEE-14	117	1,7202	21	24	1,7198
IEEE-30	116	1,5338	25	28	1,5341
IEEE-57	140	1,7243	24	25	1,7255
IEEE-118	80	1,8644	26	27	1,8644
IEEE-300	76	1,0542	11	11	1,0542

As figuras 4.12 e 4.13 mostram para os sistemas IEEE 30 e 300 barras, as respectivas curvas P-V das barras *PV* (barras de geração) de números 11 e 259, cujas magnitudes de tensão permanecem constantes ao longo de um trecho relativamente grande da curva P-V. Observe que o FCCDP também nestes casos obtém êxito na obtenção dos respectivos PMC, com um número reduzido de iterações, figuras 4.12(c) e 4.12(d), e 4.13(b) e 4.13(c). Também é possível a obtenção de pontos pertencentes à parte inferior das curvas P-V.

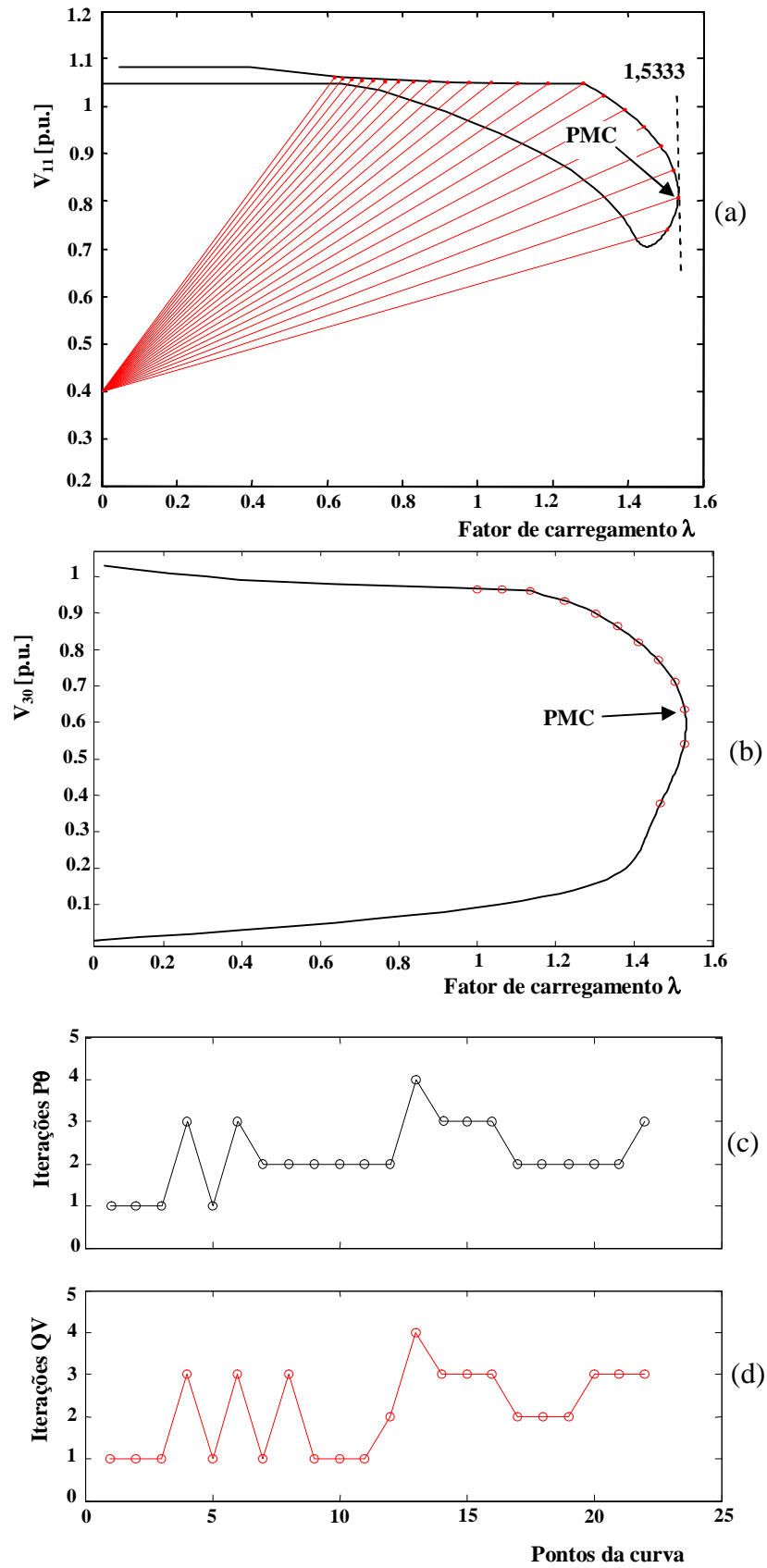


Figura 4.12: Desempenho do FCCDP, algoritmo alternado, para sistema IEEE-30: (a) curva P-V da barra 11, (b) curva P-V da barra crítica, (c) número de iterações $P\theta$ (d) número de iterações QV .

