



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JULIO DE MESQUITA FILHO” - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Aplicação da Análise Modal Estática no Estudo de Estabilidade de Tensão

Estelio da Silva Amorim

DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ILHA SOLTEIRA - SP

Janeiro de 2011

Estelio da Silva Amorim

Aplicação da Análise Modal Estática no Estudo de Estabilidade de Tensão

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica – Área de Conhecimento: Sistemas Elétricos de Potência,

Orientador: Prof. Dr. Dílson Amâncio Alves

ILHA SOLTEIRA - SP

Janeiro de 2011

FICHA CATALOGRÁFICA

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

A524a

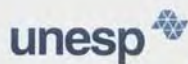
Amorim, Estelio da Silva.

Aplicação da Análise Modal Estática no Estudo de Estabilidade de
Tensão / Estelio da Silva Amorim . -- Ilha Solteira : [s.n.], 2011
126 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de Conhecimento: Automação, 2011

Orientador: Dílson Amâncio Alves
Inclui bibliografia

1. Método da continuação. 2. Estabilidade de tensão. 3. Margem de
estabilidade de tensão. 4. Análise modal. 5. Redução das perdas de potência
reativa.



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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Aplicação da Análise Modal Estática no Estudo de Estabilidade de Tensão

AUTOR: ESTELIO DA SILVA AMORIM

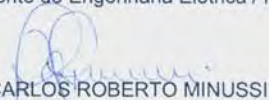
ORIENTADOR: Prof. Dr. DILSON AMANCIO ALVES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica ,
Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:



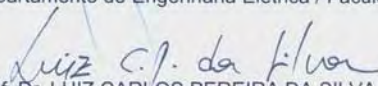
Prof. Dr. DILSON AMANCIO ALVES

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MINUSSI

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. LUIZ CARLOS PEREIRA DA SILVA

Departamento de Sistemas de Energia Elétrica / Universidade Estadual de Campinas

Data da realização: 14 de janeiro de 2011.

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, Francisco e Estela, a minha esposa Aline e a minha princesinha Júlia, minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, que me permitiu ter a capacidade de realizar este trabalho.

Aos meus pais Francisco Aquino de Amorim e Estela Maria da Silva Amorim por sempre estarem ao meu lado e pela minha formação e constante incentivo.

A minha esposa Aline pela tolerância, paciência e incentivo durante a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Dílson Amâncio Alves, pela orientação, pela paciência, pela amizade, pelo apoio incondicional dado durante a elaboração deste trabalho.

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

A FAPESP pelo apoio e disposição de recursos para o desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

O objetivo do trabalho proposto é o de apresentar aplicações práticas da técnica de análise modal na avaliação da estabilidade de tensão e à redução da perda total de potência reativa na transmissão. A análise modal tem demonstrado ser uma ferramenta de análise estática muito útil que pode ser utilizada para identificar áreas propensas à instabilidade de tensão. Seus resultados são usados para identificar as medidas de reforço mais adequadas para aumentar a margem de estabilidade de tensão de sistemas elétricos de potência. A melhor localização para a instalação de compensação reativa *shunt* e série é determinada baseada nos fatores de participação de barra e de ramos, respectivamente. Outros objetivos deste trabalho são os de apresentar uma metodologia alternativa para a alocação de bancos de capacitores *shunt*, e o efeito da compensação de bancos de capacitores série na margem de carregamento. Os objetivos são à redução da perda total de potência reativa na transmissão e o aumento na margem de carregamento do sistema. Os valores dos montantes de compensação reativa *shunt* a serem alocados são determinados com base nas curvas de perda total de potência reativa na transmissão versus magnitude de tensão da barra. No caso da compensação série, o valor da reatância capacitiva escolhido é limitado pelo valor prático de compensação que é da ordem de 80%. Também são investigados os efeitos individuais que cada um destes procedimentos traz para o sistema. Entre os efeitos investigados estão: a redução das perdas reativas, a variação na margem de estabilidade estática de tensão, e a melhoria do perfil de tensão. Os resultados obtidos para os sistemas do IEEE (14, 57 e 118 barras) mostram que o procedimento conduz a uma sensível redução da perda total de potência reativa e simultaneamente, uma melhoria no perfil da tensão e um aumento na margem de carregamento.

Palavras Chave — Método da continuação. Estabilidade de tensão. Margem de estabilidade de tensão. Análise modal. Redução das perdas de potência reativa.

ABSTRACT

The objective of the proposed work is to present practical applications of the modal analysis technique applied to voltage stability assessment and reactive power losses reduction. Modal analysis has proven to be a useful steady-state analysis approach which can be applied to identify areas prone to voltage instability. Its results are used to identify the most effective remedial actions to increase system voltage stability margin. The best location for placing shunt and series capacitor is determined based on the bus and branch participations factors respectively. Other goals of the proposed work are to present an alternative procedure to the allocation of shunt capacitor, and the effects of series capacitor compensation on the system loading margin. The objectives are the total reactive power losses reduction in the transmission and the loading margin increase. The values of shunt reactive compensation to be allocated are determined based on the curve of total transmission reactive power losses versus bus voltage magnitude. In case of series compensation, the chosen reactive capacitance values are limited by a practical upper limit of series compensation degree of 80%. The individual effects that each one of these procedures brings for the system are also investigated. Among the investigated effects are: the reduction in the total reactive power losses, the changes in the static voltage stability margin, and the improvement of voltage profile. The results obtained for the IEEE system (14, 57 and 118 bus) show that the procedure leads to a sensible reduction of total reactive power losses and simultaneously, an improvement in the voltage profile and load margin increase.

Keywords – Continuation method. Voltage stability. Maximum loading point. Voltage stability margin. Modal analysis. Reactive power loss reduction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 – Curva PV – Regiões de operação.....	30
Figura 2. 2 – Exemplo de utilização da curva PV.	31
Figura 2. 3 – Curva QV genérica.....	34
Figura 2. 4 – Possibilidades de Curvas QV	35
Figura 2. 5 – Método da continuação com preditor tangente, parametrizado por λ	39
Figura 2. 6 – Método da continuação com preditor secante, parametrizado por λ	40
Figura 2. 7 – Curva ρ versus λ , parametrização local.....	41
Figura 2. 8 – Curva PV usando o vetor perpendicular na correção.....	43
Figura 3. 1 – Modelo π equivalente da linha de transmissão (LT).....	50
Figura 4. 1 – Sistema WSCC 3-Máquinas 9-Barras.....	54
Figura 4. 2 – Perfil de tensão no sistema WSCC.	55
Figura 4. 3 – Fator de participação para todas as barras no modo mais crítico do sistema WSCC operando no caso base.....	56
Figura 4. 4 – Curva QV para as barras 5, 6 e 8 no sistema WSCC.	57
Figura 4. 5 – Diagrama unifilar do Sistema IEEE 14 barras.	58
Figura 4. 6 - Perfis de tensão – (a) Perfil de tensão no caso base (b) perfil de tensão no ponto de máximo carregamento.....	59
Figura 4. 7(a) – Diagrama unifilar correspondente ao PMC.	60
Figura 4.7(b) – Fluxo de reativo nas linhas vizinhas as barras com menores tensões – detalhe barra 5 (CANOSSA, 2007).	61

Figura 4. 7(c) – Fluxo de reativo nas linhas vizinhas as barras com menores tensões – detalhe barra 9 (CANOSSA, 2007).	61
Figura 4. 8 – Fator de participação no PMC ($\lambda=4,0209$).....	63
Figura 4. 9 – (a) Aumento na MC, (b) variação em Qperda.....	64
Figura 4. 10 – Perfil de tensão no caso base.....	65
Figura 4. 11 – Perfil de tensão no ponto de máximo carregamento.	65
Figura 4. 12 – Fator de participação no PMC ($\lambda=2,5972$).....	66
Figura 4. 13 – (a) Aumento na MC, (b) variação em Qperda.....	67
Figura 4. 14 – Perfis de tensão: (a) Perfil de tensão no caso base, (b) perfil de tensão no ponto de máximo carregamento.....	68
Figura 4. 15 – Fator de participação no PMC ($\lambda=2,9906$ p.u.).....	69
Figura 4. 16 – (a) Aumento na MC, (b) variação em Qperda.....	70
Figura 5. 1 - Curva perda total de potência reativa versus magnitude de tensão para a barra 14 do sistema IEEE-14.	72
Figura 5. 2 – Curva perda total de potência reativa versus potência reativa do banco para a barra 14 do sistema IEEE-14.	73
Figura 5. 3 – Curva de perda total de potência reativa versus magnitude de tensão para todas as barras do sistema IEEE14.	74
Figura 5. 4 – Redução na perda total de potência reativa.....	75
Figura 5. 5 – Aumento na margem de carregamento após a instalação do banco <i>shunt</i>	75
Figura 5. 6 – Redução na perda total de potência reativa em relação à potência do banco de capacitor.....	76
Figura 5. 7 – Aumento na margem de carregamento após a instalação do banco <i>shunt</i> em relação à potência do banco de capacitor.	77
Figura 5. 8 – Diagrama unifilar do sistema IEEE 14 barras.....	77

Figura 5. 9 – Fatores de participação no PMC ($\lambda=4,02086$ p.u.)	78
Figura 5. 10– (a) Variação na perda total de potência reativa e, (b) aumento na margem de carregamento após a instalação de um banco <i>shunt</i> de 5 Mvar.....	78
Figura 5. 11 – Sistema IEEE-14 sem limites de potência reativa nas barras PV: (a) curvas PV e (b) perfil de tensão no PMC.....	82
Figura 5. 12 – Fatores de participação de barra para o sistema IEEE-14 sem limites de potência reativa nas barras PV.....	83
Figura 5. 13 – Aumento na margem de carregamento após a instalação do banco <i>shunt</i> em relação à potência do banco de capacitor.	84
Figura 5. 14 – Redução na perda total de potência reativa em relação à potência do banco de capacitor.....	84
Figura 5. 15 – Sistema IEEE-14 com limites de potência reativa nas barras PV: (a) curvas PV e (b) perfil de tensão no PMC.....	86
Figura 5. 16 – Fatores de participação de barra do sistema IEEE-14 com limites de potência reativa nas barras PV.	87
Figura 5. 17 – Aumento na margem de carregamento após a instalação do banco <i>shunt</i> em relação à potência do banco de capacitor, considerando os limites de potência reativa nas barras PV.	88
Figura 5. 18 – Redução na perda total de potência reativa em relação à potência do banco de capacitor, com limites de potência reativa nas barras PV.	89
Figura 5. 19 – Aumento na margem de carregamento após a instalação de um banco <i>shunt</i> de 5 Mvar em cada barra, considerando os limites de potência reativa nas barras PV.....	89
Figura 5. 20 – Redução na perda total de potência reativa após a instalação de um banco <i>shunt</i> de 5 Mvar em cada barra, considerando os limites de potência reativa nas barras PV	90

Figura 5. 21 – Sistema IEEE-57 com limites de potência reativa nas barras PV: (a) curvas PV e (b) perfil de tensão no PMC.....	91
Figura 5. 22 – Diagrama unifilar do sistema IEEE 57 barras.....	93
Figura 5. 23 – Sistema IEEE-57: (a) Redução na perda total de potência reativa em relação à potência do banco de capacitor e (b) ganho na margem de carregamento após a instalação do banco <i>shunt</i> em relação à potência do banco de capacitor, (c) fatores de participação da barra	94
Figura 5. 24 – Sistema IEEE-118 considerando os limites de potência reativa nas barras PV: (a) curvas PV, (b) curvas PV das barras PQ pertencentes ao grupo de barras indicadas pelos fatores de participação de barras correspondentes ao modo mais crítico, (c) curvas PV das barras PV pertencentes ao grupo de barras indicadas pelo fator de participação de barras correspondente ao modo mais crítico, e (d) perfil de tensão no PMC.....	96
Figura 5. 25 – Sistema IEEE-118 barras considerando os limites de potência reativa nas barras PV: (a) Fator de participação de barra (barras PV's e PQ's), e (b) fator de participação de barra (apenas as barras PQ).	101
Figura 5. 26 – Aumento na margem de carregamento (após a instalação do banco <i>shunt</i>) em relação a potência do banco de capacitor, considerando os limites de potência reativa nas barras PV.	101
Figura 5. 27 – Sistema IEEE-118: (a) maiores fatores de participação de barra, (b) maiores fatores de participação das barras PV, (c) maiores fatores de participação das barras PQ, (d) maiores ganhos na margem de carregamento (após a instalação do banco <i>shunt</i> obtido pelo método) em relação à potência do banco de capacitor (somente barras PQ).	102
Figura 5. 28 – Diagrama unifilar do sistema IEEE 118 com as barras indicadas pelo fator de participação de barra correspondente ao modo crítico.	103

Figura 5. 29 – Resultados para o sistema IEEE-118, para as barras PV convertidas para PQ:

(a) fator de participação das barras, (b) ganho na margem de carregamento após o incremento de 10 Mvar no limite máximo de potência reativa da barra, (c) fatores de participação dos geradores (fp_{Gi}) calculados considerando todas as barras PV, (d) fp_{Gi} calculados considerando apenas as barras PV convertidas para PQ, (e) maiores fatores de participação das barras PV, (f) maiores ganhos na margem de carregamento após o incremento de 10 Mvar no limite máximo de potência reativa das barras PV, (g) detalhe da figura (c) apresentando os fp_{Gi} correspondente às barras PV da figura (e), e (h)) detalhe da figura (d) apresentando os fp_{Gi} correspondentes às barras PV da figura (e). 104

Figura 5. 30 – Sistema IEEE-118 considerando os limites de potência reativa nas barras PV:

(a) Redução na perda total de potência reativa em relação à potência do banco de capacitor, (b) fatores de participação dos cinco menores autovalores. 107

Figura 5. 31 – Sistema IEEE-118 considerando os limites de potência reativa nas barras PV:

(a) Redução na perda total de potência reativa em relação à potência do banco de capacitor, (b) redução na perda total de potência reativa após a instalação individual de um banco *shunt* de 10 Mvar em cada barra, c) maiores fatores de participação das barras PQ. 108

Figura 5. 32 – Resultados da compensação série de 50% para o sistema IEEE-14: (a)

diagrama unifilar, (b) fatores de participação dos ramos, (c) redução na perda total de potência reativa normalizado por X_c , (d) ganho na margem de carregamento normalizado por X_c . .. 111

Figura 5. 33 – Resultados da compensação série de 50% para o sistema IEEE-57: (a) fatores

de participação dos ramos, (b) ganho na margem de carregamento, (c) ganho na margem de carregamento normalizado por X_c (d) redução na perda total de potência reativa normalizado por X_c 114

Figura 5. 34 – Resultados da compensação série de 5% para o sistema IEEE-57: (a) ganho na

margem de carregamento, (b) redução na perda total de potência reativa. 115

Figura 5. 35 – Resultados da compensação série de 50% para o sistema IEEE-118: (a) fatores de participação dos ramos, (b) ganho na margem de carregamento, (c) ganho na margem de carregamento normalizado por X_c (d) redução na perda total de potência reativa normalizado por X_c	118
---	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 4. 1– Autovalores do Sistema WSCC.....	55
Tabela 4. 2 - Autovalores do IEEE14 barras para o PMC ($\lambda=4,0209$ p.u.).....	62
Tabela 4. 3 – Autovalores do IEEE14 barra para o PMC ($\lambda=2,5972$ p.u.).....	66
Tabela 4. 4– Autovalores do IEEE14 barra para o PMC ($\lambda=2,9906$ p.u.).....	69
Tabela 5. 1– Valores obtidos pelo método para o sistema IEEE14.....	74
Tabela 5. 2 – Autovalores obtidos para o IEEE 14 operando no PMC ($\lambda=4,02086$ p.u.).....	78
Tabela 5. 3– Aplicação do método para o ajuste das tensões das barras PV's.....	79
Tabela 5. 4 – Valores obtidos pelo método para o sistema IEEE-14, sem limites de potência reativos para as barras PV.	83
Tabela 5. 5 – Autovalores obtidos para o IEEE 14 operando no PMC ($\lambda=1,7444$ p.u.),	86
Tabela 5. 6 – Valores obtidos pelo método para o sistema IEEE-14, com limites de potência reativos para as barras PV.	88
Tabela 5. 7 – Autovalores obtidos para o IEEE 57 operando no PMC ($\lambda=1,6033$ p.u.),	92
Tabela 5. 8 – Sistema IEEE-57: Valores obtidos pelo método das curvas de perda total de potência reativa versus magnitude de tensão para cada uma das barras de carga, considerando os limites de potência reativos para as barras PV.....	92
Tabela 5. 9 – Autovalores obtidos para o IEEE-118 operando no PMC ($\lambda=1,8378$ p.u.), considerando os limites de potência reativa nas barras PV.	97
Tabela 5. 10 – Sistema IEEE-118: Valores obtidos pelo método das curvas de perda total de potência reativa versus magnitude de tensão para cada uma das barras de carga (barras PQ), considerando os limites de potência reativos para as barras PV.	98

Tabela 5. 11 – Aumento na margem de carregamento do sistema IEEE-118 após o incremento individual de 10 Mvar no limite máximo de potência reativa das barras PV's convertidas para PQ.	105
Tabela 5. 12– Aumento na margem de carregamento do sistema IEEE-118 após o incremento individual de 10 Mvar no limite máximo de potência reativa das barras PV (geradores).	106
Tabela 5. 13– Valores obtidos pela compensação série para o sistema IEEE-14.	110
Tabela 5. 14– Valores obtidos para o sistema IEEE-57 com compensação série de 50% do valor de X.	113
Tabela 5. 15– Fatores de participação de ramos do sistema IEEE-57, obtidos para o PMC (1,6033 p.u.).	113
Tabela 5. 16– Valores obtidos para o sistema IEEE-57 com compensação série de 5%.	113
Tabela 5. 17– Valores obtidos para o sistema IEEE-118 com compensação série de 50% do valor de X.	116
Tabela 5. 18– Fatores de participação de ramos do sistema IEEE-118, obtidos para o PMC (1,8378 p.u.).	116

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>IEEE</i>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<i>MW</i>	mega watt
<i>MVar</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>)
<i>ONS</i>	Operador nacional do sistema elétrico
<i>SVC</i>	Static var compensator
<i>WSCC</i>	<i>Western Systems Coordinating Council</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

θ	vetor ângulo das tensões nodais
V	vetor magnitude das tensões nodais
λ	fator de carregamento
P	potência ativa
Q	potência reativa
P^{esp}	potência ativa especificada
Q^{esp}	potência reativa especificada
P_{gerada}	potência ativa gerada
Q_{gerada}	potência reativa gerada
P_{carga}	potência ativa consumida pela carga
Q_{carga}	potência reativa consumida pela carga
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

$\Delta\lambda$	variação para correção do λ
$\mathbf{t}$	vetor tangente
σ	tamanho do passo preditor
$\mathbf{G}$	parte real da matriz admitância ($\mathbf{Y}$)
$\mathbf{B}$	parte imaginária da matriz admitância ($\mathbf{Y}$)
$\mathbf{J}_{P\theta}$, $\mathbf{J}_{Q\theta}$, $\mathbf{J}_{PV}$, e $\mathbf{J}_{QV}$	matrizes de sensibilidades entre as variações das injeções de potência ativa ($\mathbf{P}$) e reativa ($\mathbf{Q}$) e as variações de ângulo ($\Delta\theta$) e de magnitude das tensões ($\Delta\mathbf{V}$) nas barras do sistema
$\mathbf{J}_R$	matriz Jacobiana reduzida ou matriz de sensibilidade Q-V reduzida
Φ	matriz dos autovetores à direita de $\mathbf{J}_R$
Γ	matriz dos autovetores à esquerda de $\mathbf{J}_R$
Λ	matriz diagonal dos autovalores de $\mathbf{J}_R$
$\Delta\mathbf{v}_m$	vetor de variação modal da tensão
$\Delta\mathbf{q}_m$	vetor de variação modal da potência reativa
fp_{ki}	fator de participação da barra k no i-ésimo modo
fp_{kli}	fator de participação do ramo k-l
fp_{Gi}	fator de participação do gerador
Q_{perdas}	perda total de potência do sistema
V_i	magnitude da tensão terminal da barra i
θ_i	ângulo de fase da tensão terminal da barra i
r_{ij}	resistência série do ramo i-j
x_{ij}	reatância série do ramo i-j
b_{ij}^{sh}	susceptância <i>shunt</i> do ramo i-j
G_{ij}	elemento mútuo (não diagonal) pertencente a matriz de condutância nodal ($\mathbf{G}$)

B_{ii}	elemento próprio (diagonal) pertencente a matriz de susceptância nodal (B)
B_{ij}	elemento mútuo (não diagonal) pertencente a matriz de susceptância nodal (B)
Ω_i	conjunto de todas as barras diretamente conectadas à barra i

SUMÁRIO

CAPÍTULO 01 - INTRODUÇÃO.....	23
1.1 Introdução Geral	23
1.2 Critérios de Segurança	24
1.3 Análise Estática.....	25
1.4 Estrutura do Trabalho	26
CAPÍTULO 02 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
2.1 Introdução	28
2.2 Curva PV.....	29
2.2.1 <i>Utilização da Curva PV</i>	31
2.2.2 <i>Desvantagens da Curva PV</i>	32
2.3 Curva QV	32
2.3.1 <i>Vantagem da curva QV</i>	35
2.3.2 <i>Desvantagens da Curva QV</i>	36
2.4 Fluxo de Carga Associado ao Método da Continuação	36
2.4.1 <i>Passo Preditor</i>	37
2.4.1.1 <i>Preditor Tangente</i>	37
2.4.1.2 <i>Preditor Secante</i>	39
2.4.2 <i>Técnicas de Parametrização</i>	40
2.4.3 <i>Passo Corretor</i>	42
2.4.4 <i>Controle do Passo</i>	43

CAPÍTULO 03 - ANÁLISE MODAL ESTÁTICA.....45

3.1	Introdução	45
-----	------------------	----

CAPÍTULO 04 – ESTUDOS DE CASOS APLICANDO ANÁLISE MODAL.....53

4.1	Introdução	53
4.2	Cenário 1	54
4.3	Cenário 2	58
4.3	Cenário 3	64
4.4	Cenário 4	67

CAPÍTULO 05 - UMA NOVA PROPOSTA DE REDUÇÃO DE PERDAS REATIVAS NA TRANSMISSÃO BASEADA NAS CURVAS DE PERDAS VERSUS TENSÃO.....71

5.1	Introdução	71
5.2	Curva de Perdas Versus Tensão	71
5.3	Análises de Resultados	73
5.4	Estudos de Casos Considerando os Limites de Potência Reativa nas Barras PV	80
5.4.1	<i>Análise do sistema IEEE-14 sem limites de potência reativa.....</i>	81
5.4.2	<i>Análise do sistema IEEE-14 considerando os limites de potência reativa</i>	85
5.4.3	<i>Análise do sistema IEEE-57 considerando os limites de potência reativa</i>	90
5.4.4	<i>Análise do sistema IEEE-118 considerando os limites de potência reativa</i>	95
5.4.5	<i>Compensação série</i>	110

CAPÍTULO 06 – CONCLUSÕES.....119

6.1 Introdução 119

6.2 Contribuições 120

6.3 Trabalhos Futuros 121

REFERÊNCIAS123

APÊNDICE A126

A1 Publicações126

CAPÍTULO 01

INTRODUÇÃO

1.1 Introdução Geral

Os sistemas elétricos de potência devem satisfazer a demanda da forma mais econômica e segura possível. Para isso, diversos estudos são realizados, tanto durante o seu planejamento, quanto na sua operação. A instabilidade de tensão é um problema que, devido as graves implicações de ordem físicas, econômicas e sociais que esta acarreta, exige avaliação em ambas as etapas, ou seja, no planejamento e na operação do sistema. A instabilidade de tensão está intimamente relacionada com a incapacidade, por parte do sistema elétrico de potência, de manter o suprimento de potência reativa, dando o suporte de tensão necessário ao sistema elétrico como um todo. O destaque alcançado pela análise estática da estabilidade de tensão, tanto no planejamento, quanto na operação dos sistemas elétricos é uma consequência direta das recentes ocorrências de instabilidade de tensão em diversos sistemas elétricos, as quais muitas vezes resultaram em um colapso da tensão. Diversas causas são responsáveis pelo seu surgimento entre as quais estão o crescimento contínuo da demanda, as restrições econômicas e ambientais, e a desregulamentação do setor elétrico, que tem levado os sistemas elétricos a operar próximo de seus limites operacionais. As análises podem ser realizadas através da obtenção do perfil de tensão das barras em função de seu carregamento (curvas P-V e Q-V). Estas curvas possibilitam a compreensão das condições de operação dos sistemas para diferentes carregamentos, e têm sido recomendadas pelas empresas do setor elétrico internacional (WESTERN SYSTEM COORDINATING COUNCIL - WSCC, 1998) e nacional (FORÇA TAREFA COLAPSO DE TENSÃO - FTCT, 1999), para avaliação da estabilidade de tensão.

