



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JULIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“Método da Continuação Aplicado na Análise de
Contingência de Linhas de Transmissão”**

ROGÉRIO ROCHA MATARUCCO

Orientador: Prof. Dr. Dilson Amâncio Alves

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

Área de Conhecimento: Automação

Ilha Solteira - SP

Fevereiro/2010

FICHA CATALOGRÁFICA

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

M425m Matarucco, Rogério Rocha.
Método da continuação aplicado na análise de contingência de linhas de transmissão / Rogério Rocha Matarucco. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2010. 142 f.

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

Orientador: Dilson Amâncio Alves
Bibliografia: p. 136-140

1. Sistemas de energia elétrica - Estabilidade. 2. Método da continuação. 3. Análise de contingências. 4. Energia elétrica - Transmissão. 5. Margem de carregamento.




UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO


TÍTULO: Método da Continuação Aplicado na Análise de Contingência de Linhas de Transmissão

AUTOR: ROGÉRIO ROCHA MATARUCCO
ORIENTADOR: Prof. Dr. DILSON AMANCIO ALVES

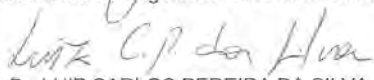
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR em ENGENHARIA ELÉTRICA, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. DILSON AMANCIO ALVES
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. PERCIVAL BUENO DE ARAUJO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MINUSSI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA
Departamento de Engenharia Elétrica / Escola de Engenharia de São Carlos-Usp


Prof. Dr. LUIZ CARLOS PEREIRA DA SILVA
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica / Universidade Estadual de Campinas

Data da realização: 18 de fevereiro de 2010.

Dedico este trabalho à minha amada esposa Ana Mara, ao meu querido filho Victor Neto e à princesinha Mariana, minha filha.

AGRADECIMENTOS

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

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

Ao Centro Universitário de Votuporanga – UNIFEV, na pessoa do magnífico reitor Prof. Dr. Marcelo Ferreira Lourenço pelo apoio através do Programa de Capacitação Docente da instituição.

Ao meu cunhado Márcio Jumpei Crusca Nakano pela colaboração durante o processo de impressão da versão final da tese.

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

Ao Grande Arquiteto do Universo, que a nós ilumina e guarda em todos os momentos de nossas vidas.

RESUMO

Este trabalho apresenta dois métodos para a análise estática de contingências em Sistemas Elétricos de Potência utilizando o Método da Continuação. No primeiro método a margem de carregamento pós-contingência é obtida a partir do ponto de máximo carregamento do caso base. A magnitude de tensão de uma barra qualquer é usada como parâmetro na etapa de parametrização do fluxo de carga continuado. O ramo selecionado para avaliação da contingência é parametrizado por um fator de escalonamento que possibilita a remoção gradual do ramo e assegura a convergência nos casos em que o método diverge para a retirada total da linha de transmissão. Em geral, para a maioria das contingências analisadas são necessárias poucas iterações para a determinação do ponto de máximo carregamento pós-contingência. Mostra-se que o método pode ser usado como uma técnica alternativa para a averiguação e até mesmo para a obtenção da lista de contingências críticas fornecida pela função de análise de segurança de sistemas elétricos. No outro método, o qual obtém o ponto de máximo carregamento de pós-contingência a partir do caso base, as variáveis ângulo de fase e magnitude de tensão de uma barra k qualquer, e a perda total de potência ativa, são propostas como parâmetros para a etapa de parametrização do fluxo de carga continuado utilizado na averiguação da lista de contingências críticas fornecida pela função de análise de segurança de sistemas elétricos. Nos casos em que há divergência do fluxo de carga, o método proposto possibilita confirmar se esta ocorre devido à deficiência numérica do método em si ou a inexistência de um ponto de operação factível de pós-contingência. O uso da perda total de potência ativa como parâmetro traz como vantagem a possibilidade da determinação de pontos além do ponto de singularidade sem a necessidade de troca de parâmetro. Os métodos propostos facilitam o desenvolvimento e a implementação de métodos da continuação para análise de contingências.

Palavras-chave: Método da continuação. Estabilidade de tensão. Fluxo de carga continuado. Ponto de máximo carregamento. Análise de contingências. Margem de carregamento.

ABSTRACT

This work presents two methods for static contingency analysis of electric power systems by using Continuation Methods. In the first the post-contingency loading margin is obtained from the base case maximum loading point. The voltage magnitude of any bus can be used as a parameter in the parameterization step of the proposed continuation power flow. The branch selected for contingency evaluation is parameterized by a scaling factor which allows its the gradual removal and assures the continuation power flow convergence for the cases where the method would diverge for the complete transmission line removal. In general, for most of the analyzed contingencies little iterations are necessary for the determination of the post-contingency maximum loading point. It is shown that the method can be used as an alternative technique to verify and even to obtain the list of critical contingencies supplied by the electric power systems security analysis function. In the other method, which obtains the maximum loading point from the base case, new parameters, namely the voltage magnitudes, phase angles and the total power losses, for evaluating the effects of branch outages. The approach can be used as a verification tool after a list of critical contingencies had been ranked according to their severities by the contingency selection functions. It is then possible to find whether the non-convergence of a power flow is due to a numerical problem or to an infeasible operating situation. The mains advantage of using the total real power losses as a parameter is that it is not necessary to change parameters during the solutions tracing until beyond the simple limit point, where the original Jacobian is singular. The proposed methods facilitate the development and the implementation of continuation methods for contingencies analysis.

Keywords: Continuation method. Voltage stability. Load flow. Maximum loading point. Contingency analysis. Voltage stability margin.

LISTA DE FIGURAS

1	Classificação da estabilidade de sistemas de potência	25
2	Definição da margem de carregamento segura	28
3	(a) Diagrama unifilar sistema três barras, (b) magnitudes de tensão, (c) ângulos de tensão, (d) determinantes normalizados	34
4	Magnitude de tensão em função do fator de carregamento, traçado utilizando o método convencional de Newton, λ como parâmetro	35
5	Método da continuação com preditor tangente	39
6	Comparação entre os métodos da continuação com preditor tangente e secante parametrizado por λ	41
7	Curva PV utilizando V_2 como parâmetro com passos fixos de -0,01 p.u.	43
8	Curvas PV de pré e pós-contingência	43
9	Aproximação da margem de estabilidade de tensão	46
10	Determinação aproximada da margem de potência reativa de uma barra	48
11	Ilustração do método de ajuste de curva generalizado	49
12	Índice de compensação de reativo (RCI)	51
13	Índice de suporte de reativo (RSI)	52
14	Filtragem iterativa	53
15	Ilustração do processo para cálculo dos pontos de máximo carregamento de pós-contingência	56
16	Margens de pré e pós-contingência	57
17	Refinamento para o cálculo do $PMC_{pós}$	58
18	Margens de potência reativa	60
19	Curvas PV para contingências de linhas de transmissão do sistema IEEE 14 barras: curva 1, caso base; curva 2, contingência de uma das duas linhas entre as barras 1 e 2; curva 3, contingência da linha entre as barras 2 e 3; curva 4, contingência das duas linhas entre as barras 1 e 2	65
20	(a) Curvas PV para o caso base e para a contingência de uma das duas linhas de transmissão entre as barras 1 e 2 do sistema IEEE 14 barras; (b) número de iterações por ponto da curva; e (c) número de iterações, partindo do caso base ($\lambda=1$) convergido e aplicando contingência da linha	67

21	(a) Curvas PV para o caso base e para a contingência das duas linhas de transmissão entre as barras 1 e 2 do sistema IEEE 14 barras; e (b) número de iterações por ponto da curva	68
22	Definição da variável μ para realização da contingência da linha de transmissão entre as barras k e l	69
23	Sistema exemplo de duas barras	71
24	Curvas PV para pré e pós-contingência das linhas de transmissão 1 e 2 e contingência parcial da linha de transmissão 2	72
25	(a) Tensão versus μ para as contingências das linhas de transmissão 1 e 2, (b) Determinantes normalizados das matrizes Jacobianas	73
26	Curvas PV para contingências de linhas de transmissão do sistema IEEE 14 barras: curva 1, caso base; curva 2, contingência de uma das duas linhas entre as barras 1 e 2; curva 3, contingência da linha entre as barras 2 e 3; curva 4, contingência das duas linhas entre as barras 1 e 2	77
27	Contingência da linha entre as barras 2 e 3 do sistema IEEE 14 barras: (a) curvas PV; e (b) número de iterações por ponto da curva	78
28	Curvas PV para o caso base e para a contingência da linha de transmissão entre as barras 35 e 36 do sistema IEEE 57 barras	79
29	Contingência da linha de transmissão entre as barras 35 e 36 do sistema IEEE 57 barras: (a) curvas PV; (b) número de iterações por ponto da curva; (c) variação dos <i>taps</i> dos transformadores por ponto da curva; e (d) variação das potências reativas geradas nas barras PV (2, 8, e 12) por ponto da curva	81
30	Desempenho da mudança do parâmetro utilizado pelo fluxo de carga continuado proposto para obtenção da margem de carregamento para a contingência da linha entre as barras 35 e 36 do sistema IEEE 57 barras: (a) curvas PV; (b) número de iterações	82
31	Desempenho da mudança do parâmetro utilizado pelo fluxo de carga continuado proposto para obtenção da margem de carregamento para a contingência da linha entre as barras 35 e 36 do sistema IEEE 57 barras, redução da tolerância dos <i>mismatches</i> para 10^{-3} p.u. e aumento do passo do parâmetro (V) para 0,02 p.u.: (a) curvas PV; (b) número de iterações	83

- 32** Desempenho da mudança do parâmetro utilizado pelo fluxo de carga continuado proposto para obtenção da margem de carregamento para a contingência do transformador do ramo 8: (a) curvas PV; (b) detalhe da curva PV; (c) número de iterações; (d) número de iterações, partindo do caso base ($\lambda = 1$) convergido e aplicando a contingência do transformador 86
- 33** Desempenho da mudança do parâmetro utilizado pelo fluxo de carga continuado proposto para obtenção da margem de carregamento para a contingência do transformador do ramo 8, inicializando com a tensão da barra crítica (V_{13}) do caso base: (a) curvas PV; (b) número de iterações 87
- 34** Desempenho da mudança do parâmetro utilizado pelo fluxo de carga continuado proposto para obtenção da margem de carregamento para a contingência do transformador do ramo 8, inicializando com a tensão da barra crítica (V_{13}) do caso base: (a) curvas PV; (b) número de iterações 89
- 35** Desempenho da mudança do parâmetro utilizado pelo fluxo de carga continuado proposto para obtenção da margem de carregamento para a contingência do transformador do ramo 8, inicializando com a tensão da barra 9 do caso base: (a) curvas PV; (b) número de iterações 90
- 36** Desempenho da mudança do parâmetro utilizado pelo fluxo de carga continuado proposto para obtenção da margem de carregamento para a contingência da linha de transmissão 116 entre as barras 69 e 75, inicializando com a tensão da barra 9 do caso base: (a) curvas PV; (b) número de iterações; (c) número de iterações com tolerância de 10^{-2} p.u. para os *mismatches* e passo de 0,02 p.u. para o parâmetro (V); (d) número de iterações, partindo do caso base ($\lambda = 1$) convergido e aplicando contingência da linha 92
- 37** Desempenho da mudança do parâmetro utilizado pelo fluxo de carga continuado proposto para obtenção da margem de carregamento para a contingência da linha 116 entre as barras 69 e 75, inicializando com a tensão da barra crítica (barra 13) do caso base: (a) curvas PV; (b) número de iterações; (c) número de iterações com tolerância de 10^{-2} p.u. para os *mismatches* e passo de 0,02 p.u. para o parâmetro (V) 94
- 38** (a) curvas PV de pré, parcial e pós-contingência da linha de transmissão 1, (b) tensão e ângulo *versus* μ , (c) perfis de tensão e ângulo, e (d) número de iterações 96

39	(a) curvas PV de pré ($\mu=0$), parcial ($\mu=\mu_{\text{máx}}=0,9775$) e pós-contingência ($\mu=1$) para a saída da linha de transmissão 48 (localizada entre as barras 35 e 36) do IEEE 57 barras, (b) tensão versus μ , (c) número de iterações para passo simples, e (d) para passo duplicado, e (e) perfil de tensão e de ângulo	99
40	(a) Curvas PV de: pré ($\mu=0$), parcial ($\mu=\mu_{\text{máx}}=0.8855$) e de pós-contingência ($\mu=1$) para a saída do ramo 8 (localizado entre as barras 5 e 8) do IEEE 118 barras, (b) magnitude de tensão versus μ , (c) número de iterações, e (e) perfis de tensão e ângulo	101
41	Exemplo de curva PV para obtenção da margem de carregamento	104
42	Sistema IEEE 14 barras	105
43	Curvas PV da barra 14 de pré ($\mu=0$) e de pós-contingência ($\mu=1$) para a saída dos ramos do sistema IEEE 14 barras	106
44	Redução percentual na margem de carregamento do sistema IEEE 14 barras para as contingências dos ramos	107
45	Margens de carregamento de pós-contingência e redução na margem do sistema IEEE 14 barras	108
46	Número de iterações para obtenção das margens de carregamento de pós-contingência do sistema IEEE 14 barras, para os dois métodos comparados	109
47	Sistema IEEE 30 barras	110
48	Curvas PV da barra 30 de pré ($\mu=0$) e de pós-contingência ($\mu=1$) para a saída dos ramos do sistema IEEE 30 barras	110
49	Redução percentual na margem de carregamento do sistema IEEE 30 barras para as contingências dos ramos	112
50	Margens de carregamento de pós-contingência e redução na margem do sistema IEEE 30 barras: (a) contingências dos ramos 1 a 22; (b) contingências dos ramos 23 a 41	113
51	Número de iterações para obtenção das margens de carregamento de pós-contingência do sistema IEEE 30 barras, para os dois métodos	114
52	Sistema IEEE 57 barras	115
53	Curvas PV de pré ($\mu=0$) e de pós-contingência ($\mu=1$) para a saída dos ramos do sistema IEEE 57 barras	116

54	Redução percentual na margem de carregamento do sistema IEEE 57 barras para as contingências: (a) dos ramos 1 a 18; (b) dos ramos 19 a 36	118
55	Redução percentual na margem de carregamento do sistema IEEE 57 barras para as contingências: (a) dos ramos 37 a 59; (b) dos ramos 60 a 80	119
56	Margens de carregamento de pós-contingência e redução na margem do sistema IEEE 57 barras: (a) contingências dos ramos 1 a 18; (b) contingências dos ramos 19 a 36	120
57	Margens de carregamento de pós-contingência e redução na margem do sistema IEEE 57 barras: (a) contingências dos ramos 37 a 59; (b) contingências dos ramos 60 a 80	121
58	Número de iterações para obtenção das margens de carregamento de pós-contingência do sistema IEEE 57 barras, para o método proposto e a partir do caso base para contingências do ramo 1 ao 26	122
59	Número de iterações para obtenção das margens de carregamento de pós-contingência do sistema IEEE 57 barras, para o método proposto e a partir do caso base: (a) para contingências do ramo 27 ao 56; (b) do ramo 57 ao 80	123
60	Curva de pré-contingência e de pós-contingência para as saídas dos ramos 41, 67 e 80 do sistema IEEE 57 barras	124
61	Redução percentual na margem de carregamento do sistema IEEE 118 barras para as contingências dos ramos 3, 8, 38, 51, 116, 118, 163, 174 e 185	127
62	Número de iterações para obtenção das margens de carregamento de pós-contingência do sistema IEEE 118 barras, para o método proposto e a partir do caso base: (a) para contingências do ramo 1 ao 23; (b) do ramo 24 ao 43	128
63	Número de iterações para obtenção das margens de carregamento de pós-contingência do sistema IEEE 118 barras, para o método proposto e a partir do caso base: (a) para contingências do ramo 44 ao 63; (b) do ramo 64 ao 83	129
64	Número de iterações para obtenção das margens de carregamento de pós-contingência do sistema IEEE 118 barras, para o método proposto e a partir do caso base: (a) para contingências do ramo 84 ao 103; (b) do ramo 104 ao 124	130
65	Número de iterações para obtenção das margens de carregamento de pós-contingência do sistema IEEE 118 barras, para o método proposto e a partir do caso base: (a) para contingências do ramo 125 ao 145; (b) do ramo 146 ao 165	131

66	Número de iterações para obtenção das margens de carregamento de pós-contingência do sistema IEEE 118 barras, para o método proposto e a partir do caso base, para contingências do ramo 166 ao 186	132
67	Curvas de pré-contingência e de pós-contingência para as saídas de alguns ramos do sistema IEEE 118 barras	132
68	Comparação do número de iterações dos dois métodos	133

LISTA DE TABELAS

1	Estados de Operação de um Sistema Elétrico de Potência	30
2	Critérios para estabelecimento de margem em estudos de estabilidade de tensão	102
3	Margens de carregamento de pós-contingência e reduções percentuais sistema IEEE 14 barras	106
4	Margens de carregamento de pós-contingência e reduções percentuais sistema IEEE 30 barras	111
5	Margens de carregamento de pós-contingência e reduções percentuais sistema IEEE 57 barras	117
6	Margens de carregamento de pós-contingência e reduções percentuais sistema IEEE 118 barras	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>IEEE</i>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<i>MW</i>	mega watt
<i>MVA_r</i>	mega volt-ampère reativo
<i>p.u.</i>	por unidade
<i>PMC</i>	ponto de máximo carregamento
<i>MC</i>	margem de carregamento
<i>LT</i>	linha de transmissão
<i>OLTC</i>	transformadores com comutação de <i>tap</i> sob carga, (<i>On Line Tap Changer</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

θ	vetor ângulo das tensões nodais
V	vetor magnitude das tensões nodais
λ	fator de carregamento
μ	fator de escalonamento;
P	potência ativa
Q	potência reativa
P^{esp}	potência ativa especificada
Q^{esp}	potência reativa especificada
PQ	barra de carga
PV	barra de geração
PV	curva da tensão em função da potência ativa ou do fator de carregamento λ
QV	curva da potência reativa em função da tensão
G	vetor composto pelas equações dos balanços de potência ativa e reativa
J	matriz Jacobiana
Δx	variação para correção do vetor x , correspondente a $\Delta\theta, \Delta V$
$\Delta\lambda$	variação para correção do λ
Ω_k	conjunto de todas as barras diretamente conectadas à barra k
σ	tamanho do passo preditor
G	parte real da matriz admitância
B	parte imaginária da matriz admitância
g	condutância série da LT
b	susceptância série da LT
k	1, NB , sendo NB o número de barras do sistema
b^{sh}	susceptância shunt

SUMÁRIO

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO	19
1.1 Introdução geral	19
Capítulo 2 – ESTADO DA ARTE E MODELOS DE ANÁLISE DE CONTINGÊNCIA	22
2.1 Introdução	22
2.2 Estabilidade de um sistema de potência	22
2.3 Objetivos de um estudo de estabilidade de tensão	25
2.4 Índices de estabilidade – margem de carregamento	27
2.5 Contingência	29
2.6 Estados de operação de um sistema de potência	30
2.7 Método da continuação	32
2.7.1 <i>Método de Newton parametrizado por λ</i>	33
2.7.2 <i>Método de Newton parametrizado por V_k e θ_k</i>	37
2.7.3 <i>Passo preditor</i>	39
2.7.4 <i>Controle do tamanho do passo preditor (σ)</i>	42
2.7.5 <i>Mudança de parâmetro</i>	44
2.7.6 <i>Passo corretor</i>	45
2.8 Principais métodos existentes relacionados à análise de contingências	45
2.8.1 <i>Método utilizando múltiplas soluções do fluxo de carga</i>	46
2.8.2 <i>Método da Função Teste</i>	47
2.8.3 <i>Método de Ajuste da Curva QV</i>	48
2.8.4 <i>Método de Ajuste De Curva Generalizado</i>	49
2.8.5 <i>Método do Look-Ahead</i>	50
2.8.6 <i>Método do Índice de Suporte de Reativo (RSI) e Filtragem Iterativa (IF)</i>	51
2.8.7 <i>Aplicação de índices de proximidade ao limite de estabilidade de tensão na seleção de contingências</i>	54
2.8.8 <i>Cálculo rápido de margens de pós-contingência</i>	55
2.8.9 <i>Seleção de contingências via método de Newton aproximado</i>	58
2.8.10 <i>Classificação de contingências baseada em margens de potência reativa</i>	59

2.8.11	<i>Seleção de contingências baseada em índices de performance</i>	61
2.8.12	<i>Outros métodos</i>	62
Capítulo 3 - DETERMINAÇÃO DA MARGEM DE CARREGAMENTO DE PÓS-CONTINGÊNCIA		63
3.1	Introdução	63
3.2	Curvas PV de pré e pós-contingências	64
3.3	Métodos propostos	68
3.3.1	<i>Obtenção da margem de carregamento a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência</i>	68
3.3.2	<i>Obtenção da margem de carregamento a partir do caso base</i>	70
Capítulo 4 - RESULTADOS DOS TESTES		75
4.1	Introdução	75
4.2	Margem de carregamento a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência	77
4.2.1	<i>Resultados obtidos para o sistema IEEE 14 Barras</i>	77
4.2.2	<i>Resultados obtidos para o sistema IEEE 57 Barras</i>	79
4.2.3	<i>Resultados obtidos para o sistema IEEE 118 Barras</i>	84
4.3	Margem de carregamento a partir do caso base	95
4.3.1	<i>Resultados obtidos para o sistema IEEE 14 Barras</i>	95
4.3.2	<i>Resultados obtidos para o sistema IEEE 57 Barras</i>	97
4.3.3	<i>Resultados obtidos para o sistema IEEE 118 Barras</i>	100
4.4	Comparação entre os métodos propostos	102
4.4.1	<i>Resultados obtidos para o sistema IEEE 14 Barras</i>	104
4.4.2	<i>Resultados obtidos para o sistema IEEE 30 Barras</i>	109
4.4.3	<i>Resultados obtidos para o sistema IEEE 57 Barras</i>	114
4.4.4	<i>Resultados obtidos para o sistema IEEE 118 Barras</i>	124
Capítulo 5 - CONCLUSÕES		134
5.1	Conclusão geral	134
5.2	Motivação para trabalhos futuros	135

REFERÊNCIAS **136**

**Apêndice A - ARTIGOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS DURANTE A
ELABORAÇÃO DA TESE DE DOUTORADO** **141**

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Introdução geral

Dados do Operador Nacional do Sistema (ONS) consideram como um dos cenários brasileiros, uma taxa média de crescimento anual do Produto Interno Bruto (PIB) de 4,8% para o quinquênio 2007-2011, o que representa uma taxa anual de crescimento da carga para o mesmo período equivalente a 5,5% (ONS, 2007). Previsão como esta leva à necessidade de construção de novas usinas de geração, bem como interligações entre os vários subsistemas. Porém, problemas ambientais e, principalmente no Brasil, as grandes distâncias entre os centros de carga e as usinas de geração e os sistemas apresentando altas compensações, fazem e farão o sistema operar próximo aos seus limites de segurança. Esses limites de segurança são associados à estabilidade de tensão que está relacionada com a falta de suporte de potência reativa necessária para se manter um perfil de tensão satisfatório para o sistema elétrico (TAYLOR, 1994).

As condições descritas no parágrafo anterior, não são inerentes apenas ao Brasil, mas em geral, ao mundo todo. Dessa forma, empresas ligadas ao setor bem como órgãos de pesquisa (universidades públicas e privadas, entre outros), têm se preocupado em desenvolver trabalhos relacionados ao problema de estabilidade de tensão. Esses trabalhos visam dar condições para que nas etapas de planejamento e operação de um sistema elétrico de potência, sejam definidas as margens de estabilidade de tensão (margem de carregamento) e as ações de controle necessárias para as condições normais de operação do sistema (caso base) e para as diferentes condições de contingências que por ventura venham a ocorrer.

Um sistema elétrico de potência está exposto à ocorrência de um grande número de contingências. Porém, apenas algumas delas são severas o suficiente para causar danos relevantes (colapso de tensão, por exemplo) ao sistema. Assim, antes da análise de estabilidade de tensão, realiza-se a seleção e a ordenação das contingências de acordo com o impacto que estas causam ao sistema, reduzindo assim o tempo computacional das análises.

Na avaliação da estabilidade de tensão onde se devem traçar curvas PV e QV para cada contingência, são utilizados métodos de análise estática, como o método de fluxo de carga e fluxo de carga continuado, que devem ser eficientes e confiáveis a fim de atender os requisitos necessários para as aplicações na etapa de planejamento e operação em tempo-real.

Neste trabalho são apresentadas as dificuldades numéricas que podem surgir quando do uso dos métodos do fluxo de carga e do fluxo de carga continuado para a determinação da margem de carregamento de pós-contingência em sistemas elétricos de potência.

Propõe-se a determinação da margem de carregamento a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência utilizando um fluxo de carga continuado em que a tensão é utilizada como parâmetro. Entretanto, diferente do método proposto na referência (FENG; XU, 2000), que utiliza o método de Newton-Raphson com fator de amortecimento (Newton modificado) para identificar e estimar a magnitude de tensão de pós-contingência da barra crítica, a qual será usada como parâmetro da continuação no fluxo de carga continuado, este novo método propõe o uso de uma técnica de parametrização que possibilita a identificação da barra crítica de pós-contingência através da remoção gradual do ramo escolhido para contingência.

Propõe-se ainda outro método onde a margem de carregamento pode ser obtida a partir do caso base, mesmo com pontos de máximo carregamento de pós-contingência menores que o carregamento do caso base. Na referência (FLUEK, 2000) foi apresentada uma ferramenta para avaliação da contingência de linhas de transmissão usando a admitância da linha como parâmetro da continuação. No método proposto neste trabalho são usados o ângulo de fase e a magnitude da tensão de uma barra k qualquer e a perda total de potência ativa $\theta(k, V_k$ e $P_a)$ como parâmetros da continuação.

Estes métodos serão abordados com maiores detalhes no capítulo 3.

No capítulo 2 são apresentados definições e conceitos de estabilidade de tensão, do método da continuação e os vários métodos existentes na literatura aplicados à análise de contingências.

No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos para a aplicação dos métodos propostos aos sistemas IEEE 14, 57 (FRERIS; SASSON, 1968) e 118 barras (UNIVERSITY OF WASHINGTON, 2003) e testes comparativos com os métodos propostos.

Finalmente, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões deste trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

ESTADO DA ARTE E MODELOS DE ANÁLISE DE CONTINGÊNCIA

2.1 Introdução

O sistema elétrico de potência opera, atualmente, próximo de seus limites de segurança, em função de restrições econômicas e ambientais impostas à construção de novas usinas de geração e sistemas de transmissão. Inicialmente, esses limites de segurança eram associados a limites térmicos de transformadores e linhas de transmissão e de estabilidade transitória. Mais recentemente descobriu-se que a estabilidade de tensão é um fator limitante para muitos sistemas devido à falta de suporte de reativos para se garantir uma margem de estabilidade apropriada com perfil de tensão ideal.

As ações de controle realizadas durante a operação *on-line* de um sistema elétrico de potência, não devem ter como objetivo apenas um melhor aproveitamento dos recursos de geração e transmissão, mas devem também evitar que o sistema opere próximo a uma condição crítica, onde um pequeno aumento de carga ou uma situação de contingência leve-o ao 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 não só para as condições normais de operação (caso base), mas também para diferentes condições de contingência.

2.2 Estabilidade de um sistema de potência

A estabilidade de é definida como a capacidade de um sistema elétrico de potência, para uma dada condição de operação inicial, recuperar um estado de equilíbrio após estar sujeito a um distúrbio físico (KUNDUR et al., 2004).

Historicamente a estabilidade do sistema de potência era baseada na manutenção do sincronismo entre os geradores síncronos, condição necessária para a operação estável. Este tipo de estabilidade, denominada recentemente por estabilidade de ângulo (TAYLOR, 1994), é regido pela dinâmica dos rotores das máquinas síncronas. Ela depende da capacidade de manter ou recuperar o equilíbrio entre o torque eletromagnético e o torque mecânico das máquinas síncronas do sistema, após a ocorrência de um distúrbio. Neste caso, a estabilidade pode ser definida em função do nível de perturbação grande ou pequena, sendo conhecida por estabilidade transitória ou estabilidade de pequenas perturbações, respectivamente. A estabilidade de ângulo está relacionada a eventos de curto prazo (3 a 20 segundos) (KUNDUR et al., 2004; ANDERSON; FOUAD, 1993).

A estabilidade de frequência refere-se à capacidade de um sistema de potência manter frequência estável após um distúrbio que resulta em um desequilíbrio entre a geração e a carga do sistema. Esse tipo de estabilidade pode ser considerado como um fenômeno de curto prazo ou de longo prazo (KUNDUR et al., 2004; ANDERSON; FOUAD, 1993).

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

Com a ocorrência desses eventos, a análise da estabilidade de tensão ganhou destaque, aumentando o interesse por parte dos engenheiros e das empresas ligadas ao setor de energia elétrica, visto que os sistemas de potência estão sendo operados mais frequentemente em situações altamente estressadas, com aumento considerável de interconexões. Isso tem tornado o sistema de potência cada vez mais complicado de se administrar.

A estabilidade de tensão refere-se à capacidade de um sistema de potência manter tensões estáveis em todas as suas barras, após ser submetido a um distúrbio a partir de uma condição inicial de operação (KUNDUR et al., 2004).

A instabilidade de tensão de um sistema de potência pode ocorrer na forma de um declínio ou aumento progressivo e incontrolável da magnitude das tensões em algumas barras do sistema. Várias alterações nas condições de operação do sistema de potência contribuem para o mesmo tornar-se instável:

- Acréscimo no carregamento;

- Geradores, condensadores síncronos e controladores estáticos de reativos atingindo seus limites de potência reativa;
- Saídas de linhas de transmissão ou geradores;
- Comportamento de cargas face às variações de tensão;
- Variação automática de *taps* de transformadores;
- Sistemas de potência estressados, devido à falta de reforço de transmissão e falta de investimentos em geração;

O principal fator responsável pela instabilidade de tensão é a incapacidade do sistema em atender a demanda de potência reativa (KUNDUR, 1993).

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

A estabilidade de tensão pode ser classificada em duas subcategorias (KUNDUR et al., 2004):

- Estabilidade de tensão de grandes perturbações que se refere à capacidade do sistema manter as tensões estáveis após ser submetido a uma grande perturbação (falha no sistema, perda de geração ou contingência em uma linha de transmissão).
- Estabilidade de pequena perturbação que se refere à capacidade do sistema manter tensões estáveis após ser submetido a uma pequena perturbação (aumento na carga do sistema).

Com relação ao tempo do evento, a estabilidade de tensão pode ainda ser classificada em outras duas subcategorias (KUNDUR et al., 2004):

- Estabilidade de tensão de curto prazo que envolve dinâmicas de dispositivos de ação rápida (motores de indução, cargas controladas eletronicamente e conversores HVDC). O fenômeno relaciona-se há segundos
- Estabilidade de tensão de longo prazo que envolve equipamentos de ação mais lenta (mudança de *tap* de transformadores, cargas controladas termostaticamente, limitadores de corrente de geradores) O fenômeno relaciona-se há minutos.

A figura 1 mostra a classificação do problema da estabilidade de tensão, com os respectivos tipos e subcategorias (KUNDUR et al., 2004).

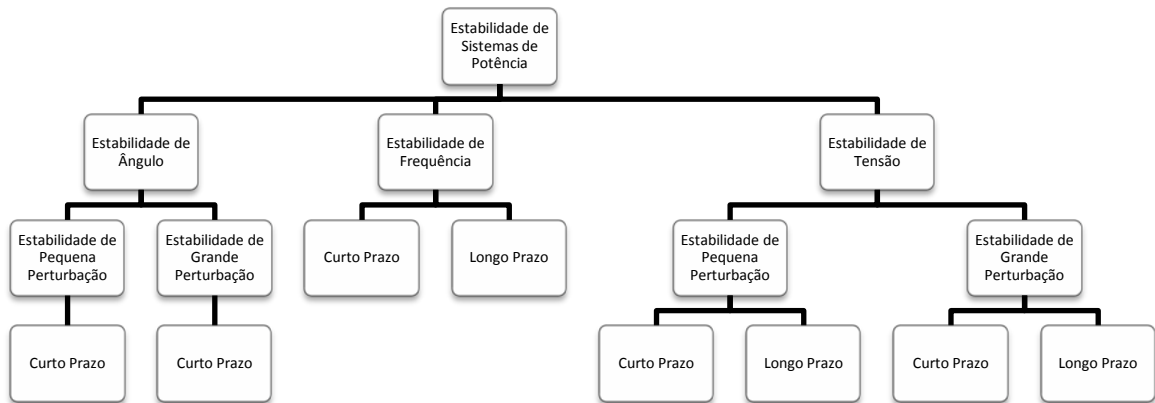


Figura 1 – Classificação da estabilidade de sistemas de potência

2.3 Objetivos de um estudo de estabilidade de tensão

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

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

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

Os métodos estáticos de análise da estabilidade de tensão são essencialmente baseados nas equações do fluxo de carga. Por envolverem somente equações algébricas, esses métodos possuem uma carga computacional menor do que os métodos dinâmicos, sendo ideais para a maioria dos estudos nos quais é necessária a determinação dos limites de estabilidade de tensão para condições de pré e pós-contingências (GAO et al., 1992). Os métodos estáticos

podem propiciar uma rápida e simples avaliação das condições críticas do sistema, associadas à singularidade da matriz Jacobiana do fluxo de carga, bem como a definição de índices para a comparação entre diferentes pontos de operação de modo a se obter uma seleção qualitativa das condições mais críticas de operação.

Um sistema de energia elétrica pode ser descrito por um conjunto de equações diferenciais e algébricas não lineares da forma mostrada no conjunto de equações 2.1.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, y, \lambda) \\ 0 &= g(x, y, \lambda) \end{aligned} \quad (2.1)$$

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

Para um determinado valor de λ , o ponto de equilíbrio $(x(\lambda^*), y(\lambda^*))$ para o qual a matriz Jacobiana do sistema de equações (2.1) é singular, é matematicamente conhecido como ponto de bifurcação sela-nó (bifurcação singular), e tem sido frequentemente associado ao fenômeno de colapso de tensão (DOBSON; CHIANG, 1989; IEEE-PSSC, 1999). Ou seja, o colapso de tensão acontece como uma consequência dinâmica da bifurcação sela-nó e, portanto, assumindo que os parâmetros do sistema estão variando lentamente, pode-se usar um modelo estático durante o período que precede o instante no qual a bifurcação ocorre.

A compreensão da bifurcação sela-nó requer um modelo dinâmico para explicar porque as tensões decrescem dinamicamente. Entretanto, é possível estimar o ponto de bifurcação sela-nó através da utilização de um modelo estático. As referências Dobson et al., (1989), Morison et al., (1993) e Cañizares (1995a), mostram que, sob certas condições, a análise do colapso de tensão pela abordagem dinâmica e estática conduz a resultados similares.

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

- Dois pontos de equilíbrio unidos (um destes pontos deve ser instável);
- A sensibilidade em relação ao parâmetro de carregamento de uma variável de estado típica é infinita. Isto resulta em uma inclinação infinita no diagrama de bifurcação no ponto de bifurcação (“nariz” da curva);
- A matriz Jacobiana do sistema tem um autovalor nulo;

- A matriz Jacobiana do sistema tem um valor singular nulo;
- O determinante da matriz Jacobiana do sistema é nulo;
- As dinâmicas do colapso, na bifurcação, são tais que o estado do sistema muda monotonicamente; a taxa de mudança é lenta inicialmente e rápida posteriormente.

Um aspecto importante que deve ser ressaltado é que, dependendo do modelo estático utilizado para representar a carga agregada do sistema, a localização do ponto de sela-nó muda significativamente. No caso de um modelo de carga do tipo PQ constante, a bifurcação sela-nó indicará o ponto de máxima transferência de potência ou ponto de máximo carregamento, correspondendo ao “nariz” da curva PV (CAÑIZARES, 1995a, 1995b). Estes pontos pertencem à superfície que define a fronteira da região de solubilidade do fluxo de carga. Fora desta região, o fluxo de carga não tem solução real. Observa-se que cargas que exibem características de impedância ou corrente constantes não causam a instabilidade de tensão (PAL, 1992).

Segundo Kundur (1993, p. 27): “Um sistema é instável em tensão se, em pelo menos uma barra do sistema, a magnitude de tensão (V) decresce quando a injeção de potência reativa (Q) desta barra aumenta”, ou ainda: “Um sistema é estável em tensão se a sensibilidade VQ é positiva para todas as barras do sistema e instável se esta sensibilidade VQ é negativa para, pelo menos uma barra do sistema”.

2.4 Índices de estabilidade – margem de carregamento

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

Para um ponto de operação particular, a quantidade adicional de carga que causaria um colapso de tensão, em um modelo específico de acréscimo da mesma, é denominada margem de carregamento para o colapso de tensão. A margem de carregamento é o mais básico e amplo índice aceito de colapso de tensão. Esta margem é função da diferença entre o valor de

um parâmetro correspondente a um evento e o seu valor atual. Existem várias escolhas para medir a mudança no carregamento, sendo uma delas a soma das variações absolutas na potência da carga. Frequentemente as cargas são consideradas como tendo fator de potência constante e, assim, a variação no carregamento pode ser medida somente pelas mudanças na potência ativa.

Se a carga de um sistema é escolhida para ser o parâmetro de carregamento, pode-se traçar uma curva PV para o sistema. Neste caso, como apresentado na figura 2 que mostra uma curva PV típica, a margem de carregamento para o colapso de tensão é representada pela distância entre o ponto de operação O e o ponto de máximo carregamento (“nariz” da curva PV).

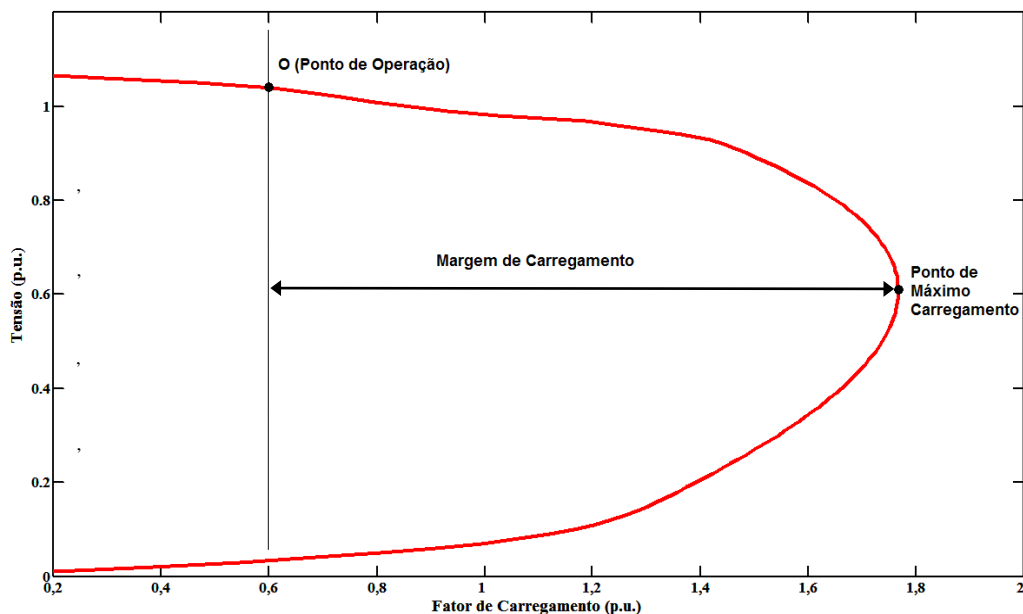


Figura 2 - Definição da margem de carregamento segura

Algumas vantagens do uso da margem de carregamento como índice de colapso de tensão são (IEEE-PSSC, 1999):

- É direta, bem aceita e facilmente entendida;
- Não é baseada em um modelo particular do sistema, requerendo apenas um modelo estático do sistema;
- É um índice preciso que leva plenamente em conta as não linearidades e limites (limites de potência reativa e de *tap*) do sistema;
- Uma vez obtida a margem de carregamento, é fácil calcular sua sensibilidade com relação a qualquer parâmetro ou controle do sistema de potência.

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

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

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

2.5 Contingência

Uma contingência consiste de um ou mais eventos ocorrendo simultaneamente ou em diferentes instantes de tempo, com cada evento resultando em uma mudança no estado de um ou mais elementos do sistema. Ela pode ser iniciada por uma pequena perturbação, uma falta, ou uma ação de chaveamento, como por exemplo, abertura ou fechamento de disjuntores, inserção ou remoção de capacitor/reator shunt, inserção de capacitores série, saída de gerador, corte de carga, mudança de *taps* de transformadores ou conexão e operação de dispositivos FACTS (IEEE-PSSC, 1999). Uma contingência pode ser classificada como simples (quando somente um equipamento sai de operação) ou como múltipla (quando dois ou mais equipamentos saem de operação). Assim, nas etapas de planejamento e operação de um sistema de potência, devem ser definidas as margens de estabilidade de tensão e as ações de controle necessárias ao sistema para as condições de operação normal e condições de operação sob contingências.

No entanto, é impraticável e desnecessário analisar em detalhes o impacto de toda contingência concebível do sistema de potência, visto que, com a interconexão dos sistemas de potência, esse número de contingências é muito alto. Se todas as contingências forem estudadas em detalhes, isso tomará um excessivo tempo computacional. Além disso, muitas contingências não são severas. Somente um número limitado delas pode comprometer a

segurança do sistema (VAAHEDI et al., 1999). Sendo assim, somente estas contingências mais severas serão de preocupação imediata e deverão ser avaliadas. Torna-se necessário então, selecionar essas contingências que mais preocupam de uma grande lista de contingências possíveis, obtendo uma pequena lista, apenas com aquelas que causam um impacto significativo no sistema elétrico de potência. Essas contingências devem ser classificadas de acordo com o seu impacto esperado.

Basicamente existem dois estágios envolvidos na análise de contingências: a seleção e a avaliação da contingência selecionada (MENG; XUE; LO, 2006). No primeiro estágio utilizam-se métodos de cálculos rápidos para selecionar uma lista de contingências mais severas que serão, então, avaliadas no segundo estágio por métodos de análises mais detalhados.

2.6 Estados de operação de um sistema de potência

O objetivo é sempre operar o sistema elétrico em um estado seguro. Porém, devido ao alto carregamento e à grande quantidade de interconexões, é praticamente impossível, nos dias atuais fazer com o que a rede esteja sempre nesse estado seguro.

Os estados de operação de um sistema de potência podem ser descritos da forma constante na tabela 1 (KUNDUR, 1993).

Tabela 1 – Estados de operação de um sistema elétrico de potência

ESTADO DE OPERAÇÃO	DESCRIÇÃO
Normal	Todas as variáveis do sistema se encontram dentro de limites normais e nenhum equipamento é sobrecarregado. A carga do sistema é normalmente atendida. O sistema é capaz de sofrer uma contingência sem violar suas restrições.

Alerta	Todas as variáveis do sistema ainda se encontram dentro de limites normais e nenhum equipamento é sobrecarregado. Porém, o sistema se encontra em um nível de segurança onde uma contingência pode causar uma sobrecarga de equipamentos, levando-o ao estado de emergência ou ainda ao estado de emergência extrema, caso a contingência seja severa.
Emergência	A carga ainda é atendida, porém, as tensões em muitas barras são baixas. O sistema pode ser restaurado ao estado de alerta através de ações de controle e emergência.
Emergência Extrema	Resulta em interrupções em cascata e possível perda da maior parte do sistema. É necessário o corte de carga como ação de controle para salvar o sistema de um possível <i>blackout</i> .
Restaurativo	Ações de controle são tomadas para restaurar a carga perdida do sistema.