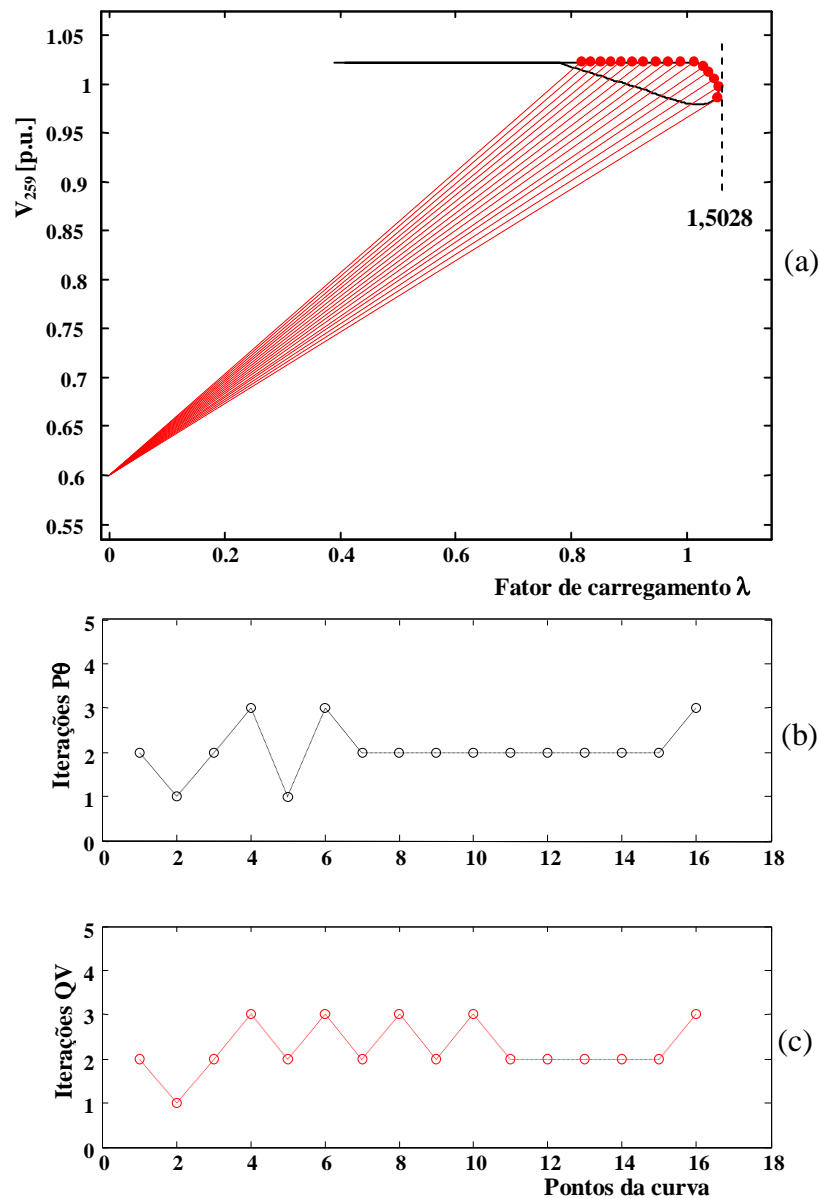


Figura 4.13: Desempenho do FCCDP para a barra PV (barra 259) sistema IEEE-300: (a) curva P-V, (b) número de iterações $P\theta$ (c) número de iterações QV .

4.4.4 Influência da Atualização das Matrizes \mathbf{H} e \mathbf{L}_{eq} Durante o Procedimento Geral

O objetivo aqui é avaliar o FCCDP fazendo-se uso dos algoritmos de resolução simultâneo e o alternado comparando seus desempenhos. São consideradas duas situações. No primeiro procedimento as matrizes \mathbf{H} e \mathbf{L}_{eq} são atualizadas a cada iteração e no segundo somente quando necessário, ou seja, quando ocorrer alguma mudança significativa no sistema (mudança no tipo da barra PV para PQ em virtude da violação de seus limites). Em ambas as situações consideram-se o centro do feixe de retas em ($\lambda^0=0$, $V^0=0,4$) e passo $\Delta\alpha=0,04$.

Para ambos os procedimentos, as tabelas 4.4 e 4.5 apresentam os tempos computacionais requeridos com a utilização dos algoritmos de resolução, e o número total de iterações (NTI) necessário para o traçado da curva P-V. Considera-se por tempo de CPU, o tempo total gasto a partir do caso base até o PMC. Seus valores foram normalizados pelos respectivos tempos requeridos considerando o primeiro procedimento, o qual se encontra na segunda coluna de cada uma das tabelas. No caso do segundo procedimento, também é mostrado o número total de iterações (NTIA) para o qual há a atualização da matriz.

Das Tabelas 4.4 e 4.5 observa-se que tanto no primeiro quanto no segundo procedimento, o algoritmo alternado se apresenta mais vantajoso que o simultâneo, já que requer tempos de CPU (TCPU) bem menores até alcançar o PMC. Também se pode afirmar com base nos dados das duas tabelas que o algoritmo alternado apresenta maior eficiência quando se faz uso do segundo procedimento. Em outras palavras, os resultados mostram que além do número total de iterações em geral ser menor para o segundo procedimento, é possível também conseguir-se uma redução do tempo computacional (coluna 6 das tabelas), ou seja, uma melhora na eficiência dos algoritmos, sem a perda de robustez. Isso é alcançado com uma simples mudança de procedimento que é o de não atualizar as matrizes a cada iteração, mas somente quando o sistema sofrer alguma mudança significativa.

Tabela 4.4: Desempenho do FCCDP considerando a atualização das matrizes \mathbf{H} e \mathbf{L}_{eq} a cada iteração.

Sistemas IEEE	Simultâneo		Alternado			Redução de tempo de CPU (%)
	TCPU (p.u.)	NTI	TCPU (p.u.)	NTI		
				P0	QV	
57	1,000	140	0,2214	26	25	77,8
118	1,000	80	0,4142	26	28	58,5
300	1,000	76	0,1779	12	12	82,2

Tabela 4.5: Desempenho do FCCDP considerando a atualização das matrizes \mathbf{H} e \mathbf{L}_{eq} somente quando necessário.

Sistemas IEEE	Simultâneo			Alternado				RCPU (%)	
	TCPU (p.u.)	NTI	NTIA	TCPU (p.u.)	NTI		NTIA		
					P0	QV	P0		QV
57	1,000	136	17	0,5206	22	22	11	11	47,9
118	1,000	76	26	0,6299	30	32	13	13	37,0
300	1,000	73	30	0,2065	13	13	5	5	79,3

4.5 Fluxo de Carga Continuado Desacoplado Proposto Modificado

Os resultados obtidos pelo FCCDP comprovam que as curvas P-V's podem ser traçadas sem nenhuma dificuldade numérica e que permite a obtenção do PMC dos sistemas elétricos de potência quando se utiliza a equação da reta que passa por um ponto no plano λV da barra crítica.

Esta técnica como vimos elimina a necessidade de troca de parâmetro ao longo do traçado da curva P-V, e amplia o grupo das variáveis de tensão que podem ser adotadas para a composição da equação da reta. Este conjunto passa agora a incluir as barras cuja magnitude de tensão permanece constante ao longo de uma faixa da curva P-V, ou seja, barras de geração e as controladas por ajuste de *tap* sob carga, as quais antes não poderiam ser utilizadas como parâmetro para se obter essa parte da curva P-V.

Também possibilita o uso da magnitude da tensão das barras cujos *noses* são coincidentes com o do fator de carregamento. Para que isso seja possível, associa-se ao método proposto uma estratégia de mudança de coordenadas do centro do feixe de retas. Essa mudança é feita somente quando o número de iterações excederem um valor preestabelecido ou quando o método divergir.