Um dos principais objetivos da análise estática de estabilidade de tensão é a obtenção

do ponto de máximo carregamento do sistema, uma vez que ele define a fronteira entre as regiões de operação estável e instável. A partir de sua obtenção é possível determinar a margem de estabilidade e, através da realização da análise modal estática, obter informações para a determinação de medidas efetivas para o reforço do sistema. A margem de estabilidade de tensão é calculada como sendo o máximo acréscimo de carga que o sistema pode atender a partir do caso base, até atingir o ponto de instabilidade de tensão (KUNDUR, 1994; OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS, 2001).

Das análises de estabilidade de tensão é possível saber não só o quão distante o sistema se encontra do ponto de colapso de tensão, mas também é possível se identificar, através da análise modal (GAO, 1992), quais áreas são mais propensas à instabilidade de tensão. Pode-se avaliar as possíveis modificações no sistema visando à implementação de medidas corretivas. O estudo da análise modal estática se faz necessário porque os métodos baseados na curva P-V informam apenas a margem de estabilidade do sistema, mas não determinam quais são as áreas críticas do ponto de vista da estabilidade de tensão, nem que tipo de medida corretiva ou de reforço resultaria em melhoria na margem de estabilidade do sistema. Por outro lado, a análise modal nos permite inferir se o sistema elétrico de potência está operando próximo do ponto de colapso de tensão, e quais áreas são mais sensíveis à estabilidade de tensão para que medidas corretivas sejam tomadas.

A técnica de análise modal e fatores de participação são aplicados na prática para ajudar a resolver o problema de alocação de fontes de reativos no sistema elétrico. As magnitudes dos fatores de participação indicam as melhores áreas para compensação de potência reativa, como alocação de bancos de capacitores, uma vez que associam variação de potência reativa com variação de tensão. Assim, a utilização em conjunto de métodos estáticos, baseados em cálculos de curvas P-V e Q-V, com a análise modal da matriz Jacobiana reduzida, tem-se mostrado como uma opção simples e confiável para a identificação de tipos, localização e tamanho de medidas de reforço adequadas contra a instabilidade de tensão em sistemas de energia (GAO, 1992; MANSOUR, 1993).

1.2 Critérios de Segurança

A distância entre o ponto atual de operação do sistema até o ponto em que ocorre o colapso de tensão (ponto máximo de carregamento do sistema) é fornecido pela margem de

estabilidade de tensão. Atualmente, a margem de estabilidade é a medida mais utilizada para avaliar a segurança do sistema, sendo usualmente medida em MW ou % (MANSOUR, 1993).

Com a crescente ocorrência de blecautes relacionados à instabilidade de tensão, este problema tem sido visto com grande interesse, tanto nos meios acadêmicos, quanto empresariais e industriais. Alguns critérios de estabilidade de tensão foram recentemente propostos, como por exemplo, a recomendação do WSCC (*Western Systems Coordinating Council*) que sugere o atendimento de uma margem de estabilidade mínima de 5% considerando a ocorrência de uma contingência simples, 2,5% para contingências duplas e maiores do que zero para o caso de múltiplas contingências (perda simultânea de três ou mais equipamentos da rede e linhas de transmissão) (WSCC, 1998).

De modo similar, o ONS (Operador Nacional do Sistema Brasileiro) também iniciou estudos recomendando o atendimento de uma margem de estabilidade mínima de 6% também para a ocorrência de contingências simples (ONS, 2001). Foi estabelecida recentemente uma Força Tarefa para estudar o problema no Brasil, visando o planejamento da expansão do sistema direcionando o planejamento da operação (FTCT, 1999).

1.3 Análise Estática

Os níveis das magnitudes de tensão nas barras, e a violação dos limites térmicos dos equipamentos que compõem os sistemas elétricos são verificados através das análises em regime permanente da estabilidade de tensão, antes e depois de um distúrbio no sistema elétrico.

Os seguintes enfoques são necessários para serem realizadas as análises da estabilidade de tensão de um sistema de potência (ZAMBRONI DE SOUZA et al., 1997)

- ✓ Sob o ponto de vista de tensão, o diagnóstico do ponto de operação do sistema, define, inicialmente, se o ponto de operação é estável;
- ✓ Sabendo que o problema é local tem-se a determinação da área/barra crítica do sistema de potência;
- ✓ A identificação do ponto de colapso de tensão por um método conhecido, que indica a margem de carga entre o ponto de operação conhecido e o ponto de colapso de tensão.

1.4 Estrutura do Trabalho

Neste trabalho são dadas condições necessárias não só para o melhor entendimento da técnica da análise modal estática no estudo de estabilidade de tensão, mas também das técnicas utilizadas para estudar este problema, onde são realizadas simulações em cada sistema elétrico de potência selecionado, determinando a margem de carga ativa do sistema (obtida pela curva PV) e a margem de carga reativa (obtida pela curva QV) das barras mais críticas, indicada pela técnica da análise modal.

A motivação principal para a elaboração da proposta é o estudo do comportamento de um determinado sistema elétrico, referente à estabilidade de tensão e suas perdas, analisando o desempenho desse nos diferentes pontos de interesse, tais como, o caso base, e o ponto de máximo carregamento.

No capítulo 2 a revisão da literatura é apresentada, discutindo o problema de estabilidade estática de tensão em sistemas elétricos de potência. Algumas técnicas relacionadas são citadas e discutidas brevemente, como, por exemplo, a análise das curvas PV e QV e o Método da Continuação.

No capítulo 3, a técnica da análise modal é discutida com o objetivo de levar o leitor à compreensão deste método, no qual têm por finalidade indicar através das magnitudes dos fatores de participação quais áreas são mais sensíveis a estabilidade de tensão para que medidas corretivas sejam tomadas, como, por exemplo, alocação de fontes de reativos na rede de alta tensão.

No Capítulo 4, os resultados obtidos são apresentados. As análises foram realizadas utilizando o sistema WSCC/9-Barras, juntamente com o sistema 14 barras do IEEE. Primeiramente foi analisado o sistema WSCC com os limites de reativo liberados e algumas modificações em seu banco de dados (HINAI, 2000). Em uma segunda análise foi considerado o sistema 14 barras do IEEE com os limites de reativo liberado. Em um terceiro momento se analisou mudança da característica da barra 6 que passou a ser PQ em vez de PV. E por fim foi considerado a mudança do tipo da barra 3, onde sua característica passa a ser PQ em vez de PV. A aplicação da análise modal estática serve para determinar as melhores localidades do sistema para a instalação de bancos de capacitores *shunt*, visando à melhoria da margem de estabilidade de tensão e a redução da perda total de potência reativa.

No capítulo 5 apresenta-se uma metodologia alternativa para a alocação de bancos de capacitores *shunt* visando à redução das perdas de potência reativa nas linhas de transmissão.

Tanto a definição do montante de compensação reativa *shunt* a ser alocada quanto o valor das magnitudes de tensão das barras PV a serem ajustados, são determinados com base nas curvas de perda total de potência reativa na transmissão versus magnitude de tensão da barra. Também são investigados os efeitos individuais que cada um destes procedimentos traz para o sistema. Entre os efeitos investigados estão: a redução das perdas reativas, a variação na margem de estabilidade estática de tensão, e a melhoria do perfil de tensão. Os resultados são obtidos para os sistemas do IEEE (de 14, 57, 118 barras (FRERIS; SASSON, 1968)) e mostram que os procedimentos conduzem a uma sensível redução das perdas de potência reativa nas linhas de transmissão e simultaneamente, uma melhoria no perfil da tensão.

No capítulo 6, a conclusão da presente pesquisa e as recomendações são feitas para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 02

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Os conceitos básicos relacionados ao problema de instabilidade de tensão são apresentados neste capítulo, pois os mesmos são indispensáveis para sua análise. Abordam-se aqui métodos como os das curvas PV e QV, que nos dão a indicação sobre a proximidade do ponto máximo de carregamento do sistema, como o conceito de margem de estabilidade, bem como é visto a formulação básica das equações estáticas do sistema de potência.

Uma série de modelos estáticos é utilizada na análise de uma variedade de problemas relativos à operação das redes de energia elétrica por elas em geral operarem em regime dinâmico lento.

As metodologias que usam modelos estáticos baseiam-se, em geral, nos métodos convencionais de solução das equações da rede elétrica em regime permanente. No caso da análise da estabilidade de tensão, os métodos baseados em modelos estáticos são também capazes de fornecer com relativa facilidade, índices de proximidade ao ponto crítico de carregamento do sistema, margens de carregamento e subsídios para a identificação das áreas instáveis sob ponto de vista de tensão. Na avaliação da estabilidade de tensão as análises estáticas baseadas no levantamento de curvas PV e QV têm sido adotadas pelas empresas do setor nacional (FTCT, 1999) e internacional (WSCC, 1998). A metodologia PV mostrou-se mais adequada para a determinação das margens de estabilidade. Já as metodologias QV e análise modal mostraram-se importantes respectivamente para subsidiar a definição do montante de margem de potência reativa e os locais mais apropriados para se realizarem os reforços no sistema.

O reforço do sistema pode ser obtido pela colocação de bancos de capacitores *shunt* (ou em derivação), mas de forma limitada uma vez que devido a sua dependência de

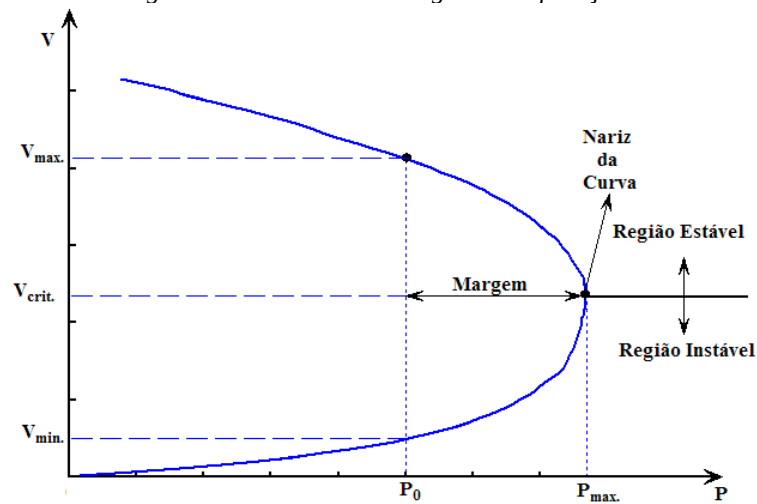
suprimento de potência reativa com o quadrado da tensão, fornece menos reativo quando o sistema mais necessita; pelo uso de compensadores síncronos e em particular dos compensadores estáticos de reativos que são mais rápidos e eficientes em face as suas velocidades de resposta; pela construção de novas linhas de transmissão, em geral, com um custo e impacto ambiental alto; pela compensação série capacitiva que apresenta um alto custo e produz problemas de proteção em virtude do aumento da potência de curto-circuito; através da utilização de geração distribuída, aproximando a geração (eólica, células combustíveis e pequenas centrais hidrelétricas) dos grandes centros de consumos e reduzindo com isso, o fluxo de potência ativa na transmissão.

2.2 Curva PV

Para introduzir os conceitos básicos do estudo da estabilidade de tensão, através de modelagem estática, considere a curva que mostra o comportamento da tensão em cada barra do sistema ilustrado na Figura 2.1. Esta curva, denominada curva PV, é obtida através de sucessivas soluções de fluxo de carga, aumentando-se gradativamente a demanda do sistema. A curva PV é definida como a relação entre a potência de um determinado barramento e a magnitude de tensão do mesmo. Desta forma, a curva PV indica a margem de estabilidade de tensão, que corresponde à distância entre um dado ponto de operação e o ponto de máximo carregamento, situado no “nariz” (*nose*) da curva.

Nesta curva, observa-se que para cada nível da demanda (P_0) existem duas soluções em termos de magnitude da tensão ($V_{\max}$ e $V_{\min}$), uma que pertence a parte superior da curva e que representa uma região estável, e uma que pertence a parte inferior e que representa uma região instável (KUNDUR, 1993). De acordo com Kundur (1993): “Um sistema é estável do ponto de vista da estabilidade estática de tensão se as magnitudes de tensão de todas as suas barras aumentam, caso as respectivas injeções de potência reativa nelas aumentem. Um sistema é instável se, em pelo menos uma de suas barras, a magnitude de tensão diminui se injeção de potência reativa aumenta”.

Figura 2.1 – Curva PV – Regiões de operação.



Amorim (2011)

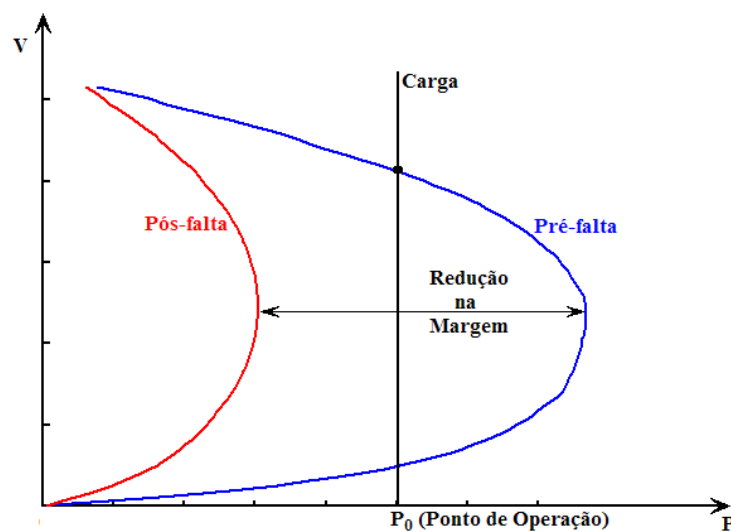
Na região superior da curva PV da Figura 2.1, um aumento na demanda resulta num desbalanço de potência reativa, tal que a magnitude da tensão do sistema tende a diminuir. Para corrigir esta redução, medidas corretivas recomendariam um ajuste na magnitude da tensão gerada ou nos *taps*, ou alternativamente uma redução de carga. Este procedimento seria tomado até que fosse atingido um ponto de equilíbrio (região estável). Por outro lado, na parte inferior da curva, um aumento na demanda causa uma elevação na magnitude da tensão do sistema. Isto faz com que o sistema não atinja um ponto de equilíbrio, pois a redução da carga recomendada pela estratégia corretiva também causa decréscimo na magnitude da tensão (região instável). O extremo da curva é o chamado ponto crítico ou ponto máximo de carregamento. Este ponto pode ser interpretado da seguinte maneira: para uma determinada condição de carga, em adição à solução normal do fluxo de carga, que é tipicamente o ponto de operação corrente, outras soluções podem ser encontradas para as equações da rede elétrica em regime permanente. Estes pontos de equilíbrio se aproximam um do outro quando o sistema é carregado, até o ponto onde somente uma única solução existe. Neste ponto, um autovalor da matriz Jacobiana se torna singular, seu determinante se torna nulo. Logo, para pontos de operação próximos ao ponto crítico, a matriz Jacobiana se torna numericamente mal-condicionada.

O colapso de tensão ocorre na operação do sistema em diversas situações como um simples aumento repentino do carregamento quando operando próximo ao máximo carregamento, ou causado por contingências que provocam desbalanço entre a produção e o

consumo de potência reativa como a perda de fonte de geração de reativos. Em geral, as contingências provocam uma demanda adicional de reativos devido ao aumento das perdas nas linhas de transmissão, aumento do consumo de reativos em motores de indução, ou a diminuição do suprimento de reativos dos bancos de capacitores face à queda de tensão no ponto de instalação do mesmo.

Existem vários possíveis cenários de instabilidade que podem ser examinados através da curva PV. Um exemplo desta situação é quando ocorre uma contingência, como é o caso da saída de linhas de transmissão ou de transformadores, e que levam a uma nova curva PV (curva PV de pós-falta), sem que a carga se altere, como mostrado na Figura 2.2. Neste caso, não existe interseção entre a curva PV e a característica de carga, e, portanto, não existe um novo ponto de operação após a contingência. Embora no geral, a análise seja feita para uma característica de carga do tipo potência constante, uma análise semelhante pode ser feita para o caso de cargas com outras características.

Figura 2. 2 – Exemplo de utilização da curva PV.



Amorim (2011)

2.2.1 Utilização da Curva PV

A curva PV é utilizada na análise estratégica de planejamento e operação de sistemas elétricos de potência, onde se tem a determinação de limites de transferência de potência, permitindo o ajuste das margens.

2.2.2 Desvantagens da Curva PV

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

Uma vez definidas as barras para as quais serão levantadas as curvas PV, o traçado da curva PV é efetuado após a seleção da região onde a carga será incrementada, sendo que a sua variação é realizada mantendo-se o fator de potência constante (FTCT, 1999). Para isso, também, define-se os geradores responsáveis pelo atendimento do aumento de carga. As curvas devem ser obtidas para a condição normal de operação, bem como para contingências simples. Uma vez obtida a curva PV, uma verificação é realizada para se constatar a existência de uma situação na qual a margem obtida é inferior à estabelecida nos critérios. A recomendação do WSCC é o de uma margem de estabilidade mínima de 5% considerando a ocorrência de uma contingência simples, 2,5% para contingências duplas (perda simultânea de dois equipamentos ou linhas de transmissão da rede) e maiores do que zero para o caso de múltiplas contingências (perda simultânea de três ou mais equipamentos ou linhas de transmissão da rede) (WSCC, 1998). De modo similar, o ONS recomenda o atendimento de uma margem de estabilidade mínima de 6% também para a ocorrência de contingências simples (ONS, 2001). Assim, além de não fornecer informações sobre os mecanismos da instabilidade de tensão, essa análise exige um alto tempo computacional.

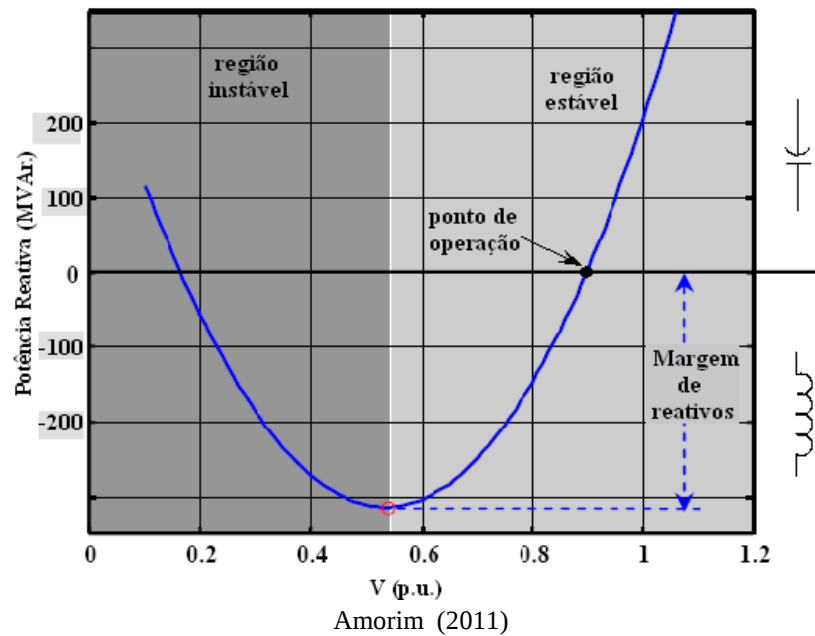
2.3 Curva QV

A curva Q-V é um método simples e rápido de análise estática da estabilidade de tensão, sendo usado para se determinar a margem de reativo nas barras críticas do sistema. O método de análise baseado na curva QV, assim como o método da curva PV, é uma das ferramentas mais aceitas pelos setores de energia elétrica. Recentemente, em (HUANG et al., 2007) foi proposto um método de curva QV baseado em medições, no qual uma parte da curva QV na vizinhança do ponto de operação pode ser medida *on-line*. O procedimento de medição é implementado por meio do ajuste de alguns parâmetros (referência de tensão do regulador de tensão do gerador, chaveamento de impedância *shunt*, e potência reativa de SVC) para criar pequenas variações de potência reativa. O segmento da curva QV revela

informações importantes sobre a estabilidade de tensão do sistema como no caso da sensibilidade dQ/dV e, quando comparado com a curva QV obtida tradicionalmente por um fluxo de carga, permite a verificação de inconsistências de modelagem e erros de dados. De acordo com a referência o *Bonneville Power Administration* (BPA) e outros membros do *Western Electricity Coordinating Council* (WECC) adotam principalmente o método da curva QV.

Através da curva Q-V determina-se a compensação de potência reativa necessário para levar o sistema para um ponto de operação considerado seguro (estável). A curva QV apresenta a variação da magnitude da tensão numa determinada barra (originalmente uma barra de carga ou barra QV) em função da injeção de potência reativa. O traçado da curva QV é realizado através da adição de um condensador síncrono fictício à barra em análise, convertendo-a de uma barra PQ para uma barra PV, sem limites de reativo. A seguir, a partir de um caso base, o valor da magnitude de tensão da barra escolhida é fixado e a injeção de reativos é determinada através da solução de um fluxo de potência. Assim, são especificados sucessivos valores para a magnitude de tensão e os correspondentes valores da injeção de reativo são obtidos. Os valores de magnitude de tensão são representados no eixo das abscissas e os da potência reativa injetada no eixo das ordenadas, conforme mostrado na Figura 2.3. O ponto de operação corresponde à intersecção da curva com o eixo das abscissas, onde a potência reativa injetada é nula. A margem de reativos disponível na barra é a diferença entre a potência reativa de saída nula do condensador síncrono (ponto de operação) e a potência do mesmo na base da curva QV.

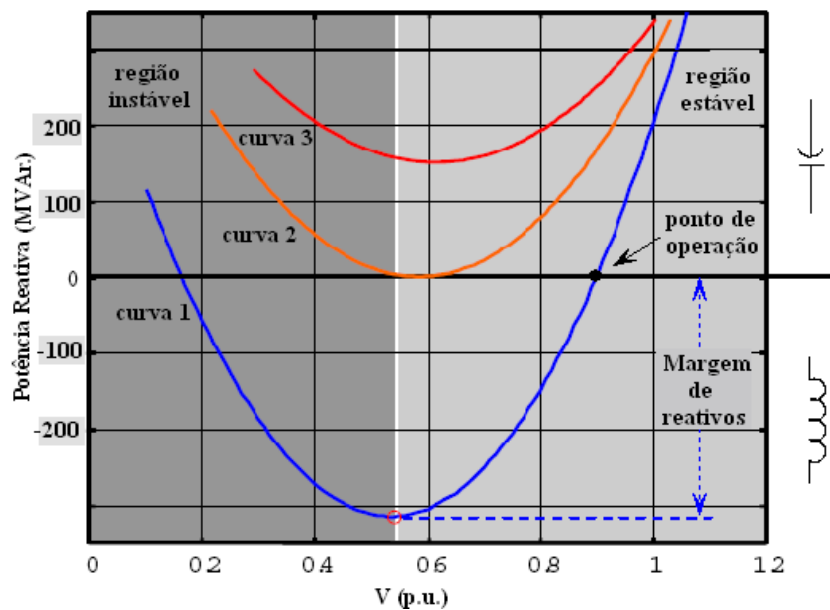
Figura 2.3 – Curva QV genérica.



A fronteira de estabilidade de tensão é representada pelo ponto onde $dQ/dV=0$, o qual define o mínimo de potência reativa necessária para a operação estável. Ao contrário dos pontos localizados à direita do ponto de mínimo, os pontos localizados à esquerda são considerados instáveis porque um acréscimo de potência reativa leva a uma diminuição do valor da magnitude da tensão.

Conforme mostrado na Figura 2.4, a curva QV se desloca para cima à medida que há um aumento do carregamento (potência ativa). No caso da curva 1, o sistema ainda pode aumentar sua potência ativa sem a necessidade de compensação local de potência reativa. No caso da curva 2, ocorre uma única intersecção com o eixo de tensão, isto significa que não há margem de potência reativa na barra, este caso representa a condição de máxima transferência de potência ativa sem compensação de reativos, o sistema encontra-se no limite de estabilidade de tensão. Para o caso da curva 3, todos os pontos encontram-se acima do eixo das abscissas, ou seja, o sistema não possui nenhum ponto de operação factível para este nível de carregamento. Neste caso, a operação só poderá ser restabelecida se alguma forma de compensação de reativos for providenciada.

Figura 2. 4 – Possibilidades de Curvas QV



Amorim (2011)

Assim, o sistema só poderá suprir o nível de carregamento solicitado mediante o emprego de compensação de reativo, ou seja, com a instalação, por exemplo, de um banco de capacitor *shunt*. O valor de compensação de reativo é obtido diretamente da curva e corresponderá para cada valor de magnitude de tensão desejada, a distância entre a curva (no caso da curva 3) e o eixo das abscissas.

2.3.1 Vantagem da curva QV

Exige poucas iterações para a convergência, quando se tem pequenas variações na escala de tensão, tornando o método eficiente devido à automatização utilizada em uma rotina de programação.

É obtida visualmente, através da observação da margem de carga reativa da curva QV, a quantidade de compensação reativa necessária para a barra analisada.

A sensibilidade no perfil de tensão é indicada pela inclinação da curva QV.