No planejamento de segurança do sistema deve-se assegurar que níveis de tensão de pré e pós-contingência sejam aceitos para os estados do sistema sob estudo. As companhias têm desenvolvido critérios satisfatórios que especificam limites de tensão aceitáveis. Estes critérios são baseados nas tolerâncias dos equipamentos e embora eles assegurem tensões operacionais, geralmente não asseguram margens de estabilidade de tensão suficiente.

Como definido anteriormente, a margem para o colapso de tensão é definida como o maior aumento de carga que um sistema pode suportar a partir de um dado ponto de operação (IEEE-PSSC, 1999). Os critérios de estabilidade de tensão definem quanto de margem é considerada suficiente para a segurança de tensão do sistema de potência. O *Western System Coordinating Council* (WSCC), por exemplo, requer de seus membros uma garantia de pelo menos 5% de margem de potência ativa em qualquer situação de contingência simples (ABED, 1999), enquanto que no Brasil, o Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro (ONS) recomenda pelo menos 6% de margem nas mesmas condições (FTCT, 1999). O WSCC recomenda ainda que o levantamento das curvas PV e VQ seja a metodologia usada para assegurar que a margem mínima requerida seja atendida. Por sua vez, o Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro, considera o traçado da curva PV a metodologia mais

apropriada à determinação da margem de estabilidade e o traçado da curva VQ uma metodologia complementar para avaliar as margens de reativos e os locais para o reforço do sistema (ONS, 2001).

Para o traçado das curvas citadas, os métodos de fluxo de carga apresentam dificuldades numéricas devido à singularidade da matriz Jacobiana do fluxo de carga no ponto de máximo carregamento (PMC). O fluxo de carga continuado supera os problemas numéricos que surgem nas vizinhanças do ponto de máximo carregamento através da adição de equações parametrizadas (AJJARAPU; CHRISTY, 1992; CHIANG et al., 1995).

Do ponto de vista de uma avaliação *on-line*, o cálculo das margens de estabilidade usando o fluxo de carga ou o fluxo de carga continuado, consome um elevado tempo computacional quando um grande número de contingências deve ser analisado.

2.7 Método da continuação

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

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

$$\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda) = 0 \quad (2.2)$$

Ou ainda:

$$\begin{aligned} \lambda \mathbf{P}^{\text{esp}} - \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) &= \mathbf{0} \quad \text{para barras PQ e PV} \\ \lambda \mathbf{Q}^{\text{esp}} - \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) &= \mathbf{0} \quad \text{para barras PQ} \end{aligned} \quad (2.3)$$

onde \mathbf{V} é o vetor das magnitudes de tensões nodais, $\boldsymbol{\theta}$ é o vetor dos ângulos de fase nodais, λ é o fator de carregamento, $\mathbf{P}^{\text{esp}} = \mathbf{P}_{\text{ger}} - \mathbf{P}_{\text{carga}}$ é a diferença entre as potências ativas geradas e consumidas para as barras de carga (PQ) e de geração (PV) e $\mathbf{Q}^{\text{esp}} = \mathbf{Q}_{\text{ger}} - \mathbf{Q}_{\text{carga}}$ é a diferença entre a potência reativa gerada e a consumida para as barras PQ. No caso das barras

de geração, quando o limite de potência reativa (\mathbf{Q}_{lim}) é atingido, a barra passa a ser tratada da mesma forma que a barra de carga, sendo que $\mathbf{Q}_{\text{ger}} = \mathbf{Q}_{\text{lim}}$. Nesse caso, λ deverá multiplicar apenas o $\mathbf{Q}_{\text{carga}}$, isto é, $\mathbf{Q}^{\text{esp}} = \mathbf{Q}_{\text{ger}} - \lambda \mathbf{Q}_{\text{carga}}$. Para o carregamento do caso base, $\lambda = 1$. Para uma barra k qualquer, $\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})$ e $\mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})$ são dados por:

$$\begin{aligned} P_k(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) &= G_k V_k^2 - V_k \sum_{l \in \Omega_k} V_l (g_{kl} \cos \theta_{kl} + b_{kl} \text{sen} \theta_{kl}), k \in \text{PQ, PV} \\ Q_k(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) &= -B_k V_k^2 - V_k \sum_{l \in \Omega_k} V_l (g_{kl} \text{sen} \theta_{kl} - b_{kl} \cos \theta_{kl}), k \in \text{PQ}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

onde Ω_k é o conjunto de todas as barras diretamente conectadas à barra k . $(G_k + jB_k)$ é o elemento da diagonal (k,k) da matriz admitância nodal e $(g_{kl} + jb_{kl})$ corresponde à admitância série do ramo que conecta as barras k e l .

Nas equações (2.3) assume-se que o aumento de carga do sistema é proporcional ao caso base ($\lambda=1$) e que o fator de potência é mantido constante (TAYLOR, 1994; WSCC, 1998). A potência ativa P_k^{esp} e a potência reativa Q_k^{esp} poderiam também ser definidas como $C_{p,k}^{\text{esp}} \cdot S_k^{\text{esp}} \cdot \cos \varphi_k^{\text{esp}}$ e $C_{q,k}^{\text{esp}} \cdot S_k^{\text{esp}} \cdot \text{sen} \varphi_k^{\text{esp}}$, respectivamente, onde $C_{p,k}^{\text{esp}}$ e $C_{q,k}^{\text{esp}}$ são parâmetros prefixados usados para caracterizar um específico cenário de carga. Assim, seria possível realizar uma variação de carregamento individual, isto é, para cada barra do sistema, considerando para cada uma, um crescimento de carga com fatores de potência diferentes aos do caso base. Tradicionalmente, entretanto, assume-se que o aumento de carga de uma determinada área é feito com fator de potência constante e proporcional ao carregamento do caso base com modelo de carga de potência constante, visto que este fornece a condição de operação mais segura para o sistema (WSCC, 1998; CHIANG et al., 1999).

2.7.1 Método de Newton parametrizado por λ

As equações (2.3) podem ser resolvidas usando um método de fluxo de carga convencional, como o método de Newton, por exemplo, calculando as soluções para várias condições de carregamento. Isto é feito incrementando λ gradualmente a partir de $\lambda = 1$ (caso base) até um valor para o qual não haja solução (o cálculo do fluxo de carga não converge ou diverge). Neste caso, λ é tratado como um parâmetro (variável independente) no processo

iterativo de Newton. No caso em que λ é usado como parâmetro, a linearização das equações do fluxo de carga de acordo com o método de Newton fornece:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = -\mathbf{J} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

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

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

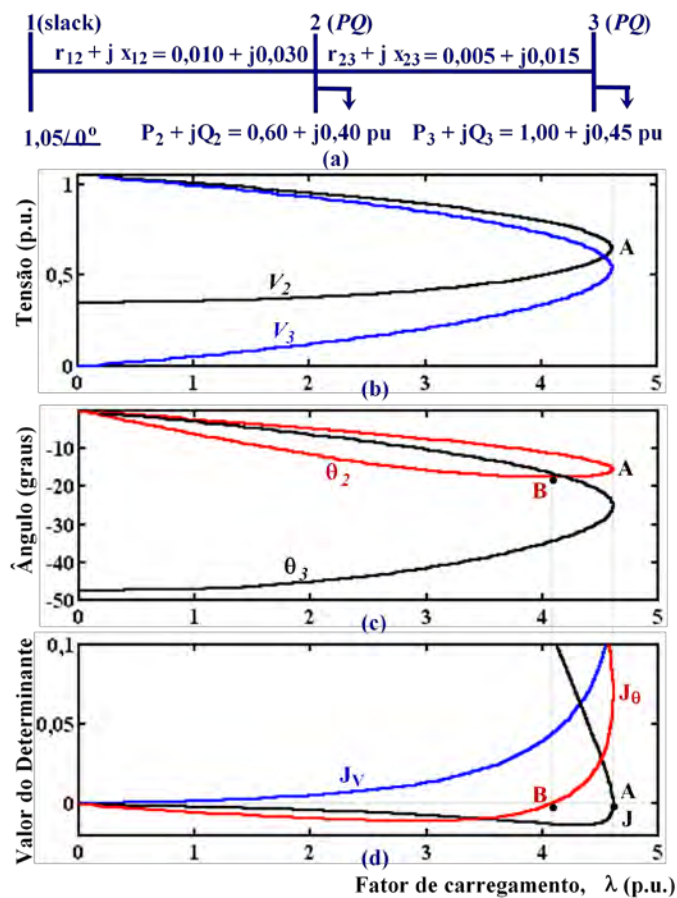


Figura 3 – (a) Diagrama unifilar sistema três barras, (b) magnitudes de tensão, (c) ângulos de tensão, (d) determinantes normalizados

Para esclarecer melhor a dificuldade que existe para se obter o ponto de máximo carregamento, ponto A, por meio do uso do método convencional de fluxo de carga de Newton, será apresentado a seguir o procedimento mais comum que consiste na obtenção da solução para $\lambda = 1$ (caso base) através da utilização de um fluxo de carga convencional. A predefinição de incrementos sucessivos para λ e a obtenção das respectivas soluções pelo fluxo de carga convencional escolhido, e de um controle de passo (em λ) que consiste na simples redução do passo todas as vezes que o processo numérico divergir, isto é, não encontrar uma solução. Portanto, esse procedimento também pode ser considerado como uma aplicação do método da continuação, uma vez que se utiliza, implicitamente, a técnica de previsão denominada de previsão trivial ou polinomial modificada de ordem zero (SEYDEL, 1994), a qual usa a solução atual (caso anterior convergido) e um incremento fixo no parâmetro da continuação escolhido (λ), como uma estimativa para a próxima solução. Este processo também será adotado nas próximas seções deste capítulo, quando da utilização de outros parâmetros (θ_k e V_k) para o traçado da curva PV. Observa-se também que, em geral, a não convergência do fluxo de carga é considerada como estando associada à existência de múltiplas soluções, ao método numérico adotado, ou a uma má inicialização.

A figura 4 mostra o traçado da curva PV para o mesmo sistema apresentado na figura 3(a). É possível se obter quase todos os pontos (soluções do fluxo de carga) da parte superior da curva PV, através das soluções do fluxo de carga para diferentes valores de λ usando o método convencional de Newton (equação (2.5)).

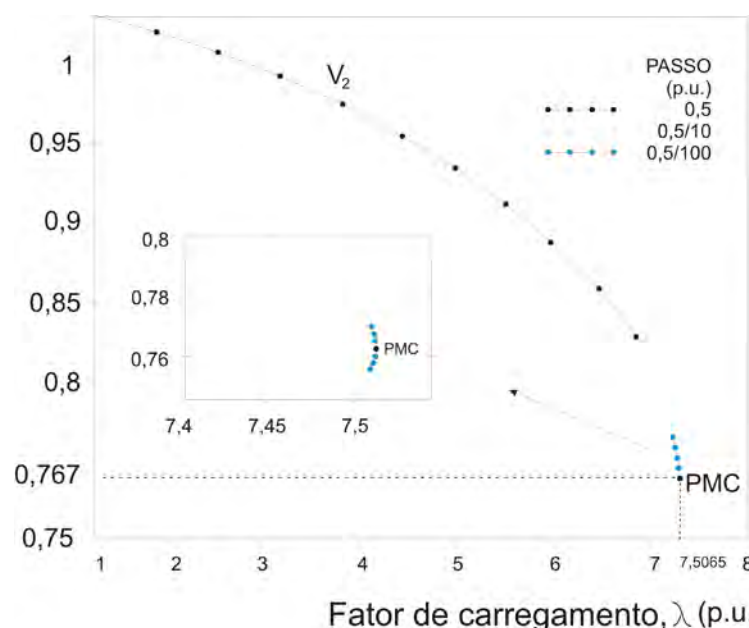


Figura 4 – Magnitude de tensão em função do fator de carregamento, traçado utilizando o método convencional de Newton, λ como parâmetro

Como podem ser verificados nesta figura, diferentes tamanhos de passos foram usados para λ durante o traçado da curva. Podem-se obter pontos de operação muito próximos ao ponto de máximo carregamento, desde que um bom controle do tamanho do passo seja usado. As reduções no tamanho do passo são feitas sempre que o processo de solução não converge (ou diverge) para um número de iterações predefinido. No caso deste exemplo foram adotadas 10 iterações.

Observa-se que o ponto de máximo carregamento está associado às limitações físicas da configuração da rede de potência, às condições da carga, à direção de aumento da carga, etc., e, portanto, sua determinação não deve ser baseada em uma limitação matemática de um método numérico.

Como mostrado na figura 3(d), no ponto de máximo carregamento a matriz Jacobiana (**J**) das equações do fluxo de carga torna-se singular e, conseqüentemente, os métodos convencionais apresentarão dificuldades numéricas devido ao mau condicionamento das matrizes. A singularidade da matriz Jacobiana no ponto de máximo carregamento é devido à redução de seu *rank*. Isto não significa que no ponto de máximo carregamento o fluxo de carga não tenha solução. Na verdade, esta solução existe, é única, e é bem definida. Porém, é necessário compensar a informação perdida com a redução do *rank*, para se obter a solução.

Em geral, isto é feito adicionando equações parametrizadas (SEYDEL, 1994). Assim, pontos muito próximos ao ponto de máximo carregamento podem ser obtidos se um bom controle do tamanho de passo é usado. Não obstante, dificuldades numéricas ocorrem no ponto de máximo carregamento e próximo a ele. Então, o sucesso de obtenção da solução do fluxo de carga dependerá de várias características do processo de solução das equações algébricas não lineares, como da existência da solução ou de múltiplas soluções, do método de solução, das condições iniciais, e também, da presença de singularidade. Assim, será sempre necessário ponderar se as situações de não convergências se devem a problemas numéricos, ou a características dos processos de solução usados ou ainda a limitações físicas do sistema. Para sistemas desconhecidos, as diferenças não são óbvias.

Diferentes implementações de métodos da continuação foram propostas para contornar as dificuldades apresentadas anteriormente, e assim, conseguir obter o ponto de máximo carregamento em sistemas de potência (AJJARAPU; CHRISTY, 1992; CAÑIZARES; ALVARADO, 1993; CHIANG et al., 1995). Os métodos da continuação são ferramentas úteis na obtenção de curvas de solução de equações algébricas não lineares, variando um parâmetro. Em geral, λ é considerado uma variável dependente e então, variado

automaticamente. Neste caso, o sistema de equações (2.3), cuja dimensão é $n = 2n_{PQ} + n_{PV}$ (n_{PQ} e n_{PV} correspondendo ao número de barras PQ e PV, respectivamente), apresenta agora $n+1$ incógnitas, e uma equação adicional é necessária. A diferença entre os métodos da continuação está na forma como esta nova variável é tratada, e em como a singularidade da matriz Jacobiana é evitada. A adição de equações parametrizadas tem se tornado um procedimento padrão (SEYDEL, 1994), e isto implicará em um aumento do tamanho da matriz. Por outro lado, qualquer uma das $n+1$ incógnitas pode ser definida como parâmetro. Seus valores (θ_k ou V_k) podem ser especificados e, então, esta equação pode ser usada para calcular a nova variável dependente λ . Desta forma, o sistema de equações (2.3) ficará com n equações e n incógnitas. Agora, a nova matriz Jacobiana diferirá da original na coluna k onde as derivadas das potências em relação à θ_k ou V_k serão substituídas pelas derivadas das potências em relação à nova variável dependente λ . Uma escolha formal do parâmetro da continuação depende da variável que tem a maior taxa de mudança próxima a uma dada solução. Enquanto a matriz tiver *rank* completo (igual a n), ela será não singular depois da remoção da coluna do respectivo parâmetro da continuação. Esta troca de variáveis corresponde a uma rotação de 90° no diagrama θ_k versus λ , ou V_k versus λ (SEYDEL, 1994).

2.7.2 Método de Newton parametrizado por V_k e θ_k

Como foi visto anteriormente, é necessária uma mudança de parâmetro para contornar as dificuldades numéricas devidas à singularidade da matriz Jacobiana no ponto de máximo carregamento. A nova matriz Jacobiana deve ser bem condicionada no ponto de máximo carregamento, e de preferência em toda sua vizinhança. De acordo com Arya e Verma (1996), as curvas PV completas podem ser obtidas usando uma magnitude de tensão como um parâmetro (variável independente) e o fator de carregamento λ como uma variável dependente. Ajjarapu e Christy (1992) mostraram que ângulos de tensão também podem ser escolhidos como parâmetros. Em geral, como pode ser visto nas figuras 3(b) e 3(c), os ângulos e as magnitudes das tensões das barras PQ estão continuamente decrescendo à medida que o carregamento se aproxima do ponto de máximo carregamento. Assim, um deles pode ser especificado e a respectiva solução encontrada. Considerando a magnitude de tensão

de uma barra k , V_k , como um parâmetro, a aplicação do método de Newton ao sistema de equações (2.3) resulta em:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P}{\Delta Q} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|cc} \mathbf{H} & \mathbf{N}_1 & -\mathbf{P}^{\text{esp}} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L}_1 & -\mathbf{Q}^{\text{esp}} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \frac{\Delta \theta}{\Delta \mathbf{V}'} \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{H} & \mathbf{N}' \\ \mathbf{M} & \mathbf{L}' \end{array} \right] \begin{bmatrix} \frac{\Delta \theta}{\Delta \mathbf{V}'} \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = -\mathbf{J}_V \begin{bmatrix} \frac{\Delta \theta}{\Delta \mathbf{V}'} \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

onde o vetor $\Delta \mathbf{V}'$ não contém o elemento ΔV_k , o qual é substituído por $\Delta \lambda$. As submatrizes \mathbf{N}' e \mathbf{L}' diferem das \mathbf{N} e \mathbf{L} da equação (2.5) apenas na coluna k onde as derivadas de \mathbf{P} e \mathbf{Q} com relação a V_k foram substituídas pelas derivadas com relação à nova variável λ . Desta forma, a nova matriz Jacobiana \mathbf{J}_V não apresentará singularidade no ponto de máximo carregamento, como pode ser observado na figura 3(d). A parametrização resulta em um método robusto não somente ao redor do ponto de máximo carregamento, mas ao longo de toda curva PV.

Considerando o ângulo de tensão de uma barra k , θ_k , como um parâmetro, a aplicação do método de Newton ao sistema de equações (2.3) resulta em:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P}{\Delta Q} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cc|c} \mathbf{H}_1 & -\mathbf{P}^{\text{esp}} & \mathbf{N} \\ \mathbf{M}_1 & -\mathbf{Q}^{\text{esp}} & \mathbf{L} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \frac{\Delta \theta'}{\Delta \lambda} \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{H}' & \mathbf{N} \\ \mathbf{M}' & \mathbf{L} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \frac{\Delta \theta'}{\Delta \lambda} \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} = -\mathbf{J}_\theta \begin{bmatrix} \frac{\Delta \theta'}{\Delta \lambda} \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

onde o vetor $\Delta \theta'$ não contém o elemento $\Delta \theta_k$, o qual é substituído por $\Delta \lambda$. As submatrizes \mathbf{H}' e \mathbf{M}' diferem de \mathbf{H} e \mathbf{M} da equação (2.5) apenas na coluna k onde as derivadas de \mathbf{P} e \mathbf{Q} com relação a θ_k foram substituídas pelas derivadas com relação à nova variável λ . Novamente, como pode ser visto na figura 3(d), a nova Jacobiana \mathbf{J}_θ não é singular no ponto A, mas somente no ponto B que está localizado na parte inferior da curva. Isto mostra que, no caso do exemplo do sistema de três barras da figura 3(a), a curva não pode ser completamente obtida se θ_2 é escolhido como um parâmetro, porque \mathbf{J}_θ torna-se singular no ponto B. Assim, quando a vizinhança do ponto B é alcançada, o método apresentará dificuldades numéricas e uma mudança de parâmetro será necessária. Pode-se observar na figura 3(d) que se θ_3 for adotado como parâmetro, a matriz Jacobiana \mathbf{J}_θ não será singular, para qualquer valor do fator de carregamento λ . Desta forma, toda a curva pode ser traçada.

2.7.3 Passo preditor

Conforme foi visto ao longo desse capítulo, uma vez encontrada a solução do sistema (2.2) para o caso base ($\theta_0, V_0, \lambda_0=1$), por um método convencional de fluxo de carga, um dos métodos parametrizados pode ser usado para calcular soluções adicionais até que o ponto de máximo carregamento seja alcançado.

Nos métodos da continuação em geral, após a obtenção de uma solução, um passo preditor é executado para encontrar uma estimativa para a próxima solução. Dentre vários preditores encontrados na literatura, o tangente (AJJARAPU; CHRISTY, 1992) e o secante (CHIANG et al., 1995) são os mais populares.

A figura 5 ilustra os passos do método da continuação com preditor tangente. A estimativa da próxima solução com esse preditor é realizada dando-se um passo, de tamanho apropriado, na direção do vetor tangente à curva PV calculado na solução atual.

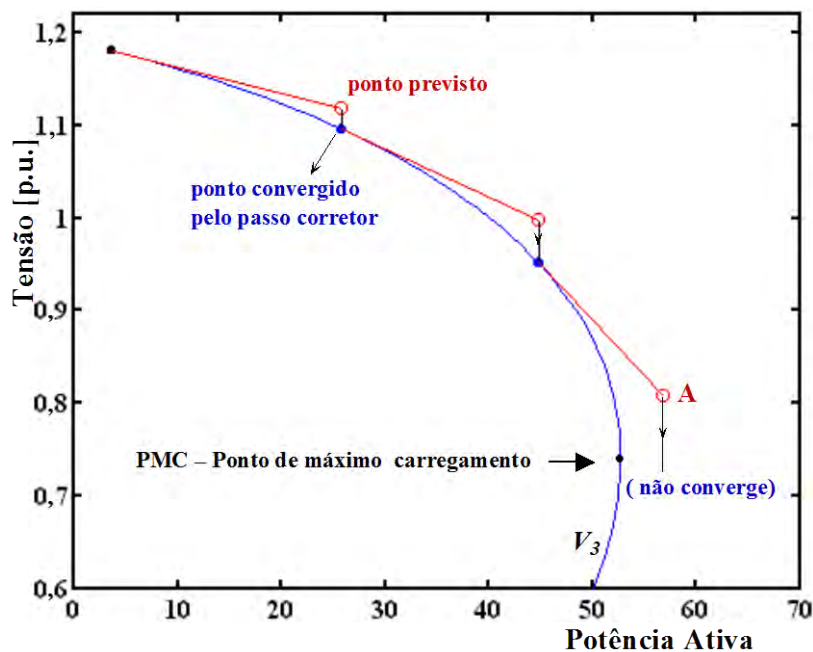


Figura 5 – Método da continuação com preditor tangente

O cálculo do vetor tangente é obtido tomando o diferencial de (2.2), e que posto na forma matricial, fornece:

$$\begin{bmatrix} G_{\theta} & G_V & -G_{\lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J & -G_{\lambda} \end{bmatrix} t = [0], \quad (2.8)$$

onde $\mathbf{G}_\theta = [\partial \mathbf{P} / \partial \boldsymbol{\theta} \quad \partial \mathbf{Q} / \partial \boldsymbol{\theta}]^T$, $\mathbf{G}_V = [\partial \mathbf{P} / \partial \mathbf{V} \quad \partial \mathbf{Q} / \partial \mathbf{V}]^T$, e $\mathbf{G}_\lambda = [\mathbf{P}^{\text{esp}} \quad \mathbf{Q}^{\text{esp}}]^T$. \mathbf{G}_θ e \mathbf{G}_V compõem a matriz Jacobiana (\mathbf{J}) do fluxo de carga convencional. Acresce-se a \mathbf{J} uma coluna ($-\mathbf{G}_\lambda$) correspondente à nova variável λ . O vetor \mathbf{t} é chamado de vetor tangente. Uma vez que o número de incógnitas é maior do que o número de equações, uma variável do vetor \mathbf{t} deve ser especificada com um valor diferente de zero. Esta variável é denominada de parâmetro da continuação. Uma nova equação ($\mathbf{e}_k \cdot \mathbf{t} = t_k = \pm 1$) é acrescida ao sistema de equações (2.2), que passa a ter a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_\theta & \mathbf{G}_V & -\mathbf{G}_\lambda \\ & \mathbf{e}_k & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\boldsymbol{\theta} \\ d\mathbf{V} \\ d\lambda \end{bmatrix} = \mathbf{J}_a \mathbf{t} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \pm 1 \end{bmatrix}, \quad (2.9)$$

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

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}^e \\ \mathbf{V}^e \\ \lambda^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}^j \\ \mathbf{V}^j \\ \lambda^j \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\boldsymbol{\theta} \\ d\mathbf{V} \\ d\lambda \end{bmatrix}, \quad (2.10)$$

onde o sobrescrito “e” indica estimativa, isto é, o vetor tangente é usado para obter uma estimativa para $\boldsymbol{\theta}$, \mathbf{V} , e λ a partir da solução atual j . O escalar σ define o tamanho do passo predictor. O tamanho do passo deve ser tal que a solução prevista esteja dentro do raio de convergência do passo corretor.

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

No caso do predictor secante, isto é, da técnica de previsão trivial ou polinomial modificada de ordem zero (CHIANG et al., 1995; SEYDEL, 1994), utiliza-se a solução atual e um incremento fixo no parâmetro (λ , θ_k ou V_k) como uma estimativa para a próxima

solução. Outra possibilidade é utilizar o carregamento λ , a magnitude de tensão V_k ou o ângulo de fase da tensão θ_k , e um preditor secante que usa um polinômio de primeira ordem (uma reta) passando através da solução atual e da anterior, para prever a próxima solução. Portanto, conforme se pode constatar na figura 6, este preditor é uma aproximação do vetor tangente. Note que, quanto mais próximo os dois pontos estiverem (solução atual e anterior), melhor será a aproximação do vetor secante em relação ao vetor tangente. Entretanto isto implicaria no cálculo de um maior número de pontos da curva para se obter o ponto de máximo carregamento. Por outro lado, pontos muito distantes um do outro produziriam estimativas muito imprecisas, as quais poderiam dificultar a convergência do passo corretor. As principais vantagens dos preditores secantes é que a sua implementação computacional é relativamente mais simples, e não apresentam problemas relacionados à singularidade da matriz Jacobiana.

A figura 6 mostra uma comparação entre os preditores tangente e secante. A principal vantagem do preditor secante de primeira ordem, quando comparado com o preditor trivial, é a redução do número de iterações do passo corretor.

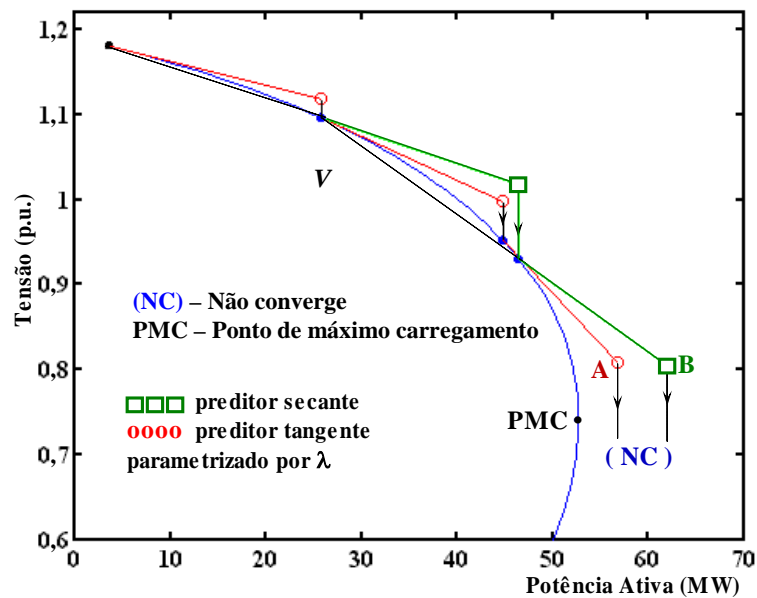


Figura 6 - Comparação entre os métodos da continuação com preditor tangente e secante parametrizados por λ

O vetor secante $\mathbf{x} = [\Delta\theta \ \Delta V \ \Delta\lambda]^T$ pode ser calculado após a obtenção de pelo menos duas soluções, ou por um método convencional, ou por um dos métodos apresentados, usando a técnica de previsão trivial. Em seguida, a estimativa para a próxima solução será dada pela equação (2.11).

$$\begin{bmatrix} \theta^e \\ \mathbf{V}^e \\ \lambda^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^j \\ \mathbf{V}^j \\ \lambda^j \end{bmatrix} + \sigma \mathbf{x} \quad (2.11)$$

2.7.4 Controle do tamanho do passo preditor (σ)

Como mostrado na figura 4, a eficiência no traçado da curva PV está relacionada com a estratégia de controle do tamanho do passo λ . Em geral, esta escolha é dependente do sistema em estudo. Na prática, o tamanho do passo apropriado é definido após um processo de tentativas e erros. Para sistemas com baixo carregamento, uma variação da carga resultará numa pequena mudança do ponto de operação, e, portanto, o tamanho do passo pode ser maior. Já em um sistema altamente carregado, uma pequena variação na carga resulta em grandes variações do ponto de operação e, neste caso, o tamanho do passo deve ser menor. O ideal seria se o tamanho do passo se adaptasse ao comportamento da convergência da solução atual, a qual estará particularmente relacionada com o desempenho do algoritmo usado pelo passo corretor. Portanto, a flexibilidade do controle de passo será decisiva no desempenho do algoritmo corretor. Um método simples para o controle de passo é baseado no número de iterações do passo corretor (SEYDEL, 1994). Se esse número de iterações for baixo, o sistema encontra-se na condição de carga leve, e o passo para o cálculo do próximo ponto de operação pode ser maior. Caso este número seja alto, o sistema estará numa região de operação de alto carregamento (carga pesada) e o tamanho do passo para o cálculo do próximo ponto de operação, deve ser reduzido. Entretanto, este procedimento pode falhar na identificação do ponto de máximo carregamento, uma vez que o aumento do número de iterações pode ser maior, devido à atuação de diversos limites operacionais de equipamentos.

No sistema da figura 3, quando do uso da tensão (V_2) como parâmetro, por exemplo, a escolha de um passo fixo, $-0,01$ p.u. resulta em um controle automático para λ durante todo o traçado da curva PV. Em particular, as variações em λ diminuem à medida que o traçado se aproxima do ponto de máximo carregamento (figura 7). Assim, não será necessário realizar nenhum procedimento adicional de ajuste do passo. Isto ocorre porque, em geral, um passo fixo em V (ou θ) corresponde a um passo grande em λ durante as condições de carga leve e

normal, onde V (ou θ) varia pouco, e num passo reduzido em condições de alto carregamento, uma vez que nesta região, os parâmetros V (ou θ) variam muito.

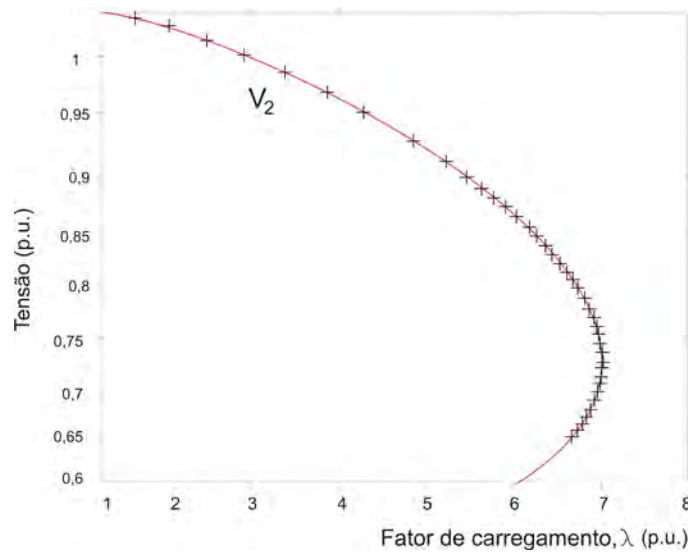


Figura 7 – Curva PV utilizando V_2 como parâmetro com passos fixos de -0,01 p.u.

Outro aspecto que deve ser levado em conta é que, dependendo da análise que se está efetuando, por exemplo, a análise de contingências, o ponto de máximo carregamento poderá ocorrer para baixos valores de carregamento, conforme se pode constatar na figura 8.

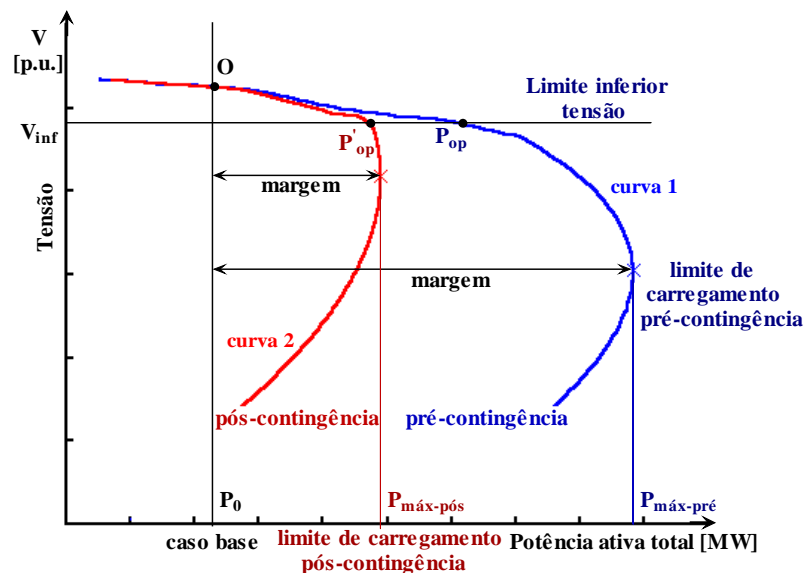


Figura 8 - Curvas PV de pré e pós-contingência

Outro método de controle do tamanho do passo é baseado no vetor tangente normalizado (ZAMBRONI; CAÑIZARES; QUINTANA, 1997). O tamanho do passo é definido como:

$$\sigma = \sigma^0 / \|t\|_2 \quad (2.12)$$

onde $\|t\|_2$ é a norma Euclidiana do vetor tangente $[\mathbf{d}\theta \ \mathbf{dV} \ \mathbf{d}\lambda]^T$, e σ^0 é um escalar predefinido. Conforme o sistema torna-se carregado, a magnitude do vetor tangente aumenta e σ diminui. A eficiência do processo depende da boa escolha de σ^0 e seu valor dependerá do sistema. Cañizares e Alvarado (1993) alcançaram bons resultados assumindo $\sigma^0 = 1$. A equação (2.12) também pode ser utilizada na técnica de previsão pelo vetor secante de primeira ordem.

2.7.5 Mudança de parâmetro

Uma mudança no parâmetro da continuação pode ser necessária durante o processo de traçado da curva PV. Usando V_k ou θ_k , a nova matriz Jacobiana pode tornar-se singular na parte inferior ou superior da curva PV. À medida que a curvatura do caminho de soluções não é conhecida a priori, é muito difícil ou até mesmo impossível, identificar qual magnitude ou ângulo de tensão é mais apropriada para ser usada como parâmetro, na obtenção de todos os pontos da curva PV. Portanto, é necessária uma definição de como se efetuará a mudança de parâmetro durante o processo de cálculo.

O objetivo é remover a singularidade da matriz Jacobiana através da adição, por meio de uma equação, da informação perdida com a redução do *rank* da matriz no ponto de máximo carregamento. Quando se usa V_k ou θ_k como parâmetro, uma forma muito simples de contornar este problema é usar uma técnica conhecida como parametrização local (AJJARAPU; CHRISTY; 1992, SEYDEL, 1994), que consiste na mudança do parâmetro próximo ao ponto de máximo carregamento.

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

$$p \leftarrow \max\{|t_1|, |t_2|, \dots, |t_{n+1}|\} \quad (2.13)$$

Na técnica que se utiliza o preditor secante, p é escolhido como sendo o componente que apresentar a máxima variação relativa (SEYDEL, 1994):

$$p \leftarrow \max \left\{ \left(\frac{|\theta^{j+1} - \theta^j|}{|\theta^{j+1}|} \right), \left(\frac{|V^{j+1} - V^j|}{|V^{j+1}|} \right), \left(\frac{|\lambda^{j+1} - \lambda^j|}{|\lambda^{j+1}|} \right) \right\} \quad (2.14)$$

onde j é o ponto atual da curva. É esperado que a escolha de p baseada nas equações (2.13) e (2.14) resulte em um bom desempenho do algoritmo. A experiência com o método do vetor tangente utilizando a equação (2.13) tem demonstrado que, ao aproximar-se do ponto de máximo carregamento, p muda de λ para a tensão que apresenta a maior variação, retornando a λ após alguns pontos. O uso deste método para a escolha automática de p não tem apresentado dificuldades mesmo para sistemas altamente compensados (CAÑIZARES; ALVARADO, 1993).

2.7.6 Passo corretor

Uma vez predefino o incremento fixo no parâmetro (V_k , θ_k ou λ) como uma estimativa para a próxima solução, é necessário realizar a correção a partir da solução atual para se obter a próxima solução. Em geral, o tamanho do passo preditor é tal que poucas iterações serão necessárias para obter a solução exata dentro da precisão desejada. A solução correta é obtida resolvendo-se a equação (2.5) quando λ é usado como parâmetro, a equação (2.6) quando V_k é usado como parâmetro e a equação (2.7) quando θ_k é usado como parâmetro.

2.8 Principais métodos existentes relacionados à análise de contingências

Muitos trabalhos relevantes têm procurado um algoritmo rápido e preciso de seleção e classificação de contingências, de acordo com o grau de severidade da mesma. O objetivo é fornecer uma lista reduzida de contingências consideradas como críticas, a partir de uma ampla lista de contingências possíveis, e estimar rápida e precisamente a margem de estabilidade de tensão para essas contingências.

2.8.1 Método utilizando múltiplas soluções do fluxo de carga

Na referência Yokoyama e Sekine (1989) com o objetivo de classificar contingências, foi proposto o uso de múltiplas soluções do fluxo de carga. Este método calcula uma margem aproximada usando gradientes de tensão determinados em um ponto de equilíbrio estável (PEE) e no correspondente ponto de equilíbrio instável (PEI) da curva PV (figura 9). A margem obtida é uma aproximação de primeira ordem da margem de estabilidade de tensão.

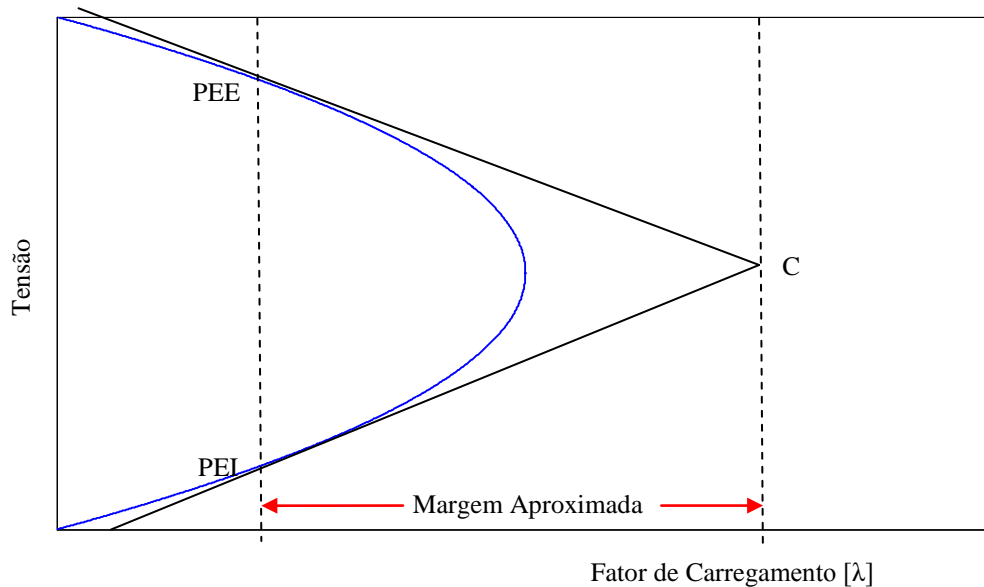


Figura 9 – Aproximação da margem de estabilidade de tensão

Este método tem como base o fato de que em um sistema fortemente carregado existem duas soluções do fluxo de carga muito próximas entre si, uma estável chamada de solução de alta tensão (PEE) e outra instável denominada solução de baixa tensão (PEI). Para se obter a solução de baixa tensão, usa-se um cálculo de fluxo de carga em coordenadas polares (YOKOYAMA; SEKINE, 1980). Para uma barra PV as incógnitas são a potência reativa e o ângulo de fase da tensão, e para uma barra PQ, a equação de balanço de potência é manipulada de forma que a magnitude e o ângulo de fase da tensão da barra são as incógnitas. A equação de quarta ordem em magnitude de tensão é então resolvida. Somente duas, das quatro soluções são possíveis, visto que a magnitude de tensão é positiva. Uma destas

soluções corresponde à solução de alta tensão e a outra é utilizada como ponto inicial de um fluxo de carga Newton para o cálculo da solução de baixa tensão.

Resultados de testes realizados em Ejebe et al. (1996) em um sistema com 234 barras e 442 linhas mostram que, comparado a um método de fluxo de carga continuado, a classificação das contingências deste método é razoavelmente boa.

2.8.2 Método da Função Teste

O Método da Função Teste (CHIANG; JUMEAU, 1995) tem a finalidade de determinar o valor do fator de carregamento λ no ponto de colapso de tensão (λ^*). Este método é baseado nos conceitos introduzidos por Seydel (1994). Uma função denominada “função teste” é usada para assegurar que os pontos de bifurcação (pontos de colapso de tensão) não sejam ignorados durante o traçado da curva PV quando do uso do método do fluxo de carga continuado. A ideia básica é usar uma “função teste” $t(x, \lambda)$ para determinar a existência de pontos de bifurcação delimitados por duas soluções (x_1, λ_1) e (x_2, λ_2) . A função teste possui duas características: (i) ela é função de x e λ e (ii) ela se anula no ponto de bifurcação λ^* . Seydel (1994) sugere que esta função seja uma função parabólica simétrica em relação ao eixo λ . Na referência (CHIANG; JUMEAU, 1995) foram realizadas simulações usando um método da continuação, as quais mostraram que a “função teste” pode ser aproximadamente quadrática quando ocorre uma mudança de demanda ativa ou reativa em uma barra simples ou a função pode ser ajustada por uma função de quarta ordem quando ocorre uma mudança de demanda ativa ou reativa em um conjunto de barras. Sendo assim, o valor do fator de carregamento no ponto de colapso de tensão λ^* pode ser calculado por um modelo de função quadrática ou por um modelo de função de quarta ordem.

Testes realizados em Ejebe et al. (1996) com este método para um sistema de 234 barras e 442 linhas mostraram que o mesmo não apresenta resultados satisfatórios, comparados aos resultados obtidos por um método de fluxo de carga continuado.

2.8.3 Método de Ajuste da Curva QV

O Método de Ajuste da Curva QV reportado na referência (FOSSO et al., 1993) é um método rápido para o cálculo aproximado do limite ao colapso de tensão baseado no fluxo de carga e ajuste de curva. Este método é apenas aplicado no cálculo da margem de potência reativa ao ponto de colapso de tensão. Ele determina a margem a partir de uma curva QV obtida para uma barra do sistema de potência, com relação à mudança de potência reativa desta barra.