A escolha tanto das coordenadas do novo centro do feixe de retas quanto à do incremento do coeficiente angular da reta é feito de forma a se obter um baixo número de iterações ao longo de todo o traçado da curva. O FCCDP modificado (FCCDPM) é usado no traçado das curvas P-V dos sistemas: IEEE 300-barras, uma configuração de 638 barras do sistema Sul-Suldeste Brasileiro, e o sistema do sudoeste Americano. Os resultados comprovam a eficiência do método desacoplado proposto na obtenção do PMC.

4.5.1 Procedimento Geral para a Mudança de Reta Durante o Traçado da Curva P-V

Em função das análises realizadas definiu-se o seguinte procedimento geral para o traçado da curva $\lambda-V_k$:

1. Obtenha o ponto "P" para o caso base utilizando o FC convencional e calcule o correspondente valor do coeficiente angular da reta (α^1) que passa pelo ponto escolhido "O" ($\lambda^0=0,0$, $V_k^0=0,7$ p.u.), e pelo ponto "P" ($\lambda^1=1$, V_k^1);

2. Obtenha os próximos pontos da curva $\lambda-V_k$ aumentando gradualmente o valor de α , $\alpha^{i+1}=\alpha^i + \Delta\alpha$, $\Delta\alpha=0,02$;
3. Quando o método proposto não encontrar solução, retorne ao ponto anterior e efetue uma redução no passo (por exemplo $\Delta\alpha= 0,02/5$)
4. Quando o método proposto divergir novamente efetue a mudança de coordenadas do centro do feixe de retas para o ponto médio (PM) situado entre os dois últimos pontos obtidos. Em seguida considere a equação da reta que passa pelas coordenadas de PM e pelo último ponto convergido. A inclusão do ponto médio é importante para garantir a robustez, e auxiliar o método a eliminar os problemas de mau-condicionamento da matriz \mathbf{L}_{eq} ;
5. Quando o valor da magnitude da tensão do ponto atual for maior que o do ponto anterior, considera-se a equação da reta que passa pelas coordenadas do centro do feixe de retas inicial (ponto "O") e do ponto atual, do segundo feixe de retas e completa-se o traçado da curva P-V com $\Delta\alpha = - \Delta\alpha$.

As coordenadas iniciais do centro do feixe de retas, ponto "O", foram escolhidas de modo a possibilitar o traçado da curva P-V de qualquer sistema desejado. As justificativas para sua escolha podem ser encontradas em (BONINI, 2006). Inicialmente a escolha foi norteadada pela constatação de que o uso das variáveis de tensão cuja magnitude da tensão permanecia fixa no valor mínimo num trecho relativamente grande durante o traçado das curvas P-V, o valor a ser adotado inicialmente para a magnitude de tensão deveria ser inferior ao valor mínimo da faixa operativa normal de tensão adotada, no caso, inferior a 0,9 p.u.

Outro fato que também foi levado em conta para a escolha de suas coordenadas foi o de que, em geral, as magnitudes de tensão das barras críticas da maioria dos sistemas analisados são em torno de 0,7 p.u., o que, como se verá mais a frente, nos casos das barras críticas essa escolha facilita o traçado da curva P-V, visto que não haverá necessidade de troca das coordenadas do centro do feixe de retas durante todo o traçado da curva.

4.5.2 Resultados Ilustrativos Obtidos com o Método Proposto Modificado

Para todos os testes realizados, a tolerância adotada para o *mismatch* total de potência foi de 10^{-4} p.u. A consideração dos limites de potência reativa (Q) nas barras PV's é feito da

mesma forma que no método convencional de FC. O valor adotado para o passo inicial ($\Delta\alpha$) é 0,04.

A figura. 4.14 apresenta o desempenho do método proposto considerando as magnitudes de tensão das respectivas barras críticas 526 e 138 dos sistemas IEEE-300 e 904 barras.

Nas figuras. 4.14(a) e 4.14(b) apresentam-se as respectivas curvas P-V das barras críticas 526 e 138 dos sistemas IEEE-300 e 904 barras. O número de iterações para cada ponto obtido sobre a curva P-V da barra 526 do IEEE-300 é apresentado na figura 4.14(c), enquanto que o número de iterações para cada solução sobre a curva P-V da barra crítica do sistema de 904 barras é apresentado na figura 4.14(d). Observa-se das figuras 4.14(a) e 4.14(b) que com a escolha da magnitude de tensão de qualquer uma destas barras para comporem a equação da reta, o algoritmo fica restrito apenas aos passos 1 e 2 do procedimento geral apresentado no item 4.5.1. Assim, nestes casos não é necessário fazer a mudança do centro do feixe de retas para a determinação do PMC. Observe também que o número de iterações gasto para cada subproblema ativo e reativo na obtenção do PMC é consideravelmente pequeno para ambos os sistemas, ver figuras 4.14(c) e 4.14(d). Esses resultados comprovam a eficiência e a robustez do método para sistemas reais de grande porte.

A figura 4.15 apresenta a aplicação do método proposto para o traçado da curva P-V da barra 346 do sistema de 638 barras. Na figura 4.15(a) é apresentada a magnitude de tensão (V_{346}) da barra de geração (barra PV) em função de λ , de onde se observa que apesar de sua magnitude de tensão permanecer fixa no mesmo valor num trecho relativamente grande durante o traçado da curva P-V, ainda assim é possível a obtenção com precisão do PMC, conforme se pode observar no detalhe da região em torno do PMC apresentado na figura 4.15(b).

Também neste caso, o método apresentou um bom desempenho. Este sistema encontra-se muito estressado (carregado). Seu PMC, igual a 1,0087 p.u., encontra-se muito próximo do ponto de operação caso base ($\lambda=1$) o que dificulta a convergência do FC. Por outro lado, o método proposto se mostrou eficiente, pois superou os problemas de singularidade e possibilitou o cálculo do PMC do sistema com um reduzido número de iterações, ver figura 4.15(c).