A diferença entre o ponto de operação e o valor de potência reativa referente ao colapso de tensão é chamada de margem de potência reativa da barra, sendo esta, utilizada como índice de confiabilidade do sistema.

2.3.2 Desvantagens da Curva QV

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

A aplicação do método para a obtenção de margem para uma área ou para o sistema inteiro mostra problemas de convergência, e não é adequada.

Há a necessidade de serem traçadas várias curvas QV quando se faz a análise de contingências e simulações com vários patamares de carga.

2.4 Fluxo de Carga Associado ao Método da Continuação

O fluxo de carga continuado (FCC) consiste basicamente em, a partir de um ponto de equilíbrio conhecido (caso base) e uma direção de crescimento de carga definida, determinar o ponto de máximo carregamento e a curva PV de cada barra de um sistema elétrico de potência. O método Newton utilizado na resolução do problema do fluxo de carga só possibilita o traçado da parte superior da curva PV. Isso ocorre em virtude da singularidade da matriz Jacobiana no ponto de máximo carregamento (AJJARAPU; CHRISTY, 1992; SEYDEL, 1994). Por outro lado, no FCC, o traçado completo do perfil de tensão (curva PV) é efetuado por meio da obtenção de sucessivas soluções de fluxo de carga, o que é realizado a partir da variação automática de um parâmetro associado ao carregamento do sistema. Outra característica importante do FCC é que, através da variação de um parâmetro apropriadamente escolhido, o método possibilita o traçado da curva PV sem a preocupação com a singularidade das equações do fluxo de carga.

A diferença entre os métodos de FCC está na forma de se eliminar a singularidade da matriz Jacobiana. Em geral, os diversos métodos de FCC descritos na literatura utilizam-se de quatro elementos básicos:

- ⇒ Passo Preditor;
- ⇒ Procedimento de parametrização;
- ⇒ Passo corretor;
- ⇒ Controle de passo;

A primeira etapa, conhecida como passo preditor, consiste na determinação, a partir de uma solução conhecida, de uma estimativa para a próxima solução. Essa previsão é usada no passo corretor para calcular o novo ponto da curva da trajetória de soluções (curva PV). Em

virtude da singularidade da matriz Jacobiana, os métodos de FCC empregam uma técnica de parametrização para eliminar os problemas numéricos em torno do ponto de máximo carregamento. Essa técnica é necessária, dependendo do método empregado, tanto no passo preditor quanto no passo corretor.

2.4.1 Passo Preditor

Os preditores mais empregados nos FCC são o tangente e o secante (AJJARAPU; CHRISTY, 1992; CHIANG et al., 1995; SEYDEL, 1994), e conforme já apresentado é usado para prever a próxima solução a partir de uma outra já conhecida.

2.4.1.1 Preditor Tangente

Em geral as equações de FC podem ser escritas como:

$$\mathbf{G}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}, \lambda) = \mathbf{0} \quad (2.1)$$

sendo:

$\mathbf{V}$ = vetor das magnitudes de tensões nodais;

$\boldsymbol{\theta}$ = vetor dos ângulos nodais;

λ = fator de carregamento;

$\mathbf{G}$ = vetor composto pelas equações dos balanços de potências ativas e reativas.

Reescrevendo a equação (2.1) tem-se:

$$\begin{aligned} \lambda \mathbf{P}^{\text{esp}} - \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) &= \mathbf{0} \\ \lambda \mathbf{Q}^{\text{esp}} - \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (2.2)$$

sendo $\mathbf{P}^{\text{esp}} = \mathbf{P}_{\text{gerada}} - \mathbf{P}_{\text{carga}}$ a diferença entre a potência ativa gerada e consumida para as barras de carga (PQ) e de geração (PV). $\mathbf{Q}^{\text{esp}} = (\mathbf{Q}_{\text{gerada}} / \lambda) - \mathbf{Q}_{\text{carga}}$ é a diferença entre a potência reativa gerada e consumida para as barras de carga (PQ). Uma vez que a solução da equação (2.1) para o caso base ($\mathbf{V}_0, \boldsymbol{\theta}_0, \lambda_0 = 1$) tenha sido encontrada por um método convencional de FC, o FCC é utilizado para calcular as soluções adicionais até que o PMC seja alcançado. No preditor tangente, a estimativa da próxima solução pode ser encontrada

dando um passo, de tamanho apropriadamente escolhido, na direção do vetor tangente à curva PV. O cálculo do vetor tangente é obtido tomando-se o diferencial da equação (2.1), que na forma matricial é dada por:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_\theta & \mathbf{G}_V & \mathbf{G}_\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J} & -\mathbf{G}_\lambda \end{bmatrix} \mathbf{t} = [0] \quad (2.3)$$

Em que: $\mathbf{G}_\theta = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \theta}\right)^T & \left(\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \theta}\right)^T \end{bmatrix}^T$; $\mathbf{G}_V = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial V}\right)^T & \left(\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial V}\right)^T \end{bmatrix}^T$; $\mathbf{G}_\lambda = [\mathbf{P}^{\text{esp}} \quad \mathbf{Q}^{\text{esp}}]^T$

$\mathbf{G}_\theta$ e $\mathbf{G}_V$ compõem a matriz Jacobiana ($\mathbf{J}$) do fluxo de carga convencional. Acrescenta-se a $\mathbf{J}$ uma coluna ($-\mathbf{G}_\lambda$) correspondente a 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 parâmetro da continuação. Uma nova equação ($\ell_k \mathbf{t} = t_k = \pm 1$) é acrescida ao sistema de equações (2.3), que passa a ter a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_\theta & \mathbf{G}_V & \mathbf{G}_\lambda \\ & \ell_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \mathbf{J}_a \mathbf{t} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

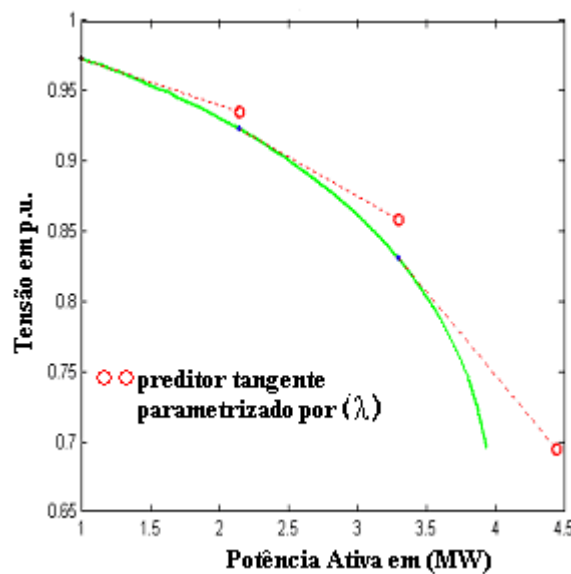
Onde ℓ_k é um vetor linha com todos os elementos nulos exceto o k -ésimo, que é igual a 1. A escolha do índice k é feita de forma que o vetor $\mathbf{t}$ tenha uma norma não nula e garanta que a matriz Jacobiana aumentada ($\mathbf{J}_a$) seja não singular no PMC. A escolha do sinal + ou – dependerá 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:

$$\begin{bmatrix} \theta^e \\ \mathbf{V}^e \\ \lambda^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^j \\ \mathbf{V}^j \\ \lambda^j \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Sendo que o sobrescrito “e” indica estimativa, isto é, o vetor tangente é usado para obter uma estimativa para θ , $\mathbf{V}$, λ a partir da solução atual $\mathbf{j}$. Tem-se σ como constante escalar

positiva que controla o tamanho do passo preditor, resultando na redução do tamanho do passo à medida que o sistema se aproxima do PMC, já que a magnitude do vetor tangente aumenta na proximidade deste ponto. Se o passo for muito grande, o ponto estimado apresentará problemas de convergência durante a sua correção, enquanto que, para um passo muito pequeno, serão necessárias muitas iterações para atingir o ponto de máximo carregamento. Pode-se observar graficamente um exemplo da técnica de parametrização com preditor tangente na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Método da continuação com preditor tangente, parametrizado por λ



Bonini Neto (2008)

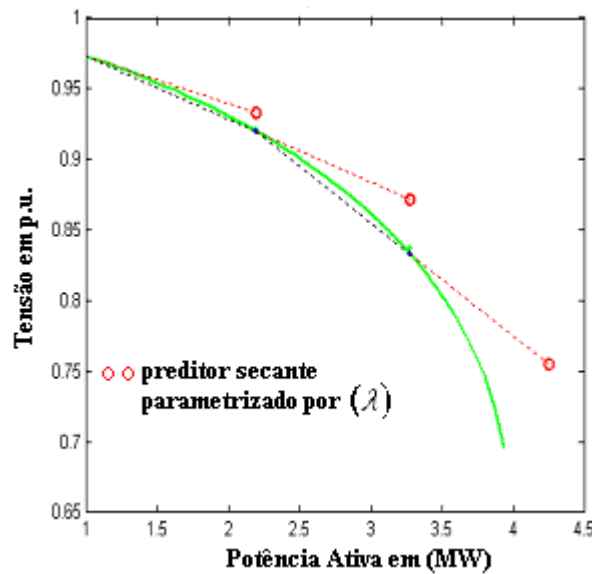
A matriz Jacobiana se torna mal condicionada quando o ponto de equilíbrio se encontra nas proximidades do ponto de máximo carregamento (singularidade da matriz), esta situação passa a ser uma dificuldade para o método no passo preditor tangente. Com a finalidade de evitar este problema, técnicas de parametrização podem ser utilizadas, como será visto no item 2.4.2: Técnicas de Parametrização.

2.4.1.2 Preditor Secante

O preditor secante é mais simples porque não apresenta problemas relacionados à singularidade da matriz Jacobiana (CHIANG et al., 1995; SEYDEL, 1994). Os dois preditores secantes mais usados são o polinomial de primeira ordem e o de ordem zero ou trivial. O preditor secante de primeira ordem consiste na aproximação do vetor tangente utilizando dois

pontos determinados previamente. Já o preditor secante de ordem zero usa a solução atual e um incremento fixo no parâmetro (λ , θ_k , ou V_k) como uma estimativa para a próxima solução. Pode-se observar graficamente um exemplo da técnica de parametrização por passo preditor secante na Figura 2.6.

Figura 2. 6 – Método da continuação com preditor secante, parametrizado por λ .



Bonini Neto (2008)

2.4.2 Técnicas de Parametrização

A parametrização fornece uma forma de identificar cada solução ao longo da trajetória a ser obtida. A parametrização é utilizada para remover a singularidade da matriz Jacobiana no ponto de máximo carregamento. Uma das técnicas é conhecida como parametrização local (AJJARAPU; CHRISTY, 1992; SEYDEL, 1994), que consiste na troca do parâmetro próximo ao PMC. No caso do vetor tangente, de acordo com a equação (2.6a), das $n+1$ variáveis, a variável que apresentar maior variação é a que será escolhida como o novo parâmetro ρ , sendo que λ a partir daí passa a ser tratado como variável dependente. Já no método baseado no preditor secante, ρ é escolhido como sendo a componente que apresentar a máxima variação relativa (SEYDEL, 1994), conforme a equação (2.6b).

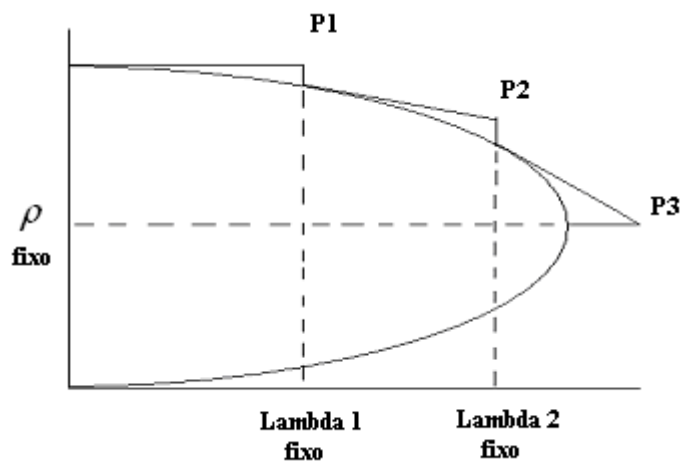
$$\rho \leftarrow \max \left\{ |t_1|, |t_2|, \dots, |t_{n+1}| \right\} \quad (2.6a)$$

$$\rho \leftarrow \max \left\{ \left(\frac{|\boldsymbol{\theta}^{j+1} - \boldsymbol{\theta}^j|}{|\boldsymbol{\theta}^{j+1}|} \right), \left(\frac{|\mathbf{V}^{j+1} - \mathbf{V}^j|}{|\mathbf{V}^{j+1}|} \right), \left(\frac{|\lambda^{j+1} - \lambda^j|}{|\lambda^{j+1}|} \right) \right\} \quad (2.6b)$$

Na equação (2.6b), j refere-se ao ponto atual da curva.

A curva λ versus ρ para este exemplo é mostrada na Figura 2.7. Na utilização da equação (2.6a) no método do vetor tangente, percebe-se que ρ muda de λ para a tensão que apresenta a maior variação, retornando novamente para λ após alguns pontos. Os pontos (P1) e (P2) são as previsões da solução. Aqui λ é escolhido como o parâmetro de continuação e converge em cima da curva após o passo corretor. No ponto (P3), próximo ao PMC, λ não pode mais ser o parâmetro de continuação, não há solução para este valor de λ . Neste ponto a técnica de parametrização local efetua a troca de parâmetros escolhendo a variável que apresenta a maior variação no vetor tangente. Nesse caso, ρ passa a ser o novo parâmetro da continuação e λ passa a ser considerado como variável dependente, removendo com essa troca, a singularidade da matriz Jacobiana e possibilitando assim que se encontre a solução para o sistema de equações resultante.

Figura 2.7 – Curva ρ versus λ , parametrização local.



Bonini Neto (2008)

Chiang et al. (1995) propuseram uma parametrização onde o comprimento de arco (s) é o parâmetro. Esta técnica propõe a adição da seguinte equação à equação (2.3):

$$\left(\frac{d\theta}{ds}\right)^2 + \left(\frac{dV}{ds}\right)^2 + \left(\frac{d\lambda}{ds}\right)^2 = 1 \quad (2.6)$$

Esta equação assegura que o parâmetro s seja o comprimento do arco sobre a curva de solução. Devido a não-linearidade do conjunto de equação resultante, é necessário um método especial de resolução. Assim, a sua solução pode exigir um tempo computacional muito alto. A opção sugerida pelos autores é o uso do preditor secante logo após a obtenção de dois pontos da curva. Esta técnica permite que sejam dados maiores passos do que a técnica de parametrização local, por isso ela é considerada pelos autores como uma técnica mais robusta.

Arya e Verma (1996), considerando a magnitude da tensão como parâmetro e λ como uma variável dependente, obtém a curva PV completa. De acordo com Ajjarapu e Christy (1992), os ângulos de tensão também podem ser escolhidos como parâmetros. À medida que o carregamento se aproxima do PMC na curva PV, a tensão decresce. Assim, a tensão de uma determinada barra poderia ser prefixada e a respectiva solução determinada.

Outros tipos de parametrização podem ser encontrados na literatura (ALVES et al., 2003; BONINI; ALVES, 2008; GARBELINI et al., 2006).

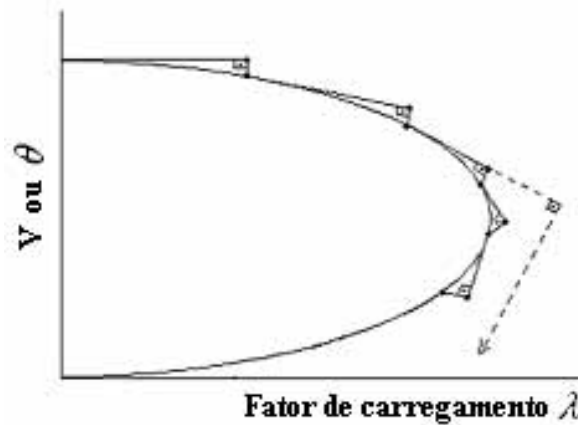
2.4.3 Passo Corretor

Diferentes técnicas têm sido utilizadas nos estudos de colapso de tensão em sistema de potência, uma delas consiste em definir um vetor perpendicular ao vetor tangente $(\theta^j, V^j, \lambda^j)$ da curva, e que passe pelos pontos previsto subsequente $(\theta^e, V^e, \lambda^e)$ e outro que se encontra sobre a curva da trajetória de soluções (θ, V, λ) . A equação de parametrização a ser acrescentada ao sistema (2.1) será dada pelo produto escalar:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta^j \\ \Delta V^j \\ \Delta\lambda^j \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \theta - \theta^j - \Delta\theta^j \\ V - V^j - \Delta V^j \\ \lambda - \lambda^j - \Delta\lambda^j \end{bmatrix} = 0 \quad (2.8)$$

sendo $(\Delta\theta^j, \Delta V^j, \Delta\lambda^j)^T = (\theta^e - \theta^j, V^e - V^j, \lambda^e - \lambda^j)$. Esta técnica exige um bom controle de passo nas proximidades do PMC, linha tracejada, na figura 2.8.

Figura 2. 8 – Curva PV usando o vetor perpendicular na correção.



Bonini Neto (2008)

2.4.3 Controle do Passo

A eficiência do processo da continuação depende de uma boa escolha de σ (escalar que define o tamanho do passo preditor), como mostra a equação (2.5), uma vez que a solução predita pode levar a condição de divergência, caso esta solução esteja fora do raio de convergência do método de Newton (aplicado a um passo corretor), ou a uma solução indesejada.

Para se obter um desempenho global, o tamanho do passo deveria se adaptar as condições reais de convergência, que por sua vez, estará relacionado com o algoritmo em uso. Uma das formas para se achar o controle do tamanho de passo é um método simples baseado no número de iterações do passo corretor. Enquanto o número de iterações for pequeno, têm-se as condições de carga leve ou normal, e o tamanho para o próximo passo poderá ser maior. Com um número grande de iterações, o sistema se encontrará estressado e o tamanho do passo poderá ser menor.

Outro método de controle de passo é baseado no vetor tangente normalizado (ZAMBRONI et al., 1997), onde o tamanho do passo é definido como:

$$\sigma = \sigma_0 / \|\mathbf{t}\|_2 \quad (2.9)$$

em que:

- $\Rightarrow \sigma_0$ é um escalar pré-definido;
- $\Rightarrow \|\mathbf{t}\|_2$ é a norma Euclidiana do vetor tangente;

A magnitude do vetor tangente aumenta e σ diminui à medida que o sistema torna-se mais carregado. A eficiência do processo depende da boa escolha de σ_0 . O seu valor dependerá do sistema. Entretanto, Cañizares e Alvarado (1993) alcançaram bons resultados para sistemas de vários tamanhos assumindo $\sigma_0 = 1$, juntamente com a redução de passo quando limites são atingidos ou ocorrem problemas de convergência. A equação (2.9) também pode ser utilizada na técnica de previsão pelo vetor secante, para obter um controle de passo.

CAPÍTULO 03

ANÁLISE MODAL ESTÁTICA

3.1 Introdução

Este capítulo descreve a técnica de análise modal que, através da matriz jacobiana reduzida, nos permite obter informações que indicam quais são as áreas críticas do sistema que estão propensas à instabilidade tensão, para que medidas corretivas sejam tomadas. As informações fornecidas servem para definir qual tipo de medida preventiva ou de reforço resultaria em melhoria na margem do sistema com mais eficácia.

A análise modal constitui uma das ferramentas mais adequada para o estudo da estabilidade estática de tensão. Em 1992, Gao propôs o uso da análise modal estática nos estudos relacionados com a estabilidade estática de tensão. Nesta análise, propõem-se o cálculo dos menores autovalores e respectivos autovetores da matriz Jacobiana reduzida que é obtida a partir de uma solução do fluxo de carga. A justificativa para o uso da matriz Jacobiana reduzida, i.e., desconsiderando os efeitos da variação da potência ativa (ΔP) e do ângulo ($\Delta \theta$), é a de que os resultados obtidos considerando a matriz Jacobiana completa representam a relação entre $(\Delta \theta, \Delta V)$ e $(\Delta P, \Delta Q)$, e uma vez que $\Delta \theta$ é incluído na formulação, fica difícil distinguir a relação entre ΔV e $(\Delta P, \Delta Q)$, o quê é de suma importância para a análise da estabilidade de tensão. Em (DA SILVA, 2001) afirma que uma técnica de análise modal capaz de considerar aspectos tanto de potência reativa, quanto de potência ativa mostra-se de grande utilidade para a avaliação completa das condições de estabilidade de tensão de um sistema. Assim, foram apresentados métodos para expandir e melhorar a técnica de análise modal estática convencional para a análise da estabilidade de tensão. De acordo com os resultados obtidos as matrizes Jacobianas reduzidas ativa e reativa fornecem informação modal diferente e complementar. A matriz reduzida reativa revela os problemas

de estabilidade de tensão a partir de um ponto de vista de potência reativa, enquanto que a matriz reduzida ativa indica os locais do sistema onde ações de controle relacionadas à potência ativa podem melhorar as margens de estabilidade de tensão significativamente. Uma aplicação direta da matriz reduzida ativa é para a determinação de fatores de participação para os geradores. Os fatores de participação propostos para geradores e cargas podem ser de grande ajuda para o projeto e avaliação dos vários meios de reforço do sistema contra instabilidade de tensão, bem como para a definição de medidas de operação para a restauração eficiente das margens de estabilidade mínimas em condições de contingências. O fator de participação ativo indica locais onde ações de controle relacionadas à potência ativa seriam mais eficientes em termos de reforço fornecido ao sistema. Enquanto que o fator de participação reativo indica os melhores locais para a compensação de reativos.

O método de análise modal estática proposto em (KUNDUR, 1993) consiste da aplicação de resultados utilizados por métodos de análise modal dinâmica em uma matriz Jacobiana reduzida, obtida a partir do modelo estático de um sistema de potência, linearizado em torno do ponto de operação, o qual pode ser expresso por:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{P\theta} & \mathbf{J}_{PV} \\ \mathbf{J}_{Q\theta} & \mathbf{J}_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

sendo $\Delta \mathbf{P}$ e $\Delta \mathbf{Q}$ as respectivas variações incrementais de potência ativa e reativa e, $\Delta \boldsymbol{\theta}$ e $\Delta \mathbf{V}$ as respectivas variações incrementais de ângulo e de magnitude das tensões nodais. Os elementos da matriz Jacobiana ($\mathbf{J}$), $\mathbf{J}_{P\theta}$, $\mathbf{J}_{Q\theta}$, $\mathbf{J}_{PV}$, e $\mathbf{J}_{QV}$, representam as sensibilidades entre as variações das injeções de potência ativa e reativa e as variações de ângulo e de magnitude das tensões nas barras do sistema, respectivamente. A estabilidade de tensão é afetada tanto por $\mathbf{P}$ quanto por $\mathbf{Q}$. Porém, pode-se manter $\mathbf{P}$ constante e avaliar a estabilidade de tensão considerando-se apenas a relação incremental entre $\mathbf{Q}$ e $\mathbf{V}$. Assim, para a definição da matriz Jacobiana reduzida ($\mathbf{J}_R$) faz-se a hipótese (KUNDUR, 1993) de que, para cada ponto de operação, as variações de potência ativa são nulas ($\Delta \mathbf{P} = 0$), e a estabilidade é avaliada considerando-se somente a relação incremental entre $\mathbf{V}$ e $\mathbf{Q}$, ou seja:

$$\Delta \mathbf{Q} = \mathbf{J}_R \Delta \mathbf{V} \quad (3.2)$$

ou

$$\Delta \mathbf{V} = \mathbf{J}_R^{-1} \Delta \mathbf{Q} \quad (3.3)$$

sendo $\mathbf{J}_R = [\mathbf{J}_{QV} - \mathbf{J}_{Q\theta} (\mathbf{J}_{P\theta}^{-1}) \mathbf{J}_{PV}]$ a matriz Jacobiana reduzida. Observa-se, utilizando a fórmula de Schur ($\det(\mathbf{J}) = \det(\mathbf{J}_{P\theta}) \times \det(\mathbf{J}_R)$), que a matriz $\mathbf{J}$ se torna singular quando a matriz $\mathbf{J}_R$ (ou $\mathbf{J}_{P\theta}$) se torna singular (MANSUR, 1993). Considerando que não haja problemas quanto à estabilidade angular do sistema, i.e., $\det \mathbf{J}_{P\theta} \neq 0$, então, a matriz $\mathbf{J}$ se torna singular quando a matriz $\mathbf{J}_R$ se torna singular.

Através do sinal das sensibilidades $\mathbf{V-Q}$ (relação entre tensão e potência reativa) de todas as barras do sistema pode-se analisar a estabilidade do sistema. Nesse caso, para uma dada barra, uma sensibilidade $\mathbf{V-Q}$ positiva implica que a tensão aumenta com a adição de injeção de potência reativa. Assim, o sistema é considerado estável se todas as sensibilidades $\mathbf{V-Q}$ forem positivas. Por outro lado, se pelo menos uma sensibilidade $\mathbf{V-Q}$ for negativa, o sistema é considerado instável. A sensibilidade se torna infinita no limite de estabilidade de tensão, i.e., no ponto de máximo carregamento, onde a matriz $\mathbf{J}_R$ é singular (GAO, 1992; KUNDUR, 1993; MANSOUR, 1993). Portanto, o sistema será tanto mais estável quanto menor for a sensibilidade.