A ideia básica é usar três pontos conhecidos na curva e então, ajustar uma curva apropriada aos três pontos (figura 10). Na figura 10 o ponto P_1 corresponde à condição do caso base, P_2 é a origem do sistema de eixos e o ponto P_3 é obtido de uma solução de fluxo de carga com a barra de interesse tratada como uma barra PV e sua magnitude de tensão estimada em um valor qualquer. O valor da potência reativa obtida para este valor de tensão estimado é o terceiro ponto. Com esses três pontos, a curva aproximada pode ser traçada.

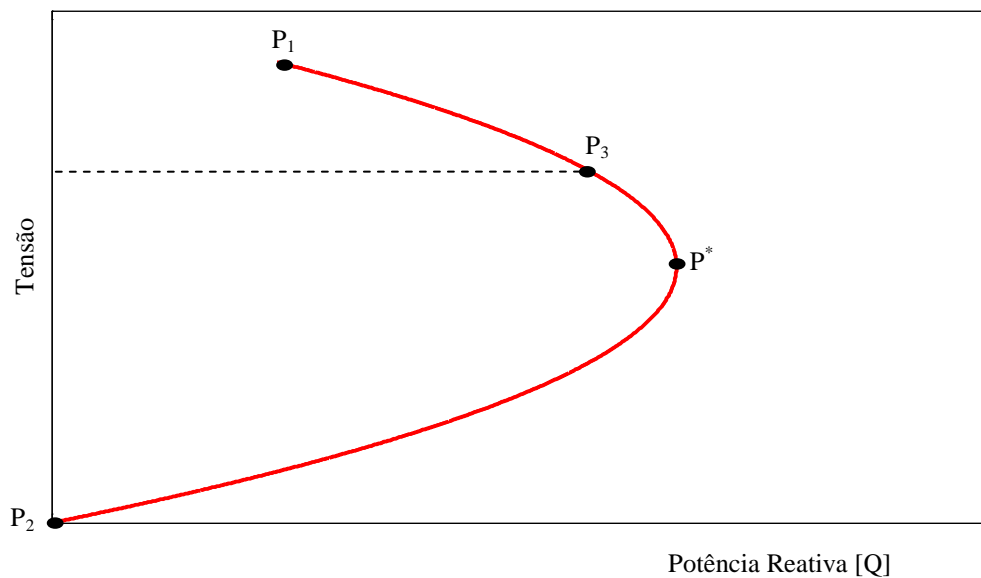


Figura 10 – Determinação aproximada da margem de potência reativa de uma barra

A desvantagem deste método é que a mudança de potência reativa é aplicada somente em uma única barra e as barras vizinhas podem ser estressadas, o que não condiz com a realidade.

2.8.4 Método de Ajuste de Curva Generalizado

Para superar a desvantagem do método apresentado na seção 2.8.3, o Método do Ajuste de Curva Generalizado apresentado em Ejebe et al. (1996) determina uma aproximação do “nose” da curva PV. O método usa uma técnica de ajuste de curva para calcular a parte estável da curva PV e fornecer uma aproximação do ponto de colapso de tensão. Isso é feito utilizando um modelo matemático aproximado da parte estável da curva, dado por um polinômio de grau n . No caso da curva PV, esse polinômio pode ser aproximado por uma função quadrática. Para ajustar a curva, três pontos de equilíbrio estável são determinados sobre a curva. Um deles é obtido a partir da solução do caso base (x_1, λ_1) . Os outros dois pontos podem ser calculados por um fluxo de carga continuado, incrementando o valor do fator de carregamento λ tal que $\lambda_3 > \lambda_2 > \lambda_1$. Os três pontos mostrados na figura 11 são então usados para o ajuste da parte estável da curva.

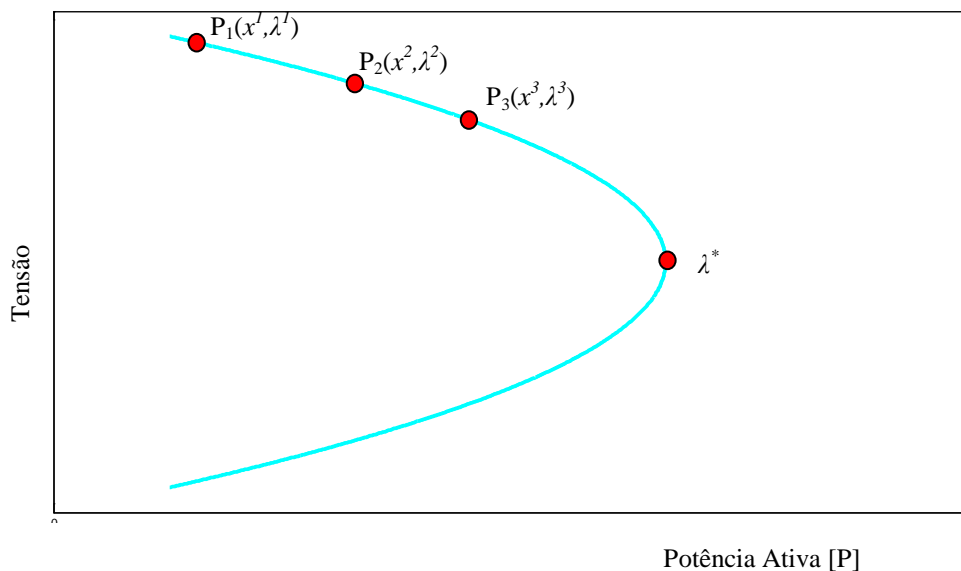


Figura 11 – Ilustração do método de ajuste de curva generalizado

Embora o método proposto em Ejebe et al. (1996) apresente uma boa precisão na classificação de contingências, as margens calculadas possuem erros notáveis. A imprecisão do método está relacionada ao uso de somente três pontos para se calcular o ponto de colapso

de tensão λ^* . Quanto maior a distância entre o ponto de colapso λ^* e o ponto λ_3 , maior será o erro. Isso mostra que o método é altamente dependente da posição dos três pontos selecionados, conforme Jia (1999).

2.8.5 Método do Look-Ahead

O Método da Tensão Prevista (CHIANG; WANG; FLUECK, 1997) é baseado na técnica do fluxo de carga continuado e na teoria da bifurcação “sela-nó”. Iniciando de uma solução do fluxo de carga, por exemplo, x_1 , com o correspondente fator de carregamento λ_1 , calcula-se outro ponto de operação (x_2, λ_2) , com $\lambda_2 > \lambda_1$, através do método apresentado na referência (CHIANG et al., 1995). Calcula-se a seguir a derivada (\dot{x}_2) de x_2 em relação à λ_2 . A seguir seleciona-se a barra que apresenta a maior queda na magnitude de tensão que é então usada para se ajustar à curva da qual será obtida a margem de carregamento. Define-se então o modelo matemático de uma função quadrática relacionando o fator de carregamento λ e a magnitude de tensão da barra selecionada. Os parâmetros desta função são então determinados utilizando-se os dois pontos anteriormente calculados e a derivada do segundo ponto (\dot{x}_2) . A margem é finalmente calculada baseando-se nos parâmetros desta função quadrática.

Resultados de testes de contingências, realizados em um sistema de 39 barras, mostram que o erro máximo nas margens de carregamento não supera 5%, se comparado às margens calculadas pelo método apresentado na referência (CHIANG et al., 1995).

A principal desvantagem deste método é ser fortemente dependente da forma da curva PV, podendo falhar nos casos em que são considerados limites de *tap* de transformadores (OLTC) e limites de potência reativa nas barras de geração. Se o segundo ponto (x_2, λ_2) está distante do ponto de colapso de tensão os resultados não serão precisos, e na prática, é muito difícil saber se este segundo ponto está próximo ou não do ponto de colapso.

2.8.6 Método do Índice de Suporte de Reativo (RSI) e Filtragem Iterativa (IF)

O método do Índice de Suporte de Reativo e Filtragem Iterativa é apresentado na referência (VAAHEDI et al., 1999). O principal objetivo do método é reduzir uma ampla lista de contingências a uma pequena lista, com apenas as contingências de interesse na análise de segurança. Nesta lista estarão presentes apenas as contingências consideradas severas ao sistema. Esses métodos são baseados em cálculos de fluxo de carga.

O Índice de Suporte de Reativo (RSI) originou-se de outro método denominado Índice de Compensação de Reativo (RCI). O método do Índice de Compensação de Reativo é baseado na ideia de que a diferença existente entre o “nose” da curva QV de pré-contingência e o “nose” desta mesma curva de pós-contingência pode ser comparada ao total de injeção de potência reativa requerida nas barras de carga de modo a se estabelecer níveis de tensões similares para ambos os casos (figura 12). Para o cálculo deste índice, fontes fictícias de reativos são inseridas nas barras de carga com tensão ajustada para o mesmo valor da tensão desta barra.

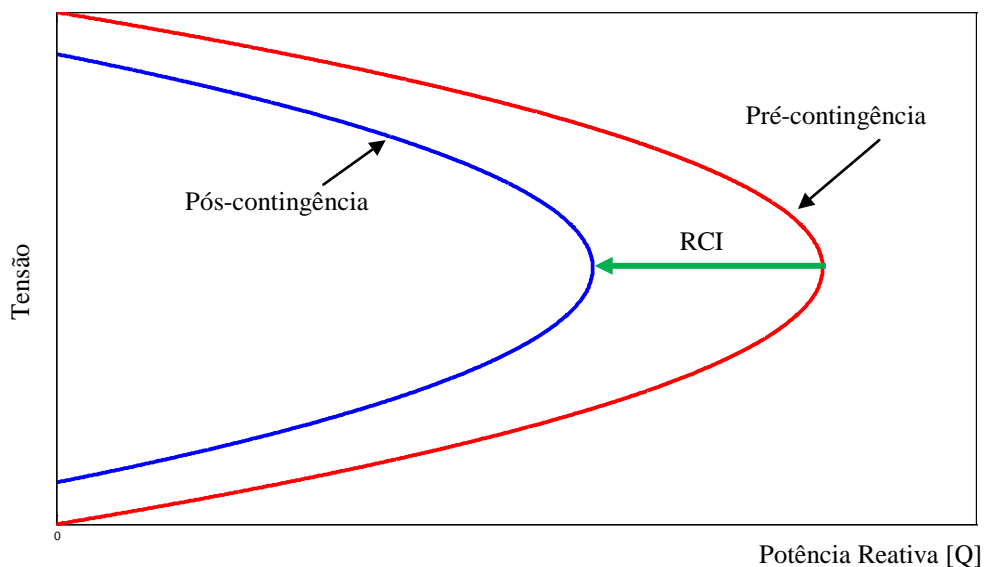


Figura 12 – Índice de compensação de reativo (RCI)

Sem a necessidade de fontes fictícias de reativos, surgiu o método do Índice de Suporte de Reativo em substituição ao Índice de Compensação de Reativo. A ideia básica do Índice de

Suporte de Reativo é determinar um grau de severidade para dada contingência, relacionando-o à quantidade extra de potência reativa que um sistema necessita para atender novamente a carga original após a contingência. Essa quantidade de potência reativa adicional é medida a partir das unidades de geração de reativos do sistema. Este método apresentou resultados mais satisfatórios do que o método do Índice de Compensação de Reativos. Para se estabelecer esta geração extra, os limites de reativos dessas unidades são ignorados no fluxo de carga. A figura 13 ilustra o Índice de Suporte de Reativo.

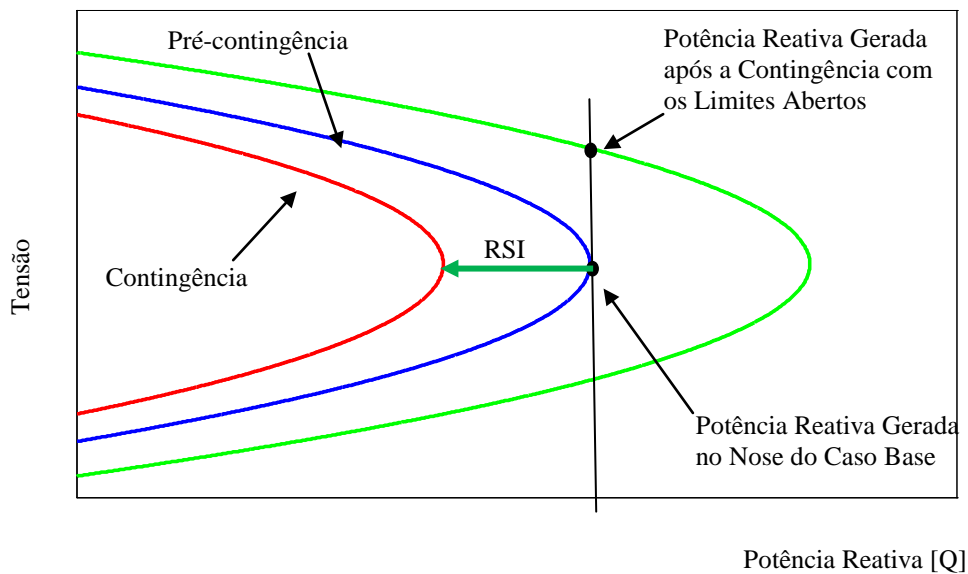


Figura 13 – Índice de suporte de reativo (RSI)

O método do Índice de Suporte de Reativo foi aplicado a um sistema de 1398 barras e 2295 ramos, com a simulação de 670 contingências, e a outro sistema de 1645 barras e 2299 ramos com 202 contingências simuladas. Os resultados foram satisfatórios comparados com os valores obtidos por um método de fluxo de carga continuado para os mesmos sistemas e condições. Os testes mostraram, porém, que algumas contingências não são classificadas corretamente por este método.

Para se assegurar que as más classificações de contingências críticas não ocorram, foi desenvolvido o método da Filtragem Iterativa. Como o próprio nome diz, esse método filtra as contingências que podem levar riscos ao sistema para um determinado nível de carregamento.

A figura 14 mostra uma série de curvas QV onde uma delas representa a curva de condição de pré-contingência (caso base) e as demais curvas com contingências sendo aplicadas.

A curva mais próxima da curva de pré-contingência apresenta um menor grau de severidade de contingência, enquanto que a mais distante representa uma contingência com maior severidade. Sendo assim as contingências podem ser classificadas em quatro graus de severidade: muito pesada, pesada, leve e muito leve.

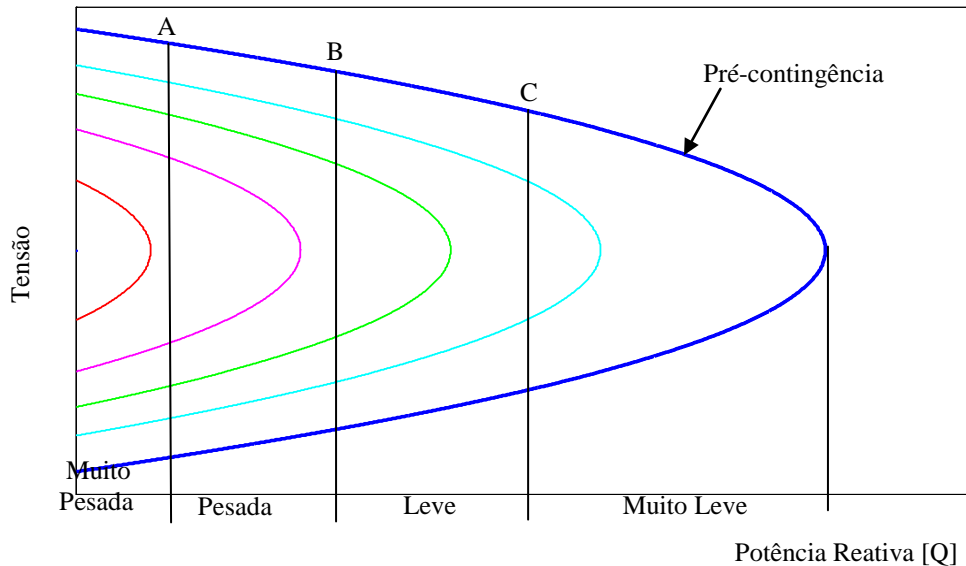


Figura 14 – Filtragem iterativa

Resolvendo um fluxo de carga no ponto C da curva de pré-contingência, por exemplo, para várias contingências, serão classificadas com o grau de muito leves, apenas aquelas em que o fluxo de carga converge. Caso contrário, estarão em um nível superior (leve). Repetindo o procedimento para o ponto B, as que convergirem terão classificação como leve e as que não convergirem passarão para o próximo nível (pesada), e assim sucessivamente.

O método foi aplicado aos mesmos sistemas onde foi aplicado o Índice de Suporte de Reativo, ou seja, sistema com 1398 barras e 2295 ramos, com a simulação de 670 contingências e o sistema com 1645 barras e 2299 ramos, com a simulação de 202 contingências. Para o primeiro sistema, onde foram simuladas 670 contingências, o método de Filtragem Iterativa necessitou de 853 iterações do fluxo de carga, ou seja, 1,27 iterações por contingência. Já para o sistema com a simulação de 202 contingências foram necessárias 401 iterações do fluxo de carga (1,98 iterações por contingência).

Para os mesmos sistemas, o método do Índice de Suporte de Reativo foi combinado com o método de Filtragem Iterativa, eliminando com isso a má classificação de contingências críticas. Assim sendo, o método do Índice de Suporte de Reativo pode ser usado em casos onde algum erro de classificação de contingências é aceito. Por outro lado, para sistemas onde

uma lista exata de contingências críticas é necessária, deve-se combinar o método do Índice de Suporte de Reativo com o método de Filtragem Iterativa (VAAHEDI et al., 1999).

2.8.7 Aplicação de índices de proximidade ao limite de estabilidade de tensão na seleção de contingências

Em Quintela (2002) é apresentado um método para classificação de contingências em relação à estabilidade de tensão em tempo real. Essa classificação é baseada em índices de performance (IP) relacionados a índices de proximidade à estabilidade de tensão baseados em ramos. O índice de performance é um escalar que reflete o montante de violações ou variações na margem de estabilidade que ocorrerá caso a contingência considerada venha a ocorrer. É a medida de quanto uma contingência em particular pode afetar o sistema de potência. As contingências que possuem maiores valores do índice de performance serão as mais severas.

Os índices de estabilidade de tensão podem ser calculados eficientemente, o que torna suas utilizações em análise de segurança muito atraentes. Estes métodos geralmente utilizam técnicas de otimização, fluxo de carga ou análise de sensibilidade. A primeira técnica identifica o ponto de bifurcação diretamente pela maximização da carga reativa que pode ser fornecida. Os métodos que utilizam fluxo de carga são baseados no aumento de carga (curva PV) ou na programação de uma série de tensões sobre um condensador síncrono fictício (curva VQ). Nos métodos de sensibilidade, as tensões monitoradas são determinadas pelo aumento de carga e determina-se então, as grandezas relevantes através da análise de sensibilidade (QUINTELA, 2002).

O método proposto em Quintela (2002) consiste em, conhecida uma lista de contingências *off-line*, classificar de acordo com o índice de performance as contingências mais severas em relação à estabilidade de tensão. O algoritmo do método é descrito a seguir.

- i. Armazena alguns dados da rede original tais como: violação de reativos, tipo das barras, injeções líquidas das potências ativa e reativa, magnitude e ângulo das tensões;
- ii. Leitura do ramo a ser analisado na lista predefinida de contingências;

- Caso haja contingência a ser simulada: modifica-se o estado do ramo a ser contingenciado, do estado normal (ramo fechado) para o estado aberto (ramo excluído) e segue para o passo iii;
 - Caso contrário: segue para o passo x;
- iii. Recuperação dos dados armazenados no passo i;
 - iv. Construção da matriz admitância (Y) para a nova rede (sem o ramo), no intuito de calcular o fluxo de carga para obter o estado contingenciado;
 - v. Obtenção do estado pós-contingência que pode ser obtido através de uma das seguintes opções:
 - Do fluxo de carga Newton até a convergência;
 - De apenas uma iteração do fluxo de carga Newton;
 - vi. Obtenção dos índices de estabilidade de tensão para cada ramo do sistema;
 - vii. Cálculo dos índices de performance para cada contingência analisada, em função dos índices de estabilidade de tensão;
 - viii. Religação do ramo;
 - ix. Volta ao passo ii;
 - x. Ordenação das contingências pelos índices de performance.

A principal limitação do método está no fato de ter que analisar a união do índice de performance ativo e reativo. A obtenção de um índice de estabilidade de tensão único, e conseqüentemente um índice de performance, conduziria a uma economia de tempo computacional (QUINTELA, 2002).

2.8.8 Cálculo rápido de margens de pós-contingência

Na referência Feng e Xu (2000) é proposta uma técnica onde a margem PV é determinada calculando-se a quantidade de carga que deve ser cortada para se manter a estabilidade de tensão do sistema elétrico de potência.

Um sistema de potência sem contingência (caso base) é capaz de absorver certa quantidade de aumento de carga. Quando uma contingência é aplicada a esse sistema, cargas devem ser cortadas para se manter a estabilidade de tensão. Se essa quantidade de carga cortada pode ser

determinada, a margem de pós-contingência será igual à margem do caso base menos a quantidade de carga cortada. Em outras palavras, o ponto de máximo carregamento da curva PV de pós-contingência é calculado partindo-se do ponto de máximo carregamento da curva PV do caso base, como mostra a figura 15. Nesta figura o fator de carregamento no ponto de máximo carregamento do caso base é (λ_0). O método apresentado na referência (FENG; XU, 2000) tenta determinar o fator de carregamento λ_1 , associado à contingência C_1 , obtendo desta forma a margem do sistema associada a essa contingência. Na figura, $\Delta\lambda_1$ é proporcional à quantidade de carga cortada, associada à contingência C_1 . Desta mesma forma podem-se determinar os fatores de carregamento de demais contingências aplicadas ao sistema ($\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \dots, \lambda_n$).

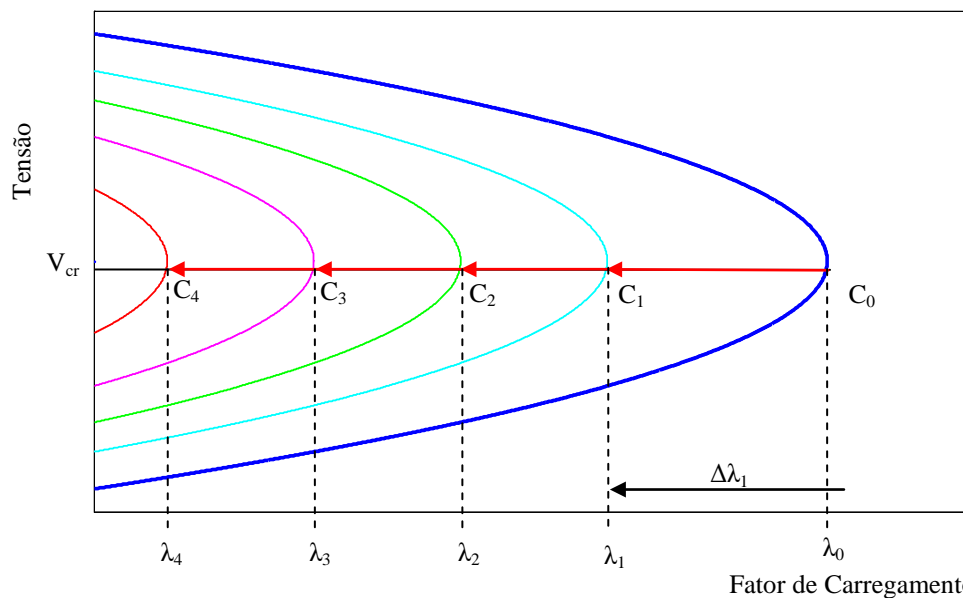


Figura 15 – Ilustração do processo para cálculo dos pontos de máximo carregamento de pós-contingência

Na técnica proposta na referência Feng e Xu (2000), determina-se primeiramente o ponto de máximo carregamento de pré-contingência ($PMC_{pré}$) com um fluxo de carga continuado. A seguir define-se uma barra de referência cuja magnitude de tensão de pós-contingência será fixada (adotada como parâmetro no fluxo de carga continuado), enquanto que o fator de carregamento λ será considerado como variável no fluxo de carga continuado. A partir dessas considerações, aplica-se a contingência e calcula-se o ponto de máximo carregamento de pós-contingência ($PMC_{pós}$) e a respectiva margem. Nos casos em que esse procedimento falhar, como seria o caso da curva de pós-contingência da figura 16, um método de Newton

modificado é usado para encontrar uma barra de referência e sua respectiva magnitude de tensão para um ponto próximo ao ponto de máximo carregamento de pós-contingência.

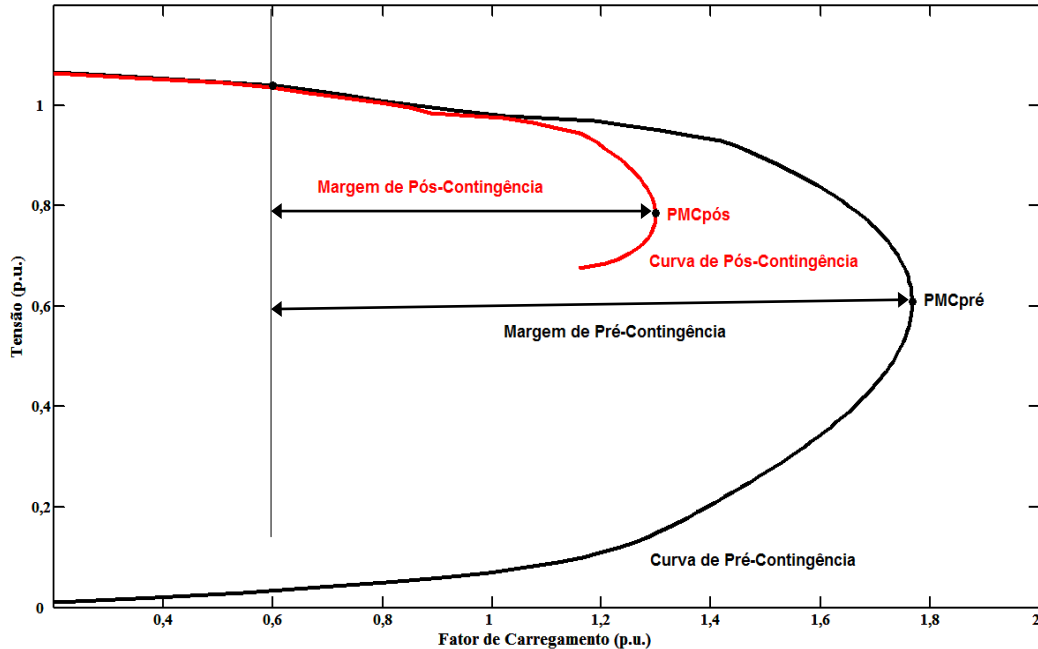


Figura 16 – Margens de pré e pós-contingência

A tensão da barra de referência obtida por este método de Newton modificado pode ser uma aproximação do valor correto. O valor obtido pode estar próximo ao valor do ponto de máximo carregamento de pós-contingência. Sendo assim, um refinamento adicional pode ser necessário para se obter o valor exato. Esse refinamento é realizado por um processo de solução da curva PV iniciando no ponto de solução estimado ($C_1^{(1)}$ ou $C_2^{(1)}$ – figura 17) e como esses pontos estão próximos do ponto exato, poucas iterações do fluxo de carga são necessárias.

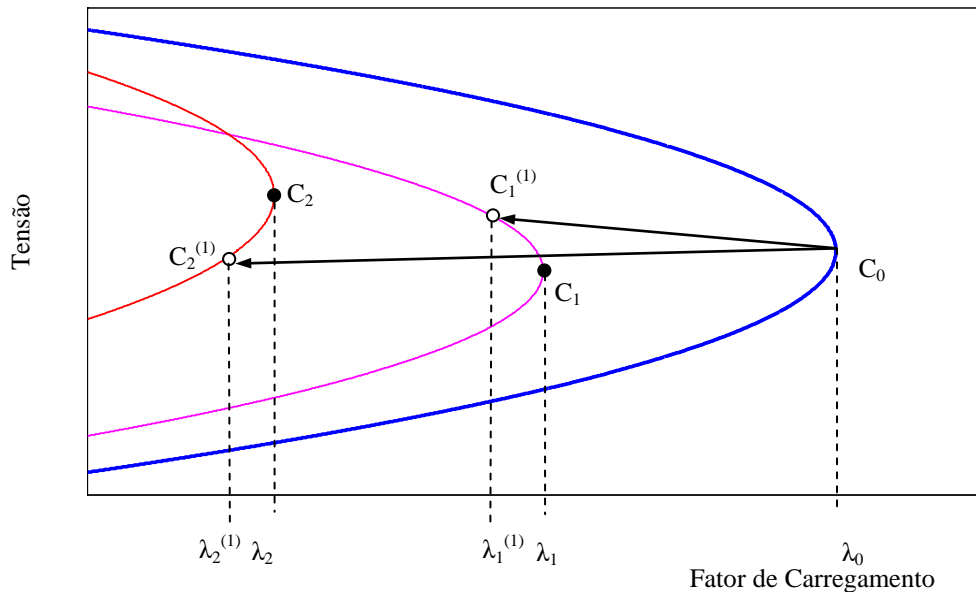


Figura 17 – Refinamento para o cálculo do $PMC_{pós}$

Dessa forma, uma vez que a barra crítica de pós-contingência, bem como sua magnitude de tensão, não é conhecida a priori, e a sua identificação é importante para a obtenção da solução, a determinação da margem de estabilidade pode se tornar um processo problemático e computacionalmente oneroso quando a magnitude de tensão é escolhida como parâmetro nas análises de contingências.

2.8.9 Seleção de contingências via método de Newton aproximado

Em Meng et al. (2006) é proposto um método para seleção de contingências que usa a primeira iteração do método de Newton para solução das equações do fluxo de carga, após uma contingência simples de linha de transmissão. O método é baseado no uso da primeira iteração P θ e da primeira iteração QV do Método de Newton Desacoplado Rápido.

Normalmente a seleção de contingências inicia com uma solução do caso base (pré-contingência) das equações do fluxo de carga. Imediatamente após a contingência de uma linha de transmissão os mismatches de potência ativa e reativa são constituídos por vetores esparsos. A primeira iteração P θ do Método Desacoplado Rápido pode obter vantagem da esparsidade do vetor de potência ativa para atualizar os ângulos das tensões que serão,

posteriormente, utilizados na primeira iteração QV para o cálculo do mismatch de potência reativa.

Resultados de simulações com os sistemas IEEE 14, 57 e 300 barras, mostraram que o método proposto tem precisão melhor que os cálculos realizados pelas primeiras iterações P θ e QV do Método Desacoplado Rápido convencional.

A principal desvantagem do método é o alto tempo computacional despendido.

2.8.10 *Classificação de contingências baseada em margens de potência reativa*

Na referência Fatehi et al. (2007) foi proposto um método que avalia os efeitos de cada contingência sobre a margem de potência reativa do sistema com o intuito de classificar as referidas contingências.

O método é baseado na sugestão do WSCC (*Western Systems Coordinating Council*) com relação à contingência simples mais grave ao sistema: “A contingência simples mais grave para o sistema é aquela que provoca o maior decréscimo na margem de potência reativa do mesmo.” (ABED, 1999, p. 193).

A ideia base é analisar a margem de potência reativa através de curvas VQ, relacionadas a cada contingência simples (de linha de transmissão ou de gerador) e então associar a estas um índice que será usado na classificação.

De acordo com o WSCC deve ser obtida a margem mínima de potência reativa para uma contingência simples a fim de encontrar a maior mudança na margem de potência reativa da barra mais crítica do sistema em estudo.

O método proposto em Fatehi et al. (2007) utiliza duas diferentes margens de potência reativa: (i) uma denominada simplesmente “Margem de Potência Reativa” (MPR) e (ii) outra similar àquela do WSCC denominada “Margem Mínima de Potência Reativa” (MMPR). A primeira é a medida da distância entre o *nose* da curva VQ sob a contingência simples e o eixo de V. Por sua vez a Margem Mínima de Potência Reativa refere à potência reativa mínima que cada barra do sistema necessita para se evitar o colapso de tensão. Essa margem é obtida da seguinte forma:

- i. Determine todas as possíveis contingências do sistema para o nível de desempenho A (contingência simples);
- ii. Trace a curva VQ para cada contingência simples determinada para o nível de desempenho A;
- iii. Aumente a carga da área em estudo em 5% e trace a curva VQ correspondente para o nível de desempenho A.
- iv. A Margem Mínima de Potência Reativa é igual ao valor absoluto da diferença entre os valores das potências reativas dos *noses* das curvas traçadas nos itens ii e iii (quantidade de potência reativa).

As duas margens abordadas no método proposto são mostradas na figura 18.

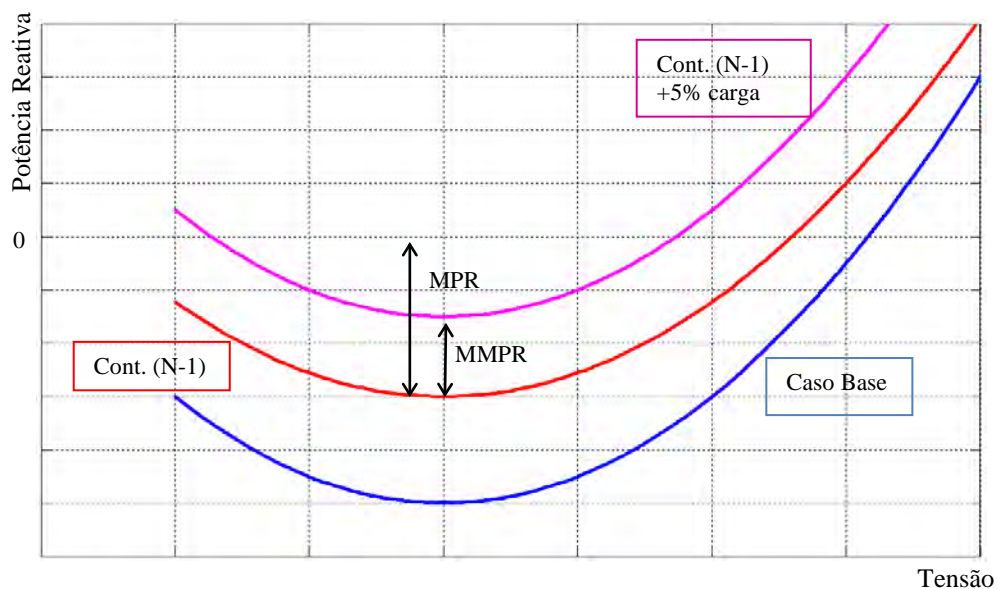


Figura 18 – Margens de potência reativa

O método propõe dois índices, um baseado na Margem de Potência Reativa (IMPR) e o outro na Margem Mínima de Potência Reativa (IMMPR). Através das curvas VQ para cada contingência, são obtidos os dois índices para cada barra de carga. Estes índices são então tabelados, e o maior deles está relacionado com a contingência simples mais severa. Caso ocorra divergência do fluxo de carga durante a análise, a contingência em questão é considerada a mais crítica.

Os índices são obtidos pelas seguintes equações:

$$IMPR_i = \omega_1(M_{ci}) + \omega_2(1 - V_{min}), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2.15)$$

$$IMMPR_i = \omega'_1(MM_{ci}) + \omega'_2(1 - V_{min}), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2.16)$$

onde, $IMPR_i$ e $IMMPR_i$ são, respectivamente, os índices baseados na Margem de Potência Reativa e na Margem Mínima de Potência Reativa para a i -ésima contingência; M_{ci} e MM_{ci} representam o valor máximo, respectivamente, da Margem de Potência Reativa e da Margem Mínima de Potência Reativa das barras de carga do sistema durante a i -ésima contingência; V_{min} é a menor magnitude de tensão do sistema durante a i -ésima contingência; N representa o número total de contingências; $\omega_1, \omega_2, \omega'_1$ e ω'_2 representam fatores de ponderação que devem ser ajustados para cada sistema em análise baseando-se em estudos *off-line*.

Considera-se como vantagem do método o fato de ser aplicado a contingências simples de linhas de transmissão e de geradores, bem como a sua simplicidade matemática.

2.8.11 Seleção de contingências baseada em índices de performance

Na referência Stefopoulos et al. (2005) é implementado um algoritmo para seleção e classificação de contingências baseado em índices de performance e modelos quadráticos de fluxo de potência. As contingências são modeladas através da inclusão de uma variável de controle de contingências μ ($\mu=1$ representa o caso base e $\mu=0$, a contingência) e a seleção das mesmas é baseada na sensibilidade do índice de performance com relação a essa variável de controle para cada contingência considerada, além da aplicação do método do vetor co-estado.

No método proposto a seleção e a classificação da contingência são feitas com base no cálculo da mudança do índice de performance devido a uma contingência. No algoritmo proposto considera-se o índice de carregamento baseado na corrente do circuito e o índice de tensão.

Devido a não linearidades do modelo do sistema e aos limites de dispositivos do mesmo, os métodos baseados em índices de performance são eficientes, porém, vulneráveis a erros (STEFPOULOS et al., 2005). Ao invés de utilizar a linearização do índice de performance em relação à variável de controle de contingência que fornece modelos de primeira ordem, o método proposto utiliza a linearização da equação das variáveis de estado em relação à essa variável para se calcular o índice de performance do sistema. Com isso, obtêm-se termos de ordem superior na série de Taylor e, conseqüentemente, o erro é minimizado.

O método foi aplicado a um sistema de 4 barras e ao sistema teste IEEE-24 barras. Os resultados mostraram que a técnica de se linearizar o estado do sistema em preferência à linearização direta do índice de performance, reduz os erros de classificação das contingências.

2.8.12 *Outros métodos*

Em Greene et al. (1999) o método apresentado usa sensibilidade linear e quadrática da margem PV para obter cálculos rápidos para a margem de pós-contingência. Embora seja um método muito rápido e, portanto, razoável para a aplicação na seleção de contingências, os resultados mostraram que as margens obtidas eram praticamente inaceitáveis para muitas das contingências estudadas.

Uma discussão sobre o uso de sensibilidades para estimar tensões e geração de potência reativa pós-contingência é apresentada em Ruiz e Sauer (2007).

Na referência Yorino et al. (2004) é apresentado um método para análise de estabilidade de tensão envolvendo contingências de saídas de gerador e linha de transmissão

No trabalho apresentado em Guerra, (2002) um método de seleção de contingências em linhas de transmissão e transformadores é apresentado, utilizando abordagem multinível adaptativa, para servir de ferramenta ao operador do sistema elétrico de potência em análises em tempo real. A síntese do método está no fato de que as informações obtidas da rede em tempo real para um ciclo de operação poderão ser utilizadas em ciclo seguinte, evitando-se cálculos desnecessários, visto que o estado de operação de redes elétricas em geral, muda pouco entre dois ciclos consecutivos de operação.

Capítulo 3

DETERMINAÇÃO DA MARGEM DE CARREGAMENTO DE PÓS-CONTINGÊNCIA

3.1 Introdução

Conforme descrito no capítulo 2, devem-se definir as margens de estabilidade de tensão de um sistema de potência não só para as condições normais de operação (caso base), mas também para diferentes condições de contingência. Além disso, o *Western System Coordinating Council* (WSCC) recomenda que as margens de estabilidade de tensão devam ser obtidas pelas análises de curvas PV e VQ (ABED, 1999).

A utilização de um método da continuação para o traçado da correspondente curva PV de cada contingência relacionada a uma barra do sistema de potência é um processo que consome muito tempo. Sendo assim, antes da obtenção da margem de carregamento de pós-contingência através da curva PV, as contingências possíveis devem ser selecionadas e classificadas de acordo com o grau de severidade, com o intuito de obter uma lista pequena de contingências realmente prejudiciais ao sistema de potência.

A convergência do fluxo de carga continuado está associada à contingência analisada e ao parâmetro da continuação adotado na etapa de parametrização do método. Dependendo do parâmetro adotado o fluxo de carga continuado pode não convergir. Para determinados carregamentos e contingências, o ponto de máximo carregamento de pós-contingência tem um valor menor que o carregamento do ponto de operação inicial (caso base) e, nessas condições, o uso do fator de carregamento (λ) como parâmetro levará à divergência do fluxo de carga continuado.

3.2 *Curvas PV de pré e pós-contingências*

Baseando-se no método relatado em Feng e Xu (2000), a figura 19 apresenta quatro curvas PV (tensão da barra 14, V_{14} , em função do fator de carregamento λ) do sistema IEEE 14 barras: curva 1, correspondente ao caso base; curva 2, para a contingência de uma das linhas de transmissão entre as barras 1 e 2; curva 3, para a contingência da linha de transmissão entre as barras 2 e 3; curva 4, para a contingência das duas linhas de transmissão entre as barras 1 e 2. Nesta figura podem-se observar melhor algumas das prováveis dificuldades que podem surgir quando da utilização dos métodos de fluxo de carga e fluxo de carga continuado para análise de contingências. As curvas foram obtidas usando um método de fluxo de carga continuado apresentado em Alves et al. (2002). Considere por exemplo o ponto P na curva de pré-contingência, como sendo o ponto de operação do caso base. De acordo com a definição da margem de carregamento, o sistema apresenta neste caso uma margem de carregamento positiva ($MC > 0$). Três contingências serão analisadas, uma em que o sistema permanecerá operando com uma margem de carregamento positiva (curva 2), e outras duas em que essa margem será negativa (curvas 3 e 4). Se o carregamento (λ) do sistema for mantido fixo, isto é, λ for adotado como parâmetro, no primeiro caso (curva 2) o sistema permanecerá estável e passará a operar no ponto A, enquanto que nas demais (curvas 3 e 4), entrará em colapso porque não existirá solução factível para este carregamento; o fluxo de carga continuado divergirá. O mesmo ocorrerá quando do uso do método do fluxo de carga.