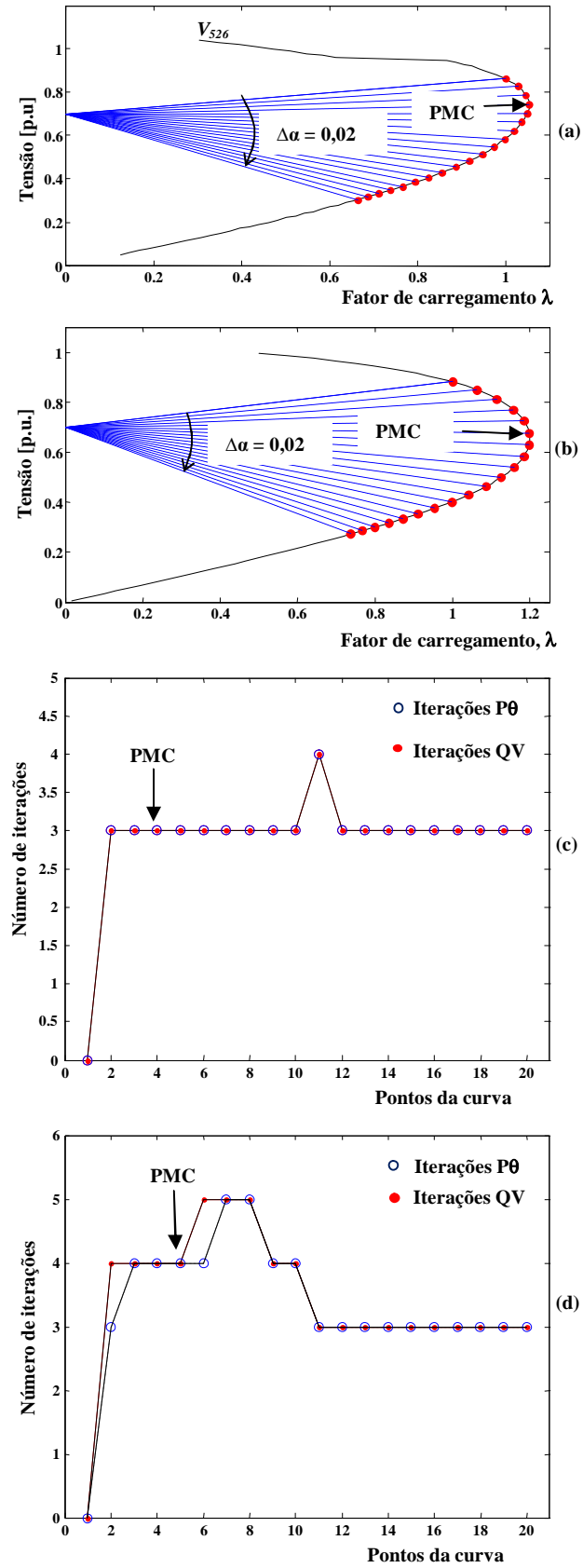


Figura 4.14: Desempenho do FCCDPM para o IEEE-300 e 904 barras: (a) magnitude da tensão (V_{526}) da barra crítica do IEEE-300 barras como função de λ ; (b) tensão da barra (V_{138}) do IEEE-904 como função de λ ; (c) e (d) respectivos número de iterações.

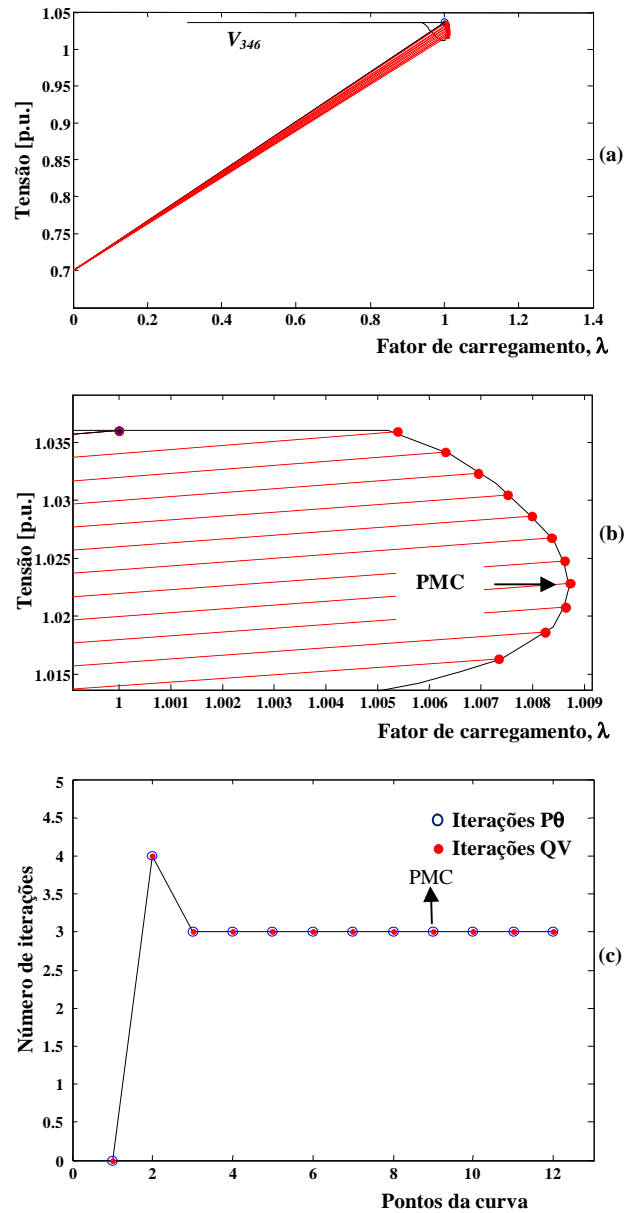


Figura 4.15: Desempenho do FCCDPM para o IEEE-638 barras: (a) magnitude da tensão (V_{346}) em função de λ ; (b) região do PMC ampliada; (c) número de iterações para os subproblemas ativo e reativo.

A figura 4.16 apresenta a aplicação do FCCDPM para o traçado da curva P-V da barra 46 do sistema de 300 barras. Na figura 4.16(a) é apresentada a magnitude de tensão (V_{46}) da barra de carga (barra PQ) em função de λ , de onde se observa que tanto o valor de λ quanto o de V_{46} apresentam pontos de inflexão (“narizes”) coincidentes, ou seja, a singularidade da matriz Jacobiana, a qual ocorre no PMC quando λ é usado como parâmetro, é coincidente com a singularidade da matriz Jacobiana modificada quando da parametrização considerando V_{46} . Por outro lado, o FCCDPM possibilita a determinação do PMC sem os problemas numéricos relacionados com a singularidade da matriz Jacobiana. A figura 4.16(b) apresenta o número de iterações utilizadas para a obtenção da curva P-V (iteraões QV e P θ). Na figura

4.16(c) mostra os pontos da curva P-V da barra crítica obtidas armazenando durante o traçado da curva P- V_{46} .