A instabilidade de tensão não ocorre para barras individuais e sim para modos individuais, exibindo para cada barra do sistema um grau de participação diferente. Assim, apesar de ser possível, a avaliação da estabilidade de tensão através das sensibilidades $\mathbf{V-Q}$ em todas as barras é uma forma de análise muito limitada.

A técnica de análise modal estática supera as deficiências do método de sensibilidades $\mathbf{V-Q}$ (GAO, 1992; KUNDUR, 1993; MANSOUR, 1993). A análise modal estática, como proposta em (KUNDUR, 1993; ONS, 2001), envolve a determinação dos autovalores e autovetores críticos da matriz de sensibilidade $\mathbf{Q-V}$ reduzida (matriz $\mathbf{J}_R$). Os autovalores críticos desta matriz identificam os diferentes modos pelos quais, o sistema pode se tornar instável. Se um autovalor de $\mathbf{J}_R$ tende a zero, uma pequena variação no perfil de reativos do sistema poderá causar uma variação muito grande na tensão de uma barra ou de um grupo de barras. A partir do cálculo dos autovetores esquerdos e direitos são definidos fatores de participação das barras de carga nos modos críticos. Estes fatores de participação fornecem informações valiosas sobre os mecanismos da instabilidade, bem como sobre as áreas mais vulneráveis a problemas de estabilidade de tensão. A matriz $\mathbf{J}_R$ representa a relação linearizada entre as variações incrementais de $\mathbf{V}$ e $\mathbf{Q}$, sendo que o i -ésimo elemento da diagonal é a sensibilidade $\mathbf{V-Q}$ da barra i . A partir de uma transformação modal, pode-se

escrever que:

$$\mathbf{J}_R = \mathbf{\Phi} \mathbf{\Lambda} \mathbf{\Gamma} \quad (3.4)$$

sendo $\mathbf{\Phi}$ e $\mathbf{\Gamma}$ as matrizes dos autovetores à direita e à esquerda de $\mathbf{J}_R$ respectivamente, e $\mathbf{\Lambda}$ é a matriz diagonal dos autovalores de $\mathbf{J}_R$. A partir de (3.3) e (3.4) tem-se que:

$$\Delta \mathbf{V} = [\mathbf{\Phi} \mathbf{\Lambda}^{-1} \mathbf{\Gamma}] \Delta \mathbf{Q} = \sum_i \frac{\Phi_i \cdot \Gamma_i}{\lambda_i} \Delta \mathbf{Q} \quad (3.5)$$

sendo Φ_i (i -ésima coluna do autovetor à direita) e Γ_i (i -ésima linha do autovetor à esquerda) os respectivos autovetores à esquerda e à direita associados ao autovalor λ_i . Os autovalores críticos da matriz $\mathbf{J}_R$ identificam os diferentes modos pelos quais o sistema pode se tornar instável. Se um autovalor tende a zero, uma pequena variação no perfil de reativos do sistema poderá causar uma variação muito grande na tensão de uma barra ou de um grupo de barras. Cada autovalor λ_i de $\mathbf{J}_R$ e os correspondentes Φ_i e Γ_i , define o i -ésimo modo do sistema. Visto que $\mathbf{\Phi}^{-1} = \mathbf{\Gamma}$, a equação (3.5) pode ser reescrita como:

$$\mathbf{\Gamma} \Delta \mathbf{V} = \mathbf{\Lambda}^{-1} \mathbf{\Gamma} \Delta \mathbf{Q} \quad (3.5)$$

A equação (3.5) pode ser reescrita como:

$$\Delta \mathbf{v}_m = \mathbf{\Lambda}^{-1} \Delta \mathbf{q}_m \quad (3.6)$$

sendo que $\Delta \mathbf{q}_m = \mathbf{\Gamma} \Delta \mathbf{Q}$ e $\Delta \mathbf{v}_m = \mathbf{\Gamma} \Delta \mathbf{V}$ são definidos como os respectivos vetores de variação modal da potência reativa e da tensão. Cada tensão modal é uma combinação linear das variáveis das tensões das barras do sistema, e cada potência modal é uma combinação linear das respectivas potências reativas das barras do sistema. Note-se a diferença entre (3.3) e (3.6) em que $\mathbf{\Lambda}^{-1}$ é uma matriz diagonal enquanto que $\mathbf{J}_R^{-1}$, em geral, não é diagonal. Para se entender o conceito de modo de instabilidade de tensão, a equação (3.6), associando o modo m e a barra i , também pode ser escrita como segue:

$$\Delta v_{mi} = (1/\lambda_i) \Delta q_{mi} \quad (3.7)$$

A amplitude de cada variação modal da tensão se iguala ao inverso de λ_i vezes a amplitude da variação modal da potência reativa. Neste sentido, a magnitude de λ_i determina o grau de estabilidade da *i-ésima* tensão modal. De (3.7) verifica-se que se $\lambda_i > 0$, as variações $\Delta \mathbf{v}_{mi}$ e $\Delta \mathbf{q}_{mi}$ se dão no mesmo sentido, indicando que o sistema está estável. Se $\lambda_i < 0$, as variações $\Delta \mathbf{v}_{mi}$ e $\Delta \mathbf{q}_{mi}$ se dão em sentidos contrários, indicando que o sistema está instável em termos de tensão. Quando $\lambda_i = 0$, a *i-ésima* tensão modal entra em colapso porque qualquer alteração na potência reativa modal provoca uma mudança infinita na tensão modal. Assim, conclui-se que quanto menor a magnitude de λ_i positivo, mais perto de ser instável estará a *i-ésima* tensão modal $\Delta \mathbf{v}_{mi}$. Conforme é enfatizado por Xu e outros (XU; MANSOUR, 1993), a conclusão que se pode tirar desta expressão é que o colapso de tensão se traduz, na verdade, pelo colapso da tensão modal, e não pelo de uma tensão “física”. Deste modo, a análise da estabilidade de tensão é realizada através da observação dos autovalores da matriz $\mathbf{J}_R$ no PMC da curva P-V, onde $\mathbf{J}_R$ apresenta um autovalor nulo. O fator de participação fornece informações importantes sobre as áreas mais vulneráveis a problemas de instabilidade de tensão, fazendo uma ligação física entre os autovalores e as barras do sistema. O fator de participação é definido como um produto elemento por elemento dos autovetores críticos direito e esquerdo de $\mathbf{J}_R$. Se λ_i é o *i-ésimo* autovalor de $\mathbf{J}_R$, ϕ_i e γ_i seus autovetores direito e esquerdo associados a λ_i , o fator de participação da barra *k* no *i-ésimo* modo é definido como:

$$fp_{ki} = \phi_{ki} \gamma_{ik} \quad (3.8)$$

Este fp_{ki} , por ser calculado considerando apenas a variação da potência reativa, também é denominado por fator de participação reativo de carga, uma vez que $\mathbf{J}_R$ contém sensibilidades somente para barras de carga (tipo PQ). As barras com altos fp_{ki} fornecem informações valiosas sobre os mecanismos da instabilidade, bem como sobre as áreas mais vulneráveis aos problemas de estabilidade de tensão. Estes fatores são utilizados para a alocação de compensação de reativos tais como os bancos de capacitores *shunts*. Assim, as barras de carga com maiores fp_{ki} indicam as melhores localidades do sistema para a instalação de bancos de capacitores *shunt* visando à melhoria da margem de estabilidade de tensão.

A análise modal também possibilita o cálculo dos fatores de participação dos ramos (fp_{kli}) e dos geradores (fp_{Gi}). Para cada modo, os fp_{kli} indicam quais linhas de transmissão deveriam ser compensadas (compensação capacitiva em série) para se aumentar a margem de

carregamento do sistema, enquanto que os fp_{Gi} indicam quais geradores suprem a maior parte da potência reativa para uma variação incremental na potência reativa do sistema.

O cálculo do fp_{kli} associado ao modo i é efetuado considerando que o vetor de variação modal de potência reativa ($\Delta \mathbf{q}_m$) tem todos os elementos nulos exceto o i -ésimo, que é igual a 1. Assim, o vetor de variações de potência reativa de barra ($\Delta \mathbf{Q}_i$) pode ser escrito como:

$$\Delta \mathbf{Q}_i = \mathbf{\Gamma}^{-1} \Delta \mathbf{q}_m = \mathbf{\Phi} \Delta \mathbf{q}_m = \mathbf{\Phi}_i \quad (3.9)$$

sendo $\mathbf{\Phi}_i$ o i -ésimo autovetor direito de $\mathbf{J}_R$. Com o vetor de variações de potência reativa de barra, o vetor de variações de tensão de barra ($\Delta \mathbf{V}_i$) é:

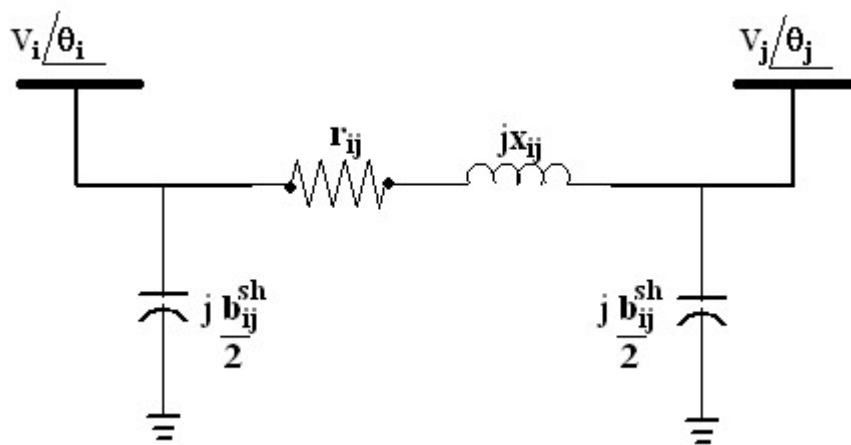
$$\Delta \mathbf{V}_i = \Delta \mathbf{Q}_i / \lambda_i \quad (3.10)$$

e o correspondente vetor de variações de magnitude de tensão de barra ($\Delta \theta_i$) é:

$$\Delta \theta_i = - (\mathbf{J}_{P\theta})^{-1} \mathbf{J}_{PV} \Delta \mathbf{V}_i \quad (3.11)$$

com os valores calculados de $\Delta \theta_i$ e $\Delta \mathbf{V}_i$, obtêm-se as variações linearizadas das perdas reativas nas linhas de transmissão (ΔQ_{perdas}), cujo modelo típico é apresentado na Figura 3.1, e das potências reativas geradas (ΔQ_{ger}).

Figura 3. 1 – Modelo π equivalente da linha de transmissão (LT).



Os fatores de participação dos ramos (fp_{kli}) e dos geradores (fp_{Gi}) são calculados por:

$$fp_{kli} = \Delta Q_{perdas} / \text{máx}(\Delta Q_{perdas}) \quad (3.12)$$

$$fp_{Gi} = \Delta Q_{ger} / \text{máx}(\Delta Q_{ger}) \quad (3.13)$$

sendo Q_{perdas} obtido a partir de (Gao, 1992):

$$Q_{perdas} = Q_{ser} - Q_{sh} \quad (3.14)$$

onde Q_{ser} e Q_{sh} são dados por:

$$Q_{ser} = x_{ij} \frac{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j)}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \quad (3.15)$$

$$Q_{sh} = \frac{b_{ij}^{sh}}{2} V_i^2 + \frac{b_{ij}^{sh}}{2} V_j^2 \quad (3.16)$$

e ΔQ_{ser} e ΔQ_{sh} são dados por:

$$\Delta Q_{ser} = x_{ij} \frac{2[(V_i - V_j \cos(\theta_i - \theta_j))\Delta V_i + (V_j - V_i \cos(\theta_i - \theta_j))\Delta V_j + V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j)(\Delta \theta_i - \Delta \theta_j)]}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \quad (3.17)$$

$$\Delta Q_{sh} = b_{ij}^{sh} V_i \Delta V_i + b_{ij}^{sh} V_j \Delta V_j \quad (3.18)$$

sendo V_i e V_j as magnitudes das tensões das barras terminais do ramo i e j , enquanto que θ_i e θ_j são os ângulos de fase das tensões terminais do ramo i e j . r_{ij} e x_{ij} são a resistência e a reatância série do ramo i e j , e b_{ij}^{sh} é a e a sua respectiva susceptância em derivação (*shunt*).

A potência reativa gerada Q_{ger} na barra i é obtida a partir de (GAO, 1992):

$$Q_{ger\ i} = -B_{ii}V_i^2 + \sum_{j \in \Omega_i} [G_{ij}V_iV_j \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij}V_iV_j \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (3.19)$$

sendo G_{ij} , B_{ij} e B_{ii} os elementos mútuos (não diagonal) e próprio (diagonal) pertencentes a matriz de admitância nodal, e Ω_i é o conjunto das barras vizinhas da barra i (diretamente conectadas à ela). A variação da potência reativa gerada na barra i ($\Delta Q_{ger\ i}$) resulta da linearização desta equação:

$$\begin{aligned} \Delta Q_{ger\ i} = & -2B_{ii}V_i\Delta V_i + \sum_{j \in \Omega_i} (G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)) (V_i\Delta V_j + V_j\Delta V_i) + \\ & + \sum_{j \in \Omega_i} V_iV_j (G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)) (\Delta\theta_i - \Delta\theta_j) \end{aligned} \quad (3.19)$$

CAPÍTULO 04

ESTUDOS DE CASOS APLICANDO ANÁLISE MODAL

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta o estudo da análise de estabilidade de tensão aplicada aos sistemas *Western Systems Coordinating Council* (WSCC de 3-Máquinas 9-barras) e IEEE14 barras.

O estudo do sistema WSCC tem por objetivo facilitar o entendimento das técnicas aplicadas no estudo de estabilidade de tensão deste sistema, através das análises dos resultados obtidos. Esta facilidade se dá, porque o sistema é de pequeno porte e de pouca complexidade, o que facilita a compreensão do mesmo.

O estudo do sistema IEEE14 barras é apresentado através de métodos computacionais, como: Método de Análise Modal, Método da Curva QV e Método da Curva PV. A análise da margem de potência reativa foi feita através do traçado das curvas QV para as barras mais críticas do sistema identificadas pelo método da análise modal. O método da curva PV foi utilizado para analisar o desempenho do sistema em termos de margem de carregamento, comparando o cenário operando no caso base e cenário operando com compensação capacitiva. Todos os programas foram desenvolvidos em ambiente MATLAB.

No primeiro caso estudado (cenário 1), foi considerado o sistema WSCC, onde das 9 barras, seis são barras PQ, duas são barras PV e uma barra *slack*, sem considerar os limites de potência reativa. No segundo caso estudado (cenário 2), foi considerado o sistema IEEE14 barras sem nenhuma alteração, com suas nove barras PQ, quatro barras PV, uma barra *slack* e com os limites de potência reativa liberados. No terceiro caso estudado (cenário 3), foi alterada a característica da barra 6 que passou a ser PQ em vez de PV, com essa mudança o sistema passa a ter dez barras PQ, três barras PV e uma *slack*, considerando os limites de

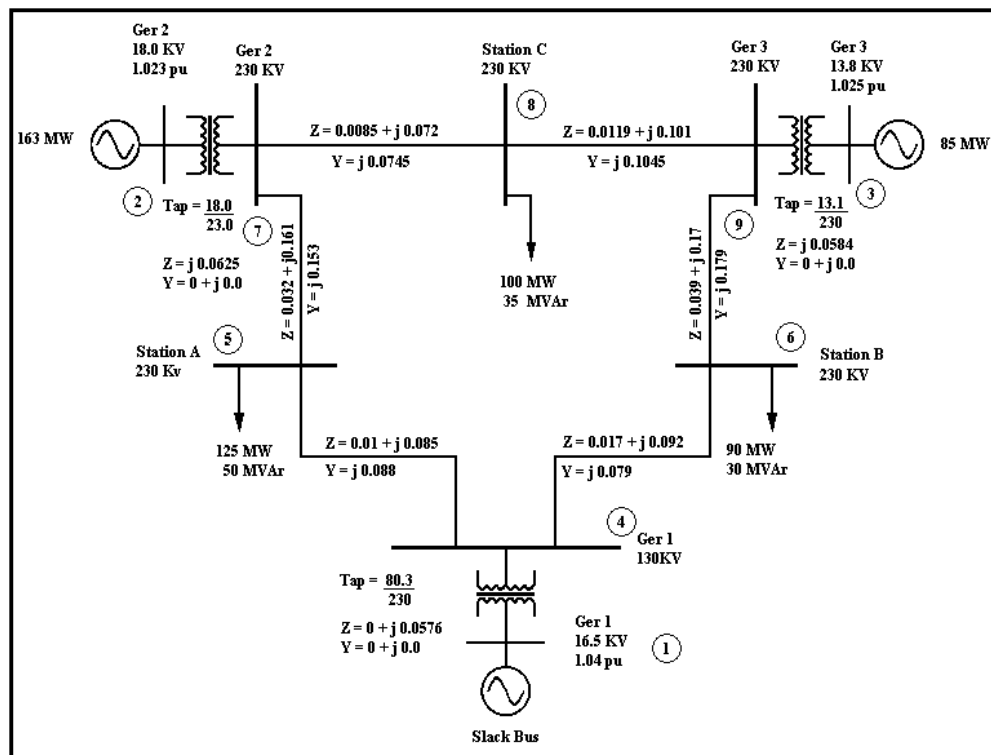
potência reativa liberados. Por fim, no quarto caso estudado (cenário 4), foi alterada a característica da barra 3, que passa a ser PQ em vez de PV, o sistema passa a ter dez barras PQ, três barras PV e uma *slack*, considerando os limites de potência reativa liberados.

Para todos os testes realizados, a tolerância adotada para os desbalanços de potência foi de 10^{-5} p.u. O ponto de cada curva é obtido com um fluxo de carga continuado. Os *taps* foram mantidos fixos e os limites de potência reativa nas barras PV's foram liberados.

4.2 Cenário 1

As próximas análises foram realizadas utilizando o sistema *Western Systems Coordinating Council* (WSCC, 3-Máquinas 9-Barras), que é apresentado no diagrama unifilar da Figura 4.1.

Figura 4. 1 – Sistema WSCC 3-Máquinas 9-Barras.

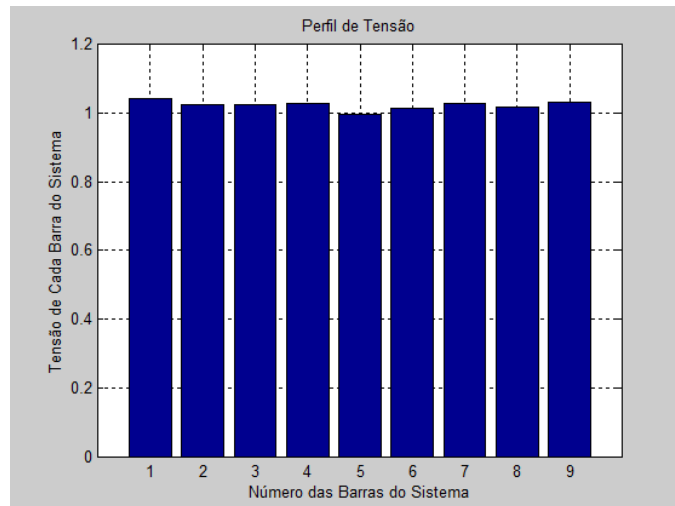


Universidade de Washington (2010)

A Figura 4.2 mostra o perfil de tensão, que é obtido através do fluxo de carga, para todas as barras do WSCC. Observe que as tensões nas barras estão dentro da faixa normal de

variação da tensão (1 p.u.). Comparando as tensões de todas as barras percebe-se que a tensão da barra 5 é a menor entre elas.

Figura 4. 2 – Perfil de tensão no sistema WSCC.



Amorim (2011)

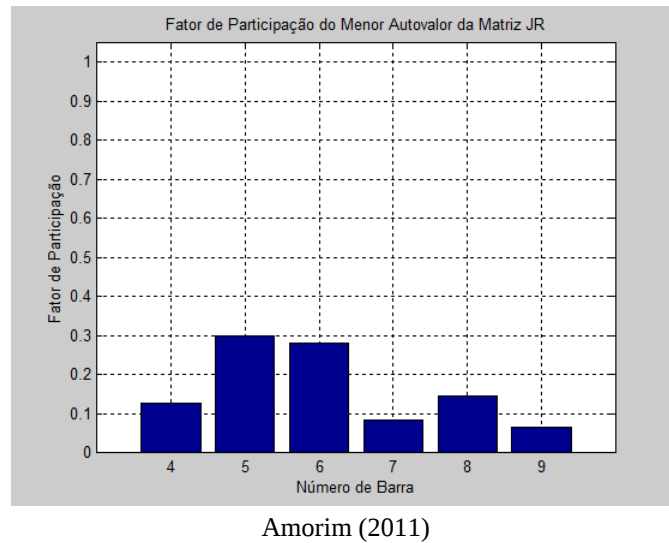
Considerando que dentre as nove barras do sistema, tem-se uma barra *slack*, duas barras PV e seis barras PQ, o número total de autovalores encontrados na matriz Jacobiana reduzida (J_R) é de seis autovalores, Tabela 4.1.

Tabela 4. 1– Autovalores do Sistema WSCC.

AUTOVALORES			
1	51,0938	4	5,9589
2	46,6306	5	12,9438
3	36,3053	6	14,9108

Conclui-se que a tensão do sistema é estável, pois todos os autovalores têm valores positivos. Pela Tabela 4.1 percebe-se que o menor autovalor que é igual a 5,9589 indica o modo mais crítico. Através do fator de participação para o menor autovalor, pode se determinar qual barra terá uma maior contribuição para o colapso de tensão. O fator de participação para este modo crítico é calculado através da multiplicação entre os autovetores esquerdos e autovetores direitos da matriz Jacobiana reduzida (J_R), o resultado é mostrado na Figura 4.3. Nota-se que as barras cinco, seis e oito são as barras com os maiores fatores de participação do modo mais crítico.

Figura 4.3 – Fator de participação para todas as barras no modo mais crítico do sistema WSCC operando no caso base.

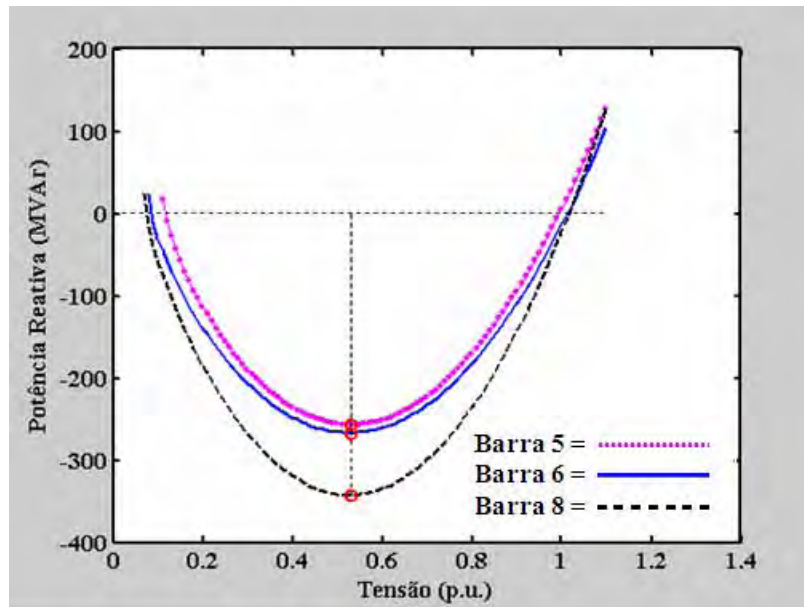


Pelo fator de participação percebe-se que a barra 5 é a que tem maior influência no modo mais crítico, associado ao autovalor 5,9589. Pode-se concluir que a barra 5 é a mais propensa à instabilidade de tensão. Assim, o menor autovalor identifica o modo mais crítico que contém a região com as barras mais críticas e está associado à tensão modal da área que contém as barras mais críticas.

As curvas QV são geradas para determinar a margem de estabilidade de tensão através da potência reativa (MVAR), que se encontra entre os pontos de operação do caso base de do ponto de máximo carregamento, antes do colapso de tensão. Em outras palavras, a curva QV possibilita que o operador e os planejadores saibam qual é a máxima potência reativa que pode ser adicionada na barra mais crítica do sistema antes dela alcançar o limite mínimo de tensão ou a tensão de instabilidade. Através das margens de potência reativa (Mvar) calculada, pode ser observado o quanto de potência reativa capacitiva pode ser inserida na barra de carga, através de bancos de capacitores ou compensadores estáticos.

A Figura 4.4 mostra as curvas QV nas três barras mais críticas indicadas pelo fator de participação para o sistema WSCC.

Figura 4.4 – Curva QV para as barras 5, 6 e 8 no sistema WSCC.