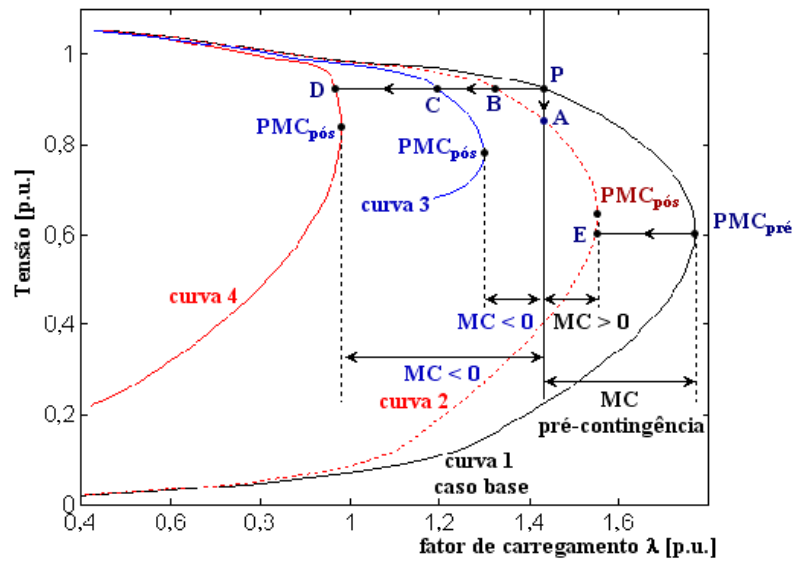


Figura 19 - Curvas PV para contingências de linhas de transmissão do sistema IEEE 14 barras: curva 1, caso base; curva 2, contingência de uma das duas linhas entre as barras 1 e 2; curva 3, contingência da linha entre as barras 2 e 3; curva 4, contingência das duas linhas entre as barras 1 e 2

Portanto, nos casos em que a margem de carregamento for negativa, será necessário estabelecer uma política de ações a fim de que o sistema possa continuar em operação. Utilizando o método do fluxo de carga continuado parametrizado por λ , a determinação da margem de carregamento só será possível para a curva 2. A determinação das demais margens de carregamento não será possível. Por outro lado, no caso da utilização da tensão do ponto P como parâmetro da continuação no fluxo de carga continuado, os novos pontos de operação de pós-contingência seriam os pontos B, C, e D, respectivamente. Assim, as correspondentes margens de carregamento poderiam ser determinadas usando o fluxo de carga continuado parametrizado por λ , ou pela tensão para a obtenção dos respectivos pontos de máximo carregamento de pós-contingência ($PMC_{pós}$). Entretanto, dado o grande número de contingências a serem analisadas num sistema real, bem como o fato de que a grande maioria dessas contingências resulta em curvas PV similares à curva 2, isto é, cujos pontos de máximo carregamento de pós-contingência são muito próximos ao ponto de máximo carregamento de pré-contingência ($PMC_{pré}$), esse procedimento resultaria num processo computacional muito lento, se for utilizado para a seleção e classificação das contingências. Com base na argumentação de que o ponto de máximo carregamento de pré-contingência é maior que qualquer um dos de pós-contingência, e que estes, por sua vez, são muito próximos àquele, a técnica proposta na referência Feng e Xu (2000) é aplicada. Uma vez definido o padrão de

crescimento de carga e a estratégia de despacho da geração, o ponto de máximo carregamento de pré-contingência é determinado com um fluxo de carga continuado (AJJARAPU; CHRISTY, 1992; ALVES et al., 2002). A seguir, define-se uma barra de referência cuja magnitude de tensão de pós-contingência será fixada (adotada como parâmetro), enquanto que λ será considerado como variável no fluxo de carga continuado. A partir dessas considerações, aplica-se a contingência e calcula-se o ponto de máximo carregamento de pós-contingência e a respectiva margem de carregamento. Observa-se que para muitas contingências a tensão crítica de pré-contingência é praticamente igual à de pós-contingência e assim, o ponto E (curva 2, figura 19) seria o próprio ponto de máximo carregamento de pré-contingência. Quando isso não ocorre, isto é, quando o seu valor de pré-contingência é uma aproximação do valor da de pós-contingência, o valor de λ será próximo ao do correspondente ponto de máximo carregamento de pós-contingência. Nesse caso pode ser necessário um refinamento para se obter seu valor exato, o que é feito partindo do ponto E, e utilizando o fluxo de carga continuado usando λ ou a tensão como parâmetro. O problema do cálculo da margem de carregamento transforma-se num problema de escolha da barra de referência e da estimativa do valor de sua tensão de pós-contingência. Conforme se pode ver na figura 20(b), na aplicação desse método para determinação do ponto de máximo carregamento de pós-contingência da curva 2, foram necessárias 9 iterações sendo 3 iterações para a obtenção do ponto E, e na fase de refinamento, mais 6 iterações para se obter o referido ponto usando a tensão da barra 14 como barra de referência (parâmetro) e um passo de +0.01 p.u.. Para essa contingência a redução na margem de carregamento foi de 28,35%. Na figura 20(c) pode ser verificado que o número de iterações necessárias para se obter o ponto de máximo carregamento de pós-contingência, partindo do caso base ($\lambda=1$) convergido e aplicando contingência da linha de transmissão, foi igual a 71 iterações. Portanto, para a maioria das contingências o número total de iterações necessárias para se determinar o ponto de máximo carregamento de pós-contingência a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência será menor do que o necessário para obtê-lo, partindo do caso base ($\lambda=1$) convergido e aplicando contingência da linha de transmissão. Observa-se ainda que para alguns casos, a obtenção do ponto de máximo carregamento de pós-contingência considerando a aplicação da contingência no caso base convergido pode falhar devido à inexistência de solução.

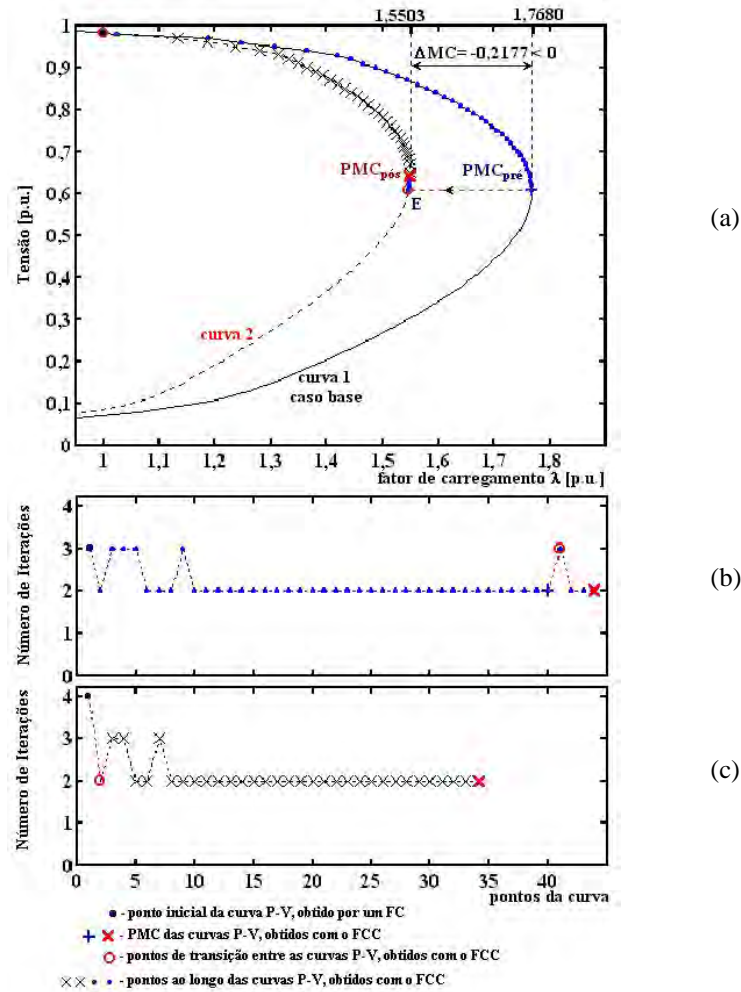


Figura 20 - (a) Curvas PV para o caso base e para a contingência de uma das duas linhas de transmissão entre as barras 1 e 2 do sistema IEEE 14 barras; (b) número de iterações por ponto da curva; e (c) número de iterações, partindo do caso base ($\lambda=1$) convergido e aplicando contingência da linha

No caso da curva 4, conforme se pode ver na figura 21, foram necessárias ao todo 50 iterações, 4 iterações para obter o ponto E, e 46 iterações na fase de refinamento. A redução na margem de carregamento foi de 102,47%, i.e., margem de carregamento negativa ($MC < 0$). Nos casos em que esse procedimento falhar, como é o caso da curva 3 da figura 19, propõe-se o uso de um método de Newton-Raphson com fator de amortecimento, que consiste no uso de um fator de passo para atualizar as variáveis do fluxo de carga de forma a prevenir a divergência do processo iterativo e atingir a superfície entre as regiões de existência e de não existência da solução das equações do fluxo de carga (CASTRO; BRAZ, 1997; FENG; XU, 2000; OBERBYE, 1994). O valor ótimo do passo é calculado de forma a minimizar uma função quadrática.

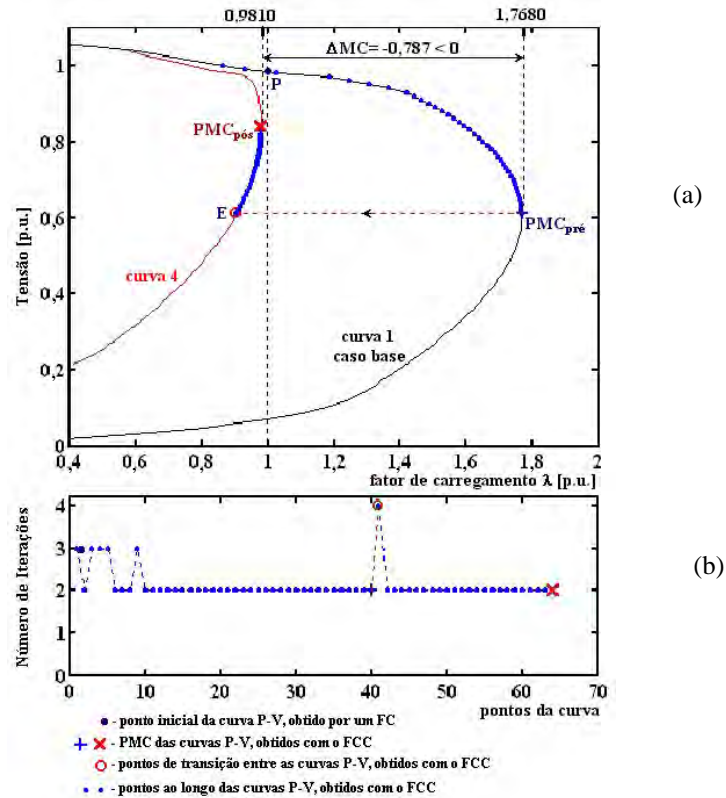


Figura 21 - (a) Curvas PV para o caso base e para a contingência das duas linhas de transmissão entre as barras 1 e 2 do sistema IEEE 14 barras; e (b) número de iterações por ponto da curva

3.3 Métodos propostos

Serão apresentados a seguir dois métodos desenvolvidos para a realização de análise de contingências em sistemas elétricos de potência.

3.3.1 Obtenção da margem de carregamento a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência

Neste trabalho também se propõe a determinação da margem de carregamento a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência utilizando um fluxo de carga continuado em que a magnitude de tensão é utilizada como parâmetro. Diferente do método proposto em Feng e Xu (2000), que utiliza o método de Newton-Raphson com fator de

amortecimento para identificar e estimar a magnitude de tensão de pós-contingência da barra crítica, a qual será usada como parâmetro da continuação no fluxo de carga continuado, este novo método propõe o uso de uma técnica de parametrização que possibilita a identificação da barra crítica de pós-contingência através da remoção gradual do ramo escolhido para contingência. Assim, o fluxo de carga continuado parametrizado por tensão pode ser utilizado ao longo de todo o processo de obtenção da margem de carregamento. Nessa técnica, conforme apresentado na figura 22, para se evitar a divergência do fluxo de carga continuado quando da aplicação da contingência, o ramo kl , correspondente à linha de transmissão selecionada para avaliação da contingência, é parametrizado por um fator de escalonamento μ , que é usado para a remoção gradual do ramo. Tanto a admitância série (y_{kl}) quanto a susceptância *shunt* (b_{kl}^{sh}) da linha de transmissão, são gradualmente removidos através de sua multiplicação por $1-\mu$. Embora este procedimento não reflita necessariamente o comportamento transitório real do sistema após uma contingência, sendo apenas um artifício matemático, possibilita a determinação de um ponto de operação factível de pós-contingência.

O sistema de equações 2.2 ($\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda) = 0$) do fluxo de carga passa a ser representado por $\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda, \mu) = 0$. Quando $\mu = 0$, obtém-se o sistema original de equações do fluxo de carga ($\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda) = 0$), e quando $\mu = 1$, um novo sistema de equações é obtido, para o qual o ramo kl foi completamente removido. A inclusão de μ como variável resultará em n equações e $n+2$ incógnitas. Entretanto, prefixando o valor de μ ($\mu = 0$, caso base; $0 < \mu < 1$, contingência parcial da linha de transmissão; $\mu = 1$, contingência total da linha de transmissão), tem-se novamente n equações e $n+1$ incógnitas. Assim, podem-se obter as respectivas curvas PV por meio de um fluxo de carga continuado, ou seja, qualquer uma das $n+1$ incógnitas restantes pode ser definida como parâmetro. Seu valor (θ_k , V_k , ou λ) pode ser selecionado como parâmetro da continuação e, portanto, passa-se a ter novamente n equações e n incógnitas.

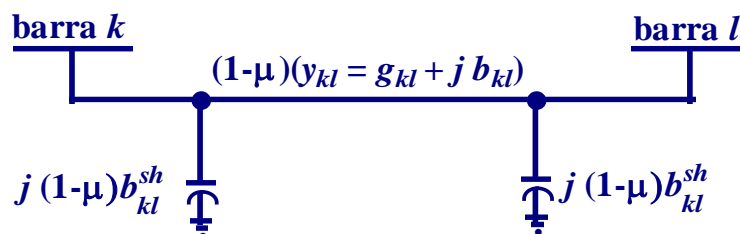


Figura 22 - Definição da variável μ para realização da contingência da linha de transmissão entre as barras k e l

Como pode ser notado na figura 22, a linha de transmissão é removida prefixando gradualmente o valor de μ até a unidade com passos predefinidos e adotando inicialmente a tensão da barra crítica do caso base como parâmetro da continuação. Com esta técnica, é possível obter-se os sucessivos pontos de máximo carregamento de pós-contingência parciais e a partir destes finalmente obter a margem de carregamento de pós-contingência. É importante observar nesse procedimento que, ao prefixar-se o valor de μ , estabelece-se a curva PV a ser traçada, enquanto que com a prefixação de um dos demais parâmetros (θ_k , V_k , ou λ) traça-se a curva desejada.

No capítulo 4 serão apresentados os resultados obtidos com a aplicação deste método para os sistemas testes do IEEE 14, 57 e 118 barras.

3.3.2 *Obtenção da margem de carregamento a partir do caso base*

No método anterior quando o fator de escalonamento μ é usado como parâmetro da continuação a trajetória de soluções apresenta um ponto de singularidade. Neste ponto o determinante da matriz Jacobiana modificada (J_μ) se anula. Assim, o método de Newton apresentará dificuldades numéricas antes mesmo de se alcançar esse ponto de singularidade, como ocorre nas proximidades do ponto de máximo carregamento quando do uso do fluxo de carga convencional.

Em Flueck e Dondetti (2000) foi proposto o uso do comprimento do arco como parâmetro da continuação para remover a singularidade da matriz Jacobiana no ponto de singularidade. Testes mostraram que este método é robusto, porém a implementação computacional do mesmo tem um alto custo.

Assim, neste trabalho propõe-se a utilização do ângulo de fase e da magnitude de tensão de uma barra k qualquer e da perda total de potência ativa (θ_k , V_k e Pa) como parâmetros da continuação. Considerando-se então estes novos parâmetros e μ como variável, as matrizes Jacobianas modificadas J_θ ou J_V difere daquela correspondente às equações do fluxo de carga ($\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda, \mu)$) apenas na coluna k onde as derivadas de P e Q com relação a θ_k e V_k são substituídas pelas respectivas derivadas com relação à nova variável μ . Desta forma as novas matrizes modificadas J_θ ou J_V serão não singulares no ponto de singularidade. Assim, utilizando esses parâmetros e a técnica de parametrização local (AJJARAPU; CHRISTY, 1992), é possível obter os pontos da curva além deste, com um número reduzido de iterações

por ponto, sem a ocorrência de dificuldades numéricas ao longo de toda a trajetória de soluções, inclusive no ponto de singularidade ou até mesmo próximo a ele. Quando se usa a magnitude ou o ângulo da tensão de uma barra k qualquer (V_k ou θ_k) como parâmetro, pode ocorrer singularidades das matrizes Jacobianas ao longo de todo o traçado da curva PV, sendo necessária a troca de parâmetro durante o processo, enquanto que usando a perda total de potência ativa (Pa), é possível se obter pontos além do ponto de singularidade sem a necessidade de troca de parâmetro.

Utilizando-se a perda total de potência ativa (Pa) como parâmetro da continuação, uma equação (W) referente a este parâmetro é adicionada às equações do fluxo de carga

$$\begin{aligned} \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda, \mu, \alpha) &= \mathbf{0} \\ W(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda, \mu, \alpha) &= \alpha Pa^0 - Pa(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda, \mu) = 0, \end{aligned} \quad (3.1)$$

onde Pa^0 é o respectivo valor da função perda total de potência ativa no valor prefixado de λ . Um novo parâmetro α é adicionado ao problema. Visto que uma nova equação foi adicionada ao sistema, o fator de escalonamento μ pode ser tratado como uma variável dependente e α considerado como um parâmetro. Para $\alpha = 1$, a solução convergida deverá resultar em $\mu = 0$. Na equação (3.1), pode-se especificar o valor desejado para Pa , e a sua solução fornecerá o ponto de operação, incluindo o fator de escalonamento (μ), para o qual o valor especificado para Pa ocorre. Após a obtenção da solução para o caso base ($\boldsymbol{\theta}_0, \mathbf{V}_0, \lambda_0$) através de um fluxo de carga, e a definição de um passo fixo para α , o fluxo de carga continuado é usado para calcular as demais soluções até se atingir o ponto de singularidade.

Utilizando-se a perda total de potência ativa como parâmetro é possível obter os pontos além do ponto de singularidade (PS), sem a necessidade de troca de parâmetro, como ocorre quando se usa a magnitude ou o ângulo da tensão de uma barra k qualquer (V_k ou θ_k).

Para demonstrar o método proposto será utilizado um sistema simples de duas barras interligadas por duas linhas de transmissão de impedâncias diferentes mostrado na figura 23.

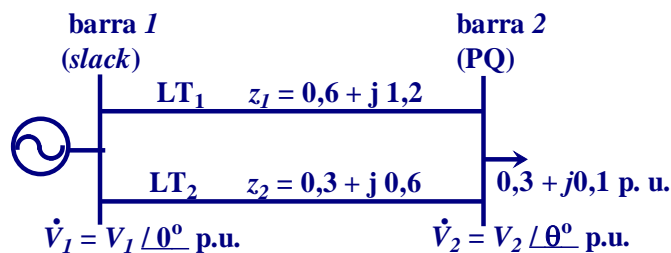


Figura 23 – Sistema exemplo de duas barras

Na figura 24 são apresentadas as curvas PV para o caso base e para as contingências da linha de transmissão 1 (LT_1) e da linha de transmissão 2 (LT_2). Os pontos A, B e C são os respectivos pontos de máximo carregamento (PMC). A carga é modelada como de potência constante e o parâmetro λ é usado para simular incrementos de carga ativa e reativa, considerando fator de potência constante. As respectivas curvas foram obtidas utilizando a magnitude de tensão da barra 2 (V_2) como parâmetro, com passo fixo de $-0,01$ p.u. e o fluxo de carga continuado apresentado em Alves et al. (2002).

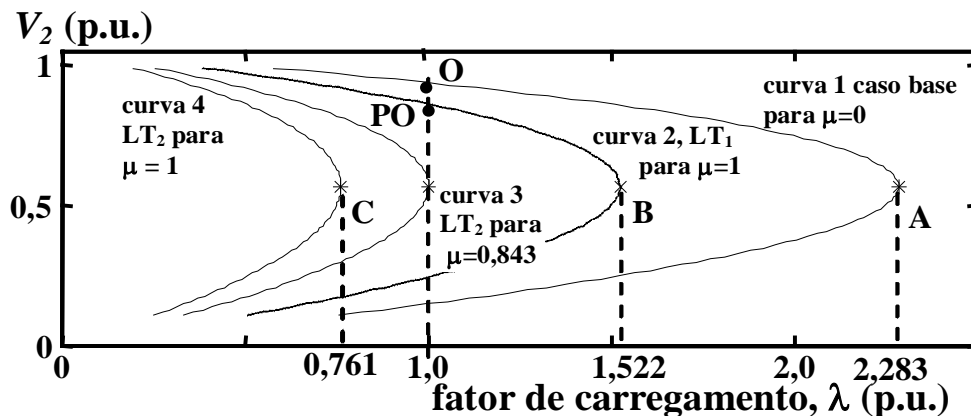


Figura 24 – Curvas PV para pré e pós- contingência das linhas de transmissão 1 e 2 e contingência parcial da linha de transmissão 2

Considerando que o sistema encontra-se operando no caso base $\lambda = 1$ (ponto O sobre a curva 1 da figura 24), na ocorrência da contingência da linha de transmissão 1 (LT_1) o fluxo de carga convergirá para o ponto de operação PO sobre a curva 2. Caso ocorra a contingência total da linha de transmissão 2 (LT_2), é importante observar que o fluxo de carga e o fluxo de carga continuado parametrizado por λ não convergirão, visto que não haverá solução para essa condição, pois o ponto de máximo carregamento de pós-contingência (ponto C da curva 4) é menor que o carregamento do ponto de operação no caso base (ponto O).

A figura 25(a) mostra o traçado de V_2 versus μ para a saída da linha de transmissão 1 (LT_1) considerando o fator de escalonamento μ como parâmetro, e para a contingência da linha de transmissão 2 (LT_2) considerando os seguintes parâmetros: V_2 , θ_2 e Pa . A figura 25(b) mostra os determinantes normalizados correspondentes aos referidos parâmetros ($|J_\mu|$, $|J_V|$, $|J_\theta|$ e $|J_{Pa}|$) para a contingência da linha de transmissão (LT_2).

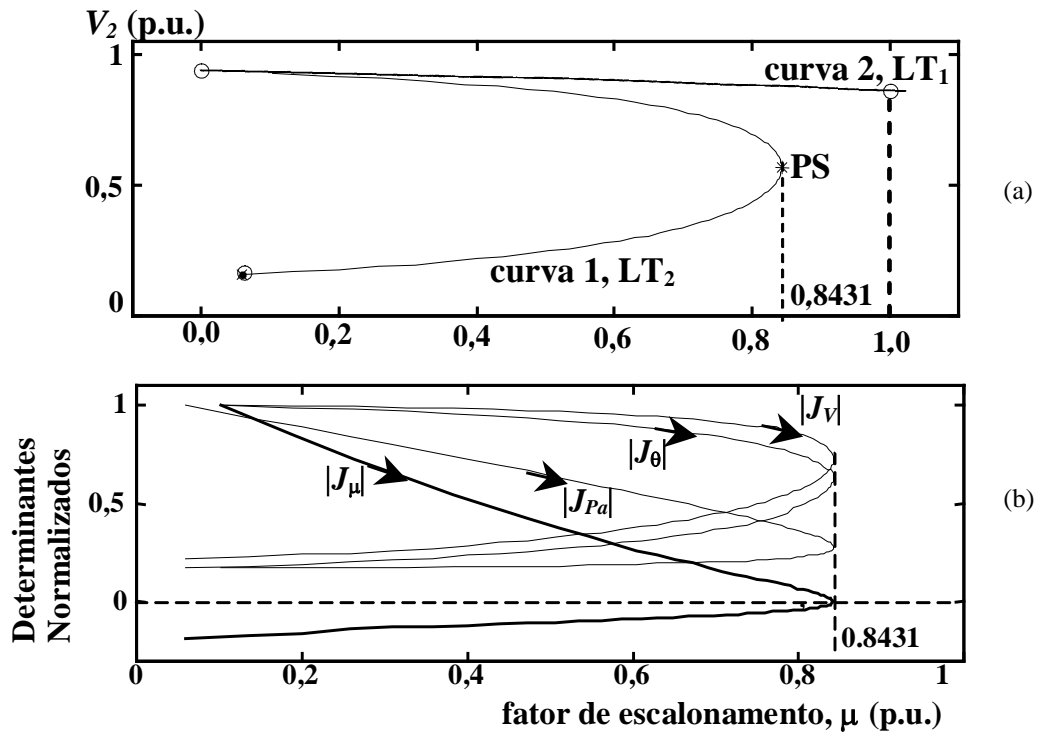


Figura 25 – (a) Tensão versus μ para as contingências das linhas de transmissão 1 e 2, (b) Determinantes normalizados das matrizes Jacobianas

No caso da contingência da linha de transmissão 1 (LT1 – curva 2 da figura 25(a)), não se encontrou nenhuma singularidade da matriz Jacobiana enquanto se variava o parâmetro μ de zero até um, e o fluxo de carga encontrará uma solução local representada pelo ponto PO sobre a curva 2 da figura 24. Em contra partida a figura 25(a) mostra que no caso da contingência da linha de transmissão 2 (LT2), quando o fator de escalonamento μ é usado como parâmetro, a trajetória de solução apresenta um ponto de singularidade (PS) em $\mu = 0,8431$, o que pode ser verificado também na figura 25(b) onde a matriz Jacobiana J_μ se anula. Assim, quando μ é usado como parâmetro o método de Newton apresentará dificuldades numéricas logo nas vizinhanças do ponto de singularidade (PS). Por outro lado, a mesma figura 25(b) mostra que a utilização de V_2 , θ_2 e Pa como parâmetro possibilita obter matrizes Jacobianas (J_V , J_θ e J_{Pa}) não singulares no ponto de singularidade. Nestes casos o método não apresentará dificuldades numéricas ao longo de toda trajetória de solução, inclusive no ponto de singularidade e em sua vizinhança. Para este sistema exemplo, é possível se obter pontos além do ponto de singularidade com um número reduzido de iterações por ponto utilizando qualquer um dos três parâmetros: V_2 , θ_2 e Pa . Entretanto para outros sistemas utilizando V_2 ou θ_2 como parâmetros, as matrizes podem apresentar singularidades ao longo da trajetória de solução, sendo necessária a troca de parâmetro

durante o processo para o traçado da respectiva curva PV, o que não ocorre quando se utiliza a perda total de potência ativa como parâmetro. O método apresentado com os parâmetros propostos resulta em excelente desempenho no que se refere à convergência, particularmente na vizinhança do ponto de singularidade (PS).

Analisando-se as figuras 24 e 25(a) nota-se que o estado do sistema no ponto de máximo carregamento da curva 3 na figura 24 (contingência parcial da LT2, $\mu = 0,8431$) corresponde ao estado do ponto de singularidade (PS) na figura 25(a). Assim, partindo-se desse ponto de máximo carregamento e fixando a magnitude de tensão da barra 2 (V_2) no corresponde valor e considerando o fator de carregamento λ como uma variável dependente, o ponto de máximo carregamento de pós-contingência (ponto C da curva 4 na figura 24) pode ser facilmente obtido usando um fluxo de carga continuado, com reduzido número de iterações.

Com este método é possível se obter até mesmo margens de carregamento negativas, ou seja, aquelas que possuem o ponto de máximo carregamento da curva de pós-contingência com valores menores que o ponto de operação do caso base, o que não é possível utilizando o método convencional de obtenção da margem de carregamento a partir do caso base.

Capítulo 4

RESULTADOS DOS TESTES

4.1 Introdução

Os desempenhos dos métodos para a realização de análise de contingências em sistemas de energia são apresentados de forma separada neste capítulo. Inicialmente serão apresentados os resultados para o método que determina a margem de carregamento a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência e posteriormente aquela que determina a margem de carregamento a partir do caso base. Por fim o método de obtenção da margem de carregamento a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência é comparado com o método tradicional de obtenção da margem a partir do caso base.

Nos testes que se seguem a tolerância adotada para os *mismatches* foi de 10^{-4} p.u.. O primeiro ponto de cada curva foi obtido com inicialização *flat start* e considerando *tap* nominal. O limite superior e inferior adotados para os *taps* foram 1,05 e 0,95, respectivamente.

As cargas foram modeladas como potências constantes e o parâmetro λ foi usado para simular o incremento de carga ativa e reativa, considerando fator de potência constante. O aumento de carga foi seguido por um aumento de geração usando λ . Com o objetivo de explicitar as características dos métodos, considerou-se a influência dos limites de potência reativa (Q) e de *tap* de transformadores. Os ajustes de *tap* nos transformadores com mudança de *tap* sob carga (OLTC) são realizados com a inclusão da posição do *tap* como variável dependente, ao passo que as magnitudes de tensão das barras controladas foram consideradas como variáveis independentes (PETERSON; MEYER, 1971). Os procedimentos para tratar os

limites de potência reativa nas barras PV e os limites dos *tap*, são os mesmos utilizados no método convencional de fluxo de carga.

Observa-se que as análises foram efetuadas para os casos de linhas de transmissão e transformadores cujas remoções não resultassem em ilhamento ou remoção simultânea de geradores.

As reduções percentuais na margem de carregamento de pós-contingências são obtidas da seguinte forma:

- a) Considerando o caso base com fator de carregamento unitário, obtém o ponto de máximo carregamento de pré-contingência ($\lambda_{PMC_{pré}}$), de cujo valor é subtraído o fator de carregamento do caso base ($\lambda_{base} = 1 p.u.$). O valor obtido é igual à margem de carregamento de pré-contingência ($MC_{pré}$).
- b) Na seqüência obtém o ponto de máximo carregamento de pós-contingência ($\lambda_{PMC_{pós}}$) e calcula-se a margem de carregamento de pós-contingência ($MC_{pós}$).
- c) Calcula-se então a redução em p.u. (R_{pu}) subtraindo a margem de carregamento de pré-contingência obtida no item (a) e a margem de carregamento de pós-contingência obtida no item (b).
- d) Para se obter a redução percentual ($R_{\%}$), basta dividir a redução em p.u. obtida no item (c) pela margem de carregamento de pré-contingência obtida no item (a) e multiplicar por 100%.

A equação 4.1 representa o cálculo da redução percentual na margem de carregamento após a ocorrência da contingência.

$$R_{\%} = \frac{(\lambda_{PMC_{pré}} - \lambda_{base}) - (\lambda_{PMC_{pós}} - \lambda_{base})}{\lambda_{PMC_{pré}} - \lambda_{base}} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

4.2 Margem de Carregamento a Partir do Ponto de Máximo Carregamento de Pré-contingência

4.2.1 Resultados obtidos para o sistema IEEE 14 Barras

Conforme comentado no capítulo anterior, o fluxo de carga continuado parametrizado pela magnitude de tensão da barra 14 (V_{14}) divergirá quando a linha de transmissão entre as barras 2 e 3 do sistema IEEE 14 barras (curva 3, figura 26) for completamente removida ($\mu = 1$), porque nesse caso não existirá solução local para as equações do fluxo de carga. Assim, não será possível obter-se a margem de carregamento para essa contingência a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência ($PMC_{pré}$).

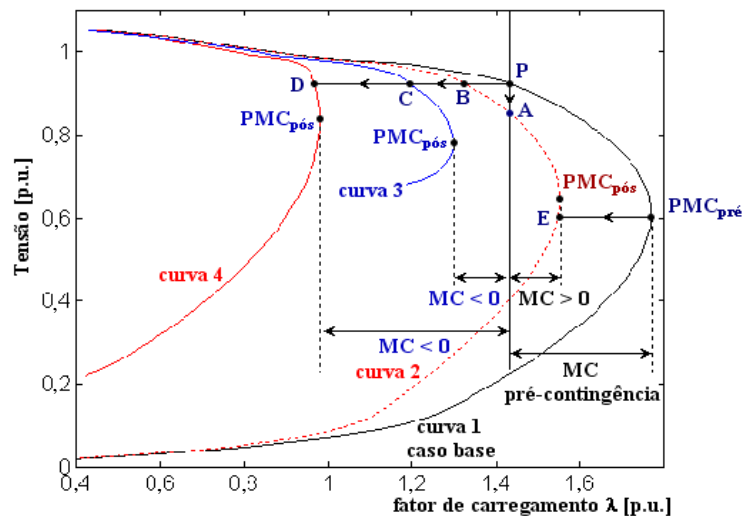


Figura 26 - Curvas PV para contingências de linhas de transmissão do sistema IEEE 14 barras: curva 1, caso base; curva 2, contingência de uma das duas linhas entre as barras 1 e 2; curva 3, contingência da linha entre as barras 2 e 3; curva 4, contingência das duas linhas entre as barras 1 e 2

De acordo com a figura 27, se a remoção da linha de transmissão for realizada prefixando gradualmente o valor de μ (0,5, 0,8, e 1,0), e a tensão da barra 14 (V_{14}) for adotada como parâmetro, é possível obter-se os sucessivos pontos de máximo carregamento de pós-

contingência ($PMC_{pós}$), e finalmente a margem de carregamento de pós-contingência por meio de um fluxo de carga continuado proposto.

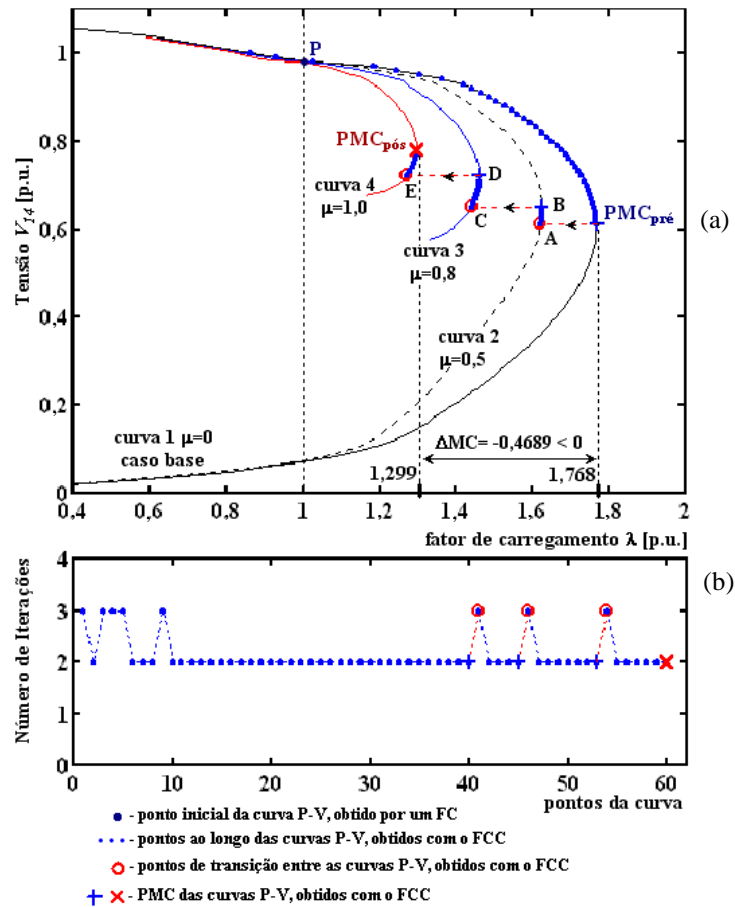


Figura 27 - Contingência da linha entre as barras 2 e 3 do sistema IEEE 14 barras: (a) curvas PV; e (b) número de iterações por ponto da curva

Prefixando inicialmente o valor de μ em 0,5 e a tensão da barra 14 (V_{14}) no seu valor correspondente ao do ponto de máximo carregamento de pré-contingência (0,61 p.u.), calcula-se o ponto A na curva 2. A partir desse ponto o parâmetro V_{14} é variado com passos de +0,01 p.u. e as respectivas soluções do fluxo de carga continuado são obtidas, até que o ponto B seja alcançado. Esse procedimento é repetido para se obter os pontos C e D (para $\mu = 0,8$), E (para $\mu = 1$) e o ponto de máximo carregamento de pós-contingência, após o qual se calcula a margem de carregamento de pós-contingência (que foi igual a 1,2991 p.u.). A redução na margem de carregamento foi de 61,05%. No caso dessa linha de transmissão, como se pode ver na figura 27(b), foram necessárias ao todo 43 iterações, 9 iterações para obter os pontos A, C e E que correspondem às mudanças de curva em consequência da variação de μ , e um total de 34 iterações gastos nas fases de refinamento.

4.2.2 Resultados Obtidos para o Sistema IEEE 57 Barras

A figura 28 apresenta as curvas PV de duas barras (31 e 35), correspondentes à contingência da linha de transmissão entre as barras 35 e 36 do sistema IEEE 57 barras, uma das mais severas contingências encontradas. Estas duas barras são apresentadas juntas na figura por serem as respectivas barras críticas de pré e pós-contingência, isto é, as que apresentam a maior taxa de variação de tensão próximo dos respectivos pontos de máximo carregamento de pré e pós-contingência (AJJARAPU; CHRISTY, 1992). A curva 1 corresponde ao caso base ($\mu = 0$) e a curva 5 à contingência completa ($\mu = 1$) da linha de transmissão. Primeiramente, adotou-se $\mu = 0,8$ (curva 2), e incrementos graduais de 0,05 (curva 3) e 0,05/4 (curva 4).

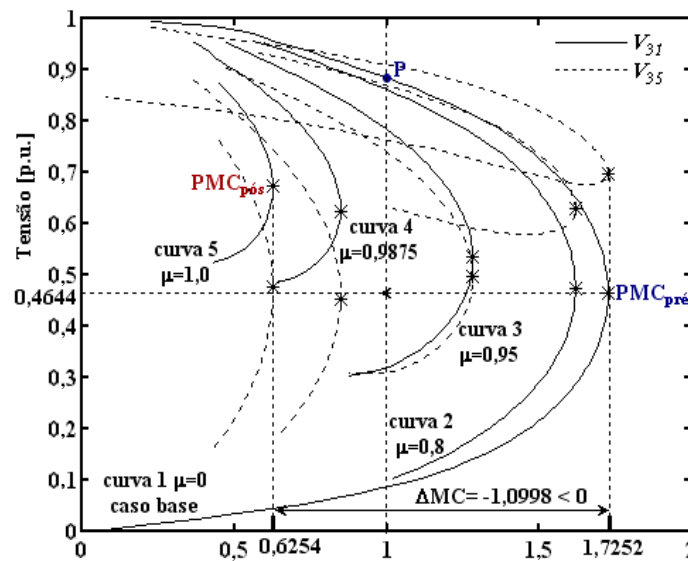


Figura 28 - Curvas PV para o caso base e para a contingência da linha de transmissão entre as barras 35 e 36 do sistema IEEE 57 barras

Da figura verifica-se que o fluxo de carga continuado não encontrará um ponto de operação pós-contingência a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência do caso base (curva 1), caso a tensão da barra 31 seja usada como parâmetro. Os argumentos são os mesmos que aqueles apresentados para a contingência da linha de transmissão entre as barras 2 e 3 do sistema IEEE 14 barras. Seguindo o mesmo procedimento já descrito para aquele caso, o método obtém êxito na determinação do ponto de máximo carregamento de

pós-contingência e da margem de carregamento de pós-contingência, conforme se pode verificar na figura 29(a). A redução na margem de carregamento foi de 151,65%. Na figura 29(b) pode-se ver que foram necessárias 56 iterações para se obter o ponto de máximo carregamento de pós-contingência a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência. Da figura verifica-se que o número de iterações necessário para passar de uma curva PV para outra variou de 3 a 4 iterações (um total de 14 iterações), em geral, a maior parte das iterações (um total de 42 iterações) foram necessárias na fase de refinamento, isto é, no cálculo dos valores intermediários do ponto de máximo carregamento de pós-contingência. Nas figuras 29(c) e 29(d) são apresentadas as variações de alguns dos *taps* e as variações das potências reativas geradas em algumas barras PV, durante a aplicação do método proposto.

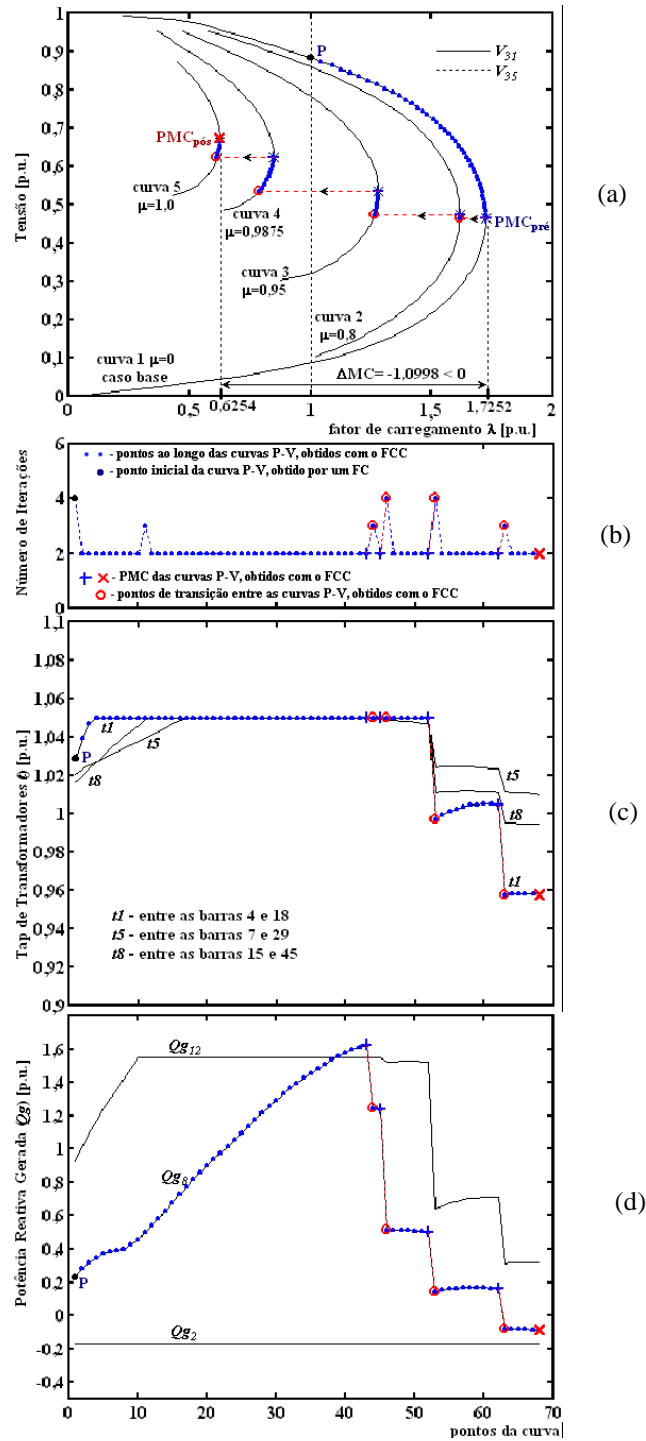


Figura 29 - Contingência da linha de transmissão entre as barras 35 e 36 do sistema IEEE 57 barras: (a) curvas PV; (b) número de iterações por ponto da curva; (c) variação dos taps dos transformadores por ponto da curva; e (d) variação das potências reativas geradas nas barras PV (2, 8, e 12) por ponto da curva

A figura 30 mostra, para a contingência da mesma linha de transmissão, o desempenho da mudança do parâmetro utilizado pelo fluxo de carga continuado proposto durante o procedimento de obtenção da margem de carregamento de pós-contingência. O critério

adotado para troca de parâmetro foi considerar como parâmetro da continuação a tensão da barra que apresentasse a maior taxa de variação durante a passagem de uma curva PV para outra. A identificação do novo parâmetro ocorreu durante a passagem da curva 2 para a 3. A barra 35 foi a indicada e o valor de sua tensão no ponto de máximo carregamento de pós-contingência da curva 3 foi o valor prefixado. Observa-se na figura 30(a) que o ponto de operação obtido a seguir foi sobre a curva 5, próximo ao ponto de máximo carregamento de pós-contingência procurado. Com este procedimento de troca de parâmetro foram necessárias ao todo 31 iterações, ou seja, resultou numa redução de 25 iterações. O número total de iterações necessárias para se passar de uma curva PV para outra foi de 11 iterações (redução de 3 iterações), enquanto que o da fase de refinamento foi reduzido para 20.