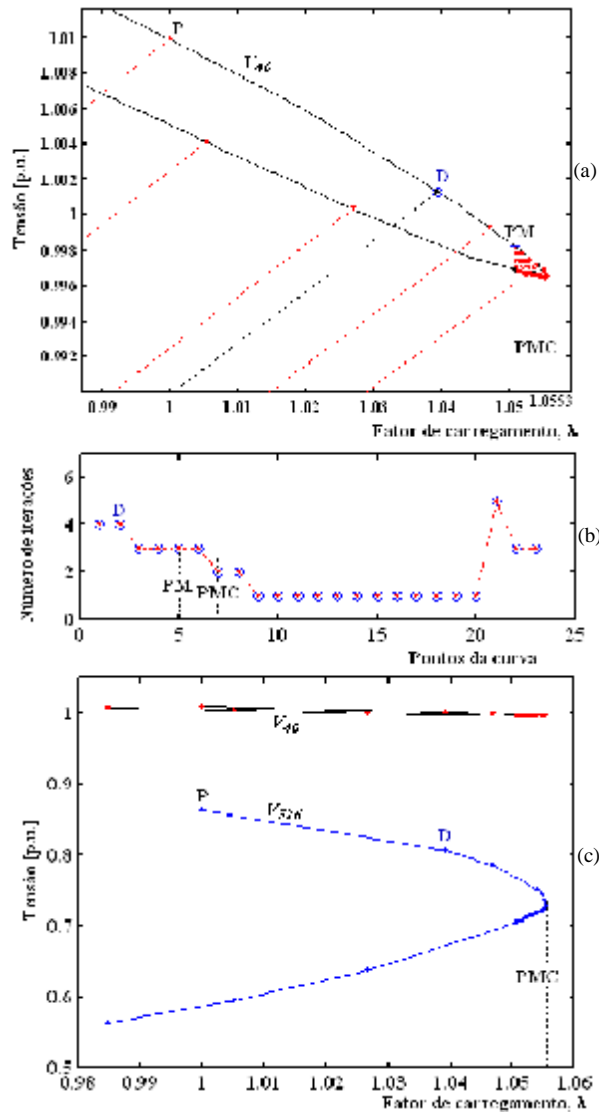


Figura 4.16: Desempenho do FCCDPM para o IEEE-300 barras: (a) curva λ - V_{46} , (b) número de iterações para os subproblemas ativo e reativo, (c) curvas P-V da barra crítica (526) e da barra (46) cuja magnitude de tensão (V_{46}) foi usada na composição da equação da reta.

As figuras 4.17 e 4.18 apresentam resultados para sistemas reais de grande porte como as configurações de 638 barras do sistema Sul-Suldeste Brasileiro e a do sistema sudoeste Americano de 900 barras.

A figura 4.17(a) apresenta resultados para a barra de geração PV, V_{403} em função de λ , utilizando o coeficiente angular α como parâmetro. A região do PMC ampliada pode ser visto na figura 4.17(b), pode-se observar que o PMC foi obtido e os problemas de mau-condicionamento das matrizes foram superados, possibilitando assim a obtenção até da parte

de baixo da curva P-V. A figura 4.17(c) foi obtida armazenando-se os pontos da barra crítica P-V₁₅₀ durante a obtenção da curva P-V₄₀₃. O número de iterações utilizadas para geração da curva P-V é mostrado na figura 4.17(d).

Os mesmos resultados apresentados na figura 4.17 é apresentado na figura 4.18. O parâmetro α é utilizado para obtenção da curva P-V (figura 4.18(c)) no plano P-V₄₃, ver figura 4.18(a). Nota-se na figura 4.18(b) a região do PMC ampliada que a singularidade da matriz **J** coincide, tanto para a tensão (V_{46}) quanto para o fator de carregamento λ . Ao utilizar α como parâmetro, observa-se que esta coincidência dos *noses* não é problema para FCCDPM, ou seja, como a singularidade é removida mudando o centro de feixe de retas para o ponto PM, os problemas de mau-condicionamento das matrizes desaparecem. O número de iterações para a obtenção da curva P-V completa pode ser visto na figura 4.18(d).

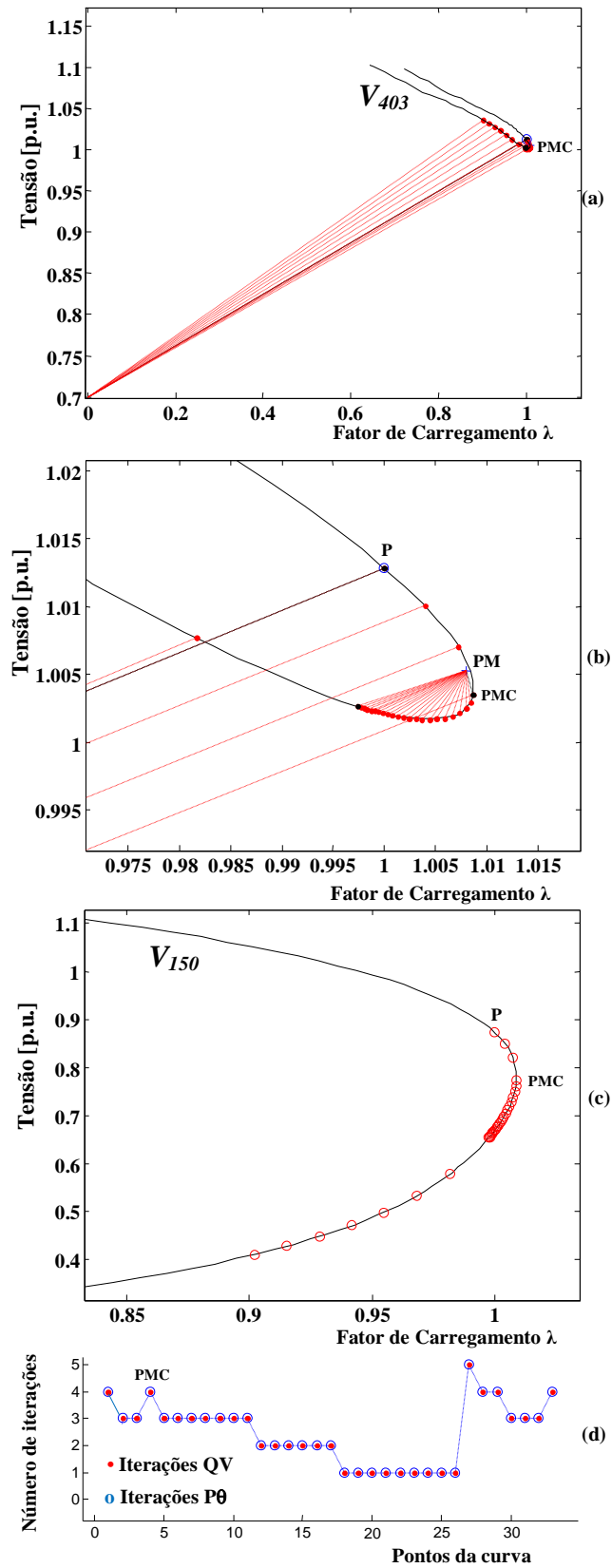


Figura 4.17: Desempenho do FCCDPM para uma configuração de 638 barras do sistema Sul-Suldeste Brasileiro: (a) curva λ - V_{403} , (b) detalhe da região em torno do PMC, (c) curva P-V da barra crítica, (d) número de iterações.