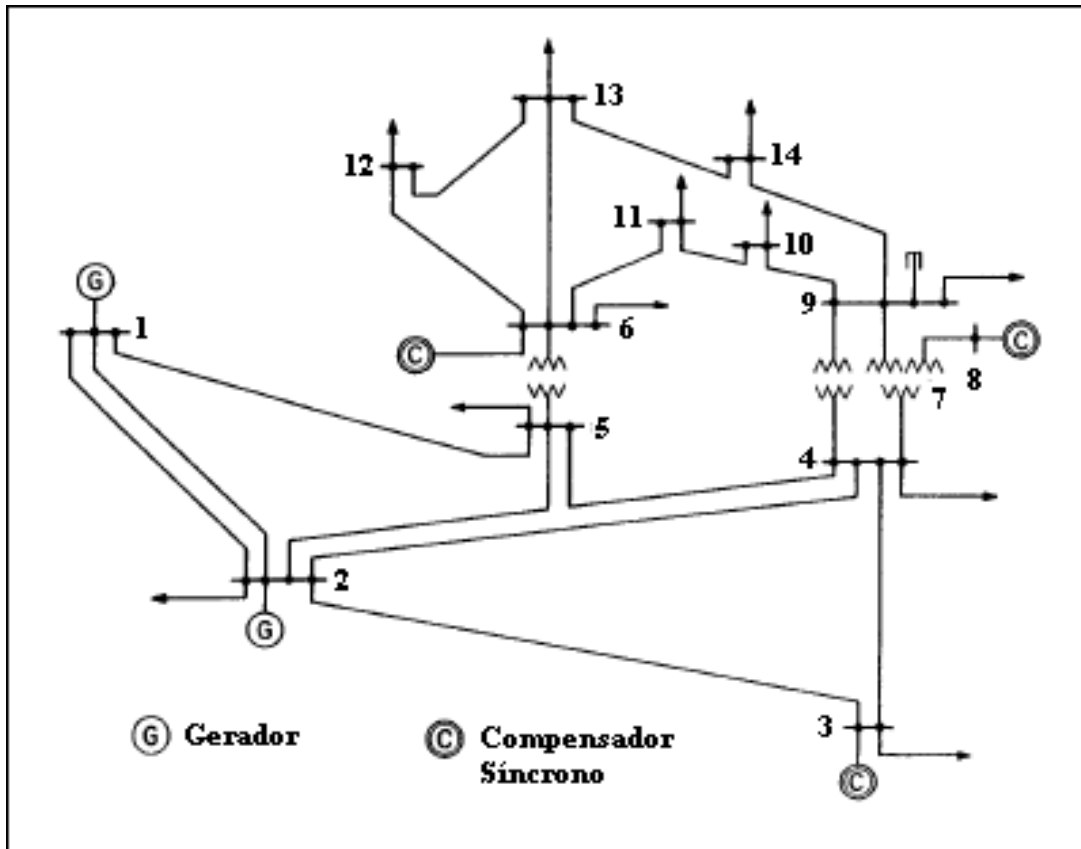
Amorim (2011)

As curvas QV exibidas na Figura 4.4 permitem analisar o quanto as magnitudes de tensões nas barras são sensíveis a variação de potência reativa, confirmando os resultados obtidos através do método da análise modal. Percebe-se que a barra 5 contém a menor margem de potência reativa com 256,90 Mvar, seguido da barra 6 com 266,83 Mvar. Pode ser visto claramente que a barra 5 comparada com as outras barras, é a mais crítica.

4.3 Cenário 2

Na Figura 4.5 apresenta-se o diagrama unifilar do sistema IEEE 14 barras, o qual será usado nas análises que se seguem. Os dados das barras e das linhas de transmissão (LT) encontram-se em (FRERIS; SASSON, 1968).

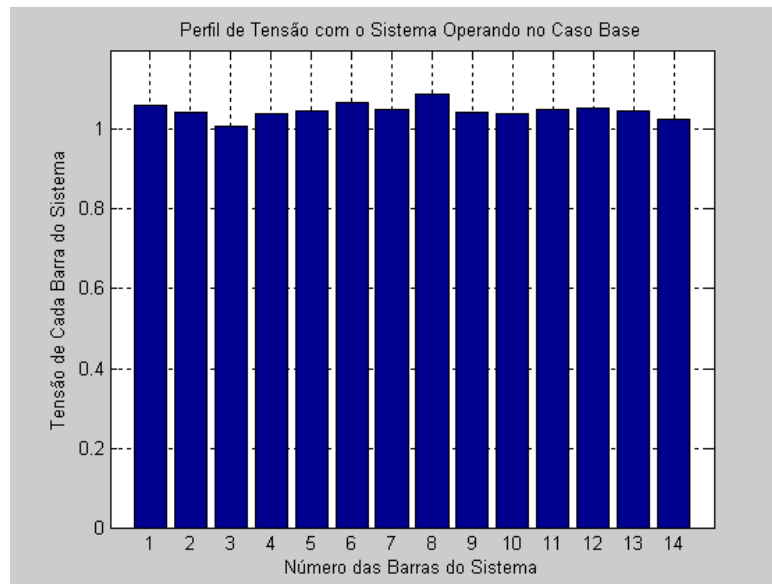
Figura 4. 5 – Diagrama unifilar do Sistema IEEE 14 barras.



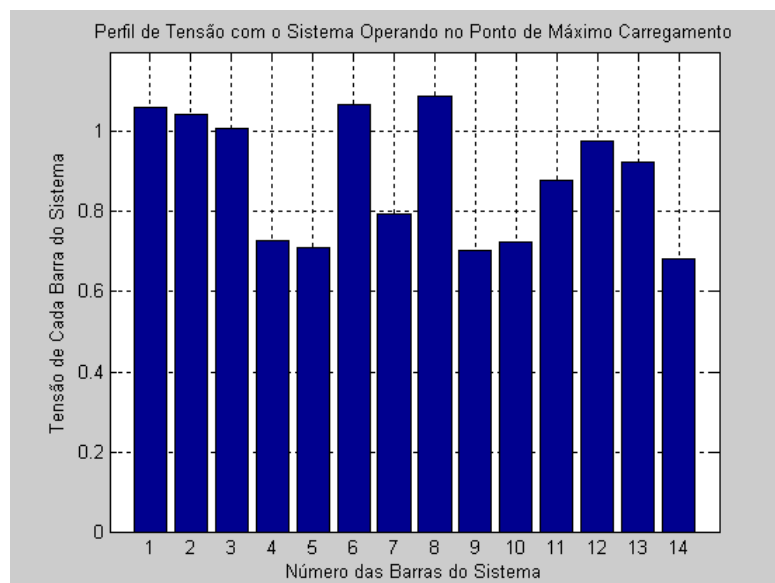
Universidade de Washington (2010)

Na Figura 4.6(a) é mostrado para este sistema, o perfil de tensão no caso base (fator de carregamento, λ , igual a 1), e na Figura 4.6(b) é mostrado o perfil de tensão no PMC ($\lambda=4,0209$), obtidos com o FCC. Observa-se que no caso base, as magnitudes de tensão encontram-se dentro da faixa normal de operação (1,0 p.u. $\pm 5\%$), enquanto que no PMC a maioria encontra-se abaixo do limite mínimo (0,95 p.u.).

Figura 4. 6 - Perfis de tensão – (a) Perfil de tensão no caso base (b) perfil de tensão no ponto de máximo carregamento.



(a)



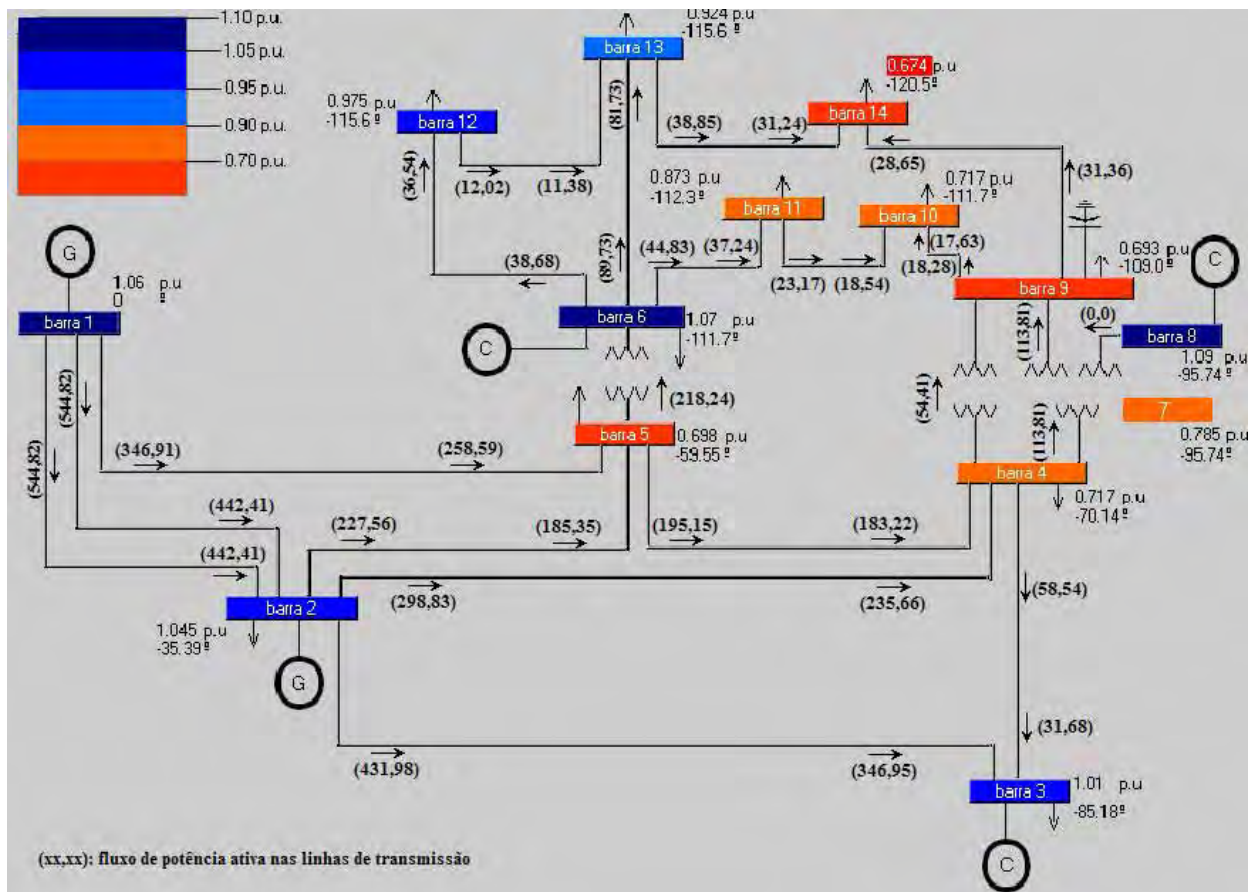
(b)

Amorim (2011)

As menores magnitudes de tensão ocorrem nas barras que não têm suporte de potência reativa das barras PV, que estão representadas no diagrama unifilar para o PMC na Figura 4.7(a). Observa-se que as barras 4, 5 e 9 apresentam magnitudes de tensão baixas, ao contrário de outras barras que estão diretamente conectadas às barras PV, por exemplo as barras de carga 12 e 13 que estão conectadas a barra 6 que é PV. Como mostrado nas Figuras 4.7(b) e 4.7(c), isto ocorre pelo grande consumo de reativos nas linhas (LT) e transformadores (T)

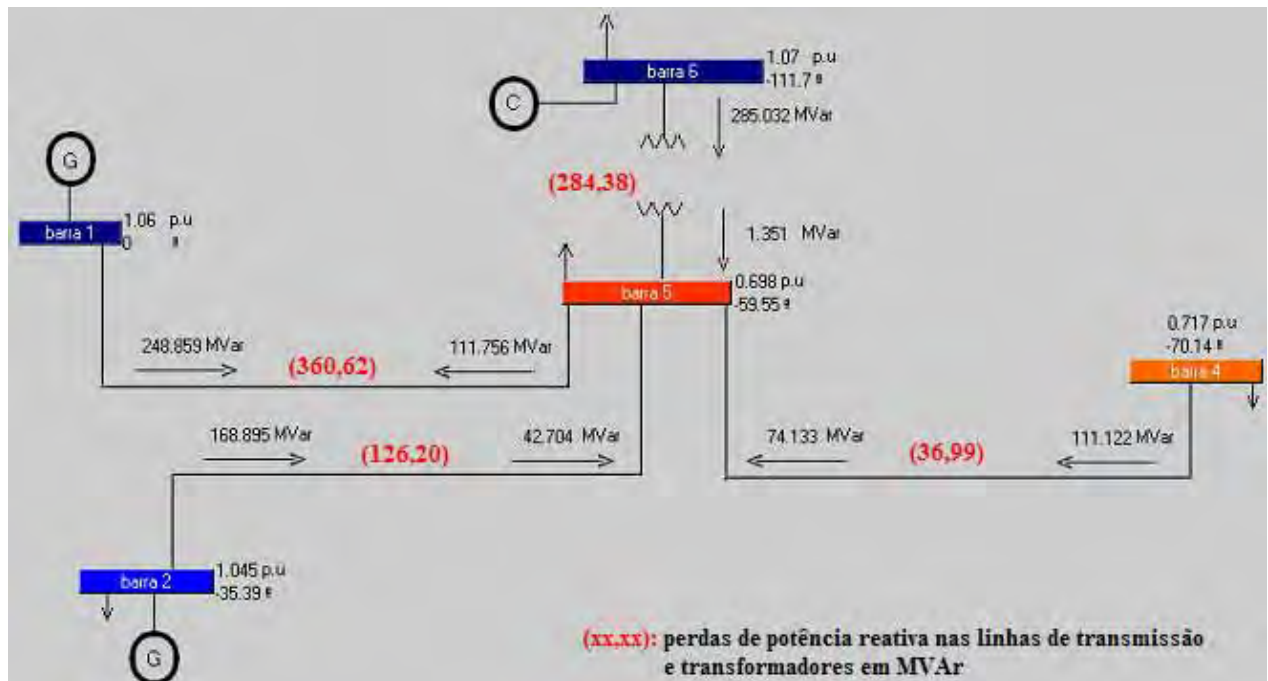
conectados a essas barras (ver LT_{1-5} e T_{5-6}), em consequência da grande circulação de fluxo de potência ativa, da geração para a carga. A título de exemplo, considere o caso da LT_{1-5} e do T_{5-6} pelos quais circulam 346,91 MW e 218,24 MW, respectivamente. Esta circulação de potência ativa implica em perdas de 360,62 Mvar e 284,38 Mvar, respectivamente. Como as barras PV (1, 2 e 6) suprem a maior parte dessas perdas reativas devido a maior proximidade elétrica, e uma vez que as suas magnitudes de tensão permanecem fixas em seus valores especificados (1,060, 1,045 e 1,07 p.u.), a barra 5 diminui a sua magnitude de tensão para possibilitar essa circulação de potência reativa.

Figura 4. 7(a) – Diagrama unifilar correspondente ao PMC.



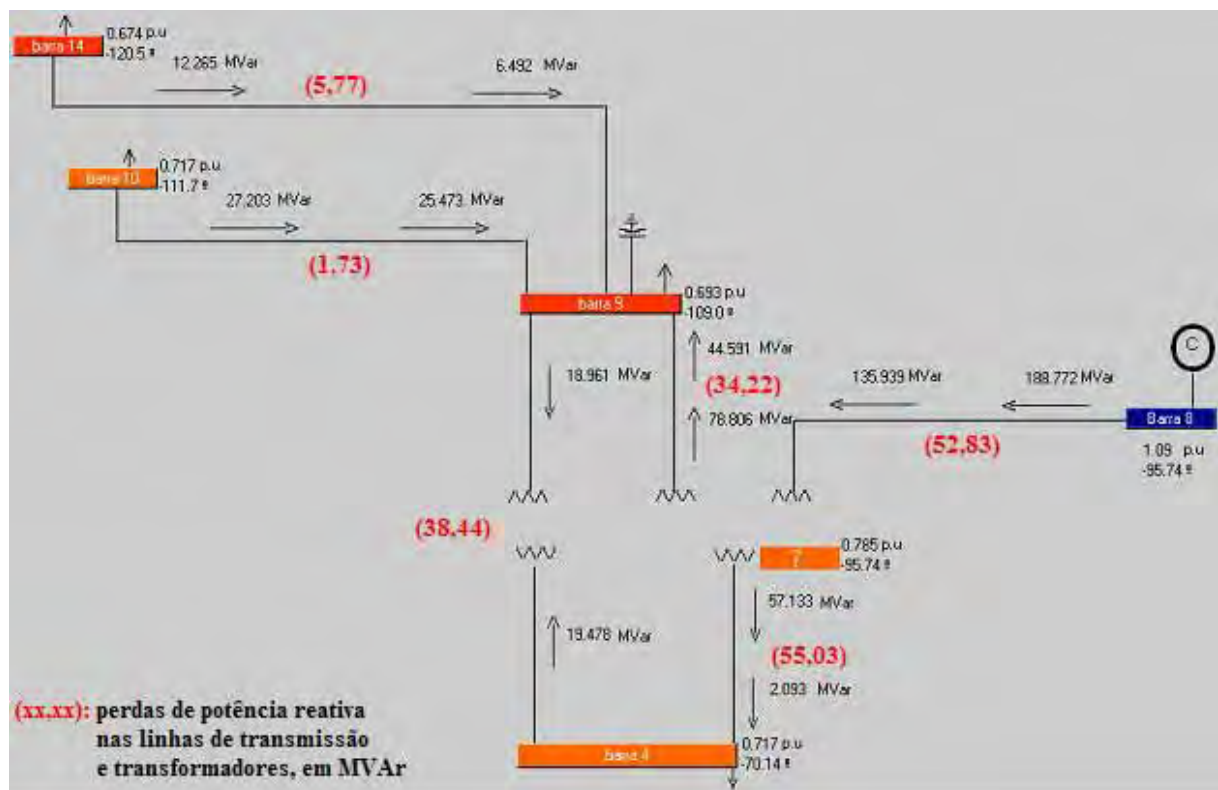
Canossa (2007)

Figura 4.7(b) – Fluxo de reativo nas linhas vizinhas as barras com menores tensões – detalhe barra 5



Canossa (2007)

Figura 4. 7(c) – Fluxo de reativo nas linhas vizinhas as barras com menores tensões – detalhe barra 9



Canossa (2007)

A transmissão de potência reativa causa grandes quedas de tensão, assim, estas situações devem ser evitadas. Uma vez que no geral não existem grupos geradores perto das cargas, o modo mais eficiente de realizar a compensação é a utilização de capacitores *shunt* (em derivação), os quais são comutados de acordo com as variações da carga. A análise modal estática é aplicada nestes casos para se determinar as melhores localidades do sistema para a instalação de bancos de capacitores *shunt*, visando a melhoria da margem de estabilidade de tensão. Com o fornecimento local de potência reativa espera-se também uma redução das perdas reativas nas LT e transformadores.

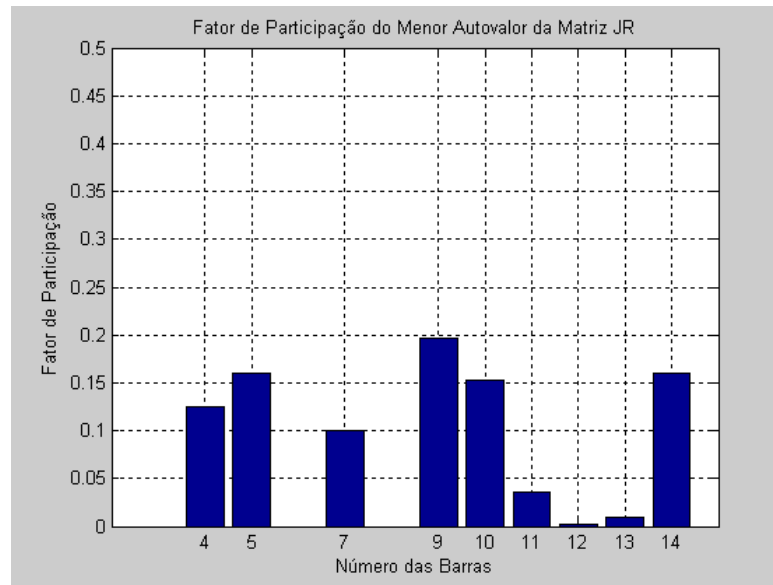
Uma vez que dentre as quatorze barras do sistema, uma é a barra *slack* e quatro são barras PV, restam apenas nove como barras PQ assim, o número total de autovalores encontrados na matriz $\mathbf{J}_R$ é igual a nove. Na Tabela 4.2 apresenta-se os autovalores para o PMC ($\lambda=4,0209$ e $MC_{CB} = 3,021$) e na Figura 4.8 os respectivos fatores de participação (fp_{ki}) para o menor autovalor (0,0389), i.e., para o modo mais crítico. Observe que o seu valor é uma indicação de que na realidade, o sistema encontra-se muito próximo do PMC, no qual o determinante da matriz é nulo.

Pelos fp_{ki} nota-se que a barra 9 é a que tem maior influência no modo mais crítico quando o sistema está operando próximo ao PMC. Sendo assim, a barra 9 é a que mais participa no colapso de tensão. As Figuras 4.9(a) e 4.9(b) apresentam em valor percentual, os respectivos aumento na margem de carregamento (MC) e a variação na perda total de potência reativa (Q_{perda}) em relação à do caso base, quando da instalação de um banco de capacitores *shunt* de 5 Mvar é aplicado separadamente em cada uma das barras indicadas. Observa-se que a barra 9 proporcionou o maior aumento (0,19%) na MC em relação às demais barras do sistema, seguida pelas barras 10 e 14. A barra 14 é a que proporcionou a maior redução na Q_{perda} , com 0,61%, e as barras 10 e 9 vêm em seguida. A MC e a Q_{perda} são obtidas através das equações (4.1) e (4.2).

Tabela 4. 2 - Autovalores do IEEE14 barras para o PMC ($\lambda=4,0209$ p.u.)

AUTOVALORES					
1	43,4319	4	16,3677	7	3,3752
2	26,4674	5	0,0389	8	4,2219
3	15,1013	6	9,4061	9	6,2126

Figura 4. 8 – Fator de participação no PMC ($\lambda=4,0209$ p.u.)



Amorim (2011)

$$MC = \left(\frac{PMC_{_C} - PMC}{PMC} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

sendo:

MC = Margem de carregamento de potência ativa do sistema;

PMC = Ponto de máximo carregamento do sistema;

PMC_c = Ponto de máximo carregamento do sistema com compensação capacitiva.

$$Q_{\text{perda}} = \left(\frac{Q_{\text{perda_Cbc}} - Q_{\text{perda_Cb}}}{Q_{\text{perda_Cb}}} \right) \times 100 \quad (4.2)$$

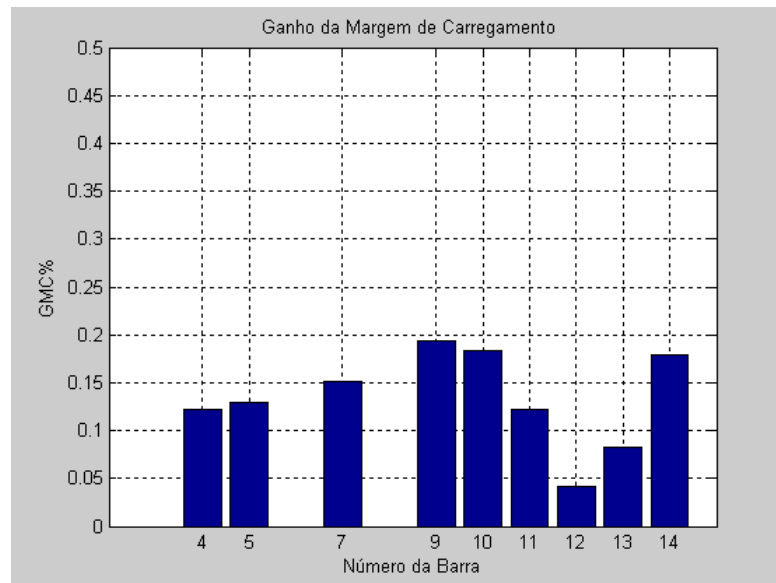
sendo:

Q_{perda} = Perda total de potência reativa do sistema;

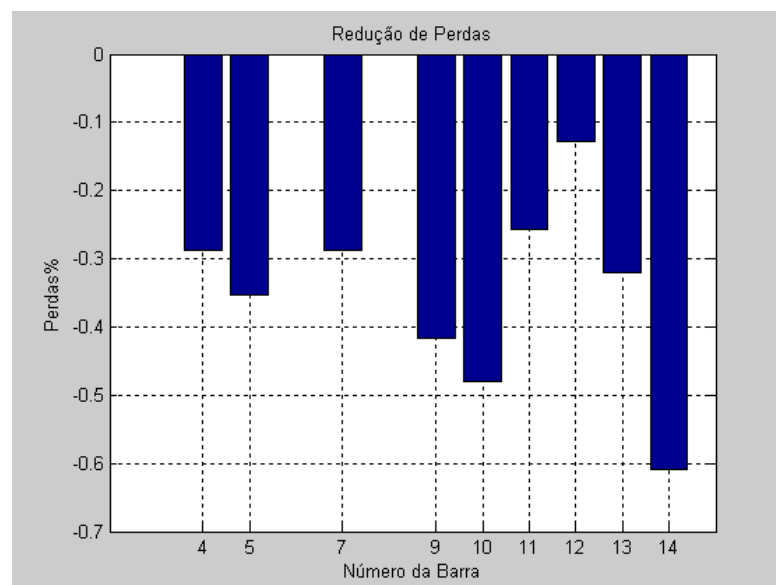
$Q_{\text{perda_Cb}}$ = Perda total de potência reativa no caso case;

$Q_{\text{perda_Cbc}}$ = Perda total de potência reativa caso base com compensação capacitiva.