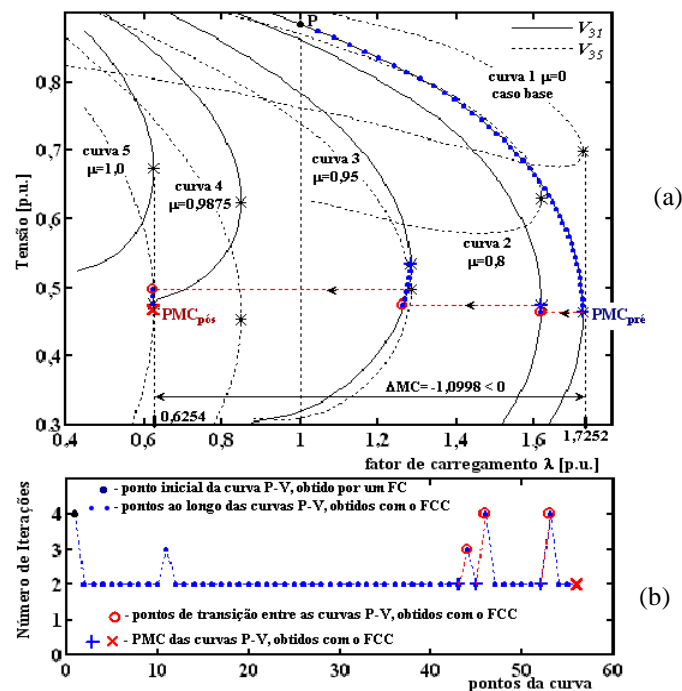


Figura 30 - Desempenho da mudança do parâmetro utilizado pelo fluxo de carga continuado proposto para obtenção da margem de carregamento para a contingência da linha entre as barras 35 e 36 do sistema IEEE 57 barras: (a) curvas PV; (b) número de iterações

A figura 31 mostra, para a saída da mesma linha de transmissão, o efeito do aumento do passo do parâmetro de tensão para 0,02 p.u. e da redução da tolerância dos *mismatches* de potência ativa e reativa para 10^{-3} p.u., utilizados pelo fluxo de carga continuado proposto durante o procedimento de obtenção da margem de carregamento de pós-contingência. Observa-se que o critério adotado para troca de parâmetro durante a passagem de uma curva PV para outra foi o mesmo usado para o traçado das curvas da figura 30.

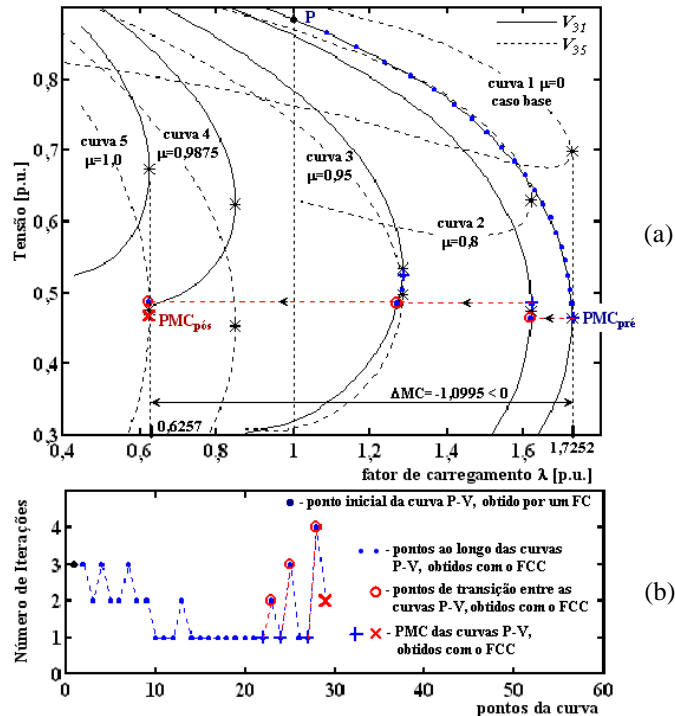


Figura 31 - Desempenho da mudança do parâmetro utilizado pelo fluxo de carga continuado proposto para obtenção da margem de carregamento para a contingência da linha entre as barras 35 e 36 do sistema IEEE 57 barras, redução da tolerância dos *mismatches* para 10^{-3} p.u. e aumento do passo do parâmetro (V) para 0,02 p.u.: (a) curvas PV; (b) número de iterações

A identificação do novo parâmetro também ocorreu durante a passagem da curva 2 para a 3, e a barra 35 foi novamente a indicada como o novo parâmetro. O valor de sua tensão no ponto de máximo carregamento de pós-contingência da curva 3 foi o valor prefixado. Observa-se na figura 31(a) que o ponto de operação obtido a seguir também foi sobre a curva 5, próximo ao ponto de máximo carregamento de pós-contingência procurado, porém ligeiramente diferente (valor da magnitude da tensão um pouco menor que o da figura 30). Com a redução da tolerância dos *mismatches* de 10^{-4} para 10^{-3} , e o aumento do passo do parâmetro de 0,01 p.u. para 0,02 p.u., o número total de iterações foi reduzido para 14, conforme apresentado na figura 31(b). Desse total foram necessárias 9 iterações para se passar de uma curva PV para outra e 5 durante as fases de refinamento. Portanto, resultou numa redução total adicional de 17 iterações, sem uma perda significativa da precisão do valor percentual de redução da margem de carregamento, cujo valor obtido anteriormente era de 151,65%, e agora é de 151,61%.

4.2.3 Resultados obtidos para o sistema IEEE 118 Barras

Para o caso base este sistema não apresentou nenhuma contingência de linha de transmissão ou transformador que resultasse numa margem de carregamento negativa, isto é, cujo fator de carregamento (λ) fosse inferior a 1 p.u.. Entretanto, são apresentadas as análises efetuadas para duas contingências, uma do transformador do ramo 8 (localizado entre as barras 5 e 8, responsável pela menor margem de carregamento encontrada) e outra da linha de transmissão 116 (localizada entre as barras 69 e 75), em virtude das características peculiares apresentadas por esse sistema as quais caracterizam bem as dificuldades numéricas apresentadas durante a aplicação do método proposto.

As figuras 32 e 33 mostram, para a contingência do transformador do ramo 8, o desempenho da mudança do parâmetro utilizado pelo fluxo de carga continuado proposto durante o procedimento de obtenção da margem de carregamento de pós-contingência. Foram consideradas as tensões de duas barras como parâmetro da continuação, a tensão do caso base de uma barra de carga qualquer, barra 9, e a tensão do caso base da barra crítica, barra 13. O objetivo é mostrar que independente da tensão escolhida como parâmetro sempre será possível se obter o ponto de máximo carregamento de pós-contingência. O critério adotado para troca de parâmetro foi o mesmo adotado para o sistema IEEE 57 barras, isto é, considerar como parâmetro da continuação a tensão da barra que apresentasse a maior taxa de variação durante a passagem de uma curva PV para outra, sendo que o seu correspondente valor de tensão no ponto de máximo carregamento da respectiva curva deve ser o valor a ser mantido fixo durante a passagem de uma curva para a outra.

A figura 32 considera a tensão da barra 9 (V_9) como parâmetro inicial. No detalhe da figura 32(b) pode-se ver a curva PV da barra 9 para a contingência total ($\mu = 1$) do transformador do ramo 8, onde se verifica que não se pode apenas fixar sua tensão no correspondente valor do ponto de máximo carregamento de pré-contingência do caso base e considerar $\mu = 1$ porque não existirá solução das equações do fluxo de carga continuado nestas condições. Entretanto com o procedimento adotado mostra-se que é possível obter o ponto de máximo carregamento de pré-contingência, mesmo escolhendo inicialmente a tensão desta barra como parâmetro. Assim, o valor inicial considerado para este parâmetro é o seu valor no ponto de máximo carregamento de pré-contingência. Partindo-se do caso base ($\mu = 0$) adotou-se inicialmente um valor igual a 0,5 para μ (curva 2), os demais valores foram

calculados considerando $\Delta\mu = 0,5$ e $\mu = 1 - \Delta\mu/4 = 0,875$ (curva 3), e finalmente a contingência total do elemento ($\mu = 1$, curva 4). A identificação do novo parâmetro ocorreu durante a passagem da curva 1 para a 2. A barra 5 foi a indicada e o valor de sua tensão no ponto de máximo carregamento de pós-contingência da curva 2 foi obtido variando a tensão do parâmetro (V_9) com passos de +0,01 p.u.. Então, o seu valor é prefixado para a obtenção do ponto sobre a curva 3. Observe na figura 32(a) que o ponto de operação obtido sobre a curva 3 não se encontra próximo ao seu ponto de máximo carregamento de pós-contingência ($PMC_{pós}$). Assim, a partir desse ponto o parâmetro (V_5) é variado com passos de -0,01 p.u. e as respectivas soluções do fluxo de carga continuado são obtidas, até que o correspondente ponto de máximo carregamento de pós-contingência da curva 3 seja alcançado. Observa-se que durante a passagem da curva 2 para a curva 3 a barra 5 foi novamente a indicada como parâmetro. Após se obter o ponto de máximo carregamento da curva 3, a tensão da barra 5 é fixada no seu valor correspondente, e o valor de μ é fixado em 1 (contingência total). Com este procedimento de troca de parâmetro foram necessárias ao todo 56 iterações. Um total de 14 iterações foi necessário para passar de uma curva PV para outra, enquanto que as fases de refinamento exigiram 42 iterações. A margem de carregamento para esta contingência é de 26,55%. Na figura 4.7(d) pode ser verificado que nesse caso o número total de iterações necessárias para se obter o ponto de máximo carregamento de pós-contingência, partindo do caso base ($\lambda = 1$) convergido e aplicando contingência da linha de transmissão, foi igual a 28. Portanto, menor que o número total de iterações necessárias para se determinar o ponto de máximo carregamento a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência.

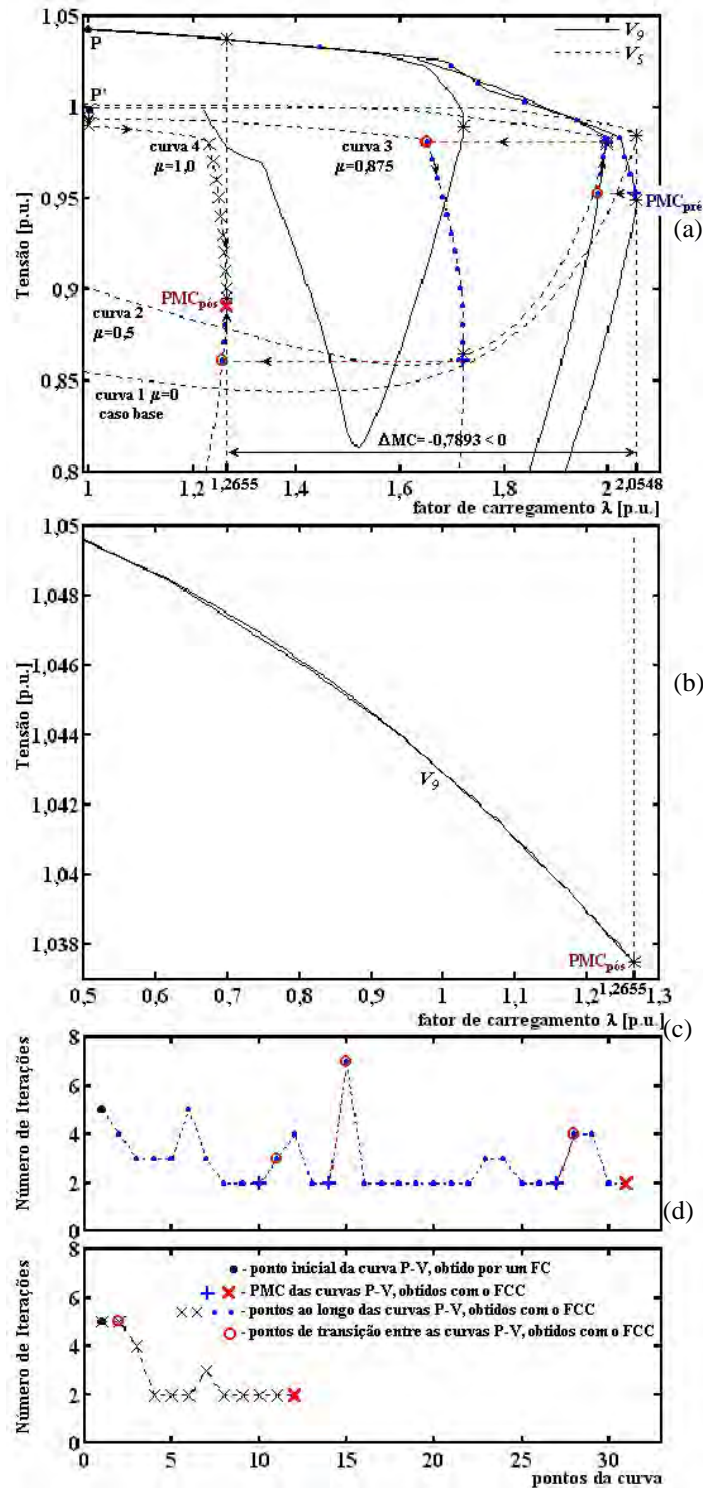


Figura 32 - Desempenho da mudança do parâmetro utilizado pelo fluxo de carga continuado proposto para obtenção da margem de carregamento para a contingência do transformador do ramo 8: (a) curvas PV; (b) detalhe da curva PV; (c) número de iterações; (d) número de iterações, partindo do caso base ($\lambda = 1$) convergido e aplicando a contingência do transformador

A figura 33 considera a tensão da barra crítica (V_{13}), barra 13 do caso base, como parâmetro inicial. Seguindo o mesmo procedimento, a barra 5 é novamente a indicada como

parâmetro para a obtenção do ponto sobre a próxima curva, no caso curva 4. Neste caso foram necessárias ao todo 55 iterações. O número total de iterações necessárias para passar de uma curva PV para outra foi igual a 13, enquanto que as fases de refinamento exigiram 42 iterações. Portanto, obteve-se praticamente o mesmo desempenho.

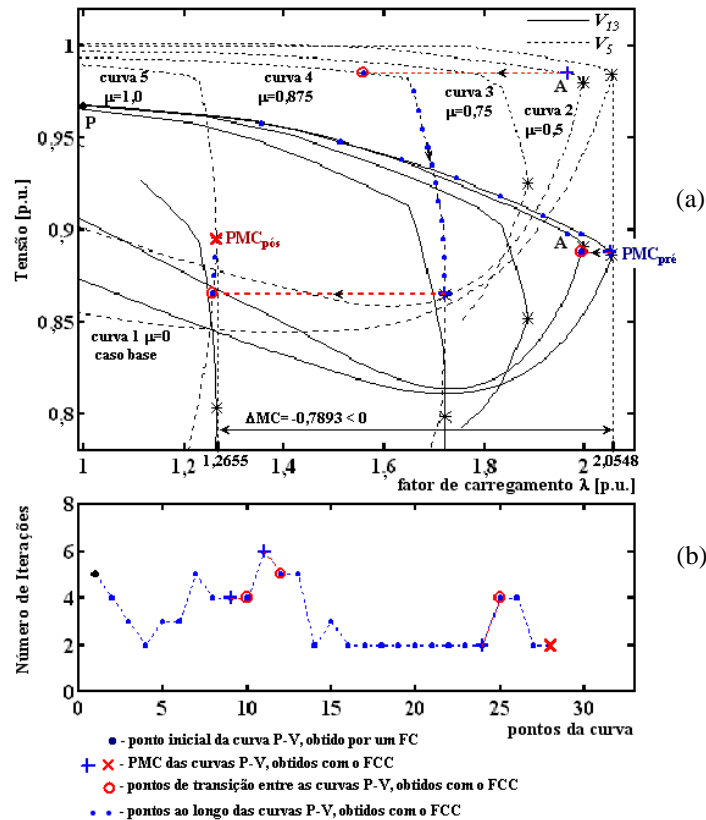


Figura 33 - Desempenho da mudança do parâmetro utilizado pelo fluxo de carga continuado proposto para obtenção da margem de carregamento para a contingência do transformador do ramo 8, inicializando com a tensão da barra crítica (V_{13}) do caso base:
(a) curvas PV; (b) número de iterações

A figura 34 considera novamente a tensão da barra crítica (V_{13}) como parâmetro inicial. O critério para troca de parâmetro foi mantido, ou seja, considerou-se como parâmetro da continuação a tensão da barra que apresentasse a maior taxa de variação durante a passagem de uma curva PV para outra. Entretanto, objetivando reduzir o número de iterações e evitar a determinação dos pontos de máximo carregamento intermediários, adotou-se que o valor da tensão da barra crítica do caso base será o valor adotado para todas as barras indicadas até que μ seja igual a 1, ou seja, o ponto de máximo carregamento será determinado somente para a curva correspondente à contingência total. Com esse procedimento o objetivo de reduzir o número total de iterações foi alcançado, como se pode verificar na figura 34(c), de onde se

constata que o número total de iterações foi 31, sendo 20 iterações necessárias para passar de uma curva PV para outra. Entretanto, deve-se ressaltar que foi necessária uma pequena mudança de estratégia para se obter o ponto D, isto porque o método divergiu ao tentar-se obter diretamente o ponto D na curva 4 a partir do ponto A na curva 2. Primeiro foi necessário uma redução no incremento de μ , isto é, foi necessário outro ponto intermediário, situado na curva de $\mu = 0,75$. Também, conforme se pode ver no detalhe da figura 34(b), ao obter-se o ponto A, a tensão da barra 5 (ponto A' na curva 2), indicada como o novo parâmetro, apresentava o valor de 0,9767 p.u. (oito vezes o valor do passo de tensão 0,01 p.u. adotado na fase de refinamento para a obtenção do ponto de máximo carregamento de uma curva PV), o que exigiu um passo de ajuste intermediário com 7 iterações para alcançar o ponto B na mesma curva. A partir do ponto B pode-se obter o ponto C sobre a curva 3 e a seguir o ponto D, mantendo-se o valor do parâmetro V_5 fixo em 0,8880 p.u.. Observa-se que a fase de refinamento só foi considerada na curva correspondente a $\mu = 1$.

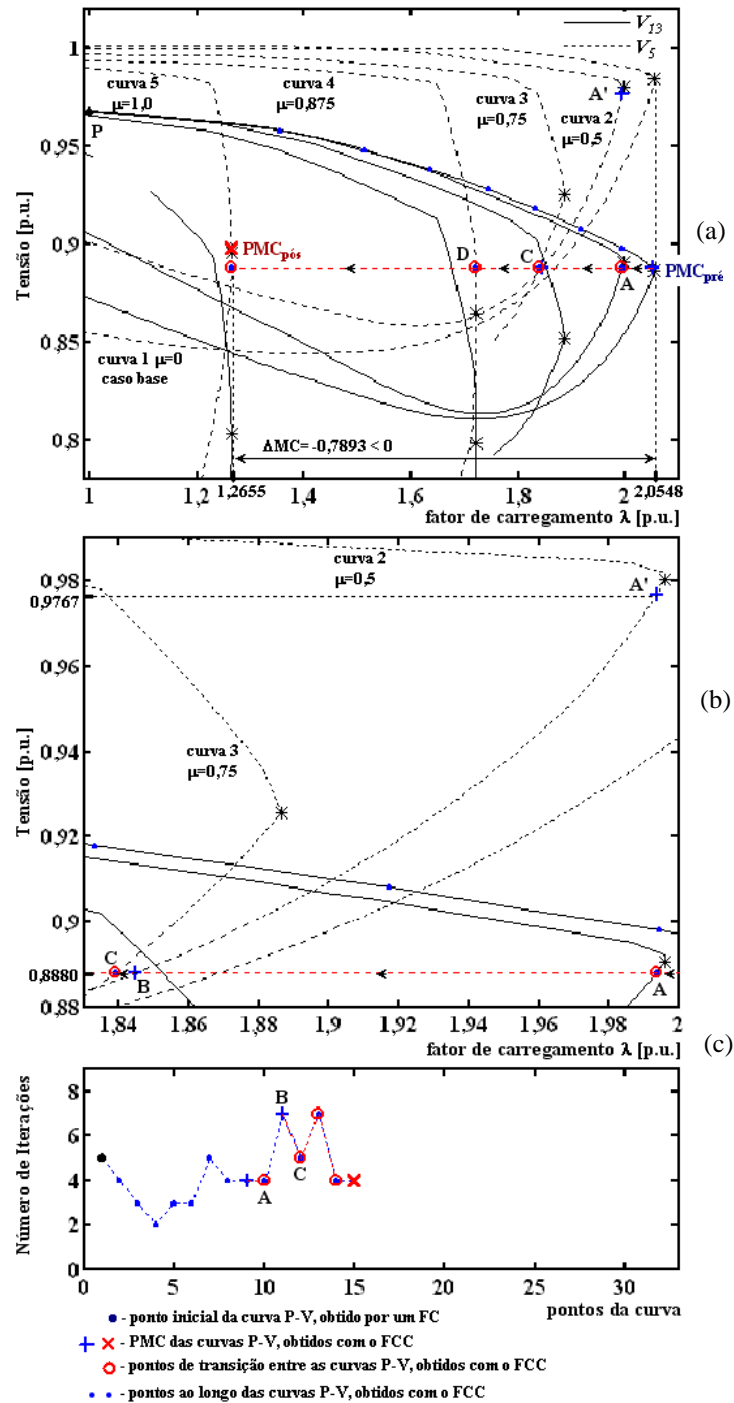


Figura 34 - Desempenho da mudança do parâmetro utilizado pelo fluxo de carga continuado proposto para obtenção da margem de carregamento para a contingência do transformador do ramo 8, inicializando com a tensão da barra crítica (V_{13}) do caso base:
(a) curvas PV; (b) número de iterações

Por outro lado, conforme se nota na figura 35, o uso da tensão da barra 9 mostrou-se mais eficiente, no tocante a passagem de uma curva para outra, porque após a obtenção do ponto sobre a curva 2, a tensão da barra 5 encontrava-se mais próxima da tensão da barra 9. Assim,

o processo pôde prosseguir sem a necessidade de passos de ajuste intermediário até obter o ponto de máximo carregamento de pós-contingência. Foram realizadas ao todo 29 iterações, sendo 17 iterações necessárias para passar de uma curva PV para outra. Assim, no geral, pode-se considerar que os dois parâmetros apresentaram praticamente o mesmo desempenho, i.e., a necessidade de um passo de ajuste intermediário não implica num aumento sensível no número total de iterações. Observa-se também, que com este procedimento obtém-se praticamente o mesmo desempenho que o alcançado partindo do caso base ($\lambda = 1$) convergido e aplicando contingência da linha de transmissão e que foi igual a 28, conforme apresentado na figura 32(d). Portanto, seria possível, a princípio, reduzir o número total de iterações evitando-se a determinação dos pontos de máximo carregamento intermediários. Entretanto, como será visto a seguir, esse procedimento nem sempre é possível, e assim foi descartado em função da garantia de sucesso na obtenção do ponto de máximo carregamento de pós-contingência.

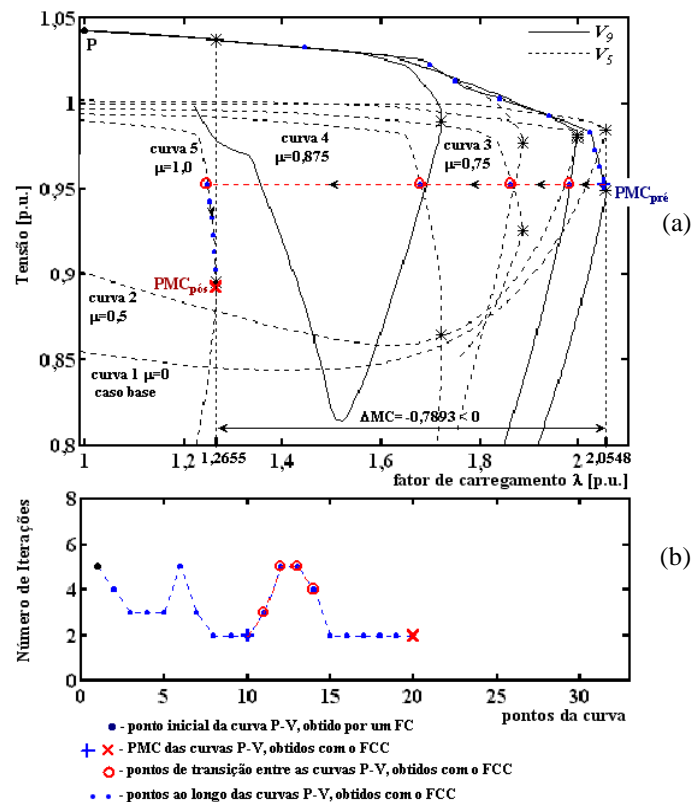


Figura 35 - Desempenho da mudança do parâmetro utilizado pelo fluxo de carga continuado proposto para obtenção da margem de carregamento para a contingência do transformador do ramo 8, inicializando com a tensão da barra 9 do caso base:
(a) curvas PV; (b) número de iterações

As figuras 36 e 37 apresentam, para a contingência da linha de transmissão 116, o desempenho da mudança do parâmetro utilizado pelo fluxo de carga continuado proposto durante o procedimento de obtenção da margem de carregamento de pós-contingência. Novamente foram consideradas as tensões do caso base das duas barras, barra 9 e barra 13 (a barra crítica) como parâmetro da continuação. É importante notar que no caso desta contingência em particular, bem como para muitas outras, as respectivas curvas PV, para o caso base ($\mu = 0$) e para contingência de 50% ($\mu = 0,5$), de todas as barras, são praticamente coincidentes, conforme se pode verificar no detalhe da figura 36(a). Também, como pode verificar nessas duas figuras, tanto a tensão da barra 9 quanto da barra 13 apresentam, para $\mu > 0,5$, um comportamento similar ao apresentado no detalhe da figura 32(b), ou seja, não se pode apenas fixar qualquer uma destas tensões no correspondente valor do ponto de máximo carregamento de pré-contingência do caso base e considerar $\mu = 1$, porque não existirá solução das equações do fluxo de carga nestas condições. Assim, apesar da margem de carregamento do sistema após esta contingência ser de 91,79%, o uso da tensão da barra 9 como parâmetro e a fixação do valor do μ em 1 impossibilitaria a classificação quanto ao grau de severidade desta contingência.

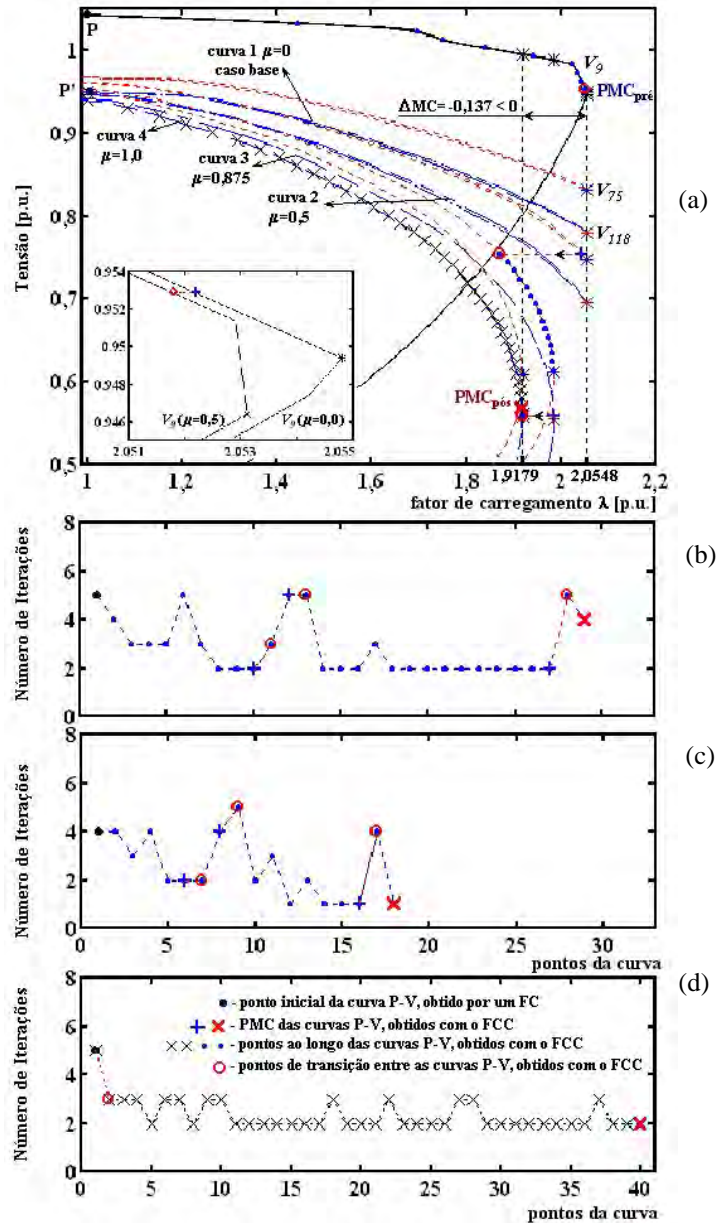


Figura 36 - Desempenho da mudança do parâmetro utilizado pelo fluxo de carga continuado proposto para obtenção da margem de carregamento para a contingência da linha de transmissão 116 entre as barras 69 e 75, inicializando com a tensão da barra 9 do caso base: (a) curvas PV; (b) número de iterações; (c) número de iterações com tolerância de 10^{-2} p.u. para os *mismatches* e passo de 0,02 p.u. para o parâmetro (V); (d) número de iterações, partindo do caso base ($\lambda = 1$) convergido e aplicando contingência da linha

Entretanto, com o critério adotado para troca de parâmetro, ou seja, o de considerar como parâmetro da continuação a tensão da barra que apresentasse a maior taxa de variação durante a passagem de uma curva PV para outra, sendo que o seu correspondente valor de tensão no ponto de máximo carregamento deve ser o valor a ser mantido fixo durante a passagem de uma curva para a outra, possibilita a obtenção do ponto de máximo carregamento de pós-

contingência sem nenhuma dificuldade numérica. O número total de iterações necessárias, 51 e 61, pode ser visto nas figuras 36(b) e 37(b), respectivamente. Desse total, foram necessárias, em ambos os casos, 13 iterações para passar de uma curva PV para outra, enquanto que o correspondente nas fases de refinamento foram 38 e 48 iterações, respectivamente. Observa-se que o uso da tensão da barra 9 como parâmetro resultou num menor número de iterações, ou seja, nem sempre o uso da tensão da barra crítica levará a um melhor desempenho. Na figura 36(d) pode-se ver que neste caso, e que corresponde à grande maioria das contingências, o número total de iterações necessárias para se obter o ponto de máximo carregamento de pós-contingência, partindo do caso base ($\lambda = 1$) convergido e aplicando contingência da linha de transmissão, foi igual a 90 iterações. Portanto, maior que o número total de iterações necessárias para se determinar o ponto de máximo carregamento a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência.

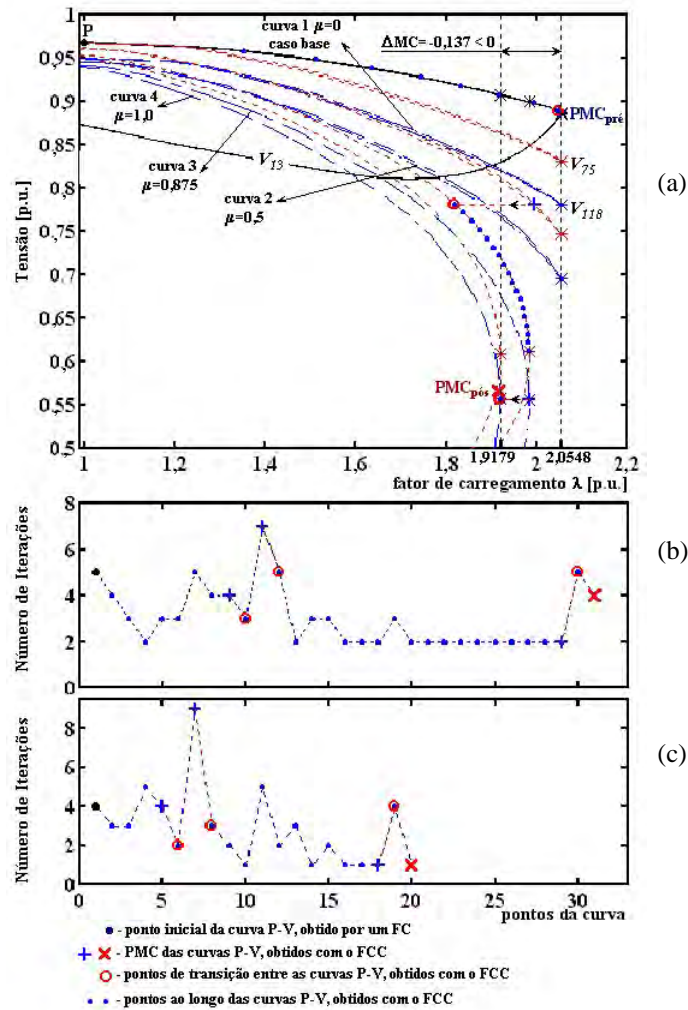


Figura 37 - Desempenho da mudança do parâmetro utilizado pelo fluxo de carga continuado proposto para obtenção da margem de carregamento para a contingência da linha 116 entre as barras 69 e 75, inicializando com a tensão da barra crítica (barra 13) do caso base: (a) curvas PV; (b) número de iterações; (c) número de iterações com tolerância de 10^{-2} p.u. para os *mismatches* e passo de 0,02 p.u. para o parâmetro (V)

Nas figuras 36(c) e 37(c) pode-se verificar que com a redução da tolerância dos *mismatches* de 10^{-4} para 10^{-2} p.u., e o aumento do passo do parâmetro de 0,01 p.u. para 0,02 p.u., o número total de iterações foi reduzido para 27, e 38, respectivamente. Desse total foram necessárias respectivamente, 11 e 9 iterações para se passar de uma curva PV para outra, e 16 e 29 durante as fases de refinamento. Portanto, alcançou-se uma redução total adicional de 24 e 23 iterações, sem uma perda significativa da precisão do valor percentual de redução da margem de carregamento, cujo valor obtido anteriormente era de 91,79%, e agora é de 92,13%.

4.3 Margem de carregamento a partir do caso base

4.3.1 Resultados obtidos para o sistema IEEE 14 Barras

A figura 38 apresenta o desempenho do método proposto para a contingência das duas linhas de transmissão localizadas entre as barras 1 e 2 do sistema IEEE 14 barras. A figura 38(a) mostra as respectivas curvas PV de: pré ($\mu=0$), parcial ($\mu=0,9908$) e pós ($\mu=1$) contingência. Os pontos A, B e C são os respectivos pontos de máximo carregamento. Para essa contingência em particular, o sistema não apresenta solução para as equações do fluxo de carga para $\lambda=1$, ponto O na figura 38(a), porque o λ do ponto de máximo carregamento de pós-contingência (PMC_{pós}, ponto C) é menor do que 1. Em outras palavras, para $\lambda=1$ não existe intersecção entre a linha perpendicular ao eixo λ e a respectiva trajetória de solução de pós-contingência. Isto também se confirma nas figuras 38(b) e (c) onde se vê as curvas no espaço do novo parâmetro. Estas curvas são obtidas usando um dos seguintes parâmetros: μ , Pa , V_5 e θ_5 . Similarmente ao apresentado no sistema exemplo do capítulo 3, pode ser verificado na figura 38(b) que a trajetória de solução do novo parâmetro apresenta um ponto de singularidade (PS) em $\mu_{\text{máx}}=0,9908$, onde a matriz Jacobiana modificada torna-se singular. Portanto, quando μ é usado como parâmetro o método de Newton apresentará dificuldades numéricas no ponto e em suas proximidades. Em particular, a situação de pós-contingência ($\mu=1$) não pode ser obtida. Por outro lado, a figura 38(b) mostra que o uso ou de Pa ou V_5 como parâmetro tem como vantagem a possibilidade de se obter pontos além do ponto de singularidade (PS) da trajetória de solução sem a necessidade de mudança de parâmetro. No caso do uso de θ_5 como parâmetro é somente possível se obter a curva até na vizinhança do ponto D, onde a matriz Jacobiana modificada J_θ torna-se singular. Neste ponto, é necessário se efetuar uma mudança de parâmetro se quisermos traçar a curva completa. Contudo, o ponto D está localizado na parte inferior da curva, e assim, a singularidade da matriz, correspondente ao parâmetro μ , no ponto de singularidade (PS), é evitada uma vez mais. Observa-se que este problema também pode ocorrer quando do uso de V_k como parâmetro, isto é, a matriz J_V , assim como a J_θ podem apresentar singularidades ou na parte inferior ou na superior da curva, dependendo da barra escolhida para ser parametrizada.

O objetivo da figura 38(d) é o de comparar o desempenho (número de iterações) das diversas parametrizações durante as mudanças de um estado (ponto da curva) para outro, assim os valores de cada parâmetro correspondentes a cada estado foram obtidos usando Pa como parâmetro; foi adotado um passo fixo de 4MW.

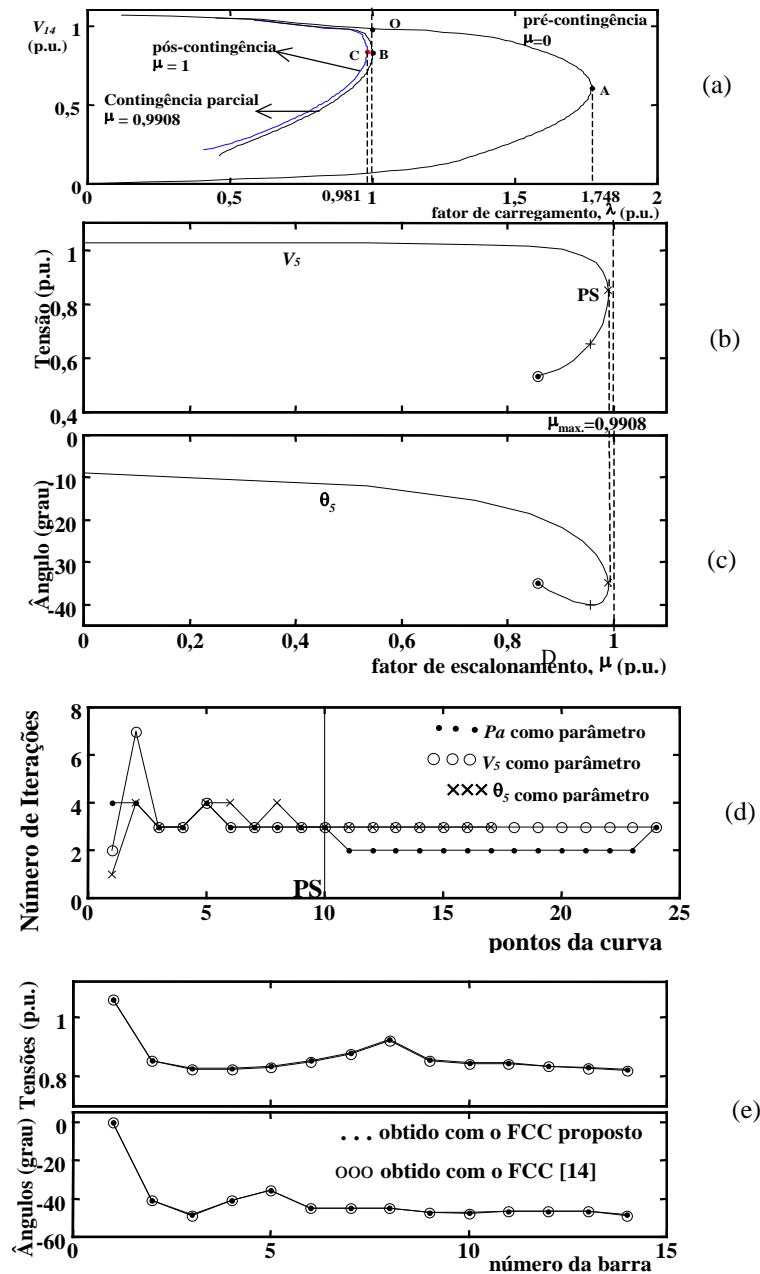


Figura 38 - (a) curvas PV de pré, parcial e pós-contingência da linha de transmissão 1, (b) tensão e ângulo *versus* μ , (c) perfis de tensão e ângulo, e (d) número de iterações

Uma vez obtidos todos os estados, os respectivos valores de cada parâmetro são calculados e a seguir usados como pontos estimados por seus respectivos métodos, ou seja,

usando a técnica de previsão trivial. Dessa forma garante-se que estes valores levarão o sistema de um mesmo estado inicial para o mesmo estado final. Com os parâmetros propostos o passo não precisa ser significativamente reduzido conforme se pode observar na figura 38(d), a qual apresenta o número necessário de iterações gasto para se obter cada ponto da curva. Destas figuras se nota que as parametrizações propostas resultam num excelente desempenho, particularmente na vizinhança do ponto de singularidade (PS). A figura 38(e) confirma que o estado do sistema no ponto B da curva PV da figura 38(a), ponto de máximo carregamento da curva PV para contingência parcial da linha de transmissão ($\mu=\mu_{\text{máx}}$), corresponde ao estado do ponto de singularidade (PS) da figura 38(b). Note que para este sistema a barra crítica de pós-contingência permanece a mesma do caso base, isto é, a barra 14. Assim, a partir do ponto B pode se determinar o ponto de máximo carregamento de pós-contingência ($\text{PMC}_{\text{pós}}$, ponto C) por meio de um fluxo de carga continuado utilizando a magnitude de tensão como parâmetro. Para isso basta se fixar a magnitude de tensão da barra 14 no seu respectivo valor e tratar λ como uma variável.

4.3.2 Resultados obtidos para o sistema IEEE 57 Barras

A figura 39(a) mostra as curvas PV de pré ($\mu=0$), parcial ($\mu=0,9775$) e pós ($\mu=1$) contingência PV para a saída da linha de transmissão 48 (localizada entre as barras 35 e 36), o qual corresponde à uma das mais severas contingências do sistema IEEE 57 barras. Conforme já apresentado anteriormente, as barras 31 e 35 são as respectivas barras críticas de pré e de pós-contingência. Os pontos A, B e C são os respectivos pontos de máximo carregamento. Considerando $\lambda=1$ como caso base, o fluxo de carga e o fluxo de carga continuado parametrizado por λ divergirão quando esta linha de transmissão for completamente removida de serviço porque para $\mu=1$ não existe nenhuma solução local para as equações do fluxo de carga e do fluxo de carga continuado parametrizado por λ . A figura 39(b) mostra a curva de V_{31} versus μ para a saída da linha 48, considerando cada um dos seguintes parâmetros: V_{31} , V_{35} , θ_{35} , e Pa .

Devido à singularidade da matriz Jacobiana modificada (J_{μ}) em $\mu_{\text{máx}}=0,9775$ (PS), no ponto de singularidade (PS) e próximo a ele, o método de Newton apresentará dificuldades numéricas se μ for usado como parâmetro. Assim, a trajetória de solução completa não pode

ser obtida quando do uso de μ como parâmetro. Isto significa que o ponto de máximo carregamento de pós-contingência (para $\mu=1$) não poderá ser obtido porque λ é menor do que o do caso base.

Da mesma forma que no caso do sistema IEEE 14 barras, para se garantir que os valores dos parâmetros levarão o sistema do mesmo estado inicial para o mesmo estado final, a figura 39(b) foi primeiramente obtida utilizando V_{31} como parâmetro; foi usado um passo fixo de 0,01 p.u. para esse parâmetro. Uma vez obtidos todos os estados, calculou-se os respectivos parâmetros os quais foram usados como pontos estimados por seus respectivos métodos.