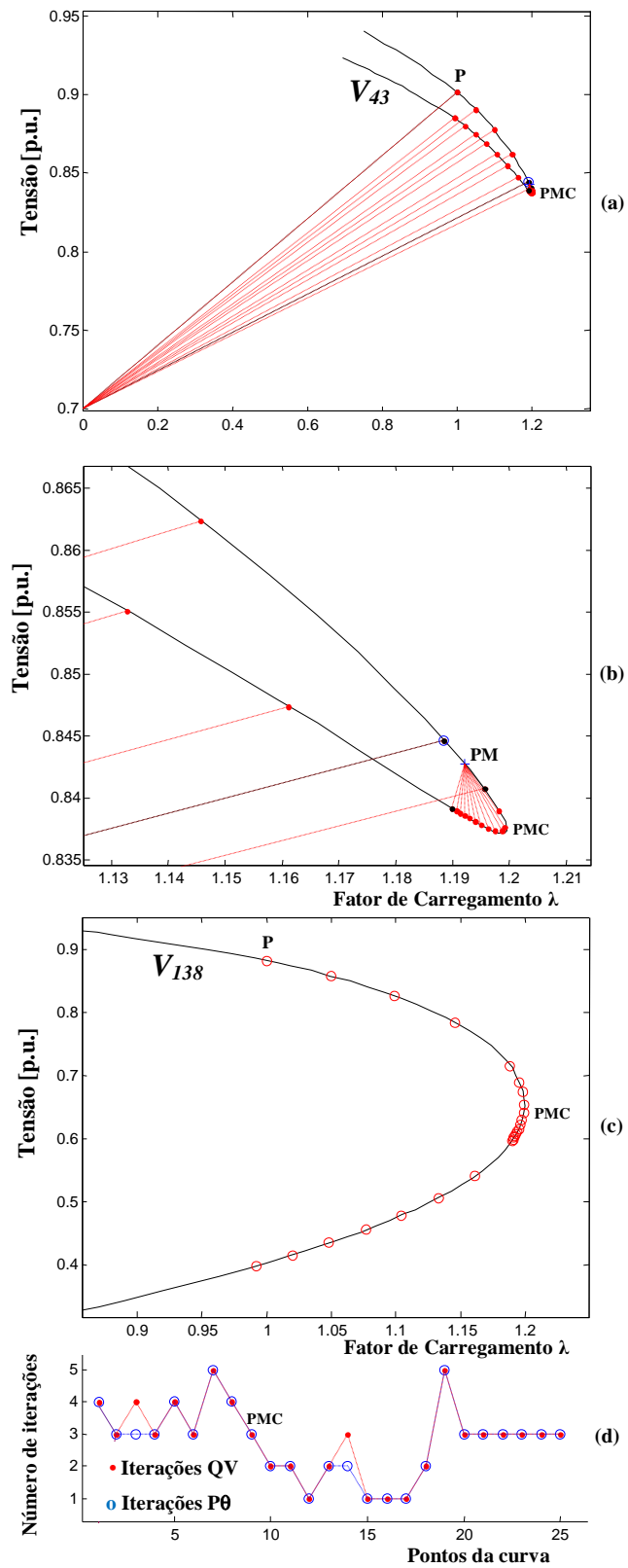


Figura 4.18: Desempenho do FCCDPM para o sistema sudoeste Americano de 904 barras: (a) curva λ - V_{43} , (b) detalhe da região entorno do PMC, (c) curva P-V da barra crítica, (d) número de iterações.

Capítulo 5

Conclusões

5.1 Conclusão Geral

Os métodos da continuação constituem-se em ferramentas eficientes na análise do fluxo de carga e podem ser usados sempre que forem encontradas dificuldades de convergência (singularidade da matriz \mathbf{J}) dos métodos convencionais. Estes métodos permitem a obtenção do PMC e também de todas as possíveis soluções das equações do fluxo de carga (curva P-V completa), constituindo-se a base para a avaliação da segurança e da estabilidade de tensão (MANSOUR, 1993).

As características deste novo método mostraram que é possível a obtenção do PMC com a precisão desejada, sem qualquer dificuldade numérica.

Isto se tornou possível em virtude da eliminação dos problemas de mau-condicionamento das matrizes \mathbf{H} e \mathbf{L}_{eq} na região do PMC. A remoção dos problemas de mau-condicionamento e conseqüente da remoção da singularidade da matriz Jacobiana, o que foi possível através de uma técnica de parametrização geométrica apresentada em (BONINI, 2006) e que consiste no acréscimo de uma equação de reta no plano λV (magnitude da tensão nodal V_k de uma barra k qualquer e o fator de carregamento λ). Os métodos da continuação baseados em parâmetros físicos são considerados pouco eficientes, devido a apresentarem problemas de singularidades. Contrariando essas expectativas mostrou-se que o uso das retas permite determinar o PMC, já que as matrizes \mathbf{H} e \mathbf{L}_{eq} não apresentam mais os problemas de mau-condicionamento na sua vizinhança. Portanto nesse caso não será necessário realizar a troca de parâmetro antes do PMC e sim, quando muito uma redução do passo próximo ao PMC, ou uma simples troca das coordenadas do centro do feixe de retas.

De acordo com os resultados obtidos (número de iterações) esta estratégia tornou o método mais robusto, visto que o método apresentou um ótimo desempenho na vizinhança do PMC. Outra vantagem proveniente do uso deste novo método foi à ampliação do conjunto de variáveis de tensão que podem ser adotadas como parâmetro da continuação. Neste conjunto

podem ser incluídas agora aquelas barras cuja magnitude de tensão permanece constante ao longo de uma faixa da curva P-V, e dessa forma não pode ser utilizada como parâmetro para se obter essa parte da curva P-V, ou ainda aquelas cuja magnitude da tensão apresenta uma inversão na sua tendência de variação simultaneamente com o fator de carregamento, i.e., os *noses* são coincidentes, ou seja, há coincidência da singularidade de ambas as matrizes Jacobianas no PMC.