Figura 4. 9 – (a) Aumento na MC, (b) variação em Qperda.



(a)



(b)

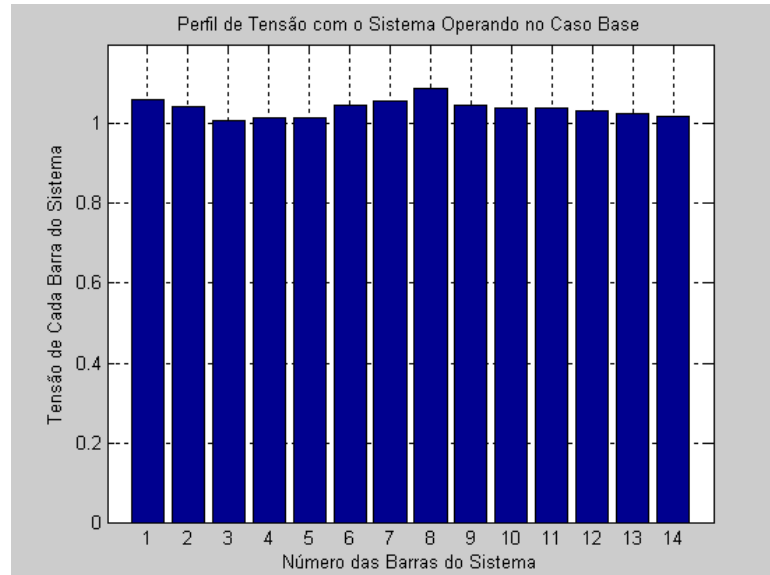
Amorim (2011)

4.3 Cenário 3

Considere agora o caso em que foi mudada a característica da barra 6, que passou a ser PQ em vez de PV. Conforme mostrado nas Figuras 4.10 e 4.11 que representam o perfil de tensão no caso base e o perfil de tensão no ponto de máximo carregamento, nota-se uma mudança no perfil de tensão em relação ao segundo cenário. Como era esperado a magnitude de tensão da barra 6, bem como as das barras 11, 12 e 13, diminuem em relação aos valores

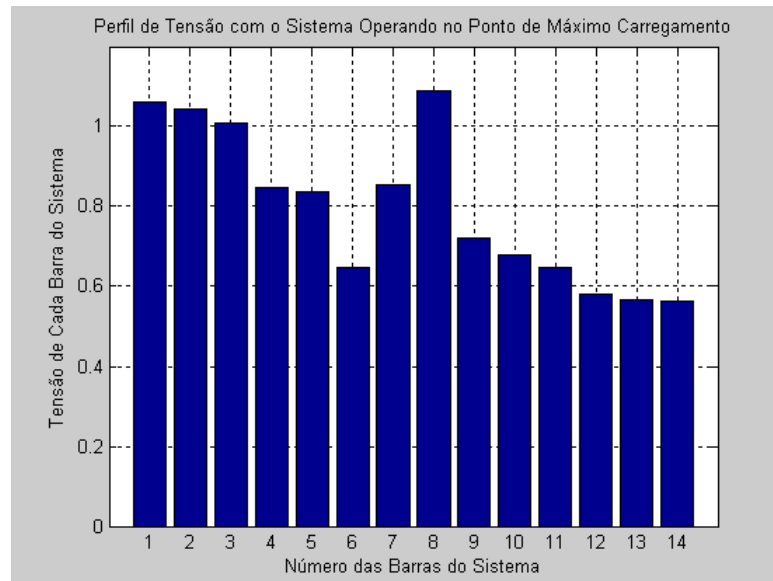
apresentados anteriormente na Figura 4.6(a). Isto ocorre porque com a mudança no tipo da barra 6 para PQ, não há mais a sustentação da magnitude de tensão destas barras.

Figura 4. 10 – Perfil de tensão no caso base.



Amorim (2011)

Figura 4. 11 – Perfil de tensão no ponto de máximo carregamento.

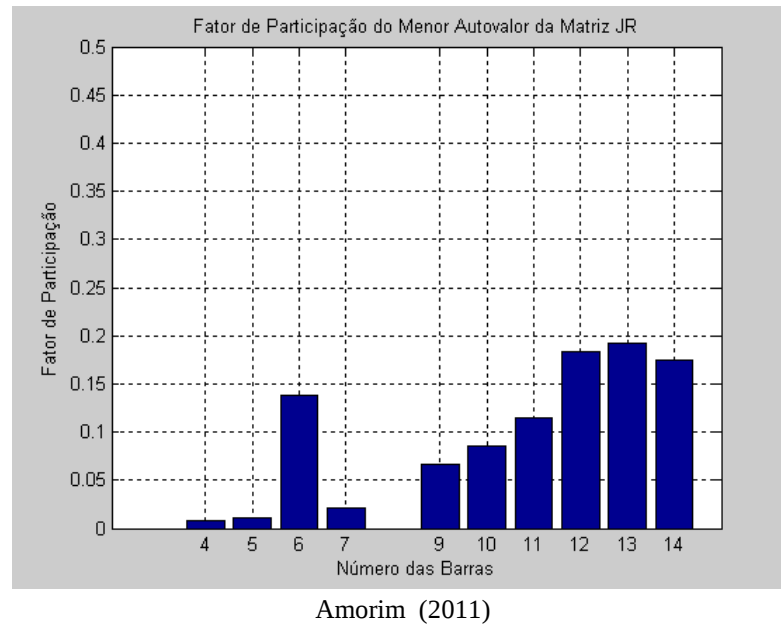


Amorim (2011)

Na Tabela 4.3 encontram-se os autovalores para o PMC e na Figura 4.12 os respectivos fatores de participação (fps) correspondentes ao menor autovalor (0,0015), i.e., ao modo crítico. Do fp_{ki} nota-se que a barra 13 é a que tem maior influência no modo mais crítico.

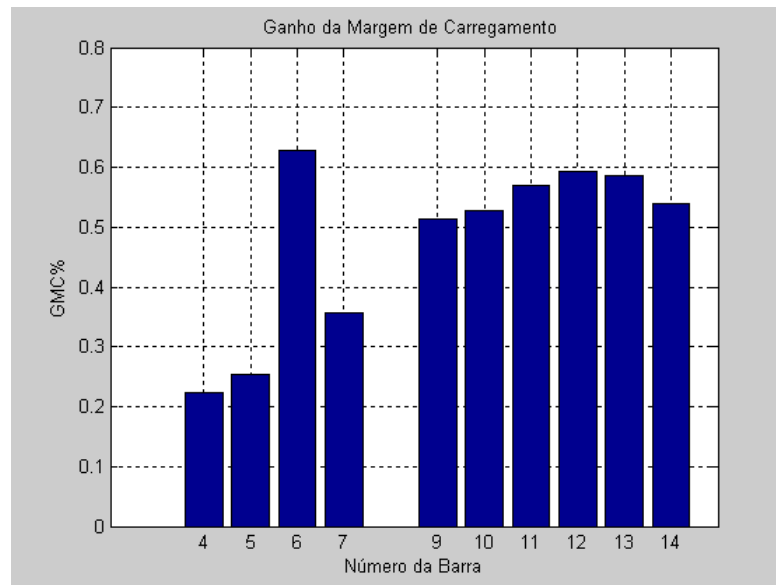
Tabela 4. 3 – Autovalores do IEEE14 barra para o PMC ($\lambda=2,5972$ p.u.)

AUTOVALORES							
1	53,4953	4	15,8785	7	8,5896	10	3,3620
2	27,3198	5	10,8617	8	6,8548		
3	17,1633	6	0,0015	9	2,3264		

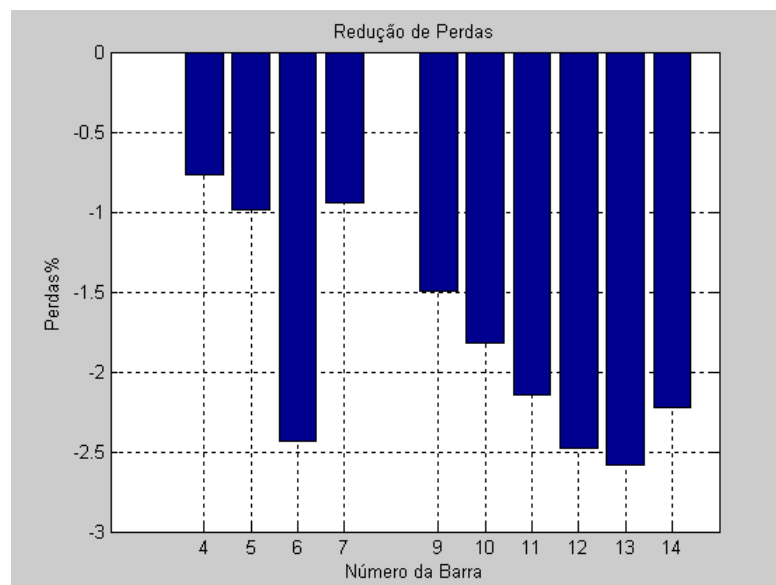
Figura 4. 12 – Fator de participação no PMC ($\lambda=2,5972$ p.u.)

Observe que essa mudança da característica da barra 6 acarreta uma redução sensível do PMC ($\lambda=2,5972$), e portanto da MC_{CB} em 1,604. Conforme se vê nas Figuras 4.13(a) e 4.13(b), com a instalação do banco de capacitores *shunt* de 5 Mvar na barra 6, os respectivos aumento na MC e redução na Q_{perda} em relação à do caso base foram iguais a 0,63% e 2,41%. As barras 12 e 13 proporcionam um aumento na MC e redução na Q_{perda} quase da mesma magnitude dos apresentados pela barra 6. Observe a maior redução de Q_{perda} (2,54%), a qual ocorre com a compensação na barra 13. Conforme pode ser observado na Figura 4.1, estes resultados confirmam que a barra 6, originalmente uma barra PV, é estrategicamente uma barra adequada para a compensação de reativos.

Figura 4. 13 – (a) Aumento na MC, (b) variação em Qperda.



(a)



(b)

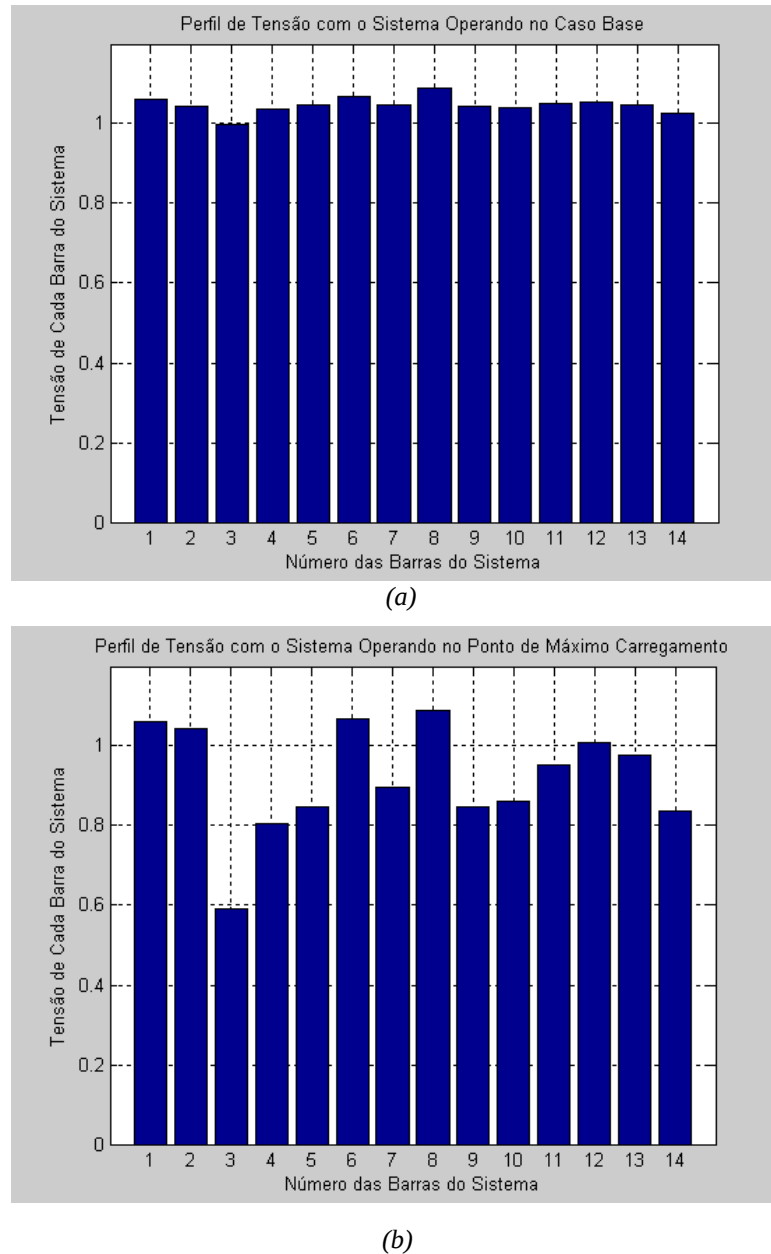
Amorim (2011)

4.4 Cenário 4

Considerando agora a mudança do tipo da barra 3, onde seu tipo passa a ser PQ em vez de PV. As Figuras 4.14(a) e 4.14(b) mostram o perfil de tensão no caso base e no PMC. Nota-se agora na Figura 4.14(b) que as magnitudes de tensão na barra 3, bem como as das barras 4, 5, 7, 9, 10 e 14 diminuem significativamente em relação aos valores mostrados na

Figura 4.14(a). Isto ocorre como consequência direta da mudança no tipo da barra e, portanto, da diminuição do suporte total de reativo.

Figura 4. 14 – Perfis de tensão: (a) Perfil de tensão no caso base, (b) perfil de tensão no ponto de máximo carregamento.

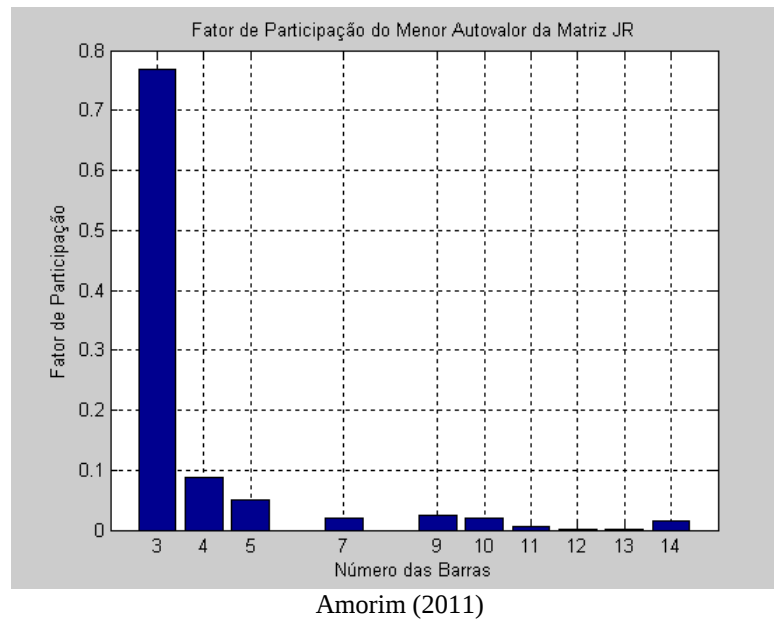


Amorim (2011)

Na Tabela 4.4 encontram-se os autovalores para o PMC e na Figura 4.15 os respectivos fatores de participação correspondentes ao menor autovalor (0,0625), i.e., ao modo crítico. Dos fp_{ki} nota-se que a barra 3 é a que tem maior influência no modo mais crítico.

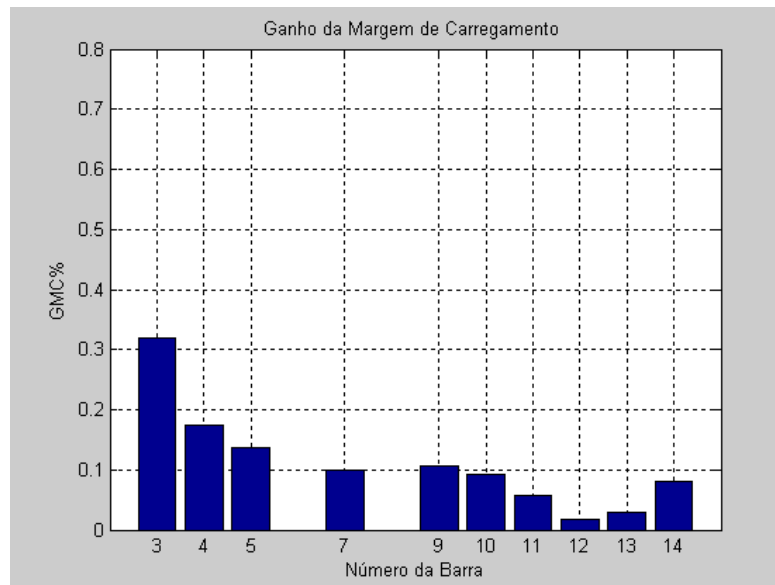
Tabela 4. 4– Autovalores do IEEE14 barra para o PMC ($\lambda=2,9906$ p.u.)

AUTOVALORES							
1	51,5156	4	17,8558	7	2,0576	10	6,7662
2	32,0749	5	17,4215	8	9,4208		
3	0,0625	6	12,5686	9	4,7199		

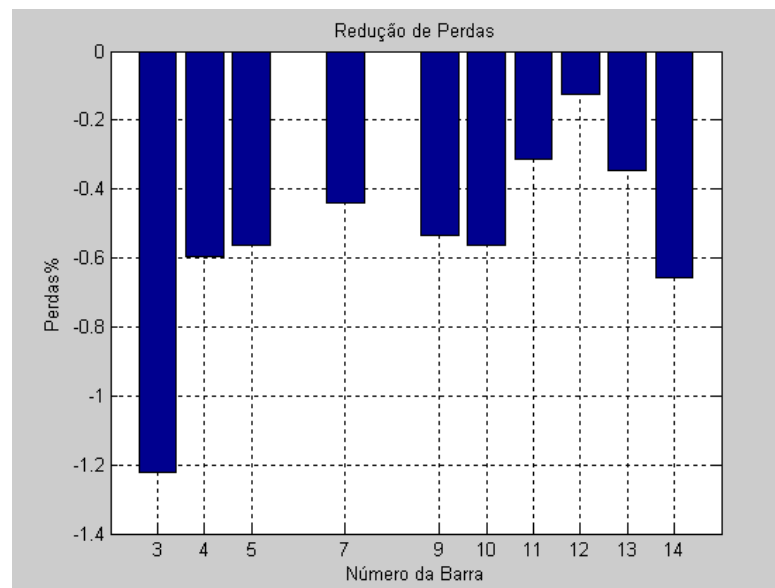
Figura 4. 15 – Fator de participação no PMC ($\lambda=2,9906$ p.u.).

Observe que essa mudança da característica da barra 6 acarreta uma redução sensível do PMC ($\lambda=2,9906$), e portanto da MC_{CB} em 1,991. Conforme se vê nas Figuras 4.16(a) e 4.16(b), com a instalação do banco de capacitores *shunt* de 5 Mvar na barra 3, os respectivos aumento na MC e redução na Q_{perda} em relação à do caso base foram iguais a 0,32% e 1,22%. Este exemplo também confirma o porquê de se definir a barra 3 como PV no banco original.

Figura 4. 16 – (a) Aumento na MC, (b) variação em Qperda.



(a)



(b)

Amorim (2011)

CAPÍTULO 05

UMA NOVA PROPOSTA DE REDUÇÃO DE PERDAS REATIVAS NA TRANSMISSÃO BASEADA NAS CURVAS DE PERDAS VERSUS TENSÃO

5.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada uma proposta alternativa para a alocação de bancos de capacitores *shunt* visando a redução da perda total de potência reativa na transmissão. A definição do montante de compensação reativa *shunt* a ser alocada e o valor das magnitudes de tensão das barras PV a serem ajustados, são determinados com base nas curvas de perda total de potência reativa na transmissão versus magnitude de tensão da barra. Também são investigados os efeitos individuais que cada um destes procedimentos traz para o sistema. Entre os efeitos investigados estão: a redução das perdas reativas, a variação na margem de estabilidade estática de tensão, e a melhoria do perfil de tensão. Os resultados obtidos para o sistema IEEE 14 barras do IEEE mostram que os procedimentos conduzem a uma sensível redução das perdas de potência reativa nas linhas de transmissão e simultaneamente, uma melhoria no perfil da tensão.

5.2 Curva de Perdas Versus Tensão

A curva de perda total de potência reativa versus magnitude de tensão da barra é traçada de forma similar a curva QV, conforme é apresentado na Figura 5.1. Assim, seguindo o mesmo procedimento realizado para a curva QV, após transformar a barra de PQ para PV, especificam-se sucessivos valores para a magnitude de tensão e os correspondentes valores da perda total de potência reativa e os da potência reativa injetada são obtidos. Podem-se traçar

duas curvas conforme apresentado nas Figuras 5.1 e 5.2. Os valores de magnitude de tensão, ou o da potência reativa injetada (Q_{gerado}), são representados no eixo das abscissas e os da perda total de potência reativa no eixo das ordenadas. O ponto de operação do caso base (ponto O) corresponde a intersecção da curva com o eixo das abscissas, onde a potência reativa injetada é nula, conforme apresentado na Figura 5.2. Em ambas as figuras, apresenta-se uma reta tracejada que passa pelo ponto O que corresponde a perda total de potência reativa do caso base (31,2162 Mvar). O ponto M corresponde a menor perda obtida (30,9954 Mvar) por compensação nessa barra. Na Figura 5.1 pode-se ver a margem de redução de perdas (31,2162-30,9954 = 0,2208 Mvar), e que corresponde à distância do ponto M a essa reta. Assim, através da instalação de um banco de capacitor *shunt* é possível obter uma redução de 0,7073% do valor do caso base. Na Figura 5.2 pode-se ver a potência do banco (Q_{banco}), que é de 9,478 Mvar na correspondente magnitude de tensão de 1.047 p.u. A potência reativa fornecida pelo banco de capacitores não é uma quantia fixa, na verdade ela varia com o quadrado da tensão ($Q=BV^2$). Assim, o valor da potência reativa a ser especificada para o banco de dados é de 8,6461 Mvar para uma magnitude de tensão de 1.0 p.u.

Figura 5. 1 - Curva perda total de potência reativa versus magnitude de tensão para a barra 14 do sistema IEEE-14.

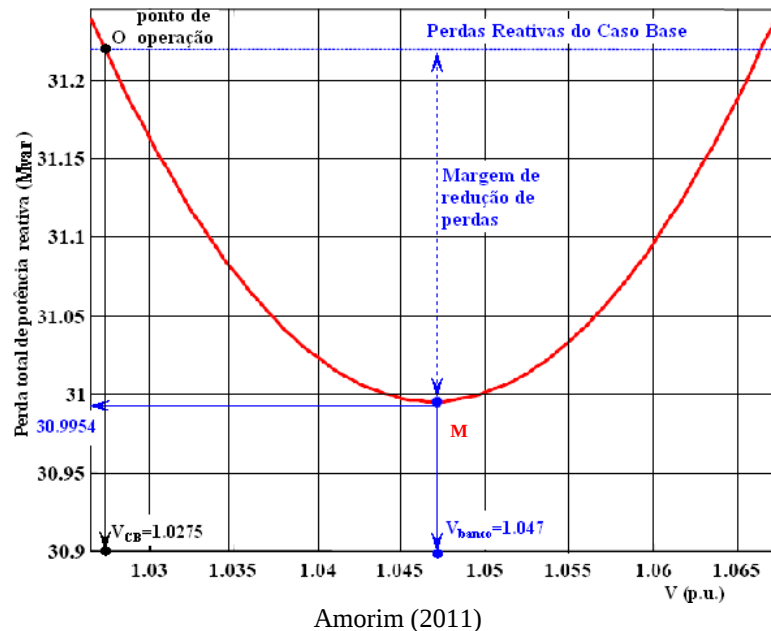
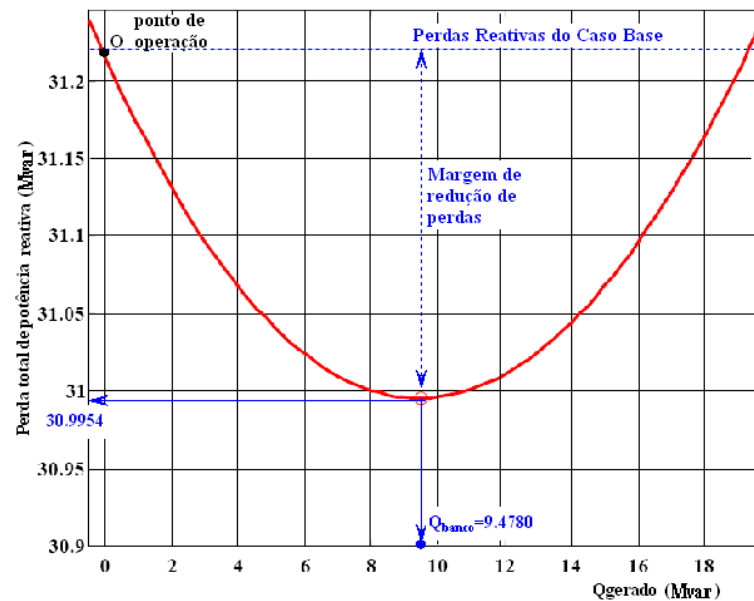


Figura 5. 2 – Curva perda total de potência reativa versus potência reativa do banco para a barra 14 do sistema IEEE-14.