A figura 39(b) mostra que para este sistema, ao contrário do parâmetro μ , os parâmetros V_{31} , V_{35} , θ_{35} , e Pa , possibilitam a obtenção do ponto de singularidade (PS). Em geral, a matriz Jacobiana modificada desses parâmetros, exceto o parâmetro Pa , podem tornar-se singular antes do ponto de singularidade ser atingido. Nesse caso, ou outro parâmetro V_k é utilizado, ou uma mudança no tipo do parâmetro (p.ex., para θ_k ou Pa) será necessário. Como será apresentado mais tarde, este é o caso do sistema IEEE 118 barras, para o qual nenhuma magnitude de tensão pôde ser usada como parâmetro. A dificuldade com a mudança de parâmetro está relacionada com a curvatura da trajetória de solução. Uma vez que essa curvatura não é conhecida a priori, fica muito difícil se identificar qual variável será mais apropriada para ser o parâmetro da continuação de forma que todos os pontos da curva sejam obtidos. Portanto, se faz necessário definir um procedimento para a mudança de parâmetro durante o processo de cálculo. Por outro lado, no caso do uso de Pa como parâmetro a respectiva matriz Jacobiana modificada também pode se tornar singular, contudo, similarmente aos casos apresentados em Alves et al. (2002), isto sempre acontecerá após a determinação do ponto de singularidade (PS). Assim, este parâmetro traz como vantagem a possibilidade de obtenção de pontos além do ponto de singularidade da trajetória de solução sem a necessidade da troca de parâmetro. Com os parâmetros propostos não há a necessidade da redução significativa do tamanho do passo conforme se pode confirmar pela comparação das figuras 39(c) e 39(d), que apresentam o número de iterações para o tamanho de passo simples e duplicado, respectivamente.

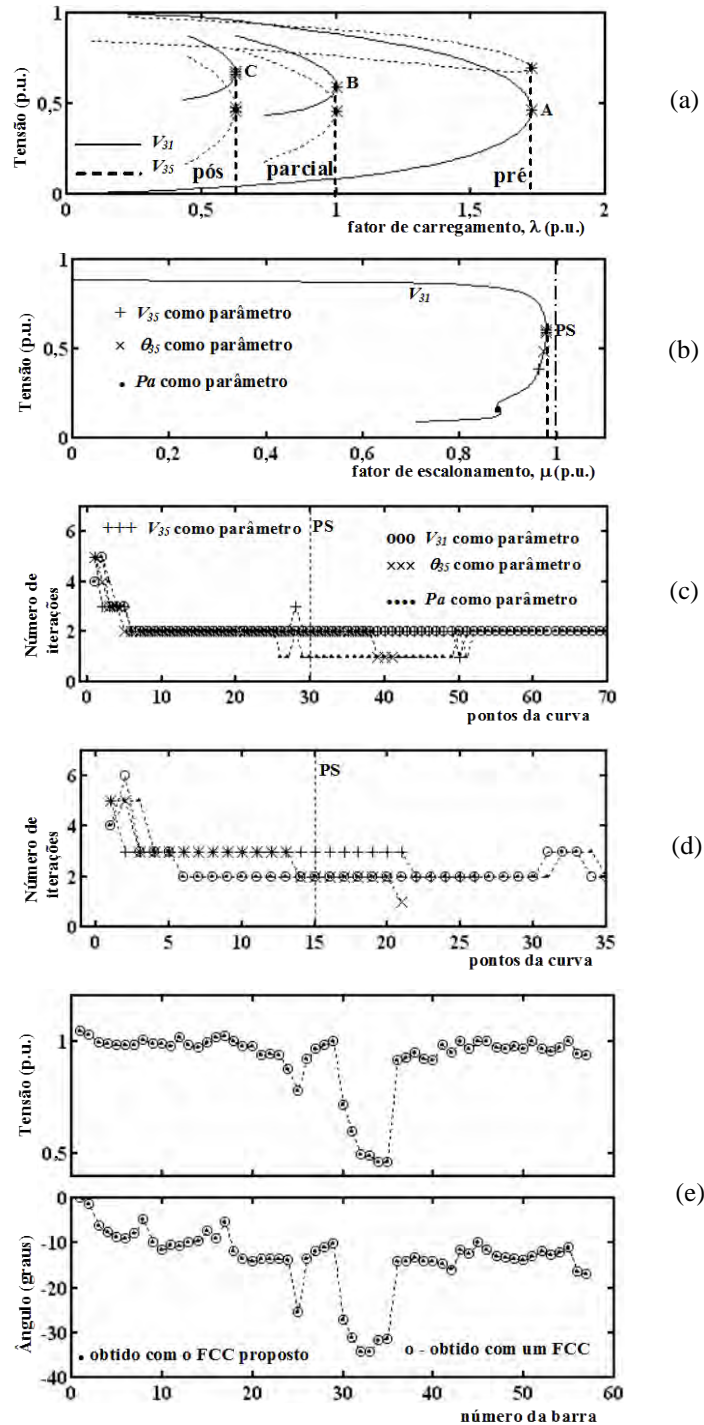


Figura 39 - (a) curvas PV de pré ($\mu=0$), parcial ($\mu=\mu_{\max}=0,9775$) e pós-contingência ($\mu=1$) para a saída da linha de transmissão 48 (localizada entre as barras 35 e 36) do IEEE 57 barras, (b) tensão versus μ , (c) número de iterações para passo simples, e (d) para passo duplicado, e (e) perfil de tensão e de ângulo

Note que a parametrização proposta resulta num excelente desempenho de convergência, particularmente na vizinhança do ponto de singularidade (PS). Novamente, como pode ser confirmado pelo perfil das magnitudes e ângulo das tensões apresentados na figura 39(e), a

solução do fluxo de carga continuado no ponto de máximo carregamento (ponto B) da curva PV correspondente à contingência parcial ($\mu=\mu_{\text{máx}}$) apresentada na figura 39(a), corresponde à solução no ponto de singularidade (PS) da figura 39(b). Além disso, neste ponto a barra crítica de pós-contingência (barra 35) já é conhecida.

Assim, iniciando do ponto B e fixando-se a magnitude de tensão da barra 35 e tratando λ como uma variável desconhecida, o ponto de máximo carregamento de pós-contingência (ponto C) pode ser calculado, por meio de um fluxo de carga continuado que utiliza a magnitude de tensão como parâmetro, após somente 4 iterações.

4.3.3 Resultados obtidos para o sistema IEEE 118 Barras

Para o caso base $\lambda=1$, nenhuma das contingências do sistema IEEE 118 barras levou à divergência do fluxo de carga ou do fluxo de carga continuado. Assim, para se verificar o desempenho do método proposto para este sistema, foi considerado um caso particular da contingência de um transformador (ramo 8, localizado entre as barras 5 e 8). A contingência foi aplicada considerando um novo caso base onde $\lambda=1,7$ p.u. porque o ponto de máximo carregamento de pós-contingência é igual a 1,2655 p.u., ou seja, maior do que o λ do caso base. A figura 40(a) mostra as curvas PV de pré ($\mu=0$), parcial ($\mu=0,8855$) e de pós ($\mu=1$) contingência para a saída do ramo 8. Os pontos A, B e C são os respectivos pontos de máximo carregamento, e V_{13} é a barra crítica para ambos os casos: de pré e de pós-contingência.

A figura 40(b) mostra a curva PV da magnitude de tensão da barra crítica, V_{13} , versus μ para a saída do ramo 8, considerando cada um dos seguintes parâmetros: θ_3 e Pa . Para este sistema e contingência em particular, nenhuma magnitude de tensão de barra possibilitou a obtenção da solução, quando foi utilizada como parâmetro da continuação. Somente com o uso de θ_3 ou Pa como parâmetro da continuação se alcançou êxito na obtenção do ponto de singularidade (PS) e dos demais pontos além deste. A figura 40(b) foi obtida primeiramente pelo uso de Pa como parâmetro. Inicialmente foi usado um tamanho de passo fixo de 1.0 MW, o qual foi aumentado para 10 MW logo após a obtenção dos primeiros quatro pontos.

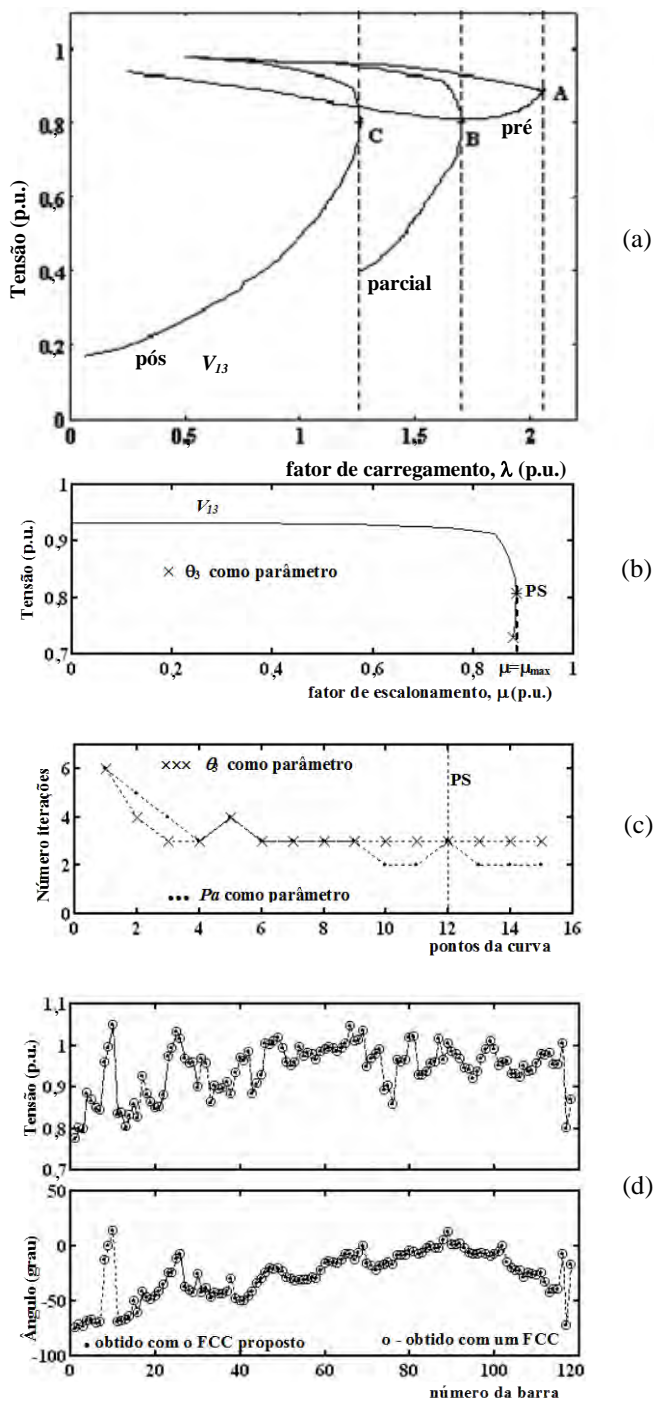


Figura 40 - (a) Curvas PV de: pré ($\mu=0$), parcial ($\mu=\mu_{\max}=0,8855$) e de pós-contingência ($\mu=1$) para a saída do ramo 8 (localizado entre as barras 5 e 8) do IEEE 118 barras, (b) magnitude de tensão versus μ , (c) número de iterações, e (e) perfis de tensão e ângulo

Com os respectivos valores do parâmetro θ_3 computados, comparou-se o desempenho de ambos os parâmetros, conforme apresentado na figura 40(c). Ambos os parâmetros propostos resultaram em um excelente desempenho no que se refere a convergência, particularmente na vizinhança do ponto de singularidade (PS). Os perfis de tensão e de ângulo apresentados na

figura 40(d) confirmam uma vez mais que a solução do fluxo de carga no ponto de máximo carregamento (ponto B) da curva PV correspondente à contingência parcial ($\mu=\mu_{\text{máx}}$) apresentada na figura 40(a), corresponde à solução no ponto de singularidade (PS) da figura 40(b). A barra 13 foi a indicada como a barra crítica de pós-contingência. Assim, partindo-se do ponto B e prefixando a magnitude de tensão desta barra igual ao seu respectivo valor no ponto B, e tratando λ como uma variável desconhecida, o ponto de máximo carregamento de pós-contingência (ponto C) pôde ser facilmente obtido por meio de um fluxo de carga continuado que utiliza a magnitude de tensão como parâmetro, em apenas 4 iterações.

4.4 Comparação entre os métodos propostos

O principal objetivo desta seção é comparar o número de iterações necessárias para se obter a margem de carregamento de pós-contingência de cada sistema, utilizando o método proposto de obtenção da margem a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência e o método clássico de obtenção da margem a partir do caso base. Nos testes, a tensão da barra crítica foi usada como parâmetro no fluxo de carga continuado, com passos de 0,01 p.u.

Como descrito no capítulo 2, os critérios de avaliação da estabilidade de tensão definidos pelo WSCC (ABED, 1999) também recomendados pela FTCT (Força Tarefa “Colapso de Tensão”) (FTCT, 1999), são especificados em termos de margens mínimas de potência ativa (MP) e reativa (MQ). Os valores mínimos variam de acordo com quatro categorias de desempenho (A, B, C e D), vide tabela 2. Para o nível A (contingência simples N-1), $MP > 5\%$ e para o nível C (contingências duplas N-2), $MP > 2,5\%$.

Tabela 2 – Critérios para estabelecimento de margem em estudos de estabilidade de tensão

Nível de Desempenho	Distúrbio (1), (2), (3) iniciado por: Com ou sem falta Distúrbio em CC	Margem (4), (5), (6) em MW (Método PV)	Margem (5), (6) em MVAr (Método VQ)
A	Qualquer elemento: gerador, circuito, transformador, fonte de reativos, monopólio CC	$\geq 5\%$	Cenário do pior caso (7)
B	Seção do barramento	$\geq 2,5\%$	50% da margem requerida no nível A

C	Qualquer combinação de dois ou mais elementos: linha de transmissão + gerador, linha de transmissão + fonte de reativos, dois geradores, duas linhas de transmissão, bipólo CC, etc.	$\geq 2,5\%$	50% da margem requerida no nível A
D	Qualquer combinação de três ou mais elementos: usina, subestação, etc.	$> 0\%$	$> 0\%$

- (1) A tabela se aplica igualmente a sistemas com todos os elementos em serviço (normal) e a sistemas com um elemento removido (sob contingência simples: N-1) e o sistema reajustado. Os ajustes do sistema, após a remoção de um elemento no caso base (para os níveis A - D), incluem todos os ajustes que podem ser realizados dentro de um período de 60 minutos para levar o sistema para a próxima condição de operação estável de regime posteriormente à remoção do elemento, por exemplo: redespacho da geração, ajustes de *taps* e de intercâmbios, etc.
- (2) Para aplicação destes critérios por membros pertencentes ao sistema, são permitidos esquemas de alívio de carga para se atender o nível A.
- (3) A margem para a condição do caso base deverá ser maior que a do desempenho de nível A.
- (4) O ponto de máxima operação no eixo P precisa ter uma margem igual ou maior que os valores da tabela, sendo medida da ponta do “nariz” da curva PV para cada nível de desempenho.
- (5) As técnicas de análise pós-transitória devem ser utilizadas na aplicação dos critérios. Estudos deveriam ser conduzidos para se verificar se o sistema é transitoriamente e dinamicamente estável; este procedimento é importante para confirmar se nenhuma instabilidade de ângulo é a responsável pelo colapso de tensão.
- (6) Para determinar a margem requerida por seu sistema, cada membro do sistema deveria considerar, conforme apropriado, as incertezas tais como: cargas ativas e reativas maiores que a prevista, bem como variações nas características da carga especialmente nos fatores de potência da carga; reservas de potência reativa em tempo real que não estão disponíveis; limites de potência reativa nos geradores internos mais restritivos que o planejado; com relação aos sistemas vizinhos: restrições de potência reativa maiores que o planejado, saídas de elementos não rotineiramente estudadas, variações nos despachos; etc.
- (7) A barra com maior deficiência de reativo precisa ter uma margem adequada de potência reativa para a pior contingência simples de modo a satisfazer uma das seguintes condições (a que for pior): i – 5% de aumento além da máxima carga prevista; ii – 5% de aumento além do máximo intercâmbio permitido. A pior contingência é aquela que causa a maior diminuição na margem de potência reativa.

Para exemplificar os critérios adotados pelo WSCC, através do traçado da curva PV, consideremos as curvas PV de pré e pós-contingência mostradas na figura 41. Consideremos ainda que a curva de pós-contingência representa a contingência mais severa do sistema. Como nota-se na figura, essa contingência provocou uma redução de 0,426 p.u. na potência ativa (valor obtido da diferença entre o ponto de máximo carregamento da curva de pré-contingência (ponto 1) e o da curva de pós-contingência (ponto 2)). Deve-se assumir ainda 5% de margem, calculada sobre o ponto de máximo carregamento de pós-contingência, como incertezas. Assim teremos uma redução adicional de 0,0671 p.u., resultando no limite de carregamento do sistema igual a 1,275 p.u. (ponto 3). A distância entre os pontos 2 e 3 representam os 5% de margem para a contingência simples mais crítica do sistema.

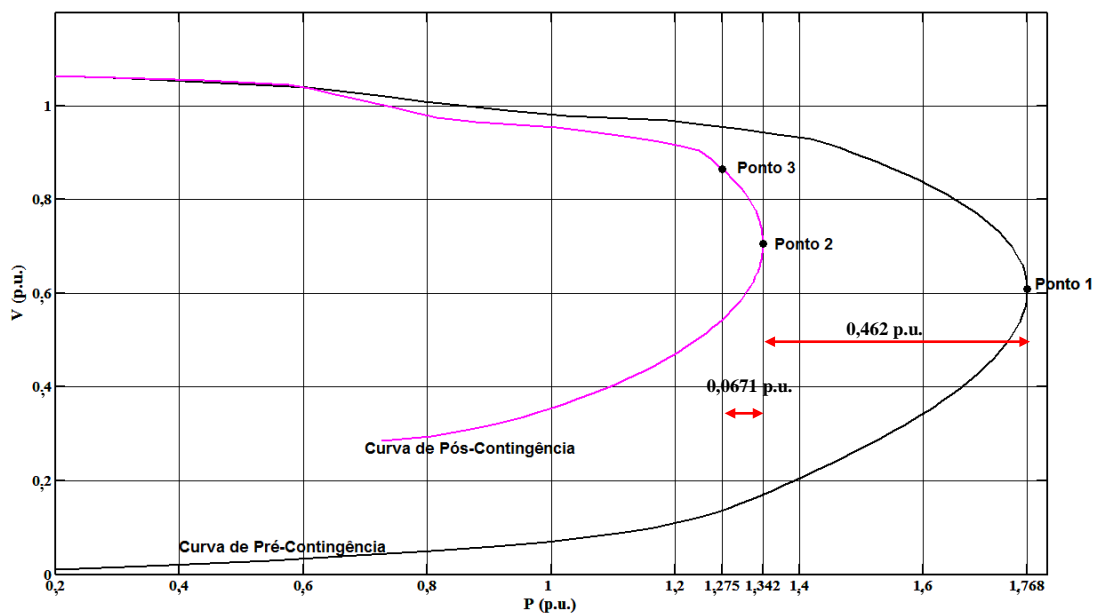


Figura 41 - Exemplo de curva PV para obtenção da margem de carregamento

4.4.1 Resultados obtidos para o sistema IEEE 14 Barras

Na figura 42 está representado o sistema IEEE 14 barras e a figura 4.18 mostra as curvas PV da barra 14 de pré-contingência e de pós-contingência para a saída de cada ramo do sistema, exceto aqueles que provocam ilhamento (8, 14 e 15) deste sistema. A curva 1 representa o caso de pré-contingência.

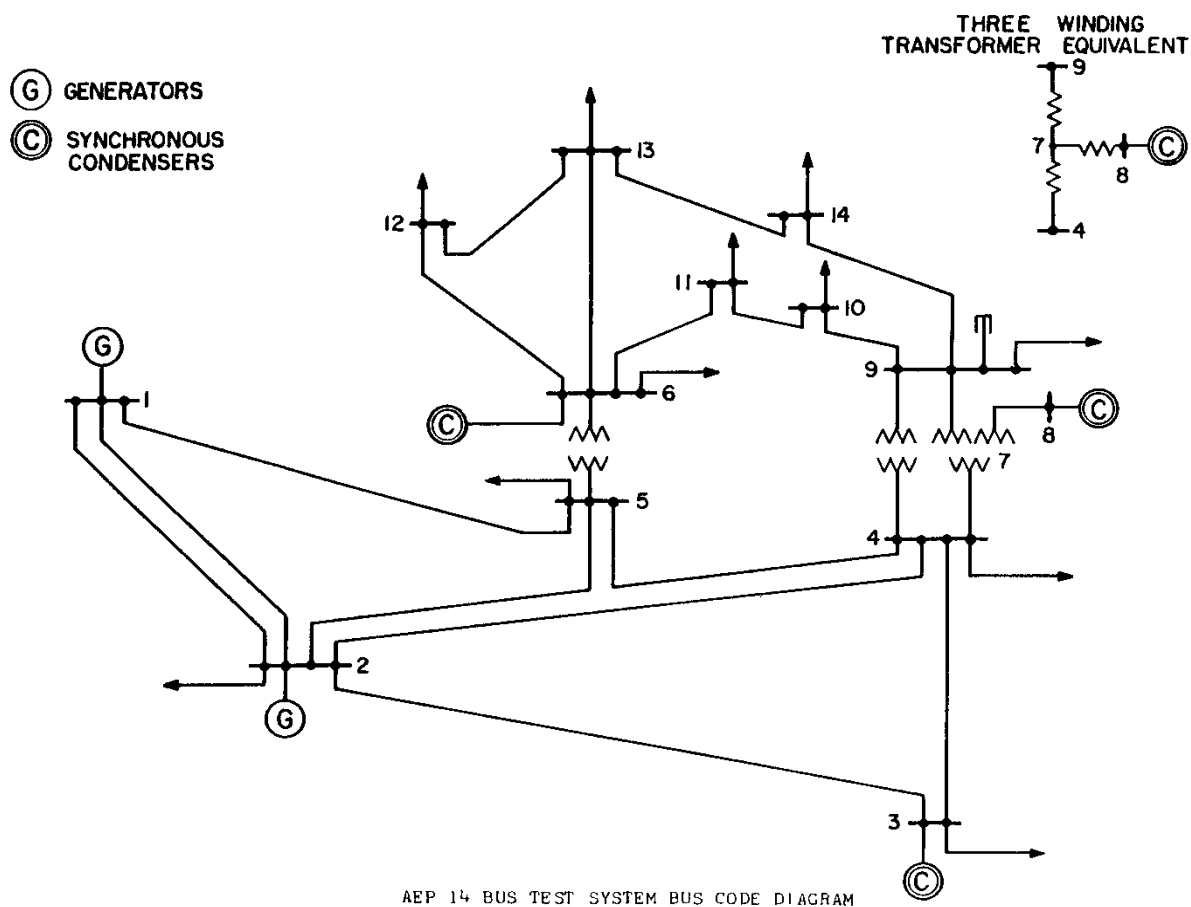


Figura 42 - Sistema IEEE 14 barras

Como já mostrado anteriormente a saída das duas linhas de transmissão entre as barras 1 e 2 (curva 4) é a contingência mais crítica do sistema IEEE 14 barras, proporcionando inclusive uma margem de carregamento negativa ($PMC_{pós} = 0,981$ p.u.). A curva 3 representa a saída da linha 3 entre as barras 2 e 3 ($PMC_{pós} = 1,2991$ p.u.), enquanto que a curva 2 representa a situação de pós-contingência pela saída do transformador do ramo 10 entre as barras 5 e 6 ($PMC_{pós} = 1,3421$ p.u.). Essas três contingências provocam reduções maiores que 50% na margem de carregamento do sistema.

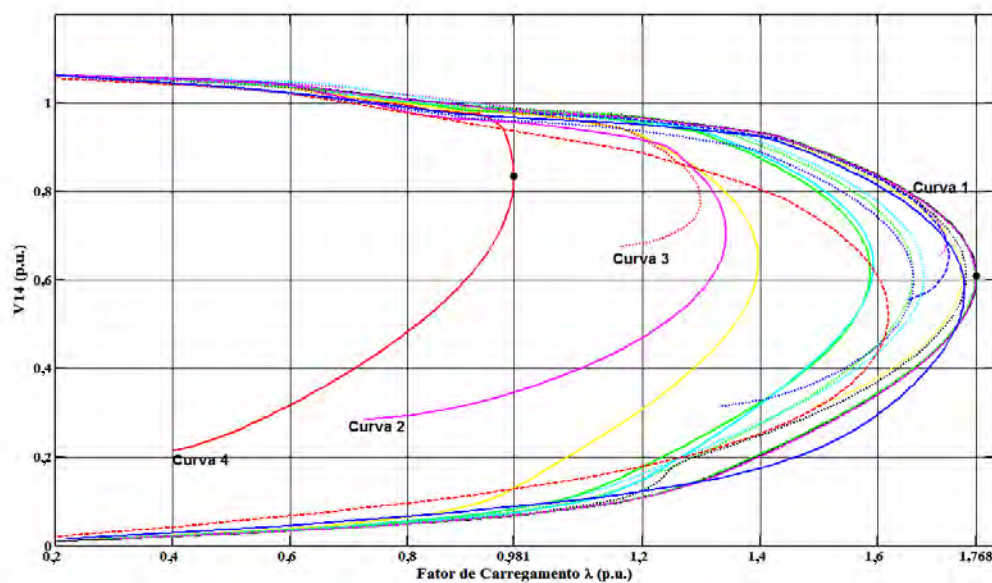


Figura 43 - Curvas PV da barra 14 de pré ($\mu=0$) e de pós-contingência ($\mu=1$) para a saída dos ramos do sistema IEEE 14 barras

Na tabela 3 são apresentadas as margens de carregamento de pós-contingência e as respectivas reduções percentuais para as contingências simples aplicadas a cada ramo do sistema IEEE 14 barras, que não provocassem ilhamentos.

Tabela 3 – Margens de carregamento de pós-contingência e reduções percentuais sistema IEEE 14 barras

IEEE 14 BARRAS - CONTINGÊNCIAS SIMPLES DE RAMOS									
		BARRA				BARRA			
RAMO	DE	PARA	MARGEM (p.u.)	REDUÇÃO %	RAMO	DE	PARA	MARGEM	%
1	1	2	-0,019	102,5%	11	6	11	0,751	2,2%
2	1	5	0,397	48,3%	12	6	12	0,743	3,2%
3	2	3	0,299	61,1%	13	6	13	0,661	13,9%
4	2	4	0,587	23,5%	16	9	10	0,721	6,1%
5	2	5	0,660	14,0%	17	9	14	0,618	19,5%
6	3	4	0,717	6,7%	18	10	11	0,766	0,3%
7	4	5	0,593	22,9%	19	12	13	0,767	0,2%
9	4	9	0,679	11,6%	20	13	14	0,748	2,6%
10	5	6	0,342	55,5%					

Na figura 44 verifica-se a redução na margem de carregamento para a contingência de cada um dos ramos do sistema. No detalhe da figura 44 nota-se a margem de carregamento

negativa (redução de 102,5%) com a saída das duas linhas de transmissão entre as barras 1 e 2 do sistema.

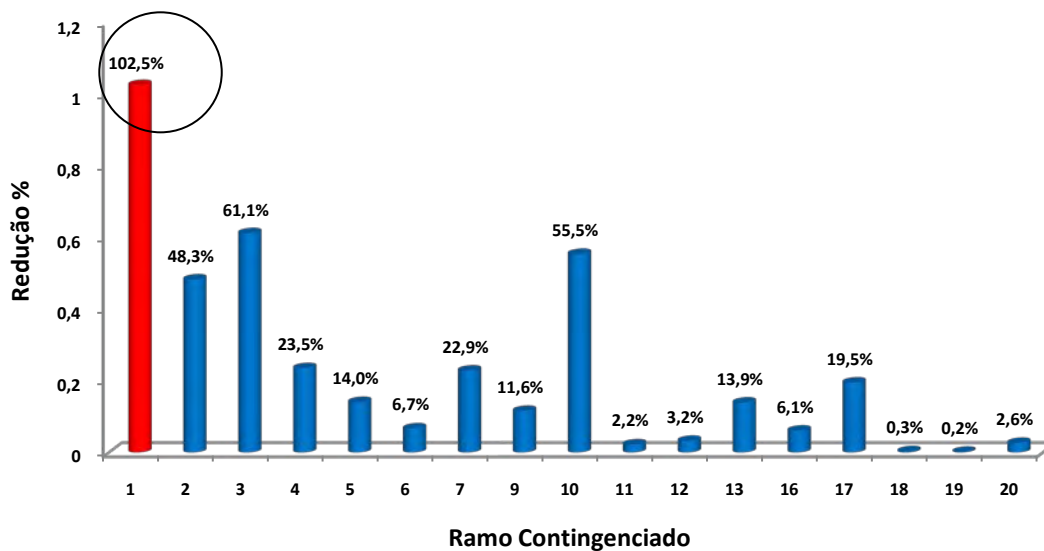


Figura 44 - Redução percentual na margem de carregamento do sistema IEEE 14 barras para as contingências dos ramos

Na figura 45 são mostradas as margens de carregamento de pós-contingência em p.u. e as respectivas reduções percentuais nas margens. É possível observar as contingências das linhas de transmissão 1 com margem negativa, da linha de transmissão 3 e do transformador do ramo 10 como as mais severas (redução acima de 50%).

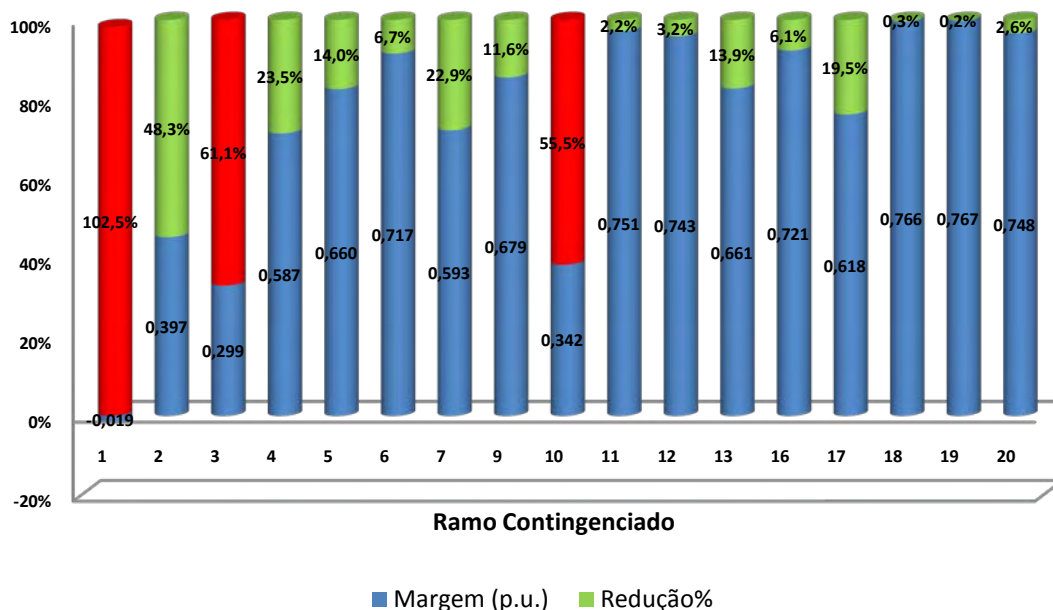


Figura 45 - Margens de carregamento de pós-contingência e redução na margem do sistema IEEE 14 barras

Com a contingência das duas linhas de transmissão do ramo 1 (entre as barras 1 e 2), o sistema entrará em colapso caso não haja corte de carga ou compensação de reativos ($MC < 0$).

A figura 46 mostra o número de iterações para obtenção da margem de carregamento de pós-contingência do sistema IEEE 14 barras, para todas as contingências simples de linhas de transmissão e de transformadores, exceto aquelas que provocam ilhamento de barras, para o método proposto neste trabalho e a partir do caso base (fator de carregamento $\lambda = 1$). Para a saída das duas linhas de transmissão do ramo 1, entre as barras 1 e 2, observa-se que não é possível obter a margem de carregamento através do traçado da curva PV a partir do caso base, visto que esta contingência apresenta margem negativa.

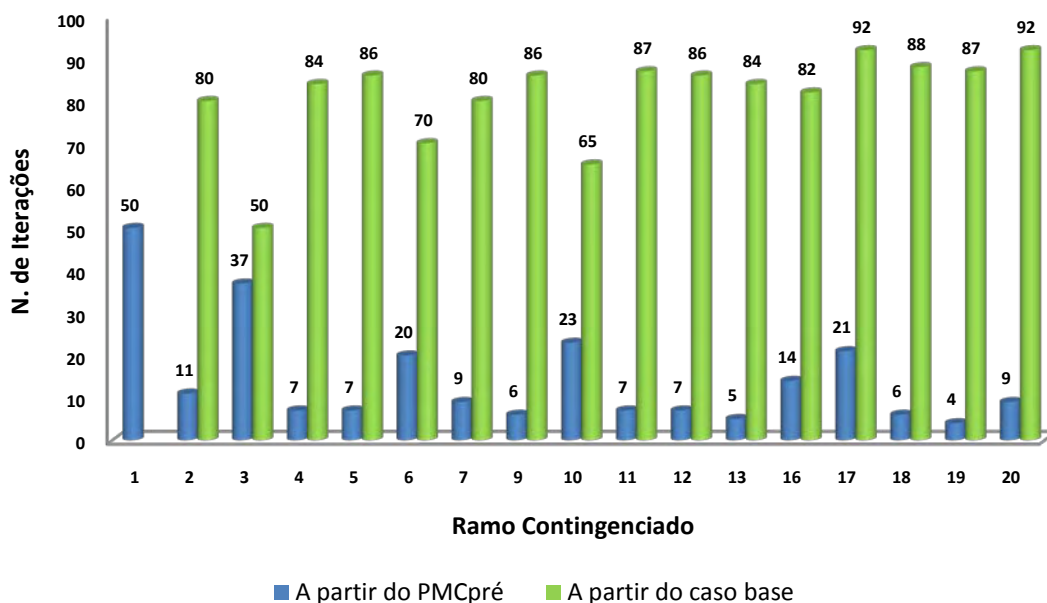


Figura 46 - Número de iterações para obtenção das margens de carregamento de pós-contingência do sistema IEEE 14 barras, para os dois métodos comparados

Ainda na figura 46 pode-se observar a grande diferença entre o número de iterações para obtenção da margem entre os dois métodos. Exceto as margens referentes às contingências dos ramos 3 e 6 do sistema IEEE 14 barras, as demais margens puderam ser obtidas a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência, aplicando-se diretamente a contingência total do ramo ($\mu=1$).

Para a obtenção da margem de carregamento de pré-contingência foram necessárias 81 iterações.

4.4.2 Resultados obtidos para o sistema IEEE 30 Barras

Na figura 47 está representado o sistema IEEE 30 barras.

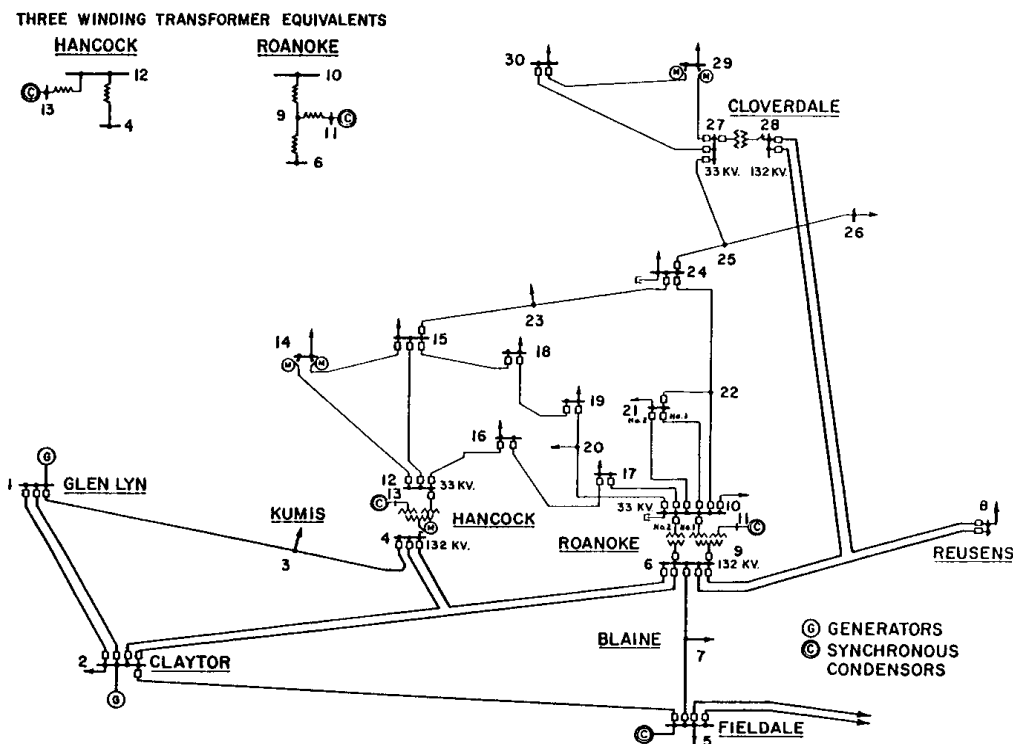


Figura 47 - Sistema IEEE 30 barras

A figura 48 mostra as curvas PV da barra 30 (barra crítica) do sistema IEEE 30 barras de pré e pós-contingência para a saída de cada ramo do sistema, exceto aqueles que provocam ilhamento, utilizando o método de obtenção da margem de carregamento a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência (curva 1, $PMC_{pré} = 1,5335$ p.u.).

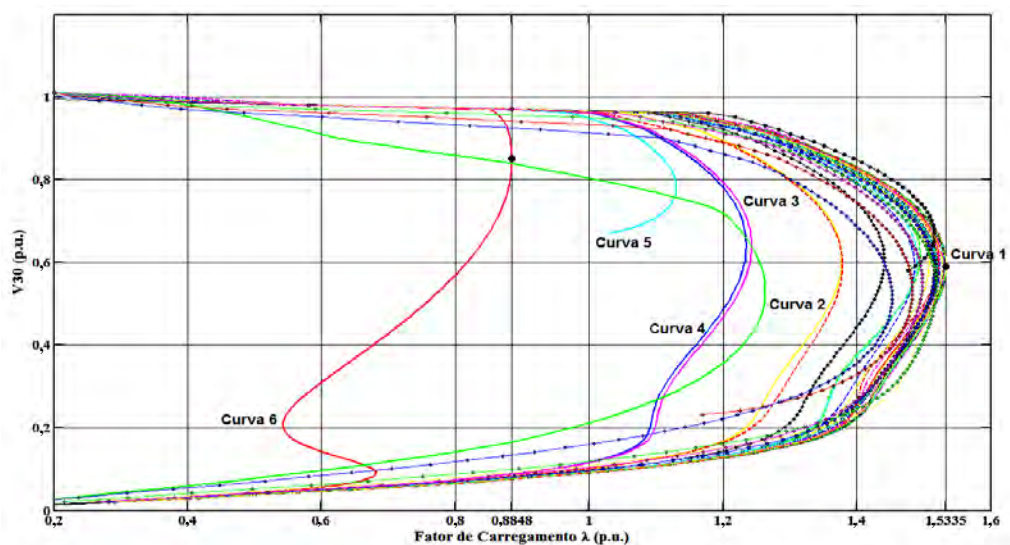


Figura 48 - Curvas PV da barra 30 de pré ($\mu=0$) e de pós-contingência ($\mu=1$) para a saída dos ramos do sistema IEEE 30 barras

A contingência mais severa é a saída do ramo 1 (entre as barras 1 e 2) representada pela curva 6 na figura 48, que apresenta uma margem de carregamento de pós-contingência negativa ($PMC_{pós} = 0,8848$ p.u.). Outras contingências com saídas totais dos ramos ($\mu=1$) que provocam redução maiores que 50% na margem de carregamento, ocorre na saída da linha 5 entre as barras 2 e 5 (curva 5); saída da linha 2 entre as barras 1 e 3 (curva 4); saída da linha 4 (entre as barras 3 e 4), curva 3; contingência do transformador do ramo 36 entre as barras 28 e 27, representada pela curva 2 da figura 48.

Na tabela 4 são apresentadas as margens de carregamento de pós-contingência e as respectivas reduções percentuais para as contingências simples aplicadas a cada ramo do sistema IEEE 30 barras, que não provocassem ilhamentos.

Tabela 4 – Margens de carregamento de pós-contingência e reduções percentuais sistema IEEE 30 barras

IEEE 30 BARRAS - CONTINGÊNCIAS SIMPLES DE RAMOS									
RAMO	BARRA		MARGEM (p.u.)	REDUÇÃO %	RAMO	BARRA		MARGEM (p.u.)	REDUÇÃO %
	DE	PARA				DE	PARA		
1	1	2	-0,115	121,6%	23	18	19	0,531	0,4%
2	1	3	0,235	55,9%	26	10	17	0,523	1,9%
3	2	4	0,441	17,3%	27	10	21	0,509	4,7%
4	3	4	0,243	54,5%	28	10	22	0,528	1,1%
5	2	5	0,130	75,6%	29	21	22	0,533	0,0%
6	2	6	0,378	29,2%	30	15	23	0,520	2,6%
7	4	6	0,379	29,0%	31	22	24	0,516	3,2%
8	5	7	0,524	1,7%	32	23	24	0,530	0,6%
9	6	7	0,388	27,3%	33	24	25	0,533	0,1%
10	6	8	0,486	8,9%	35	25	27	0,516	3,3%
12	6	10	0,495	7,3%	36	28	27	0,264	50,6%
17	12	14	0,522	2,1%	37	27	29	0,483	9,4%
18	12	15	0,491	8,1%	38	27	30	0,453	15,1%
19	12	16	0,522	2,1%	39	29	30	0,519	2,8%
20	14	15	0,533	0,1%	40	8	28	0,528	1,1%
21	16	17	0,530	0,6%	41	6	28	0,498	6,6%
22	15	18	0,523	2,0%					

A figura 49 mostra a redução na margem de carregamento para a contingência de cada um dos ramos do sistema IEEE 30 barras. A contingência das duas linhas de transmissão entre

as barras 1 e 2 (ramo 1) levam a uma margem de carregamento negativa, com redução de 122%, como pode ser visto no detalhe da figura 49.

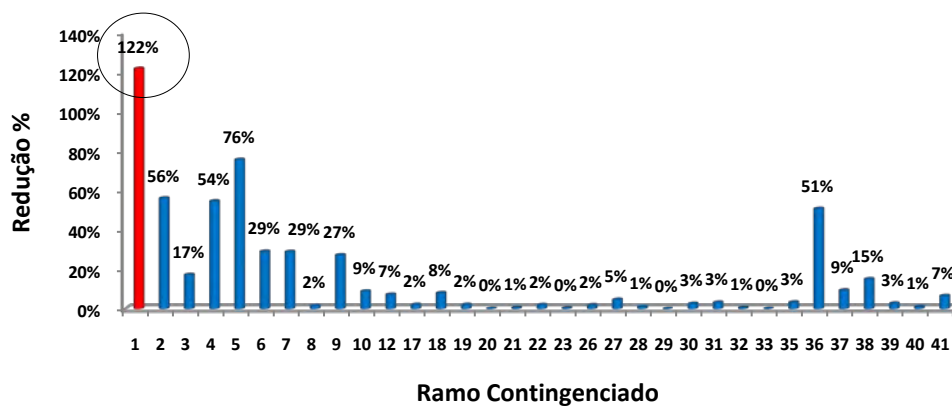


Figura 49 - Redução percentual na margem de carregamento do sistema IEEE 30 barras para as contingências dos ramos

Nas figuras 50(a) e 50(b) são mostradas as margens de carregamento de pós-contingência em p.u. e as respectivas reduções percentuais nas margens. Destacam-se nas mesmas figuras a contingência da linha de transmissão 1 com margem negativa e as contingências das linhas 2, 4, 5 e 36 como as mais severas do ponto de vista de redução da margem de carregamento, com reduções superiores a 50%.