O método proposto, ao contrário do proposto por Ajjarapu (AJJARAPU; CHRISTY, 1994), não necessita realizar a troca de parâmetro ao longo de todo o traçado da curva P-V, sendo que algumas vezes apenas se faz uma mudança de coordenadas do centro do feixe de retas, o que, da mesma forma que o proposto por Ajjarapu (AJJARAPU; CHRISTY, 1994) também não implicará em mudanças na estrutura da matriz \mathbf{L}_{eq} , mas apenas do valor do elemento correspondente a derivada de R em relação à λ , ou seja, no valor de α .

Com relação ao uso do procedimento de atualizar as matrizes somente quando o sistema sofrer uma mudança significativa, dos resultados pode-se concluir que é a alternativa mais viável, visto que com isso os tempos de CPU sofrem uma considerável redução. Também é possível afirmar que o método desacoplado utilizando o algoritmo alternado é mais eficiente que o desacoplado utilizando o algoritmo simultâneo, cabe salientar que os citados algoritmos foram implementados no MATLAB. Portanto o método proposto constitui-se uma excelente ferramenta na obtenção com precisão do PMC e se mostrou eficiente no traçado das curvas P-V dos sistemas de potência em geral, incluindo sistemas reais de grande porte como o sistema Sul-Suldeste Brasileiro e a do sistema sudoeste Americano aqui analisados.

5.2 Motivação para Trabalhos Futuros

Algumas sugestões para dar continuidade aos trabalhos iniciados por essa pesquisa:

- Tornar o FCCDPM competitivo em termos de tempo computacional.
- Investigar o uso das propriedades da matriz \mathbf{L}_{eq} nos métodos desacoplados rápidos.
- Ampliar o estudo utilizando equações de retas situadas no plano formado nas variáveis ângulo da tensão nodal (ou qualquer outra variável) e fator de carregamento λ .

Referências

AJJARAPU, V. Identification of steady-state voltage stability in power systems. **International Journal of Energy Systems**, Anaheim, v.11, n.1, p.43-46, 1991.

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

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

ALVARADO, F. L.; JUNG, T. H. Direct detection of voltage collapse conditions. **Proceedings: Bulk Power System Voltage Phenomena-Voltage Stability and Security**, Potosi, p.523-538, 1989

ALVES D. A. **Obtenção do ponto de máximo carregamento em sistemas elétricos de potência utilizando novas técnicas de parametrização para o método de continuação**. 2000. 120f. Tese (Doutorado)- DSCE/FEEC, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

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

BIJWE, P. R.; TARE, R. S. An efficient continuation power flow method for voltage stability analysis. **Electric Machines and Power Systems**, New York, v.25, [s.n], p.927-938, 1997.

BONINI, A. N.; ALVES, D. A. Fluxo de carga continuado utilizando uma técnica de parametrização geométrica que considera as equações de retas no plano formado pelas variáveis tensão e fator de carregamento. In: **WCCSETE-WORLD_ CONGRESSO ON COMPUTER SCIENCE, ENGINEERING AND TECHNOLOGY EDUCATION**. 6., 2006, Itanhaém. WCCSETE ..., p.1117-1121, Itanhaém: [s.n.]. 2006.

BONINI, A. N.; ALVES, D. A. Técnica de parametrização geométrica para o fluxo de carga continuado baseado nas variáveis tensão nodal e fator de carregamento. **Controle & Automação**, Natal, v.19, n.3, July/Sept. 2008.

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 Trans. on Power Systems**, New York, v.7, n.2, p.673-683, 1992.

CAÑIZARES, C. A.; ALVARADO, F. L. Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems. **IEEE Trans. on power Systems**, New York, v.8, n.1, p.1-8, February, 1993.

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

CASTRO, C. A. **Cálculo de fluxo de carga**. Campinas: FEEC/UNICAMP, [2009?]. Apostila do curso de cálculo de fluxo de carga. Disponível em: <<http://www.dsee.fee.unicamp.br/~ccastro>>. Acessado em: 20 mar. 2009.

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

CHIANG, H. D.; LI, H. Y.; FUKUYAMA, Y.; NAKANISHI, Y. The generation of ZIP-V curves for tracing power system state stationary behavior due to load and generation variations. **IEEE PES Summer Meeting, Edmonton**, Alberta, v.2, p.647-651, 1999.

FLATABO, N.; OGNEDAL, R.; CARLSEN, T. Voltage stability condition in a power transmission system calculated by sensitivity methods. **IEEE Transactions on Power Systems, New York**, v.5, n.4, p.1286-1293, 1990.

FORÇA TAREFA COLAPSO DE TENSÃO- FTCT. Critérios e metodologias estabelecidos no âmbito da força – tarefa colapso de tensão do GTAD/SCEL/GCOI para estudos de estabilidade de tensão nos sistemas interligados Norte/Nordeste, Sul/Sudeste e Norte/Sul Brasileiros. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA- SNPTEE, GAT-10, 15., 1999, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, [s.n], 1999.

GARBELINI, E., BONINI A. N., ALVES D. A., RIGHETO, E., SILVA, L. C. P.; CASTRO C. A., Fluxo de carga continuado: Uma nova técnica de parametrização geométrica. In: LATIM-AMERICAN CONGRESS: ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 6., 2005, Mar del Plata. **Anais...** Mar del Plata: [s.n], 2005.

GALIANA, F. D. Load flow feasibility and the voltage collapse problem. In: CONFERENCE ON DECISION CONTROL, 23., 1984, Nevada. **Proceedings...** Nevada: Las Vegas, 1984. v.1, p.485-487.

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

IBA K.; SUZUKI, H.; SEGAWA, M.; T. Calculation of critical loading condition with nose curve using homotopy continuation method. **IEEE Trans. on Power Systems**, New York, v.6, n.2, p.585-593, 1991.

KESSEL, K. P.; GLAVITSCH, H. Estimating the voltage stability of power system. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Germany, v.1, n.3, p.346-351, 1986.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. New York: McGraw-Hill, 1993. 1176 p.

KUNDUR, P.; PASERBA, J.; AJJARAPU, V.; ANDERSON, G.; BOSE, A.; CAÑIZARES, C.; HATZIARGYRION, N.; HILL, D.; STANKOVIC, A.; TAYLOR, C.; VAN CUSTEM, T.; VITTAL, V. Definition and classification of power system stability. IEEE/CIGRE joint task on stability terms and definitions. **IEEE Trans. On Power Systems**, New York, v.19, n.3, August, 2004.