Amorim (2011)

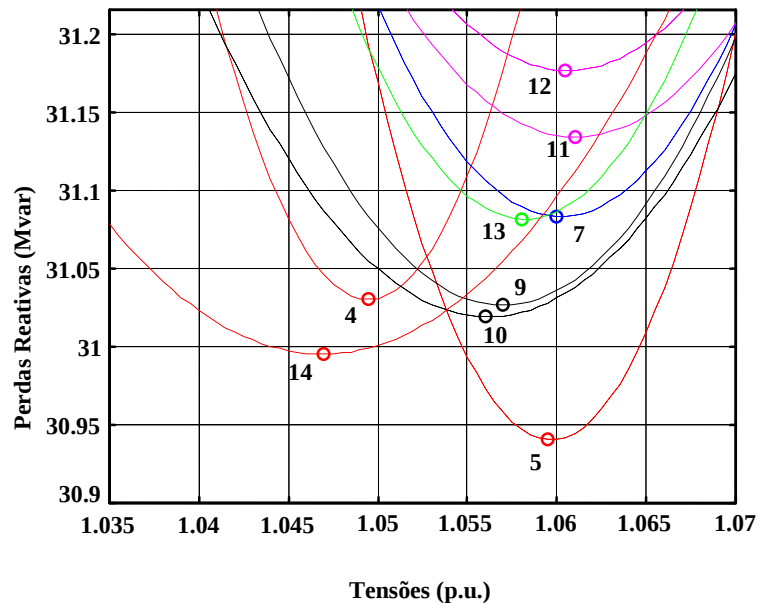
5.3 Análises de Resultados

Para todos os testes apresentados a seguir, a tolerância adotada para os desbalanços de potência foi de 10^{-5} p.u. O ponto de operação inicial de cada curva é obtido com um fluxo de carga convencional. Os *taps* foram mantidos fixos no valor do banco de dados e os limites de potência reativa nas barras PV's foram liberados.

A Figura 5.3 apresenta as curvas de perda total de potência reativa versus magnitude de tensão para cada uma das barras de carga do sistema IEEE 14 barras. As colunas da Tabela 5.1 apresentam respectivamente os valores de simulação obtidos para a perda total de potência reativa, a potência reativa do banco *shunt*, a magnitude de tensão para a qual ocorre a menor perda, e a margem de carregamento (MC) após a inclusão do banco *shunt*.

De acordo com o apresentado na Figura 5.3 e na coluna 1 da Tabela 5.1, a maior redução ($31,2162 - 30,9954 = 0,2208$ Mvar ou 0,7073% em relação à do caso base (31,2162 Mvar)) na perda total de potência reativa ocorre com a inclusão do banco de 22,3231 Mvar junto à barra 5.

Figura 5. 3 – Curva de perda total de potência reativa versus magnitude de tensão para todas as barras do sistema IEEE14.



Amorim (2011)

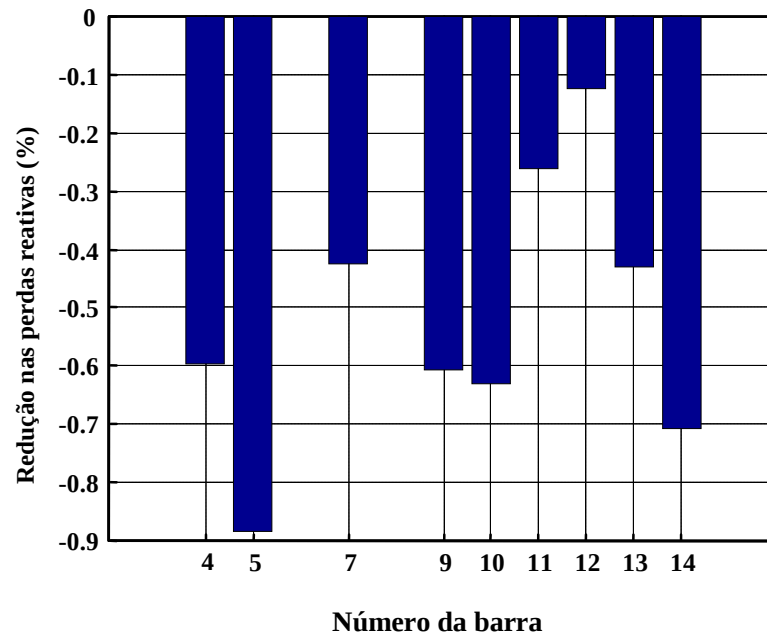
Tabela 5. 1– Valores obtidos pelo método para o sistema IEEE14.

Barra	fp_{ki}	Perda total		Pot. do Banco (Mvar)	$ V_{CB} $ (p.u.)	PMC		GMC (%)	Re (%)
		Mvar	MW			λ	$ V $ (p.u.)		
5	0,1652	30,9405	13,48	22,3231	1,0595	4,0439	0,680	0,77	0,90
14	0,1554	30,9954	13,59	8,6461	1,0470	4,0332	0,685	0,42	0,71
10	0,1503	31,0192	13,62	9,9482	1,0560	4,0351	0,681	0,47	0,63
9	0,1948	31,0267	13,63	11,5037	1,0570	4,0385	0,683	0,59	0,61
4	0,1281	31,0304	13,49	19,1375	1,0495	4,0393	0,678	0,61	0,60
13	0,0095	31,0821	13,60	9,8385	1,0580	4,0267	0,659	0,19	0,43
7	0,1000	31,0837	13,65	11,3978	1,0600	4,0342	0,660	0,44	0,43
11	0,0354	31,1345	13,63	6,4787	1,0610	4,0267	0,659	0,19	0,26
12	0,0023	31,1772	13,64	4,1141	1,0605	4,0218	0,658	0,03	0,13

As Figuras 5.4 e 5.5 apresentam os respectivos valores percentuais de redução da perda total de potência reativa e do aumento da margem de carregamento consequentes da inclusão individual de cada um dos bancos apresentados na coluna 2 da tabela 5.1. Observe que apesar da redução da perda total de potência reativa seguir, como já era esperada, a ordem decrescente (5, 14, 10, 9, 4, 13, 7, 11, e 12) apresentada na Figura 5.4, o mesmo não ocorre para o aumento da margem de carregamento em relação à do caso base (MC=4,0208-

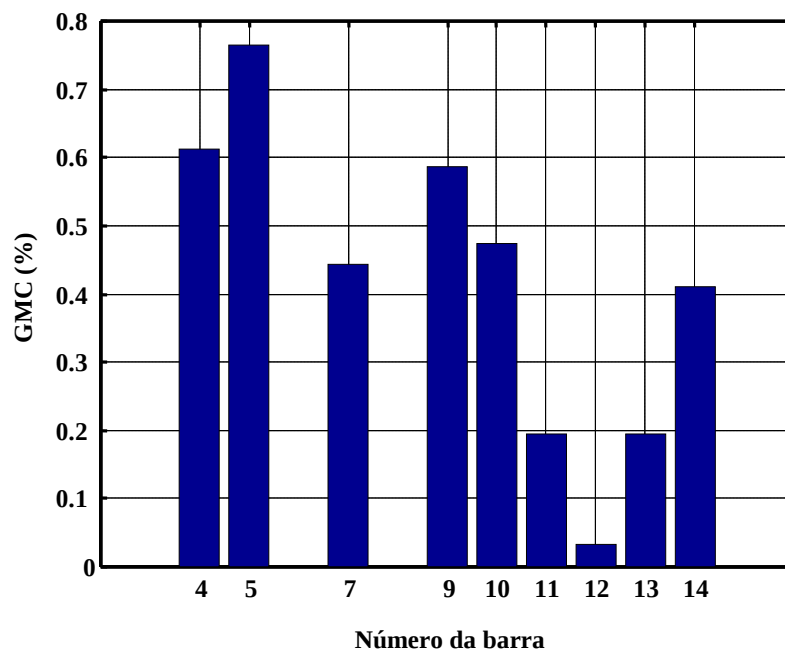
1,0000=3,0208 p.u.), que conforme apresentado na Figura 5.5 segue a ordem (5, 4, 9, 10, 7, 14, 11, 13 e 12). Entretanto, cabe observar que do ponto de vista de eficiência da compensação *shunt*, fica difícil efetuar uma comparação, visto que os valores das potências utilizadas para os bancos são diferentes. Assim, com o intuito de se possibilitar a identificação de quais locais (barras) são mais eficientes para se efetuar a compensação *shunt* visando a

Figura 5. 4 – Redução na perda total de potência reativa.



Amorim (2011)

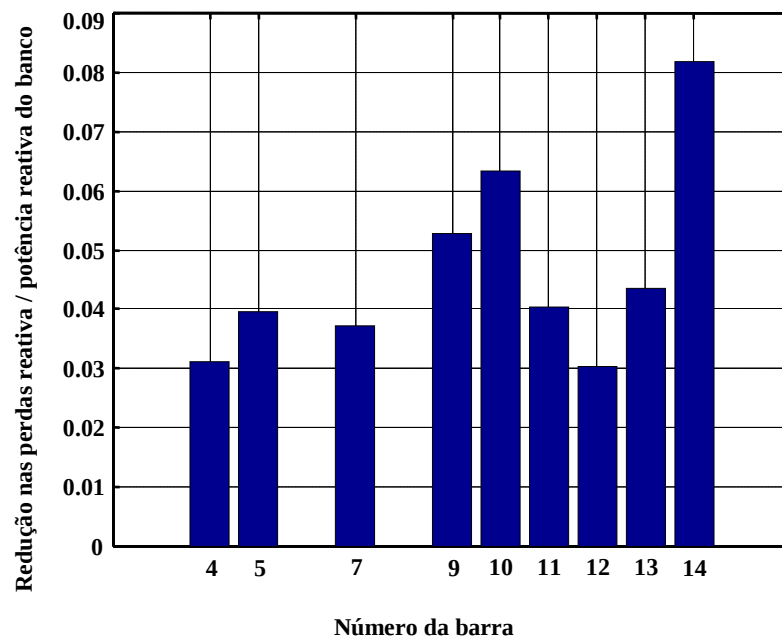
Figura 5. 5 – Aumento na margem de carregamento após a instalação do banco shunt.



Amorim (2011)

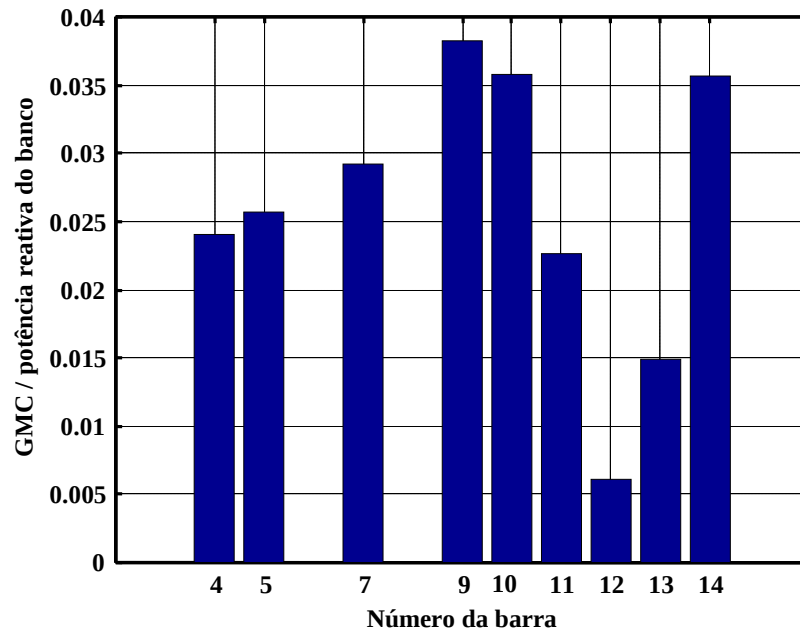
redução das perdas e o aumento da margem de carregamento, apresentam-se respectivamente nas Figuras 5.6 e 5.7, os valores da redução das perdas reativas e do aumento da margem de carregamento por unidade de Mvar do banco. Das Figuras 5.6 e 5.7 se verifica que as barras 14, 10 e 9, nessa ordem, são as mais apropriadas para se obter uma redução na perda total de potência reativa, enquanto que para o aumento na margem de carregamento são as mesmas barras, porém na ordem inversa 9, 10 e 14. Na Figura 5.8 verifica-se que já existe instalado na barra 9 um banco de 19 Mvar, confirmando assim os resultados da análise. Um banco dessa quantia localizado na barra 14 ao invés da 9, levaria à uma perda total de potência reativa da ordem de 31,7952 Mvar ao invés de 31,2162 Mvar, e à uma margem de carregamento de 4,0177 p.u., ao invés de 4,0208 p.u.

Figura 5. 6 – Redução na perda total de potência reativa em relação à potência do banco de capacitor.



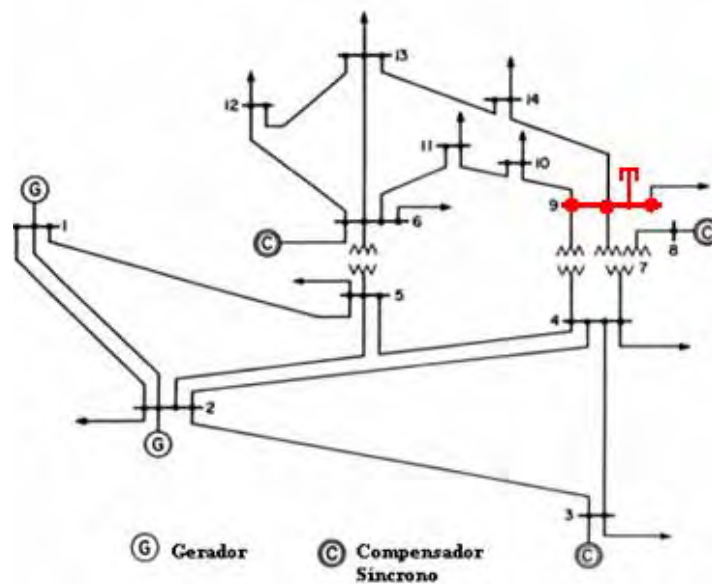
Amorim (2011)

Figura 5. 7 – Aumento na margem de carregamento após a instalação do banco shunt em relação à potência do banco de capacitor.



Amorim (2011)

Figura 5. 8 – Diagrama unifilar do sistema IEEE 14 barras.



Universidade de Washington (2010)

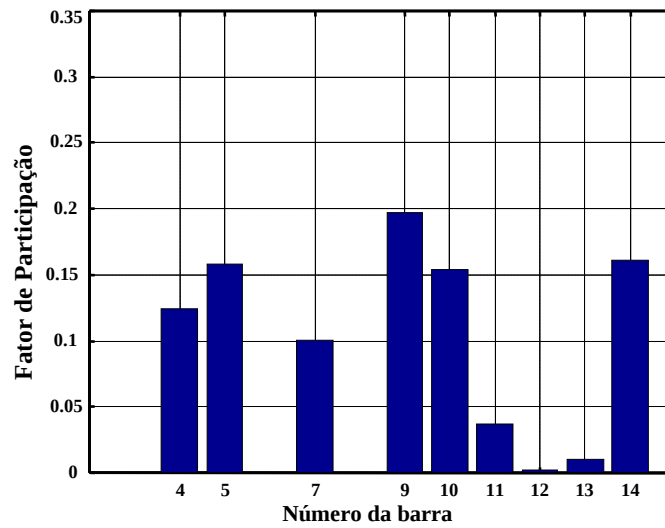
As Figuras 5.9, 5.10a e 5.10b, e a Tabela 5.2, foram obtidas a partir da aplicação da análise modal. Nota-se dos valores obtidos para os fatores de participação, correspondentes ao menor autovalor ou ao modo mais crítico, que as barras 9, 14, 5 e 10 são as que têm maior

influência no modo mais crítico quando o sistema está operando próximo ao PMC. Sendo assim, estas barras são as que mais participam no colapso de tensão.

Tabela 5. 2 – Autovalores obtidos para o IEEE 14 operando no PMC ($\lambda=4,02086$ p.u.)

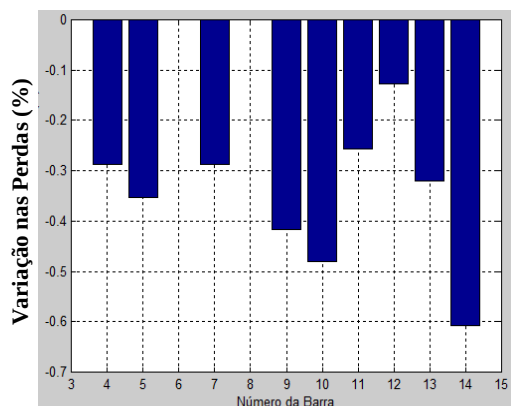
Autovalores					
1	43,4681	4	9,4116	7	15,1093
2	26,4835	5	3,3854	8	16,3693
3	0,0506	6	4,2309	9	6,2135

Figura 5. 9 – Fatores de participação no PMC ($\lambda=4,02086$ p.u.)



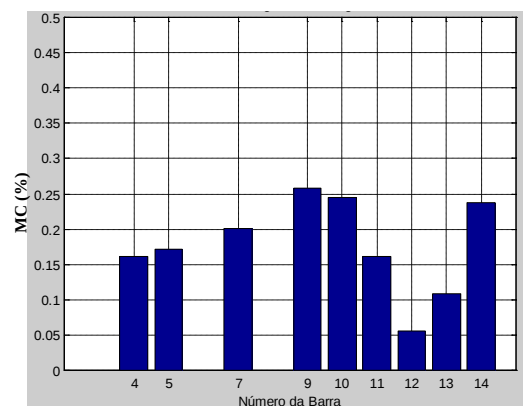
Amorim (2011)

Figura 5. 10– (a) Variação na perda total de potência reativa e, (b) aumento na margem de carregamento após a instalação de um banco shunt de 5 Mvar.



(a)

Amorim (2011)



(b)

As Figuras 5.10(a) e 5.10(b) apresentam em valor percentual, as respectivas variação na perda total de potência reativa e aumento na margem de carregamento (MC) em relação aos do caso base, quando um banco de capacitores *shunt* de 5Mvar é aplicado separadamente

em cada uma das barras indicadas. Comparando respectivamente as Figuras 5.10(a) e 5.10(b), com as 5.6 e 5.7 constatam-se o mesmo padrão de variação na perda total de potência reativa e aumento na margem de carregamento, comprovando o resultado apresentado pela análise proposta. Assim, em termos de eficiência as barras mais indicadas tanto para redução na perda total de potência reativa, quanto para o aumento na margem de carregamento são as barras 9, 10 e 14.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados da aplicação do método proposto para o ajuste do valor das magnitudes de tensão das barras PV. Esse ajuste é efetuado separadamente em cada uma das barras de acordo com a sequência indicada pelas colunas SNB (colunas 1, 4 e 7). O valor da magnitude de tensão de cada barra (colunas 3, 6 e 9) é determinado com base na curva de perda total de potência reativa versus magnitude de tensão da barra. Observe que à medida que os ajustes são efetuados, a perda total de potência reativa vai diminuindo, conforme apresentado nas colunas 2, 5 e 8 da tabela. As correspondentes margens de carregamento para cada um dos casos analisados encontram-se apresentado na última linha da tabela. Observe que em todos os três casos há uma redução sensível do valor das perdas, sendo o maior valor igual a 14,5% do valor do caso base (31,2162 Mvar). Entretanto, isso ocorre à custa de uma pequena redução da margem de carregamento, sendo o maior valor igual a 2,8% do valor do caso base (4,0208).

Tabela 5. 3– Aplicação do método para o ajuste das tensões das barras PV's.

CASO 1			CASO 2			CASO 3		
SNB	Perdas Reativas (Mvar)	Tensão (p.u.)	SNB	Perdas Reativas (Mvar)	Tensão (p.u.)	SNB	Perdas Reativas (Mvar)	Tensão (p.u.)
2	30,5390	1,0600	6	29,3003	1,0115	8	30,3562	1,0380
3	29,0775	1,0480	8	27,4516	1,0140	6	27,5559	0,9995
6	27,8821	1,0240	3	27,1968	1,0260	3	27,2936	1,0260
8	26,7512	1,0305	2	26,6888	1,0580	2	26,7932	1,0580
MC	3,9715		MC	3,9095		MC	3,9128	

5.4 Estudos de Casos Considerando os Limites de Potência Reativa nas Barras PV

Neste item apresentam-se os resultados da alocação de bancos de capacitores em derivação (*shunt*) e em série. O montante de compensação reativa *shunt* a ser alocado é determinado com base na respectiva curva de perda total de potência reativa na transmissão versus a magnitude de tensão da barra. A compensação série é expressa como um percentual da reatância indutiva do ramo e especificada pelo grau de compensação série. Neste caso o valor da reatância capacitiva escolhido é limitado pelo valor prático de compensação que é da ordem de 80%. Considerando-se que a faixa usual de compensação varia de 20 a 70%, optou-se por considerar um valor fixo de 50% para a reatância capacitiva. Também são investigados os efeitos individuais que cada um destes procedimentos traz para o sistema. Entre os efeitos investigados estão: a redução da perda total de potência reativa, a variação na margem de estabilidade estática de tensão, e a melhoria do perfil de tensão. Os resultados obtidos para o sistema de 14, 57, e 118 barras do IEEE mostram que os procedimentos conduzem a uma sensível redução das perdas de potência reativa nas linhas de transmissão e simultaneamente, uma melhoria no perfil da tensão.

Para todos os testes realizados, a tolerância adotada para os desbalanços de potência foi de 10^{-8} p.u. As curvas PV foram obtidas considerando-se que as cargas são modeladas como de potência constante e o parâmetro fator de carregamento é usado para simular incrementos de carga ativa e reativa, considerando fator de potência constante. Cada incremento de carga é seguido por um incremento de geração equivalente usando o fator de carregamento. O ponto de operação inicial de cada curva é obtido com um fluxo de carga convencional, enquanto que os demais são obtidos por um fluxo de carga continuado utilizando a magnitude de tensão como parâmetro. No passo preditor, o controle de passo utilizado é baseado na equação (2.9), com $\sigma^0=0,1$. Os *tap*'s foram mantidos fixos em 1,0 p.u. Quanto aos limites de potência reativa nas barras PV's foram analisados os resultados para as condições de limites abertos e fechados. Uma vez que o objetivo é a obtenção do ponto de máximo carregamento, não foi feito o traçado da parte inferior da curva PV. Em seguida à obtenção do PMC, foram calculados os autovalores, os autovetores, e correspondentes fatores de participação de barra, de geradores e dos ramos.