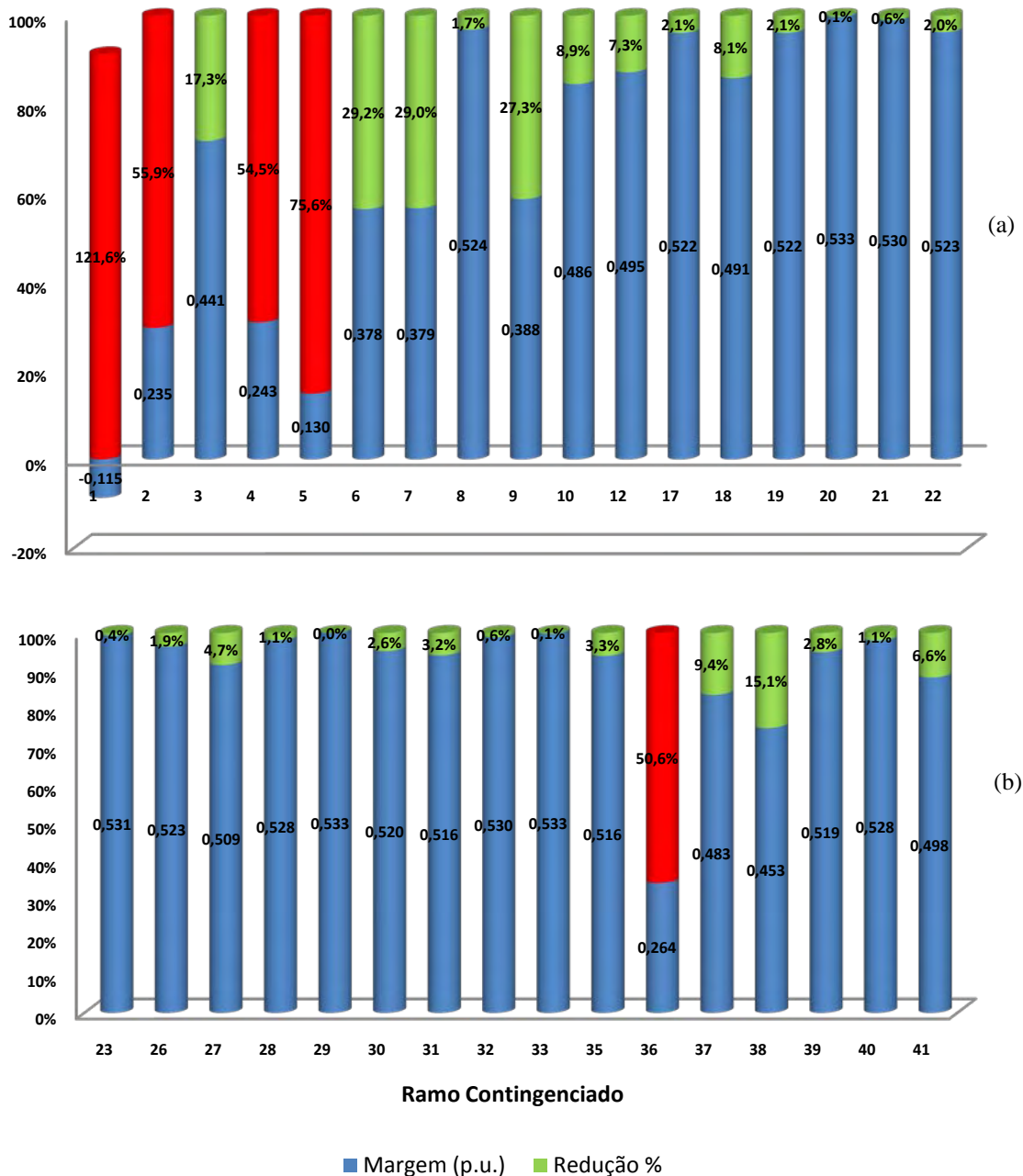


Figura 50 - Margens de carregamento de pós-contingência e redução na margem do sistema IEEE 30 barras: (a) contingências dos ramos 1 a 22; (b) contingências dos ramos 23 a 41

Assim como ocorrido com o sistema IEEE 14 barras, a figura 51 mostra, para o sistema IEEE 30 barras, a grande diferença entre o número de iterações para a obtenção da margem de carregamento de pós-contingência a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência e a partir do caso base. A obtenção da margem através do traçado da curva PV a partir do caso base apresenta um número de iterações bem superior ao encontrado para o método proposto neste trabalho. Novamente é importante notar na figura 51 que para a

contingência das duas linhas de transmissão entre as barras 1 e 2 (ramo 1), não é possível obter a curva PV a partir do caso base, visto que esta contingência apresenta margem de carregamento negativa.

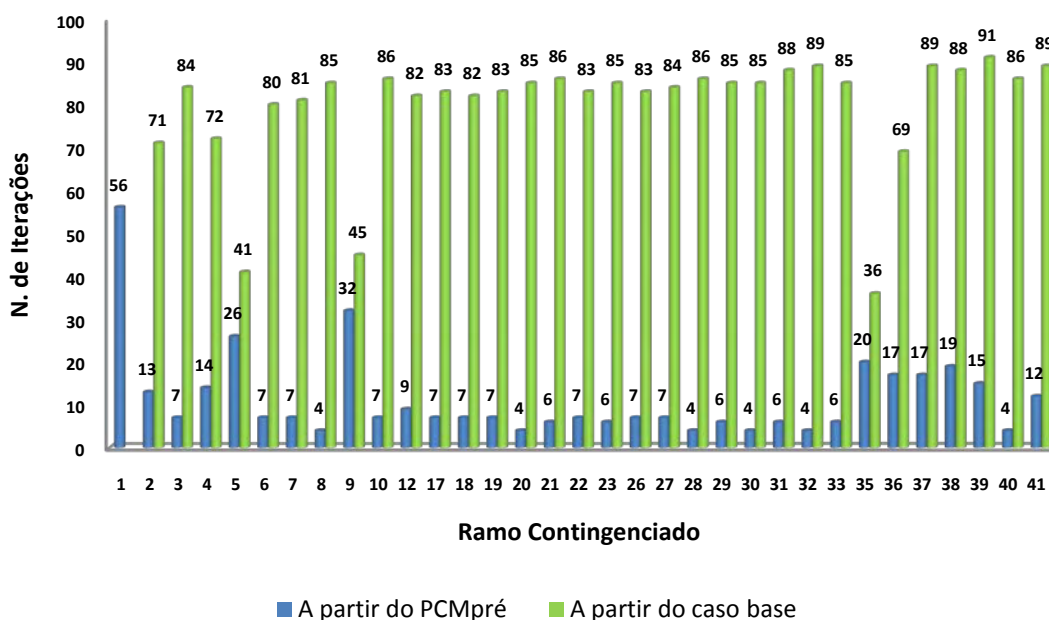


Figura 51 - Número de iterações para obtenção das margens de carregamento de pós- contingência do sistema IEEE 30 barras, para os dois métodos

Na aplicação do método de obtenção da margem a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência, foi possível se obter a maioria das curvas aplicando ao respectivo ramo a contingência total ($\mu=1$). Apenas para as contingências dos ramos 5 e 9 houve a necessidade de se retirar o ramo gradativamente, iniciando em $\mu=0,5$ (50% da contingência), $\mu=0,875$ e finalmente $\mu=1$ (contingência total).

4.4.3 Resultados obtidos para o sistema IEEE 57 Barras

Na figura 52 está representado o sistema IEEE 57 barras.

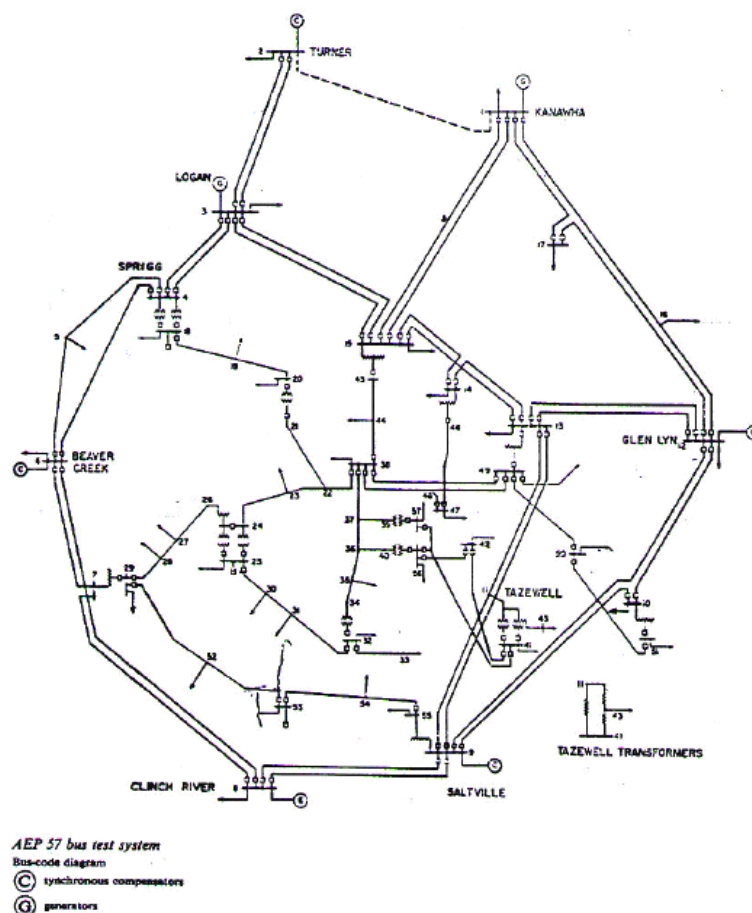


Figura 52 - Sistema IEEE 57 barras

A figura 53 mostra as curvas PV da barra 31 (barra crítica) do sistema IEEE 57 barras de pré de pós-contingência para a saída de cada ramo do sistema, exceto aqueles que provocam ilhamento, utilizando o método de obtenção da margem de carregamento a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência (curva 1, $PMC_{pré} = 1,7252$ p.u.).

A curva 4 da figura 53 representa a curva PV da barra 31 para a contingência mais crítica, a saída da linha de transmissão 48 entre as barras 35 e 36. Neste caso tem-se uma margem de carregamento de pós-contingência negativa ($PMC_{pós} = 0,6254$ p.u.). As curvas 2 e 3 da mesma figura representam contingências que também levam a uma margem de carregamento negativa, respectivamente, a saída do ramo 47 entre as barras 34 e 35 e do ramo 42 entre as barras 25 e 30.

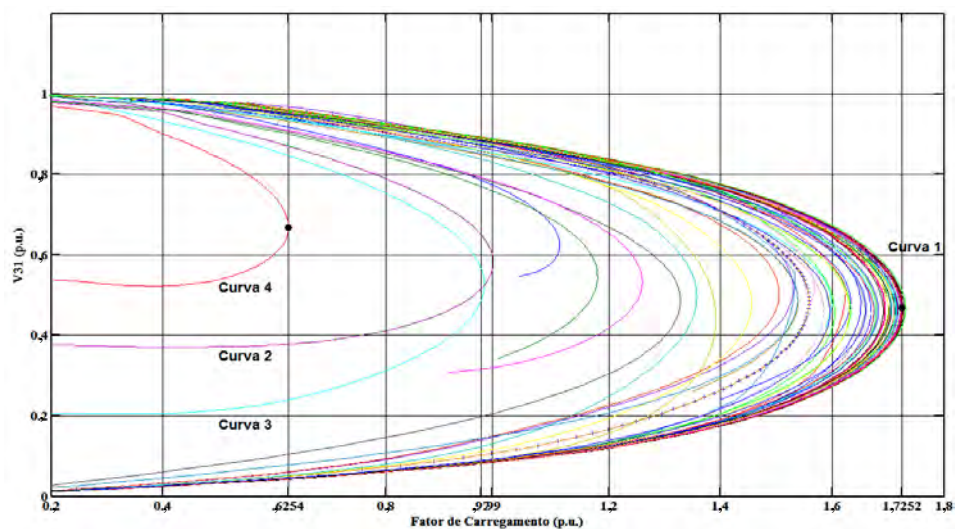


Figura 53 - Curvas PV de pré ($\mu=0$) e de pós-contingência ($\mu=1$) para a saída dos ramos do sistema IEEE 57 barras

Na tabela 5 são apresentadas as margens de carregamento de pós-contingência e as respectivas reduções percentuais para as contingências simples aplicadas a cada ramo do sistema IEEE 57 barras, que não provocassem ilhamentos.

Tabela 5 - Margens de carregamento de pós-contingência e reduções percentuais sistema IEEE 57 barras

IEEE 57 BARRAS - CONTINGÊNCIAS SIMPLES DE RAMOS									
RAMO	ENTRE		MARGEM (p.u.)	REDUÇÃO %	RAMO	ENTRE		MARGEM (p.u.)	REDUÇÃO %
	BARRA	BARRA				BARRA	BARRA		
1	1	2	0,701	3,3%	39	27	28	0,455	37,2%
2	2	3	0,669	7,7%	40	28	29	0,357	50,8%
3	3	4	0,676	6,7%	41	7	29	0,111	84,7%
4	4	5	0,723	0,4%	42	25	30	-0,024	103,3%
5	4	6	0,722	0,4%	43	30	31	0,328	54,8%
6	6	7	0,723	0,3%	44	31	32	0,538	25,8%
7	6	8	0,705	2,8%	46	34	32	-0,007	101,0%
8	8	9	0,391	46,1%	47	34	35	-0,007	101,0%
9	9	10	0,715	1,4%	48	35	36	-0,375	151,7%
10	9	11	0,695	4,2%	49	36	37	0,260	64,2%
11	9	12	0,723	0,3%	50	37	38	0,179	75,3%
12	9	13	0,717	1,2%	53	22	38	0,599	17,4%
13	13	14	0,714	1,6%	54	11	41	0,695	4,2%
14	13	15	0,710	2,1%	55	41	42	0,651	10,2%
15	1	15	0,533	26,5%	57	38	44	0,633	12,8%
16	1	16	0,659	9,2%	58	15	45	0,596	17,8%
17	1	17	0,625	13,9%	59	14	46	0,585	19,4%
18	3	15	0,676	6,9%	60	46	47	0,584	19,4%
19	4	18	0,713	1,7%	62	48	49	0,719	0,8%
20	4	18	0,712	1,9%	63	49	50	0,725	0,0%
21	5	6	0,723	0,3%	64	50	51	0,682	6,0%
22	7	8	0,604	16,7%	65	10	51	0,568	21,7%
23	10	12	0,711	2,0%	66	13	49	0,631	13,0%
24	11	13	0,723	0,3%	67	29	52	0,364	49,8%
25	12	13	0,674	7,0%	68	52	53	0,612	15,6%
26	12	16	0,706	2,7%	69	53	54	0,715	1,4%
27	12	17	0,691	4,7%	70	54	55	0,705	2,8%
28	14	15	0,679	6,3%	72	44	45	0,596	17,9%
29	18	19	0,705	2,8%	73	40	56	0,725	0,0%
30	19	20	0,718	1,0%	74	56	41	0,700	3,4%
31	21	20	0,725	0,0%	75	56	42	0,718	1,1%
33	22	23	0,539	25,7%	76	39	57	0,725	0,0%
34	23	24	0,632	12,8%	77	57	56	0,711	2,0%
35	24	25	0,530	26,9%	78	38	49	0,705	2,7%
36	24	25	0,505	30,4%	79	38	48	0,661	8,9%
37	24	26	0,559	23,0%	80	9	55	0,464	36,0%
38	26	27	0,559	23,0%					

Nas figuras 54 e 55 estão representadas as reduções na margem de carregamento para as contingências do sistema IEEE 57 barras. A contingência mais severa do ponto de vista da redução da margem de carregamento é a saída da linha de transmissão 48 entre as barras 35 e 36 que produz uma redução de 152%, como pode ser visto no detalhe da figura 55 (a). Como pode ser observado na mesma figura, outras três contingências levam a margens de carregamento negativas, as contingências das linhas de transmissão 42 e 47 e a contingência do transformador do ramo 46.

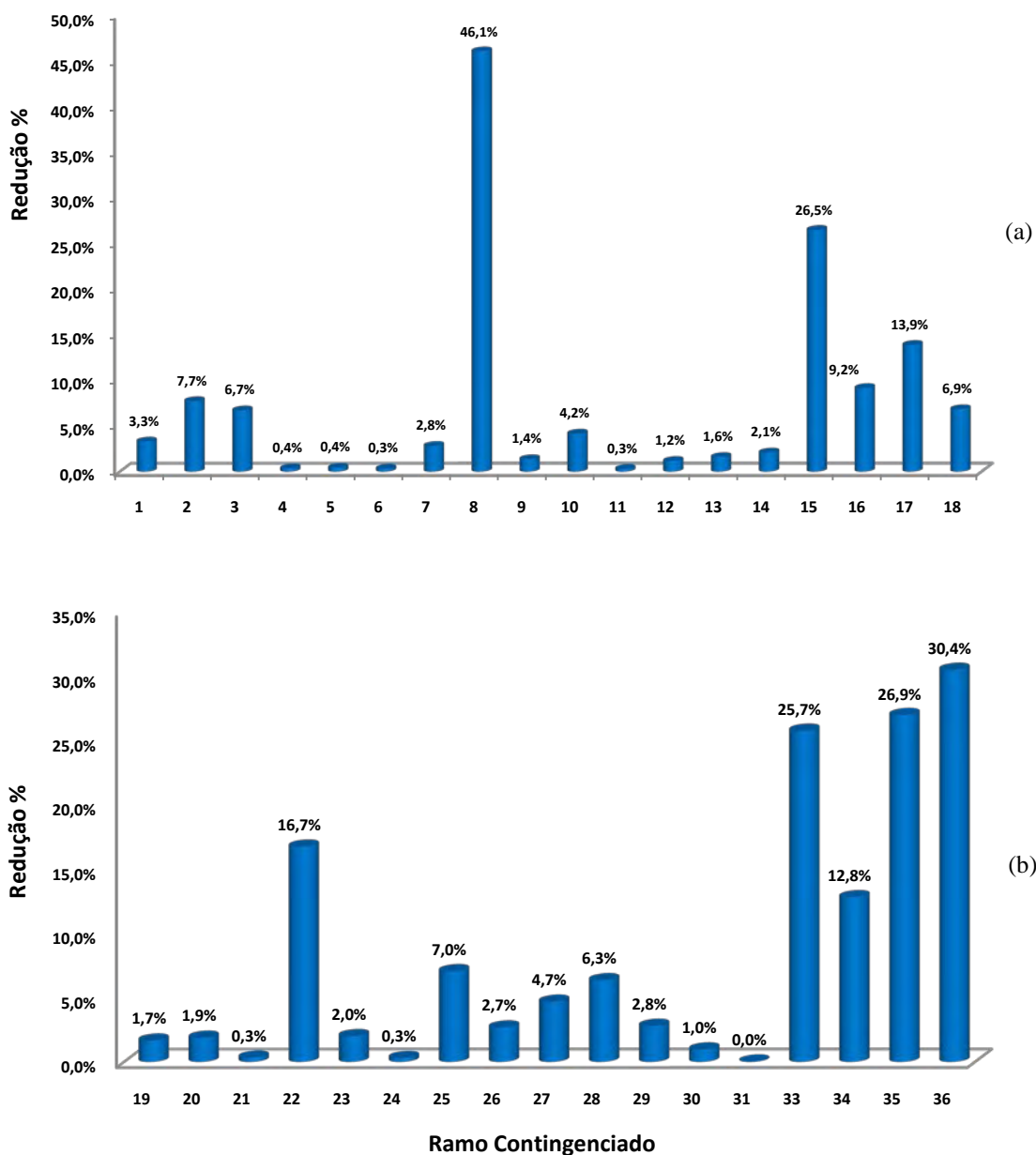


Figura 54 - Redução percentual na margem de carregamento do sistema IEEE 57 barras para as contingências: (a) dos ramos 1 a 18; (b) dos ramos 19 a 36

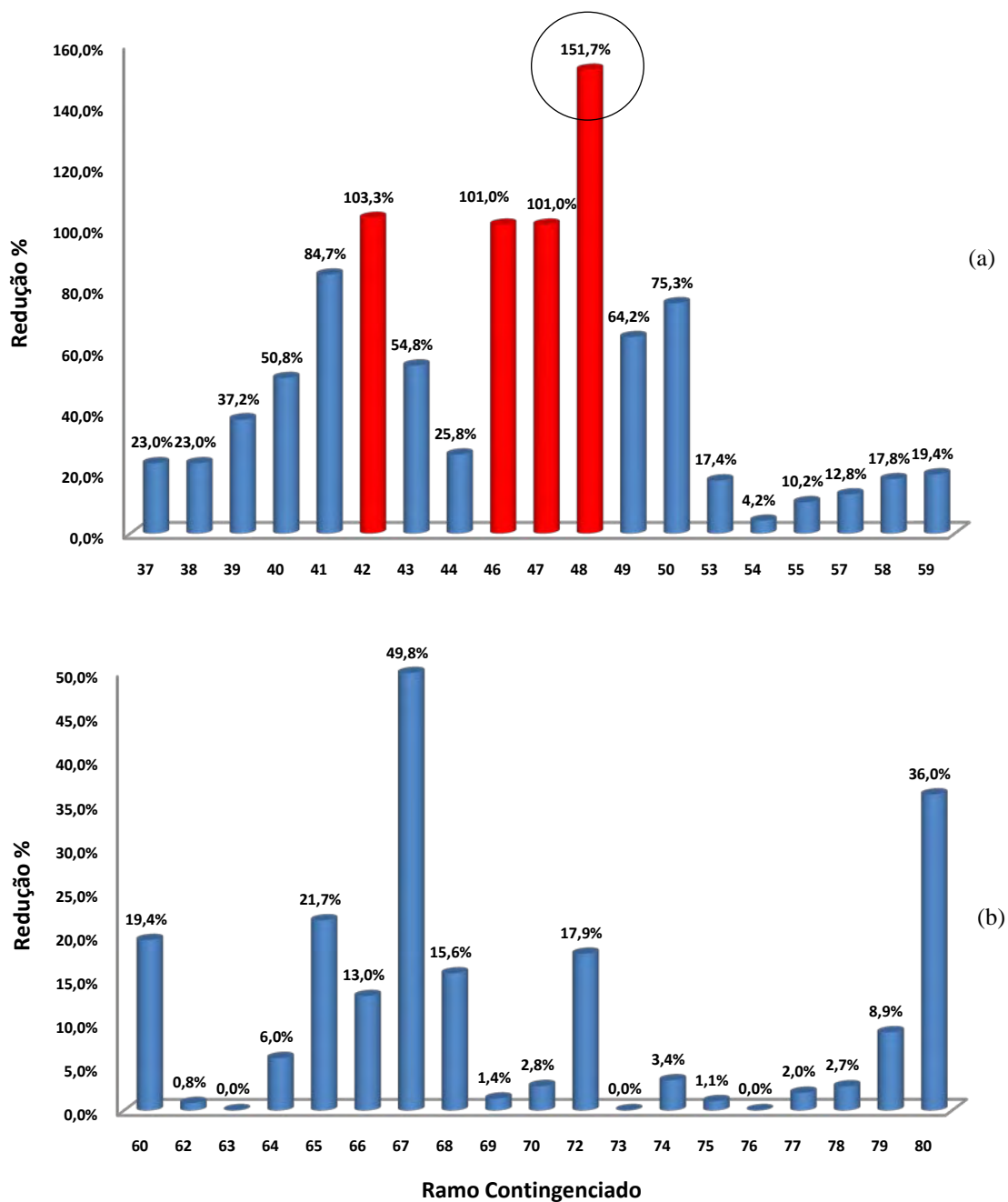


Figura 55 - Redução percentual na margem de carregamento do sistema IEEE 57 barras para as contingências: (a) dos ramos 37 a 59; (b) dos ramos 60 a 80

Nas figuras 56 e 57 são mostradas as margens de carregamento de pós-contingência em p.u. e as respectivas reduções percentuais nas margens.

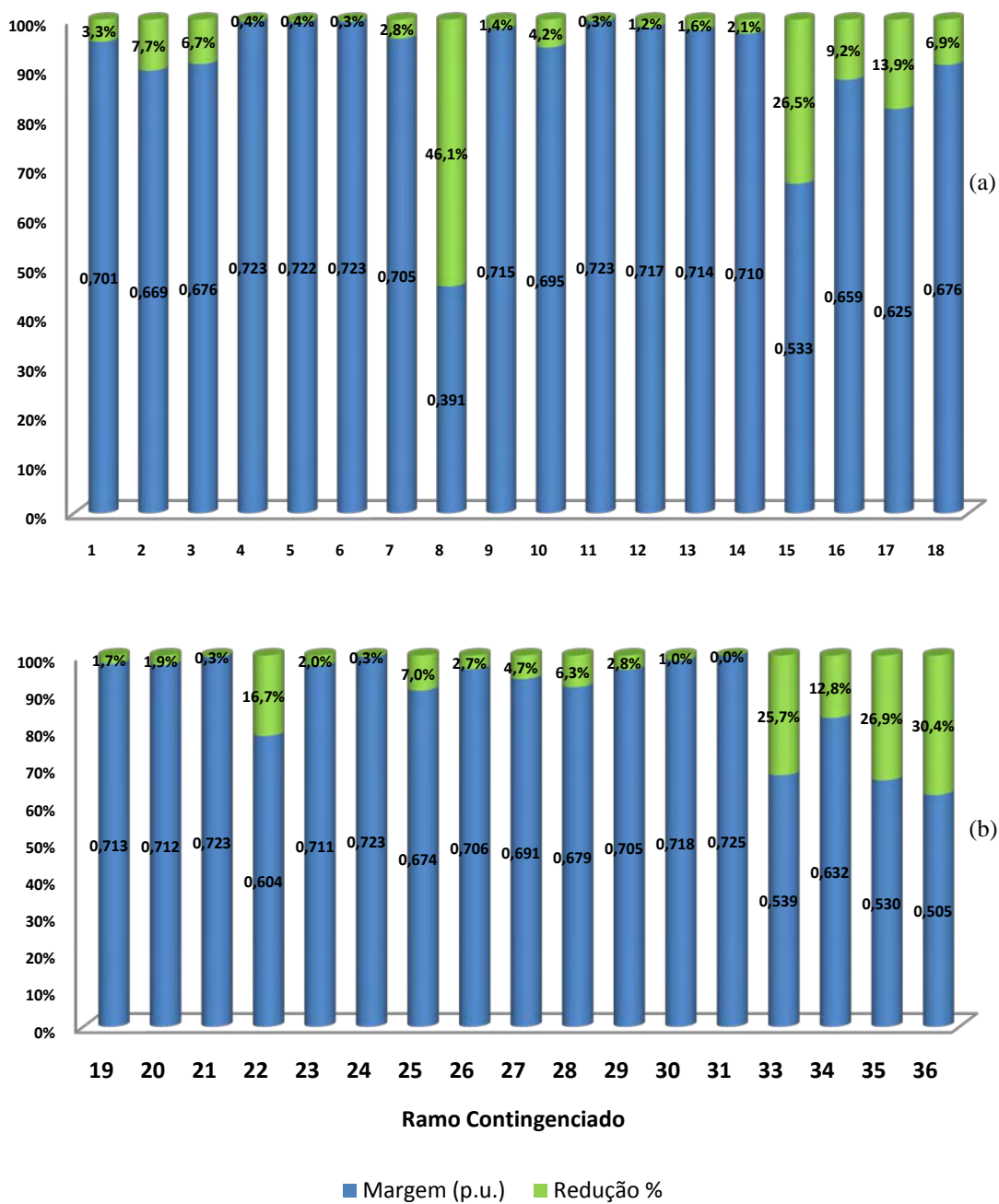


Figura 56 - Margens de carregamento de pós-contingência e redução na margem do sistema IEEE 57
barras: (a) contingências dos ramos 1 a 18; (b) contingências dos ramos 19 a 36

Na figura 57(a) verificam-se as contingências das linhas de transmissão e transformadores que levam às margens de carregamento negativas (redução > 100%).

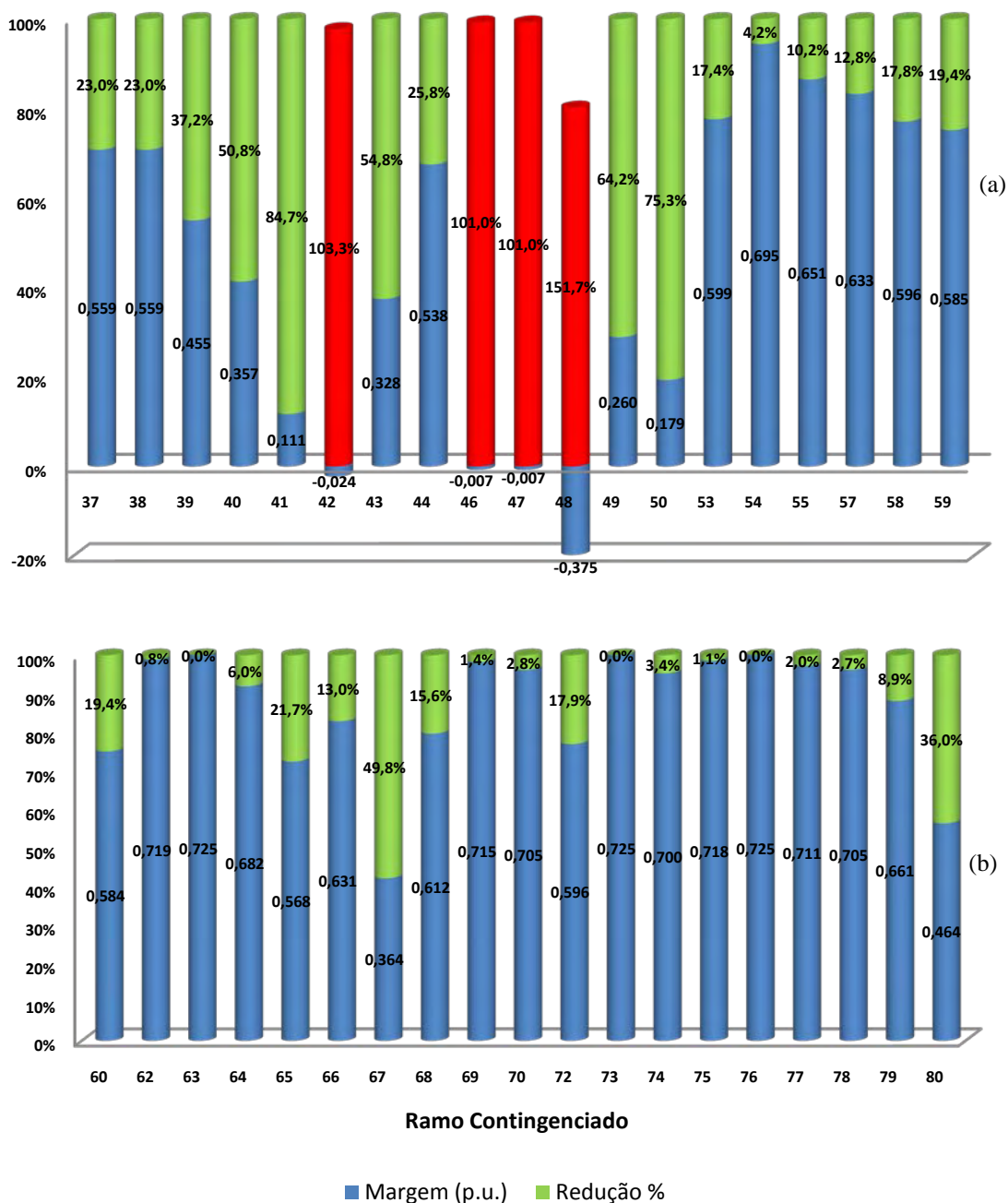


Figura 57 - Margens de carregamento de pós-contingência e redução na margem do sistema IEEE 57 barras: (a) contingências dos ramos 37 a 59; (b) contingências dos ramos 60 a 80

Nas figuras 58 e 59 comparam-se o número de iterações para obtenção da margem de carregamento de pós-contingência, a partir do caso base e a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência, para contingências simples dos ramos do sistema IEEE 57 barras.

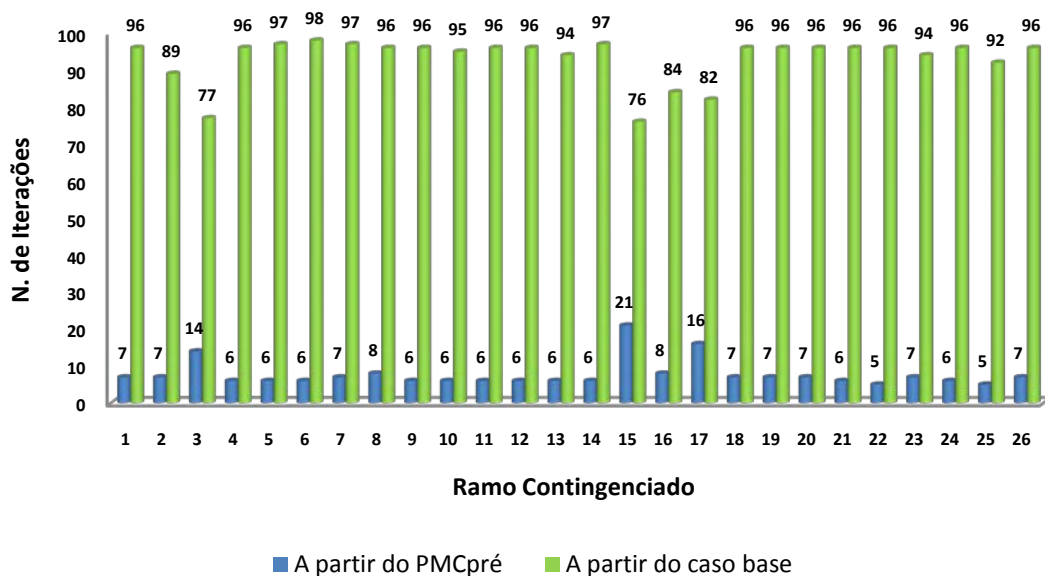


Figura 58 - Número de iterações para obtenção das margens de carregamento de pós- contingência do sistema IEEE 57 barras, para o método proposto e a partir do caso base para contingências do ramo 1 ao 26

Observa-se na figura 59 que a obtenção da margem para as contingências dos ramos 42, 46, 47 e 48 (contingência mais crítica) só é possível a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência. Isso se dá pelo fato de tais contingências fornecerem margem de carregamento negativa.

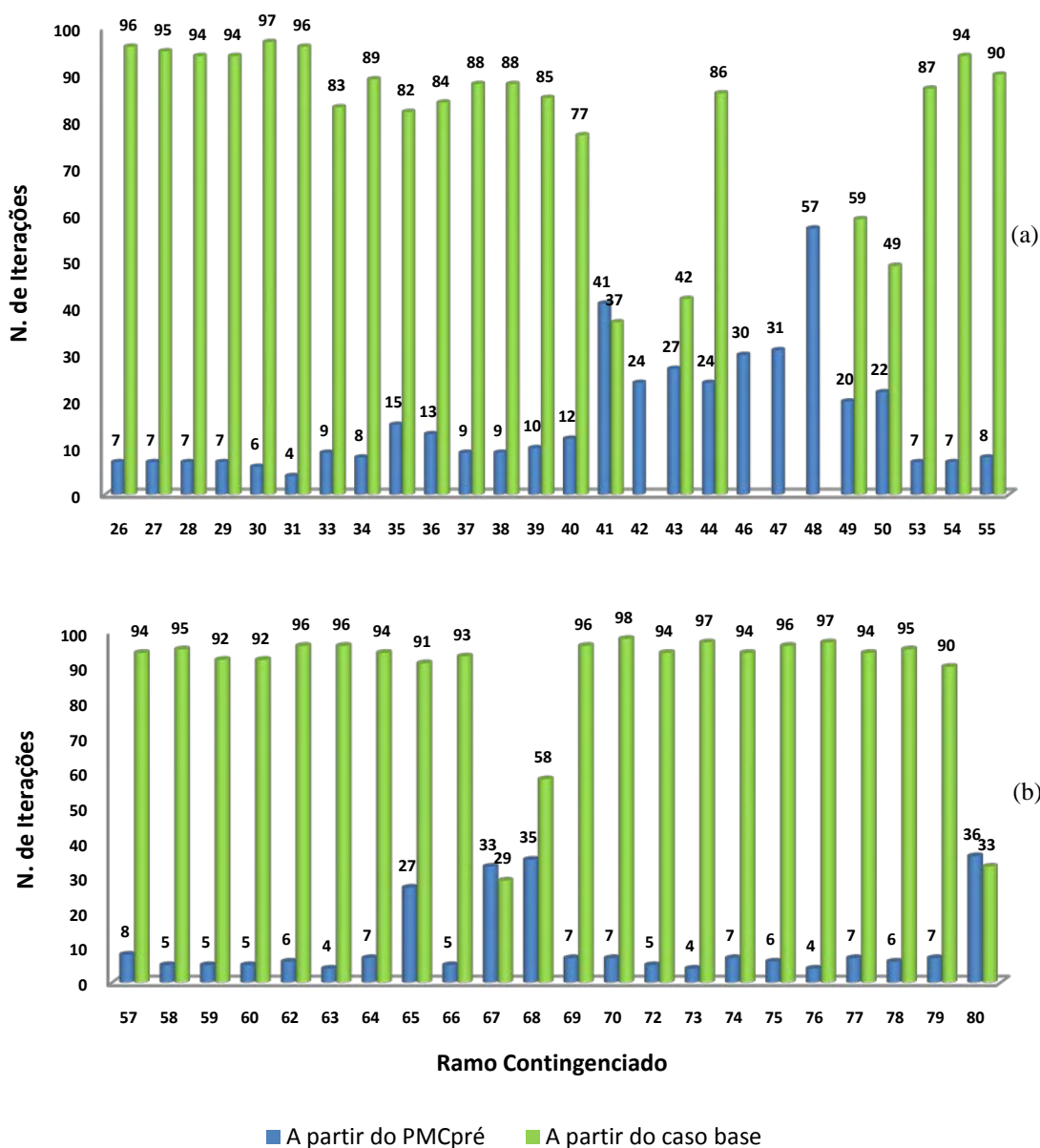


Figura 59 - Número de iterações para obtenção das margens de carregamento de pós-contingência do sistema IEEE 57 barras, para o método proposto e a partir do caso base: (a) para contingências do ramo 27 ao 56; (b) do ramo 57 ao 80

Devido às características das curvas PV de pós-contingência, o número de iterações obtido pelo método de obtenção da margem a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência é maior, se comparado ao método de obtenção a partir do caso base, para as contingências dos ramos 41, 67 e 80. A figura 60 mostra a curva de pré-contingência e as curvas de pós-contingência para estas situações.

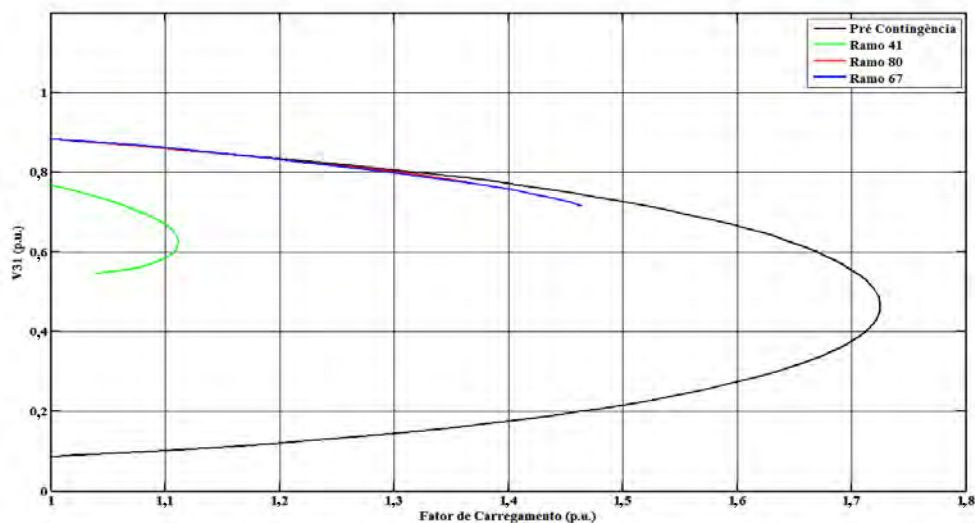


Figura 60 - Curva de pré-contingência e de pós-contingência para as saídas dos ramos 41, 67 e 80 do sistema IEEE 57 barras

Para as demais contingências, esse método apresenta número de iterações menor que aquele de obtenção da margem a partir do caso base.

4.4.4 Resultados obtidos para o sistema IEEE 118 Barras

Na tabela 6 são apresentadas as margens de carregamento de pós-contingência e as respectivas reduções percentuais para as contingências simples aplicadas a cada ramo do sistema IEEE 118 barras, que não provocassem ilhamentos.