LESIEUTRE B. C.; SAUER, P. W.; PAI, M. A. Existence of solutions for the network/load equations in power systems. **IEEE Trans. on Circuits na Systems-I: fundamental theory and applications**, [S.l.], CAS-I-46, n.8, p.1003-1011, 1999.

LONG, B.; AJJARAPU, V. A critical review of the applications of homotopy and continuation methods to power system analysis. th In: NORTH AMERICAN POWER SYMPOSIUM, M.IT., 28., 1996, Cambrige. **Proceedings...** Cambrige: [s.n.] 1996. p.8-15.

MALANGE, F. C. V. **Proposta de parametrização para o fluxo de carga continuado visando redução de perdas na transmissão e o aumento da margem estática de estabilidade de tensão**. 2008. 139f. Tese (Doutorado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

MATARUCCO. R. R.; CANOSSA J.; H; ALVES D. A.; SILVA, L. C.P .; CASTRO C. A. Método da continuação aplicado na análise de contingência de linhas de transmissão. **Controle & Automação**, Campinas, v.17, n.2, Junho, 2006.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: Blücher, 1983. 162p.

MONTICELLI, A.; GARCIA, A. V.; SAAVEDRA, O. R. Fast decoupled load flow: hypothesis, derivations and testing. **IEEE Transactions on Power Systems**, [S.l.], v.5, n.4, p.1425-1431, Nov. 1990.

MOGHAVVEMI, M.; JASMON, G. B. New method for indicating voltage stability condition in power system. In: IEEE INTERNATIONAL POWER ENGINEERING CONFERENCE, 1997, Singapore. **Proceedings...** Singapore: [s.n.], 1997. p.223-227.

NGUYEN, H. L. Newton–raphson in Complex Form. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v.12, n.3, p.1355-1359, August. 1997.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO- ONS. **Diretrizes e critérios para estudos elétricos, procedimentos de rede**: submódulo 23.3. Rio de Janeiro: [s.n.], 2001. Disponível em: <www.ons.org.br>. Acesso em: 15 jun. 2009.

SAUER, P.W.; RAJAGOPALAN, C.; PAI, M. A.; VERGHESE, A. Critical modes and voltage instability in power systems. **IEEE ISCAS**, [Chicargo],v. 3, [s.n.], p.1019-1022, 1986.

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

SOUZA, A. C. Z. **New techniques to efficiently determine proximity to static voltage collapse**. 1995. 119f. Thesis (PhD) - University of Waterloo, Canadá, 1995.

STOTT, B. Review of load-flow calculation methods. **Proceedings of the IEEE**, New York, v.2, n.7, p.916-929, Jul. 1974.

STOTT, B; ALSAÇ, O. Fast decoupled load flow. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v.93, n.3, p.859-869, 1974.

TAMURA, Y.; MORI, H.; IWAMOTO, S. Relationship between voltage instability and multiple load flow solutions in electric power systems. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. PAS-102, n.5, p.1115-1125, 1983.

TAYLOR, C. W. **Power system voltage stability**. Palo alto: McGraw-Hill, 1994. 273p.

TIRANUCHIT, A.; THOMAS R. J. Var support and voltage instabilities in electric power networks. In: NORTH AMERICAN POWER SYMPOSIUM, 3., 1986, Ithaca. **Proceedings...** Ithaca: Cornell University, 1986. p.21-29.

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

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

WSCC, final report, voltage stability criteria, undervoltage load shedding strategy, and reactive power reserve monitoring methodology: Reactive power reserve work group-RRWG. [S.l.: s.n.], 1998. 154p.

ZAMBRONI A. C. S.; CAÑIZARES, C. A.; QUINTANA, V. H. New techniques to speed up voltage collapse computations using tangent vectors. **IEEE Trans. on Power Systems**, [s.n.], v.12, n.3, p.1380-1387, August, 1997.

ZARATE, L. A. **Estimação rápida do ponto de máximo carregamento para a análise de estabilidade de tensão de sistemas elétricos de potência**. 2004. 105f. Tese (Doutorado)-DSCE/FEEC, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

Este apêndice apresenta a publicação de artigos resultantes de trabalhos desenvolvidos em vínculos científicos até o momento.

A1 Publicações

E. M. Magalhães, A. Bonini Neto, D. A. Alves, Obtenção do Ponto de Máximo Carregamento de Sistemas Elétricos de Potência Utilizando o Método Desacoplado de Newton, artigo aceito para publicação nos anais do **IEEE/PES – T&D 2010 LATIN AMERICA**, 2010, São Paulo, IEEE/PES – T&D 2010 LATIN AMERICA.

E. M. Magalhães, A. Bonini Neto, D. A. Alves, Método da Continuação utilizando Métodos Newton Desacoplado para a Obtenção da Curva Trajetória de Soluções (Curvas P-V). DINCON'10, Serra Negra, Junho, 2010. Anais da 9th BRAZILIAN CONFERENCE ON DYNAMICS CONTROL AND THEIR APPLICATIONS.

E. M. Magalhães, D. A. Alves, A. Bonini Neto, Métodos de Newton Desacoplado na Solução do Fluxo de Carga Continuado. INTERTECH'2010, Ilhéus-BA, Março, 2010. Anais da IX International Conference on Engineering and Technology Education.

A. Bonini Neto, E. M. Magalhães, D. A. Alves, Técnica de Parametrização Geométrica para o Fluxo de Carga Continuado Utilizando o “Flat Start” e para Sistemas Mau Condicionados. INTERTECH'2010, Março, 2010. Anais da IX International Conference on Engineering and Technology Education.

A. Bonini Neto, E. M. Magalhães, D. A. Alves, Proposição de uma Técnica de Parametrização para o Fluxo de Carga Continuado Baseado na Soma das Tensões das Equações Não Lineares, Bauru, Maio, 2009. Aceito para publicação nos anais da 8th BRAZILIAN CONFERENCE ON DYNAMICS CONTROL AND THEIR APPLICATIONS.

A. Bonini Neto, E. M. Magalhães, D. A. Alves, Propostas para a Melhoria do Desempenho do Fluxo de carga Continuado. Anais do THE 8th LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION – CLAGTEE.

A. Bonini Neto, E. M. Magalhães, D. A. Alves, Técnicas de Parametrização Geométrica para o Fluxo de Carga Continuado Baseados nas Variáveis Ângulo ou Tensões Nodais e o

Fator de Carregamento para Diferentes Limites de Potência Reativa. Anais do ICECE'2009 International Conference on Engineering and Computer Education-Education Engineers for Innovation, 2009, Buenos Aires.