Tabela 6 - Margens de carregamento de pós-contingência e reduções percentuais sistema IEEE 118 barras

IEEE 118 BARRAS - CONTINGÊNCIAS SIMPLES DE RAMOS									
		BARRA			BARRA				
RAMO	DE	PARA	MARGEM (p.u.)	REDUÇÃO %	RAMO	DE	PARA	MARGEM (p.u.)	REDUÇÃO %
1	1	2	1,048	0,2%	8	8	5	0,265	74,8%
2	1	3	1,027	2,2%	10	4	11	1,032	1,7%
3	4	5	0,919	12,5%	11	5	11	1,048	0,2%
4	3	5	1,012	3,6%	12	11	12	1,045	0,5%
5	5	6	1,034	1,6%	13	2	12	1,025	2,4%
6	6	7	1,050	0,0%	14	3	12	1,049	0,1%

	BARRA					BARRA			
RAMO	DE	PARA	MARGEM (p.u.)	REDUÇÃO %	RAMO	DE	PARA	MARGEM (p.u.)	REDUÇÃO %
15	7	12	1,050	0,0%	56	40	41	1,050	0,0%
16	11	13	1,028	2,1%	57	40	42	1,047	0,3%
17	12	14	1,049	0,1%	58	41	42	1,046	0,4%
18	13	15	1,050	0,0%	59	43	44	1,044	0,6%
19	14	15	1,050	0,0%	60	34	43	1,029	2,0%
20	12	16	1,050	0,0%	61	44	45	1,025	2,4%
21	15	17	1,010	3,8%	62	45	46	1,025	2,4%
22	16	17	1,035	1,5%	63	46	47	1,047	0,3%
23	17	18	1,026	2,3%	64	46	48	1,049	0,1%
24	18	19	1,046	0,4%	65	47	49	1,050	0,0%
25	19	20	1,050	0,0%	66	42	49	1,008	4,0%
26	15	19	1,050	0,0%	67	42	49	1,008	4,0%
27	20	21	1,035	1,5%	68	45	49	1,030	1,9%
28	21	22	1,021	2,8%	69	48	49	1,046	0,4%
29	22	23	1,000	4,8%	70	49	50	1,050	0,0%
30	23	24	1,043	0,7%	71	49	51	1,050	0,0%
31	23	25	1,006	4,2%	72	51	52	1,050	0,0%
32	26	25	1,001	4,7%	73	52	53	1,050	0,0%
33	25	27	0,990	5,7%	74	53	54	1,050	0,0%
34	27	28	1,046	0,4%	75	49	54	1,050	0,0%
35	28	29	1,049	0,1%	76	49	54	1,050	0,0%
36	30	17	0,957	8,9%	77	54	55	1,050	0,0%
37	8	30	1,050	0,0%	78	54	56	1,050	0,0%
38	26	30	0,905	13,8%	79	55	56	1,050	0,0%
39	17	31	1,047	0,3%	80	56	57	1,050	0,0%
40	29	31	1,050	0,0%	81	50	57	1,050	0,0%
41	23	32	1,024	2,5%	82	56	58	1,050	0,0%
42	31	32	1,046	0,4%	83	51	58	1,050	0,0%
43	27	32	1,049	0,1%	84	54	59	1,050	0,0%
44	15	33	1,050	0,0%	85	56	59	1,048	0,2%
45	19	34	1,047	0,3%	86	56	59	1,048	0,2%
46	35	36	1,050	0,0%	87	55	59	1,047	0,3%
47	35	37	1,047	0,3%	88	59	60	1,049	0,1%
48	33	37	1,042	0,8%	89	59	61	1,048	0,2%
49	34	36	1,049	0,1%	90	60	61	1,048	0,2%
50	34	37	1,034	1,6%	91	60	62	1,048	0,2%
51	38	37	0,658	37,4%	92	61	62	1,050	0,0%
52	37	39	1,037	1,3%	93	63	59	0,990	0,0%
53	37	40	1,034	1,6%	94	63	64	0,978	6,9%
54	30	38	1,050	0,0%	95	64	61	1,049	0,1%
55	39	40	1,030	1,9%	96	38	65	0,689	0,0%

RAMO	BARRA		MARGEM (p.u.)	REDUÇÃO %	RAMO	BARRA		MARGEM (p.u.)	REDUÇÃO %
	DE	PARA				DE	PARA		
97	64	65	0,953	0,0%	141	89	92	0,994	5,4%
98	49	66	1,036	1,4%	142	89	92	1,050	0,0%
99	49	66	1,036	1,4%	143	91	92	1,050	0,0%
100	62	66	1,050	0,0%	144	92	93	1,050	0,0%
101	62	67	1,050	0,0%	145	92	94	1,050	0,0%
102	65	66	1,050	0,0%	146	93	94	1,050	0,0%
103	66	67	1,050	0,0%	147	94	95	1,050	0,0%
104	65	68	1,049	0,1%	148	80	96	1,050	0,0%
105	47	69	1,045	0,5%	149	82	96	1,050	0,0%
106	49	69	1,047	0,3%	150	94	96	1,050	0,0%
107	69	68	1,044	0,6%	151	80	97	1,050	0,0%
108	69	70	0,970	7,6%	152	80	98	1,050	0,0%
109	24	70	1,050	0,0%	153	80	99	1,050	0,0%
110	70	71	1,050	0,0%	154	92	100	1,050	0,0%
111	24	72	1,050	0,0%	155	94	100	1,050	0,0%
112	71	72	1,049	0,1%	156	95	96	1,050	0,0%
114	70	74	1,050	0,0%	157	96	97	1,050	0,0%
115	70	75	1,050	0,0%	158	98	100	1,050	0,0%
116	69	75	0,918	12,6%	159	99	100	1,050	0,0%
117	74	75	1,050	0,0%	160	100	101	1,050	0,0%
118	76	77	0,803	23,5%	161	92	102	1,050	0,0%
119	69	77	1,050	0,0%	162	101	102	1,050	0,0%
120	75	77	1,050	0,0%	163	100	103	0,670	36,2%
121	77	78	1,050	0,0%	164	100	104	1,011	3,7%
122	78	79	1,050	0,0%	165	103	104	1,050	0,0%
123	77	80	1,050	0,0%	166	103	105	1,050	0,0%
124	77	80	1,050	0,0%	167	100	106	0,965	8,1%
125	79	80	1,050	0,0%	168	104	105	1,050	0,0%
126	68	81	1,050	0,0%	169	105	106	1,050	0,0%
127	81	80	1,050	0,0%	170	105	107	1,050	0,0%
128	77	82	1,050	0,0%	171	105	108	1,050	0,0%
129	82	83	1,050	0,0%	172	106	107	1,050	0,0%
130	83	84	1,050	0,0%	173	108	109	0,985	6,2%
131	83	85	1,050	0,0%	174	103	110	0,860	18,1%
132	84	85	1,050	0,0%	175	109	110	1,050	0,0%
135	85	88	1,050	0,0%	178	17	113	0,991	5,6%
136	85	89	1,050	0,0%	179	32	113	1,050	0,0%
137	88	89	1,050	0,0%	180	32	114	1,050	0,0%
138	89	90	1,050	0,0%	181	27	115	1,049	0,1%
139	89	90	1,050	0,0%	182	114	115	1,050	0,0%
140	90	91	1,050	0,0%	185	75	118	0,559	46,8%
					186	76	118	1,050	0,0%

Na figura 61 estão representadas as reduções na margem de carregamento para as contingências de alguns ramos do sistema IEEE 118 barras. Para esse sistema não houve contingência que provocasse uma redução maior que 100% e conseqüentemente a uma margem de carregamento de pós-contingência negativa.

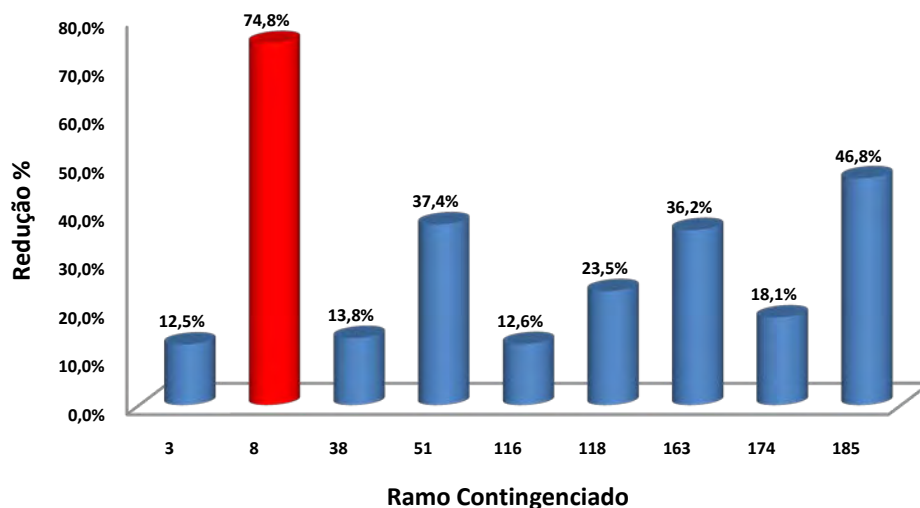


Figura 61 - Redução percentual na margem de carregamento do sistema IEEE 118 barras para as contingências dos ramos 3, 8, 38, 51, 116, 118, 163, 174 e 185

Observa-se na figura 61 a contingência do ramo 8, como sendo a que promoveu a maior redução na margem de carregamento de pós-contingência (74,8%).

Nas figuras 62, 63, 64, 65 e 66 comparam-se o número de iterações para obtenção da margem de carregamento de pós-contingência, a partir do caso base e a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência, para contingências simples dos ramos do sistema IEEE 118 barras.

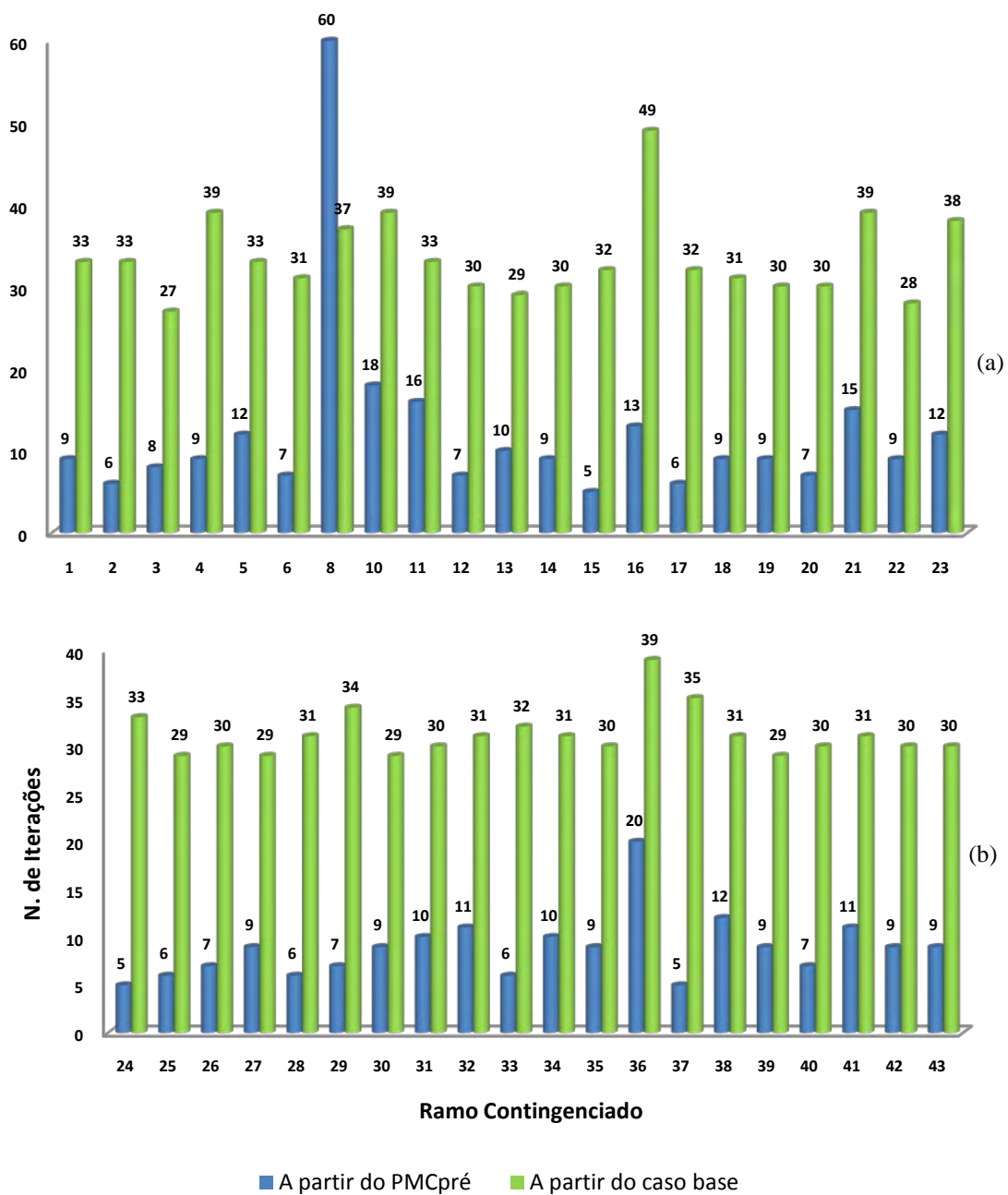


Figura 62 - Número de iterações para obtenção das margens de carregamento de pós- contingência do sistema IEEE 118 barras, para o método proposto e a partir do caso base: (a) para contingências do ramo 1 ao 23; (b) do ramo 24 ao 43

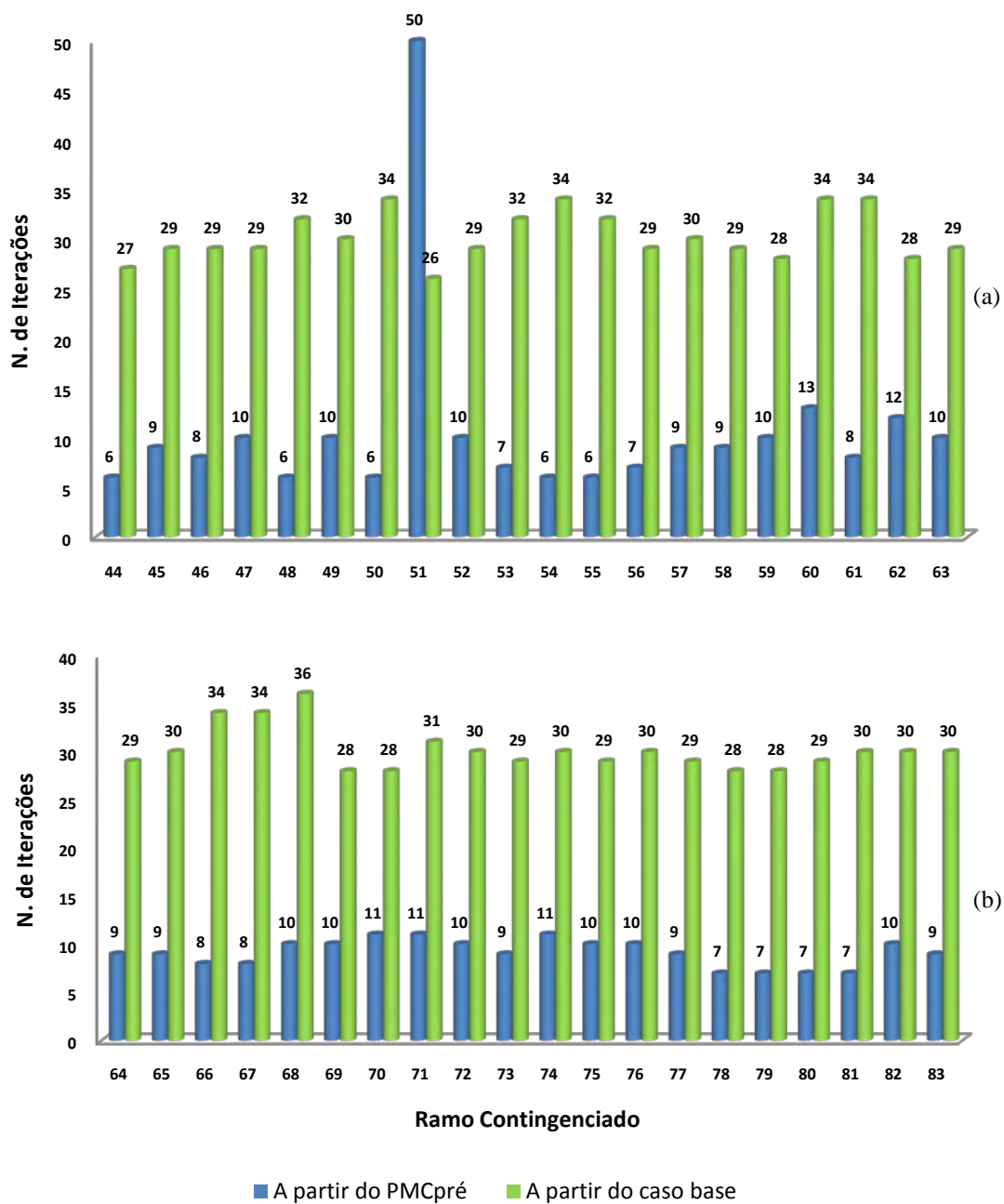


Figura 63 - Número de iterações para obtenção das margens de carregamento de pós- contingência do sistema IEEE 118 barras, para o método proposto e a partir do caso base: (a) para contingências do ramo 44 ao 63; (b) do ramo 64 ao 83

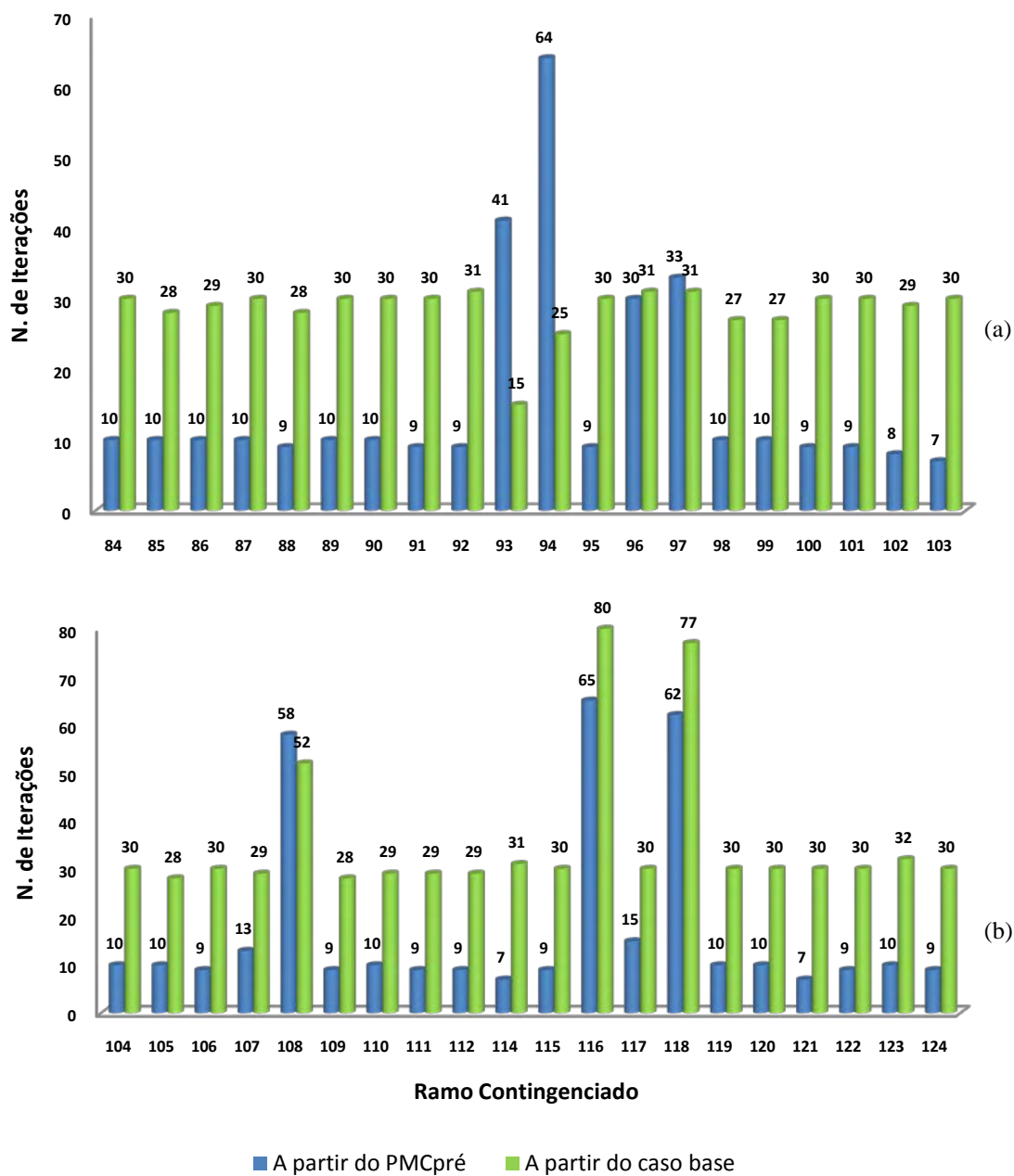


Figura 64 - Número de iterações para obtenção das margens de carregamento de pós- contingência do sistema IEEE 118 barras, para o método proposto e a partir do caso base: (a) para contingências do ramo 84 ao 103; (b) do ramo 104 ao 124

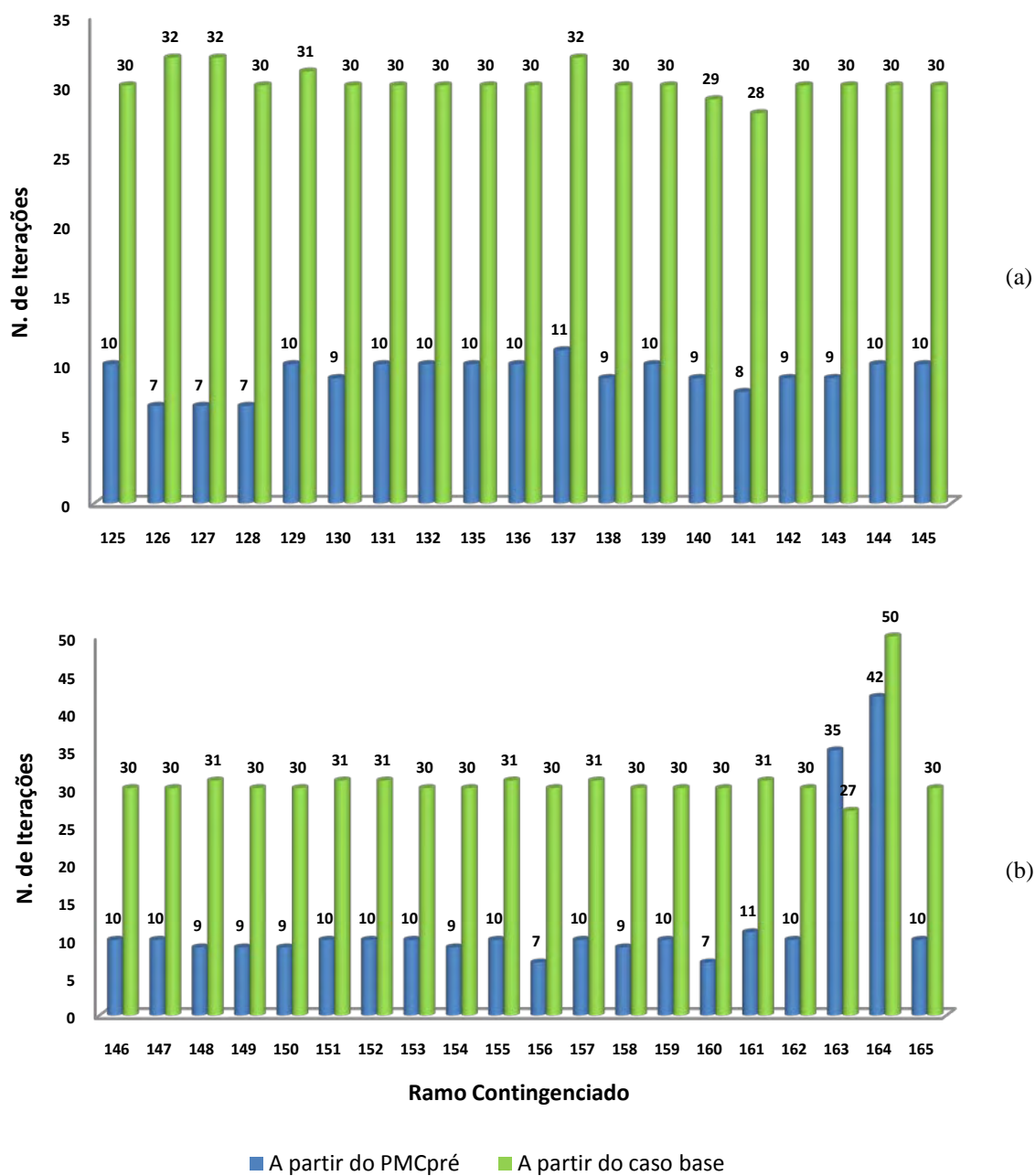


Figura 65 - Número de iterações para obtenção das margens de carregamento de pós- contingência do sistema IEEE 118 barras, para o método proposto e a partir do caso base: (a) para contingências do ramo 125 ao 145; (b) do ramo 146 ao 165

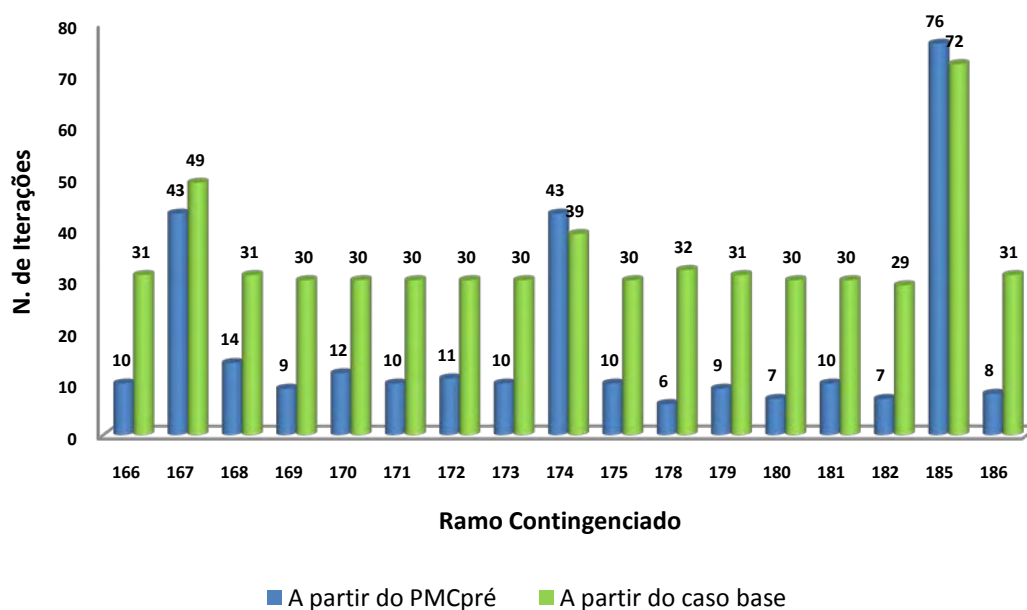


Figura 66 - Número de iterações para obtenção das margens de carregamento de pós- contingência do sistema IEEE 118 barras, para o método proposto e a partir do caso base, para contingências do ramo 166 ao 186

Observação análoga ao sistema IEEE 57 barras, pode ser feita com relação ao grande número de iterações apresentado pelo método proposto para alguns casos de contingências do sistema IEEE 118 barras. A figura 67 mostra as curvas de pré-contingência e de pós-contingência que apresentam características inerentes ao grande número de iterações para convergência do método do fluxo de carga.

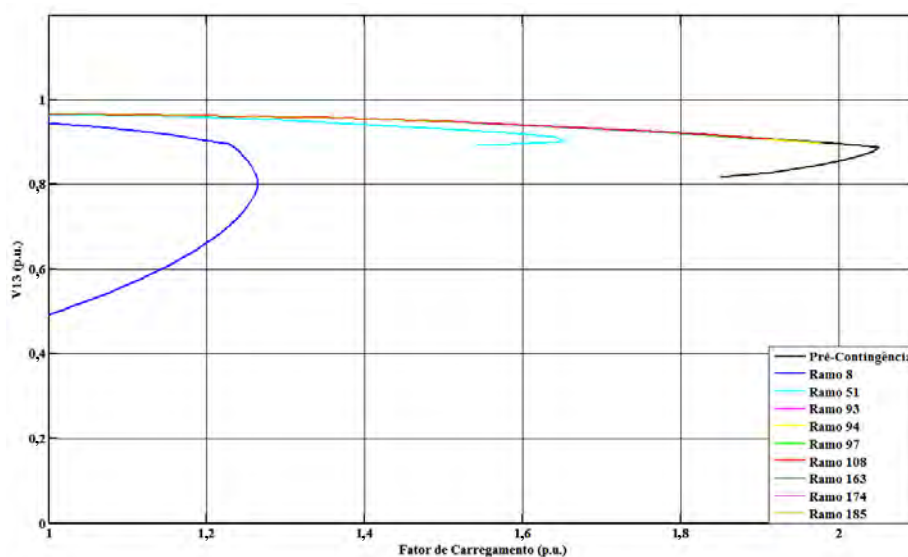


Figura 67 - Curvas de pré-contingência e de pós-contingência para as saídas de ramos do sistema IEEE 118 barras

Os testes mostram que a obtenção da margem de carregamento de pós-contingência a partir do ponto de máximo carregamento de pré-contingência apresenta um número de iterações global bem menor se comparados à obtenção da mesma margem a partir do caso base. Isso se verifica nos três sistemas testes analisados, IEEE 14, IEEE 30 e IEEE 57 barras. Além disso, nos casos de contingências que apresentam margem de carregamento negativa, mesmo com um número relativamente elevado de iterações, o método proposto neste trabalho foi eficiente na obtenção da margem, enquanto que o método convencional (a partir do caso base) falha. A figura 68 mostra a diferença no número de iterações totais entre os métodos comparados para os três sistemas testes do IEEE. Ressalta-se ainda que para ambos os métodos comparados o número de iterações são baseados no método de Newton-Raphson para resolução de equações não lineares.

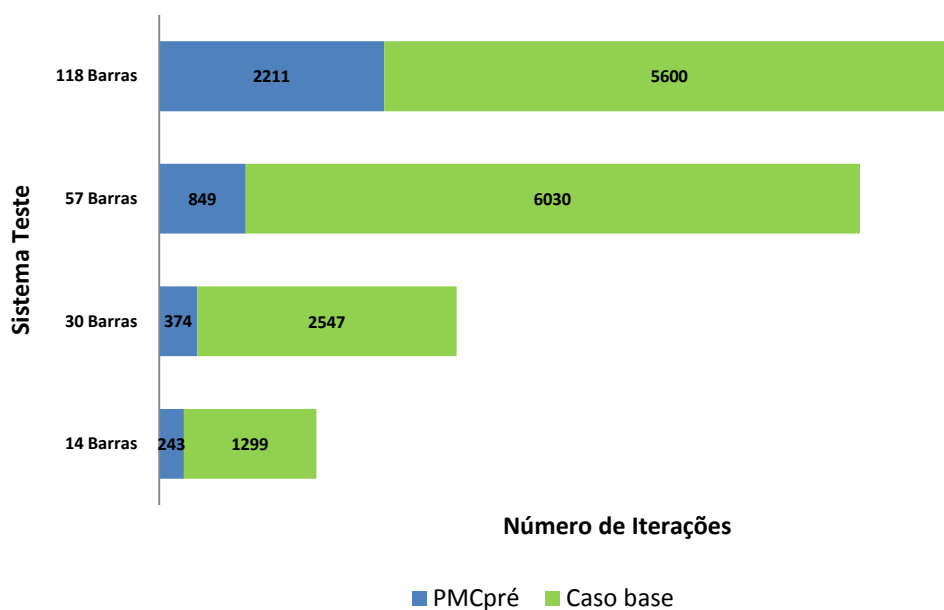


Figura 68 - Comparação do número de iterações dos dois métodos

Capítulo 5

CONCLUSÕES

5.1 Conclusão geral

A obtenção da margem de carregamento de pré e pós-contingência de sistemas elétricos de potência vêm se tornando necessidade primordial para o planejamento e operação dos mesmos. A análise estática de contingências é um processo que consome muito tempo computacional, visto que o número de contingências possíveis de um sistema de potência é muito elevado. Faz-se então necessário, realizar uma seleção das contingências que realmente provocam danos sérios aos sistemas, para posteriormente, obter a margem de carregamento do sistema para estas contingências consideradas.

Os métodos da continuação são ferramentas robustas para realização da análise estática de contingência, com o intuito de obter a margem de estabilidade de pós-contingência de um transformador ou de uma linha de transmissão.

Neste trabalho foram apresentados dois métodos de análise de contingências utilizando o método da continuação como ferramenta. Inicialmente apresentou-se um método onde a convergência do fluxo de carga continuado é assegurada através do uso de uma técnica de parametrização em que os parâmetros do modelo equivalente π , do transformador ou da linha de transmissão selecionada para avaliação da contingência, são parametrizados por um fator de escalonamento que possibilita sua remoção gradual. Apesar de isso não representar fisicamente o que ocorre no sistema, o método possibilita a obtenção da margem de carregamento de pós-contingência. Foi adotado no fluxo de carga continuado, o procedimento de troca de parâmetro durante a passagem de uma curva PV para outra similar àqueles encontrados na literatura.

Na referência Flueck e Dondetti (2000) foi apresentada uma ferramenta para avaliação da contingência de linhas de transmissão usando a admitância da linha como parâmetro da continuação. O segundo método proposto neste trabalho utiliza-se o ângulo de fase e a magnitude de tensão de uma barra k qualquer e a perda total de potência ativa (θ_k, V_k e Pa) como parâmetros da continuação. Esse método garante a obtenção da margem de carregamento a partir do caso base, mesmo com pontos de máximo carregamento de pós-contingência menores que o carregamento do caso base. Além disso, o uso da perda de potência ativa como parâmetro da continuação mostrou ser possível obter pontos da curva PV além do ponto de singularidade, sem a necessidade de troca de parâmetro.

É importante observar que os métodos propostos requerem poucas modificações dos métodos de fluxo de carga continuado existentes, facilitando assim as suas implementações computacionais. Além disso, os resultados dos testes mostraram excelente desempenho do fluxo de carga continuado com um número reduzido de iterações durante o traçado da curva PV.

5.2 Motivação para futuros trabalhos

Como sugestões para trabalhos futuros podem-se elencar:

- Realização de análise de contingências de geradores, banco de capacitores e reatores;
- Análise de contingências prevendo saída de linhas de transmissão ou transformadores que provoquem ilhamentos no sistema;
- Análise de contingências múltiplas;
- Agregar aos métodos de análise de contingências propostos, métodos para a realização de compensação de reativos ou corte de carga no sistema;

REFERÊNCIAS

ABED, A. M. WSCC voltage stability criteria, under-voltage, load shedding strategy, and reactive power reserve monitoring methodology. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 1999, Edmonton. Proceedings... Edmonton: [s.n.], apr. 1999. p. 191-197.

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

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. Revista Controle & Automação, Campinas, v. 13, n. 3, p. 275-289, set. 2002.

ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. Power system control and stability. New York: John Wiley, 2003. 672 p.

ARYA, L. D.; VERMA, H. K. A method for tracing PV curve for voltage stability analysis with voltage dependent loads. Electric Machines and Power Systems, New York, v. 24, p. 583-596, sep. 1996.

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

CAÑIZARES, C. A. On bifurcations, voltage collapse and load modeling. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 10, n. 1, p. 512-522, feb. 1995.

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

CASTRO, C. A.; BRAZ, L. M. C. Uma nova abordagem para a solução do problema de fluxo de carga pelo método de Newton com otimização de passo. Revista Controle & Automação, Campinas, v. 8, n. 3, p. 121-133, set. 1997.

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

CHIANG, H. D.; JUMEAU, R. J. Toward a practical performance index for predicting voltage collapse in electric power systems. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 10, n. 2, p. 584-592, may 1995.

CHIANG, H. D.; WANG, C. S.; FLUECK, A. J. Look-ahead voltage and load margin contingency selection functions for large scale power systems. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 12, n. 1, p. 173-180, feb. 1997.

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. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 1999, Edmonton. Proceedings... Edmonton: [s.n.], july 1999. v. 2, p. 647-652.

CUTSEM, V. T.; VOURNAS, C. Voltage stability of electric power system. Boston: Kluwer Academic, 1998. 378 p.

DOBSON, I.; CHIANG, H. D. Towards a theory of voltage collapse in electric power systems. Systems & Control Letters, Edmonton, v. 13, n. 3, p. 253-262, 1989.

EJEBE, G. C.; IRISARRI, G. D.; MOKHTARI, S.; OBADINA, O.; RISTANOVIC, P.; TONG, J. Methods for contingency screening and ranking for voltage stability analysis of power systems. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 11, n. 1, p. 350-356, feb. 1996.

FATEHI, F.; RASHIDINEJAD, M.; GHARAVEISI, A. A. Contingency ranking based on a voltage stability criteria index. In: POWER ENGINEERING, LARGE ENGINEERING SYSTEMS CONFERENCE, 2007, Montreal. Proceedings... Montreal: [s.n.], oct. 2007. p. 142-147.

FENG, Z.; XU, W. Fast computation of post-contingency system margin for voltage stability assessments of large-scale power systems. IEE Proceedings: generation, transmission and distribution, Stevenage, v. 147, n. 2, p. 76-80, 2000.

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, nov. 1990.

FLUEK, A. J.; DONDETTI, J. R. A new continuation power flow tool for investigating the nonlinear effects of transmission branch parameter variations. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 15, n. 1, p. 223-227, feb. 2000.

FOSSO, O. B.; FLATABO, N.; HAAVIK, B.; HOLEN, A. T. Comparison of methods for calculation of margins to voltage instability. In: ATHENS POWER TECH. CONFERENCE, 1993, Athens. Proceedings... Athens: [s.n], 1993. p. 216-221.

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

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 estabilidades de tensão nos sistemas interligados Norte/Nordeste, Sul/Sudeste e Norte/Sul Brasileiros. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – SNPTEE, 1999, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: Cigré Brasil/Itaipu Binacional, 1999.

GAO, B.; MORISON, G. K.; KUNDUR, P. Voltage stability evaluation using modal analysis. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 7, n. 4, p. 1529-1536, nov. 1992.

GREENE, S.; DOBSON, I.; ALVARADO, F. L. Contingency ranking for voltage collapse via sensitivities from a single nose curve. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 14, n. 1, p. 232-240, feb. 1999.

GUERRA, A. F. Seleção de contingências para violações de MW em ramos de sistemas elétricos de potência utilizando abordagem multinível adaptativa. 2002. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

IEEE-PSSC. Power System Stability Committee (IEEE-PSSC). Final draft: voltage stability assessment, procedures and guides. Waterloo: University of Waterloo, 1999. (Special publication). Disponível em: <<http://www.power.uwaterloo.ca>>. Acesso em: 12 jul. 2003.

JIA, Z. Contingency ranking for on-line voltage stability assessment. 1999. 134 f. Thesis (Master) - Faculty of Engineering and Applied Science, Memorial University of Newfoundland, Canada, 1999.

KUNDUR, P. Power system stability and control. New York: McGraw-Hill, 1993. 1176 p.

KUNDUR, P.; PASERBA, J.; AJJARAPU, V.; ANDERSSON, G.; BOSE, A.; CAÑIZARES, C.; HATZIARGYRIOU, N.; HILL, D.; STANKOVIC, A.; TAYLOR, C.; VAN CUTSEM,

T.; VITTAL, V. Definition and classification of power system stability. IEEE Transactions on Power System, New York, v. 19, n. 2, p. 1387-1401, may 2004.

MENG, Z. J.; XUE, Y.; LO, K. L. A new approximate load flow calculation method for contingency selection. In: POWER SYSTEMS CONFERENCE AND EXPOSITION, 2006, Atlanta. Proceedings... Atlanta: [s.n], oct-nov. 2006. p. 1601-1605.

MORISON, G. K.; GAO, B.; KUNDUR, P. Voltage stability analysis using static and dynamic approaches. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 8, n. 3, p. 1159-1171, aug. 1993.

OBERBYE, T. J. A power flow measure for unsolvable cases. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 9, n. 3, p. 1359-1365, aug. 1994.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. Procedimentos de rede, diretrizes e critérios para estudos elétricos. Rio de Janeiro, 2001.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. Plano Anual da Operação Energética – PEN 2007: relatório executivo. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <www.ons.com.br>. Acesso em: 20 jan. 2008.

PAL, M. K. Voltage stability conditions considering load characteristics. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 7, n. 1, p. 243-249, feb. 1992.

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

QUINTELA, A. S. Estudo de índices de proximidade ao limite de estabilidade de tensão e aplicações na seleção de contingências. 2002. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

RUIZ, P. A.; SAUER, P. W. Post-contingency voltage and reactive power estimation for contingency analysis using sensitivities. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 22, n. 2, p. 639-647, may 2007.

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

STEFPOPOULOS, G. K.; YANG, F.; COKKINIDES, G. J.; MELIOPOULOS, A. P. S. Advanced contingency selection methodology. In: POWER SYMPOSIUM, 2005, Atlanta. Proceedings... Atlanta: [s.n], oct. 2005. p. 67-73.

TAYLOR, C. W. Power system voltage stability. New York: McGraw-Hill, 1994.

UNIVERSITY OF WASHINGTON. The standard IEEE 118 test data. Washington, [200-]. Disponível em: <<http://www.ee.washington.edu>>. Acesso em: 04 jun. 2003.

VAAHEDI, E.; FUCHS, C.; XU, W.; MANSOUR, Y.; HAMADANIZADEH, H.; MORISON, G. K. Voltage stability contingency screening and ranking. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 14, n. 1, p. 256-265, feb. 1999.

WESTERN SYSTEMS COORDINATING COUNCIL – WSCC. Reactive Power Reserve Work Group - RRWG. Final report: voltage stability criteria, under voltage load shedding strategy, and reactive power reserve monitoring methodology. Salt Lake City, may 1998. 145 p.

YOKOYAMA, A.; SEKINE, Y. Multisolutions for load flow problem and their physical stability test. Electrical Engineering in Japan, Tokyo, v. 100, n. 5, p. 28-36, sep. 1980.

YOKOYAMA, A.; SEKINE, Y. A static voltage stability index based on multiple load flow solutions. In: PROCEEDINGS OF BULK POWER SYSTEM VOLTAGE PHENOMENA – VOLTAGE STABILITY AND SECURITY CONFERENCE, 1989, Missouri. Proceedings... Missouri: [s.n], jan. 1989. p. 7-111.

YORINO, N.; LI, H. Q.; HARADA, S.; OHTA, A.; SASAKI, H. A method of voltage stability evaluation for branch and generator outage contingencies. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 19, n. 1, p. 252-259, feb. 2004.

ZAMBRONI, S.; CAÑIZARES, C. A.; QUINTANA, V. H. New techniques to speed up voltage collapse computations using tangent vectors. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 12, n. 3, p. 1380-1387, aug. 1997.

Apêndice A

ARTIGOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS DURANTE A ELABORAÇÃO DA TESE DE DOUTORADO

2006

MATARUCCO, R. R.; ALVES, D. A.; CANOSSA, J. H.; SILVA, L. C. P.; CASTRO, C. A. Método da continuação aplicado na análise de contingência de linha de transmissão. **Revista Controle & Automação**, Campinas, v. 17, n. 2, p. 138-154, 2006.

2005

ALVES, D. A.; MATARUCCO, R. R.; SILVA, L. C. P.; CASTRO, C. A. Análise de contingências de linhas de transmissão e de transformadores através do método da continuação. In: ENCUESTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DEL CIGRÉ, 11., 2005, Hernandaria-Paraguai. **Anais...** Hernandaria: [s.n.], 2005. v. 1, p. 1-6.

MATARUCCO, R. R.; CANOSSA, J. H.; ALVES, D. A. Reformulação do Fluxo de carga continuado visando a realização de análise de contingência de linhas de transmissão. In: GLOBAL CONGRESS ON ENGINEERING AND TECHNOLOGY EDUCATION, 2005, Santos. **Anais...** Santos: [s.n.], 2005. v. 1, p. 1211-1215.

2004

ALVES, D. A.; CANOSSA, J. H.; MATARUCCO, R. R.; SILVA, L. C. P.; CASTRO, C. A. Método da continuação aplicado na análise de contingência de linhas de transmissão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 15., Gramado, 2004. **Anais...** Gramado: [s.n.], 2004. v. 1, p. 1-6.

MATARUCCO, R. R., ALVES, D. A. Parâmetros alternativos para avaliação de contingência de linhas de transmissão através do método da continuação. In: WORLD CONGRESS ON ENGINEERING AND TECHNOLOGY EDUCATION, Santos, 2004. **Anais...** Santos: [s.n.], 2004. v. 1, p. 745-749.

MATARUCCO, R. R.; ALVES, D.A.; SILVA, L.C.P.; CASTRO, C.A. Alternative parameterization for assessing branch outages by a continuation method. In: 2004 IEEE-PSSC TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATINA AMERICA, 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s.n.], 2004. v. 1, p. 39-44.

MATARUCCO, R. R.; CANOSSA, J. H.; ALVES, D. A. avaliação de contingência de linhas de transmissão através do método da continuação. In: CONGRESSO TEMÁTICO DE DINÂMICA E CONTROLE DA SBMAC, 3., Ilha Solteira, 2004. **Anais...** Ilha Solteira: [s.n.], 2004. v. 1, p. 1141-1151.