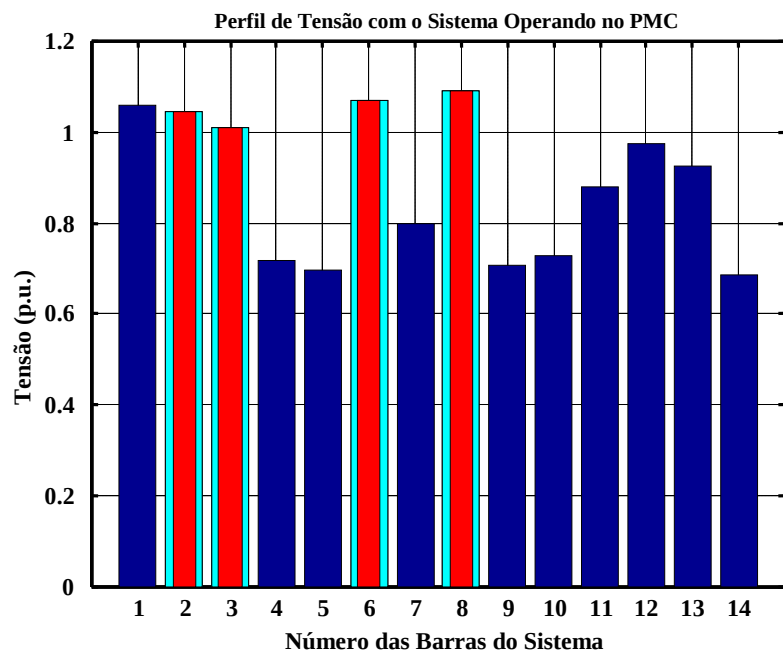
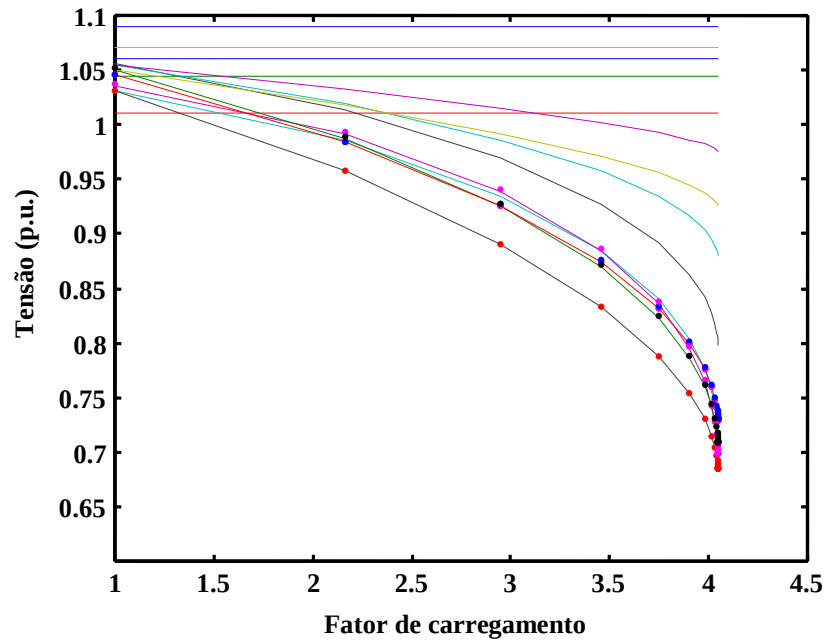
5.4.1 Análise do sistema IEEE-14 sem limites de potência reativa

Nas figuras 5.11(a) e (b), e 5.12 encontram-se respectivamente as curvas PV, o perfil de tensão no PMC e os fatores de participação de barras do sistema IEEE-14, sem limites de potência reativa nas barras PV. As curvas PV para o sistema IEEE-14 sem considerar os limites de potência reativa nas barras PV são apresentadas na Figura 5.11(a). O fator de carregamento do caso base (λ) é igual a 1. Por outro lado, o valor de λ é de 4,0456 p.u. Assim, a margem de carregamento é de 304,56%. Isto significa que o sistema pode transmitir uma potência de 4,0456 vezes a potência do caso base. Observando o perfil de tensão apresentado na Figura 5.11(b) pode-se ver que no PMC as menores magnitudes de tensão, em ordem crescente, ocorrem para as barras 14, 5, 9, 4 e 10. A menor magnitude de tensão ocorre para a barra 14. O sistema não consegue transmitir maiores potência que o limite apresentado sem entrar em colapso de tensão. Assim, quanto menor for a margem de carregamento maior será a possibilidade do sistema apresentar problemas de tensão quando da ocorrência de um aumento subitâneo de carga ou contingência tal como a saída de uma linha de transmissão ou transformador. Apesar da margem de estabilidade de tensão ser de fácil compreensão, a sua obtenção requer o cálculo de vários pontos de operação, i.e., resulta num alto custo computacional.

As colunas da Tabela 5.4 apresentam respectivamente os valores de simulação obtidos para a perda total de potência reativa, a potência reativa do banco *shunt*, a magnitude de tensão para a qual ocorre a menor perda, e a margem de carregamento (MC) após a inclusão do banco *shunt*. Os valores para os bancos foram obtidos a partir das curvas de perda total de potência reativa versus magnitude de tensão para cada uma das barras de carga do sistema IEEE-14. Nesse caso, os limites de potência reativa nas barras PV's foram liberados. De acordo com o apresentado na coluna 1 da Tabela 5.4, a maior redução ($26,8245 - 26,5219 = 0,3026$ Mvar ou 1,128% em relação à do caso base (26,8245 Mvar) na perda total de potência reativa ocorre com a inclusão do banco de 25,1093 Mvar junto à barra 5. Entretanto, do ponto de vista de eficiência da compensação *shunt*, os locais (barras) mais eficientes para se efetuar a compensação *shunt* visando à redução das perdas e o aumento da margem de carregamento podem ser vistos nas colunas 10 e 12 da Tabela 5.4 e nas Figuras 5.13 e 5.14. De acordo com os resultados constata-se que as barras de carga mais eficientes para a redução das perdas são as barras 14, 10, 9 e 5, enquanto que para o aumento da margem de

carregamento foram as barras 9, 10, 14 e 5. Essas barras também são indicadas pelos fatores de participação correspondentes ao modo mais crítico conforme se pode ver na Figura 5.12.

Figura 5. 11 – Sistema IEEE-14 sem limites de potência reativa nas barras PV: (a) curvas PV e (b) perfil de tensão no PMC.



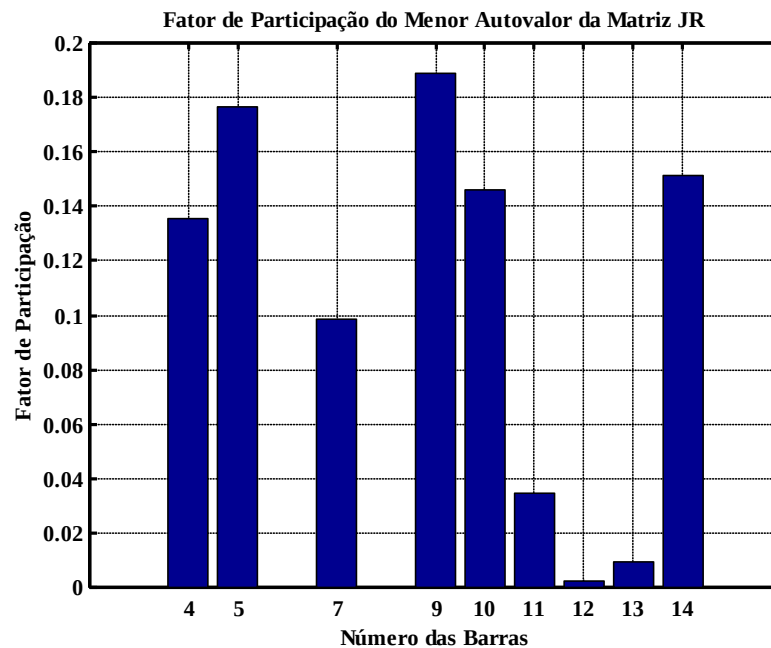
■ - magnitude de tensão das barras PV ■ - magnitude de tensão especificada para as barras PV
 ■ - magnitude de tensão das barras PQ

Tabela 5. 4– Valores obtidos pelo método para o sistema IEEE-14, sem limites de potência reativos para as barras PV.

Barra	fp_{ki}	Perda total		Potência do Banco (PB) (Mvar)	$ V_{CB} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re	
		Mvar	MW			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/PB	(%)	(%)/PB
5	0,1763	26,5219	13,5156	25,1093	1,0470	4,0706	0,6840	0,8209	0,0327	1,1281	0,0449
14	0,1513	26,6158	13,3356	8,4707	1,0510	4,0572	0,7004	0,3809	0,0450	0,7780	0,0918
10	0,1460	26,6443	13,3630	9,5146	1,0610	4,0589	0,6910	0,4367	0,0459	0,6718	0,0706
9*	0,1889	26,6562	13,3762	10,7744	1,0630	4,0616	0,6930	0,5253	0,0488	0,6274	0,0582
4	0,1357	26,6234	13,5140	19,6874	1,0390	4,0640	0,6856	0,6042	0,0307	0,7497	0,0381
13	0,0094	26,6940	13,3403	9,8566	1,0590	4,0517	0,6907	0,2003	0,0203	0,4865	0,0494
7	0,0986	26,7006	13,3877	11,0712	1,0660	4,0584	0,6895	0,4203	0,0380	0,4619	0,0417
11	0,0347	26,7488	13,3752	6,5754	1,0640	4,0517	0,6875	0,2003	0,0305	0,2822	0,0429
12	0,0023	26,7856	13,3770	4,0891	1,0610	4,0469	0,6865	0,0427	0,0104	0,1450	0,0355

* mais 19,0 Mvar existente: $10,7744 + 19 = 29,7744$

Figura 5. 12 – Fatores de participação de barra para o sistema IEEE-14 sem limites de potência reativa nas barras PV.



Amorim (2011)

Figura 5. 13 – Aumento na margem de carregamento após a instalação do banco shunt em relação à potência do banco de capacitor.

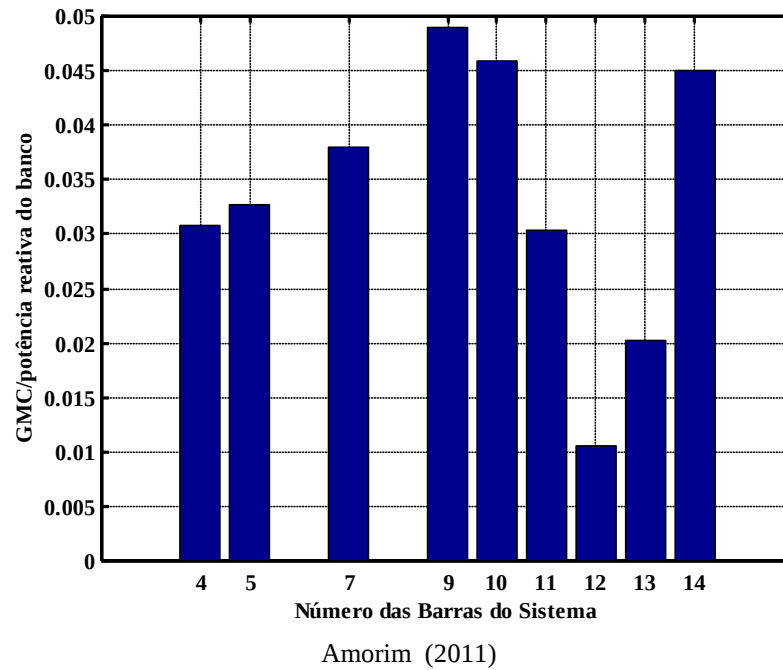
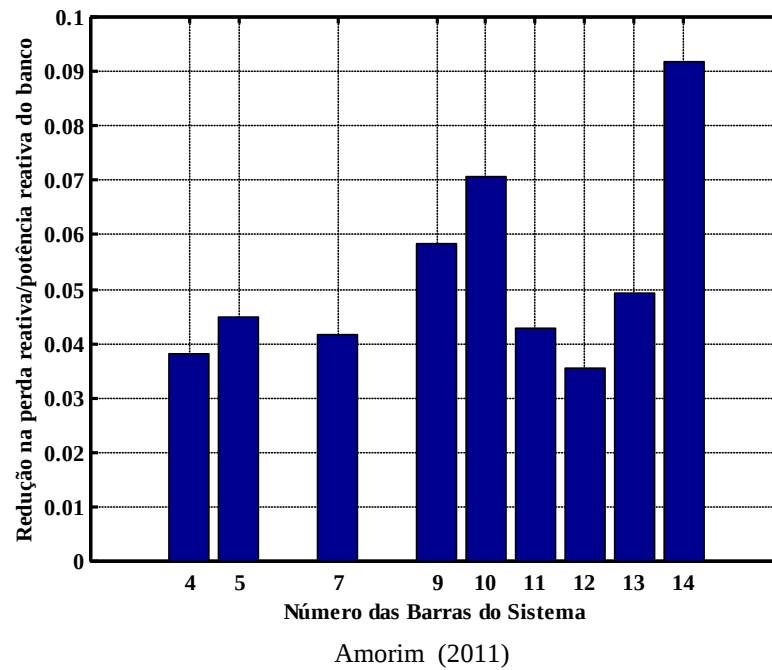


Figura 5. 14 – Redução na perda total de potência reativa em relação à potência do banco de capacitor.



5.4.2 Análise do sistema IEEE-14 considerando os limites de potência reativa

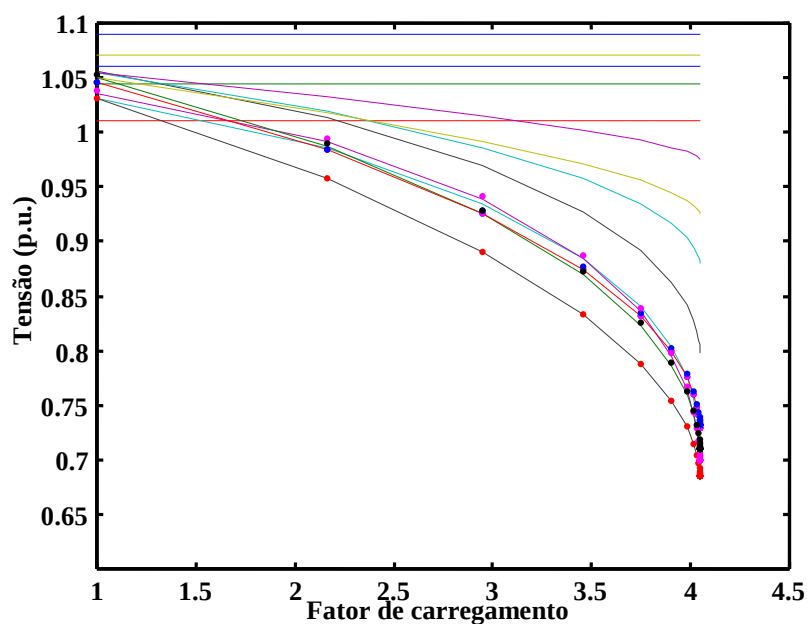
As curvas PV para o sistema IEEE-14 com limites de potência reativa nas barras PV são apresentadas na Figura 5.15(a). O fator de carregamento do caso base (λ) é igual a 1, enquanto que o valor de λ é de 1,7444 p.u. Assim, a margem de carregamento é de aproximadamente 74,44%, i.e., o sistema pode transmitir no máximo uma potência de 1,7444 vezes a potência do caso base. Portanto, considerando os limites de potência reativa nas barras PV há uma redução da margem da ordem de 75,558% em relação a obtida com os limites liberados conforme apresentado no item 5.4.1. Isso evidencia a importância da disponibilidade de potência reativa para o transporte de potência ativa. Observe que o sistema não consegue transmitir maiores potência que o limite apresentado sem entrar em colapso de tensão. Observando o perfil de tensão apresentado na Figura 5.15(b) pode-se ver que no PMC as menores magnitudes de tensão em ordem crescente ocorrem para as barras 14, 13, 12, 10 e 11. Também nesse caso a menor magnitude de tensão ocorre para a barra 14.

Do perfil de tensão apresentado na Figura 5.15(b) pode-se verificar que no PMC os valores especificados para as magnitudes de tensões das barras PV não foram atendidos uma vez que os limites máximos de potência reativa de todas as barras PV foram alcançados e com isso as magnitudes de tensões de todas as barras PQ ficaram abaixo do valor mínimo desejado. Uma vez que no PMC ($\lambda=1,7444$ e $MC_{CB} = 0,7444$), dentre as quatorze barras do sistema, uma é a barra *slack*, nove são barras PQ, e as quatro barras PV encontram-se em seu limite máximo de potência reativa gerada, o número total de autovalores encontrados na matriz $\mathbf{J}_R$ é igual a treze, conforme apresentado na Tabela 5.5. Na Figura 5.16 apresentam-se os respectivos fatores de participação (fp_{ki}) para o menor autovalor (9.569×10^{-7}), i.e., para o modo mais crítico. Observe que o seu valor é uma indicação de que o sistema encontra-se muito próximo do PMC, no qual o determinante da matriz é nulo.

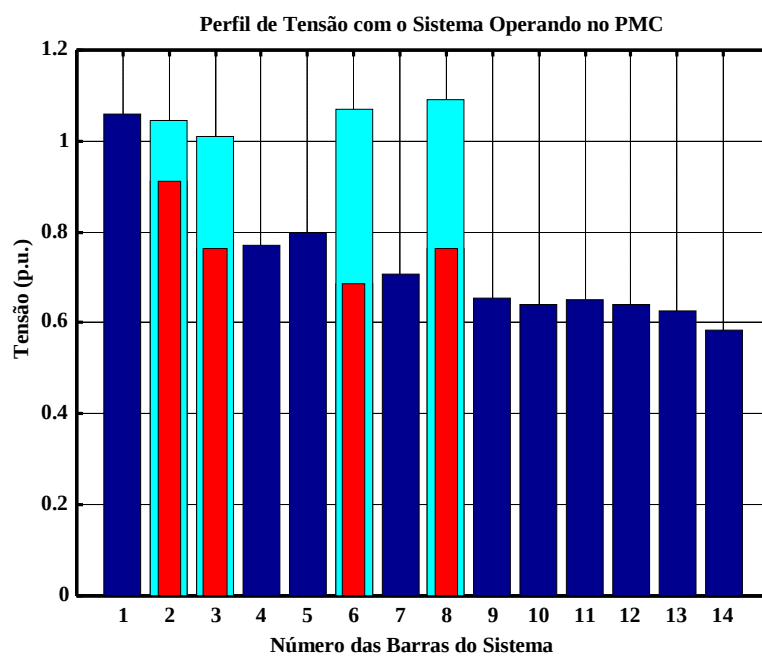
Tabela 5. 5– Autovalores obtidos para o IEEE 14 operando no PMC ($\lambda=1,7444$ p.u.), considerando os limites de potência reativa nas barras PV.

Autovalores							
1	49,8855	5	15,0458	9	7,4626	13	3,7170
2	32,7039	6	11,8664	10	1,7919		
3	24,8312	7	$9,569 \times 10^{-7}$	11	3,1807		
4	18,2429	8	9,9911	12	3,7522		

Figura 5. 15 – Sistema IEEE-14 com limites de potência reativa nas barras PV: (a) curvas PV e (b) perfil de tensão no PMC.



(a)

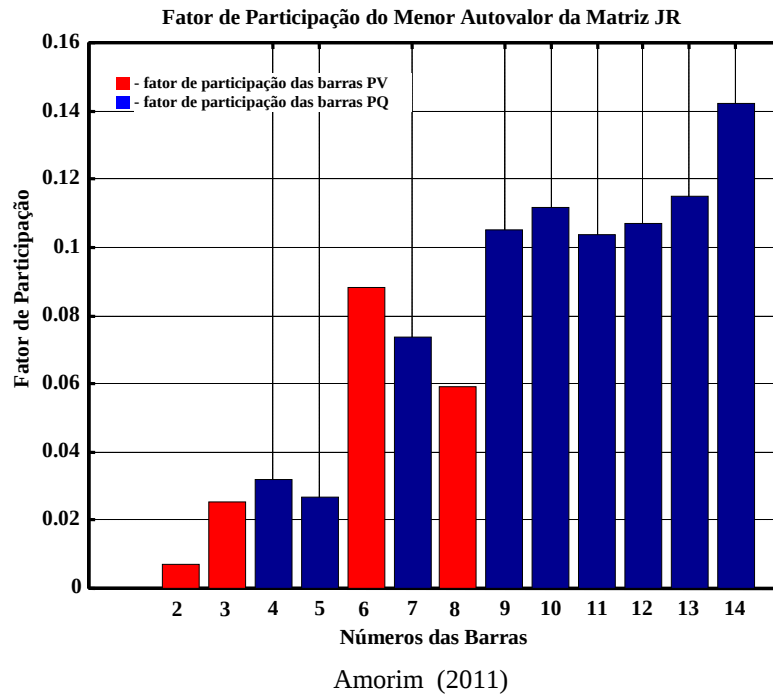


(b)

■ - magnitude de tensão das barras PV ■ - magnitude de tensão especificada para as barras PV
 ■ - magnitude de tensão das barras PQ

Amorim (2011)

Figura 5. 16 – Fatores de participação de barra do sistema IEEE-14 com limites de potência reativa nas barras PV.



A Tabela 5.6 apresenta os valores de simulação obtidos para a perda total de potência reativa, a potência reativa do banco *shunt*, a magnitude de tensão para a qual ocorre a menor perda, e a margem de carregamento (MC) após a inclusão do banco *shunt*, cujos valores foram obtidos a partir das curvas de perda total de potência reativa versus magnitude de tensão para cada uma das barras de carga. De acordo com o apresentado na coluna 11 da Tabela 5.6, a maior redução ($26,8245 - 26,4508 = 0,3735$ Mvar ou 1,1334% em relação à do caso base (26,8085 Mvar) na perda total de potência reativa ocorre com a inclusão de um banco de 26,6529 Mvar junto à barra 5. Entretanto, do ponto de vista de eficiência da compensação *shunt*, as barras mais eficientes para se efetuar a compensação *shunt* visando à redução das perdas e o aumento da margem de carregamento podem ser vistos nas colunas 10 e 12 da Tabela 5.6, e nas Figuras 5.17 e 5.18. De acordo com os resultados constata-se que as barras de carga mais eficientes para o aumento da margem de carregamento foram as barras 9, 10, 11, 13, 12, 14 e 7, enquanto que para a redução das perdas são as barras 14, 13, 10, e 9. Essas barras também são indicadas pelos fatores de participação correspondentes ao modo mais crítico conforme se pode ver na Figura 5.16. Um outro aspecto a ser observado se refere aos valores dos aumentos da margem de carregamento, e que são relativamente maiores do que os apresentados na Tabela 5.4, e que também foram obtidos pela compensação *shunt*, porém sem considerar os limites de potência reativa nas barras PV. Assim, se pode verificar a

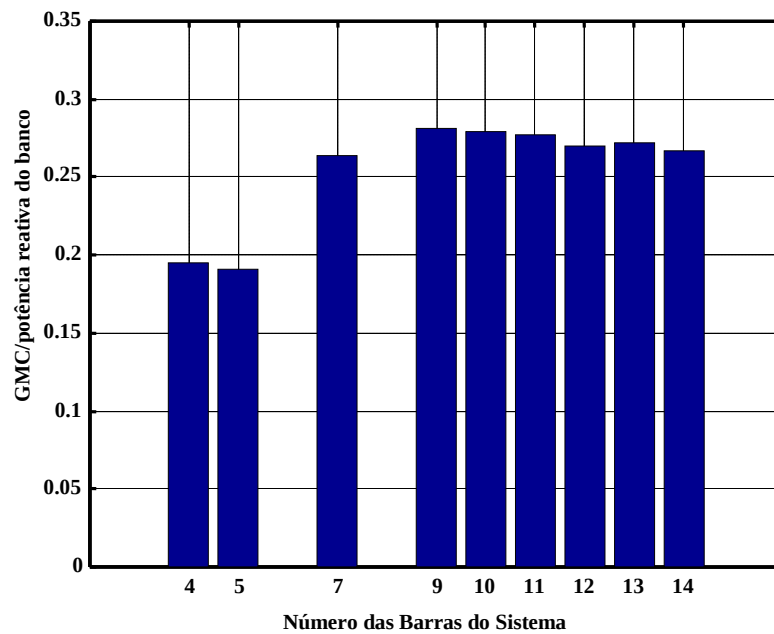
importância maior que a compensação *shunt* tem para sistemas com restrição de fornecimento de potência reativa nos geradores.

Tabela 5. 6– Valores obtidos pelo método para o sistema IEEE-14, com limites de potência reativos para as barras PV.

Barra	fp_{ki}	Perda total		Potência do Banco (PB) (Mvar)	$ V_{CB} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re	
		Mvar	MW			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/PB	(%)	(%)/P _B
14	0,1421	26,5531	13,3271	9,4645	1,0420	1,7632	0,6077	2,5255	0,2668	0,9527	0,1007
13	0,1151	26,6141	13,3170	9,4841	1,0480	1,7636	0,5997	2,5793	0,2720	0,7251	0,0765
10	0,1118	26,5889	13,3700	11,4135	1,0550	1,7681	0,6010	3,1838	0,2789	0,8191	0,0718
12	0,1069	26,7261	13,3600	6,6069	1,0490	1,7577	0,5946	1,7867	0,2704	0,3074	0,0465
9*	0,1052	26,6097	13,3920	12,9381	1,0580	1,7715	0,6035	3,6405	0,2814	0,7416	0,0573
11	0,1038	26,6883	13,3648	8,2846	1,0540	1,7615	0,5963	2,2972	0,2773	0,4484	0,0541
7	0,0735	26,6888	13,3828	13,7776	1,0630	1,7715	0,6004	3,6405	0,2642	0,4465	0,0324
4	0,0319	26,5858	13,4919	23,4095	1,0370	1,7783	0,5972	4,5540	0,1945	0,8307	0,0355
5	0,0265	26,4508	13,4542	26,6529	1,0440	1,7822	0,5978	5,0779	0,1905	1,3343	0,0501

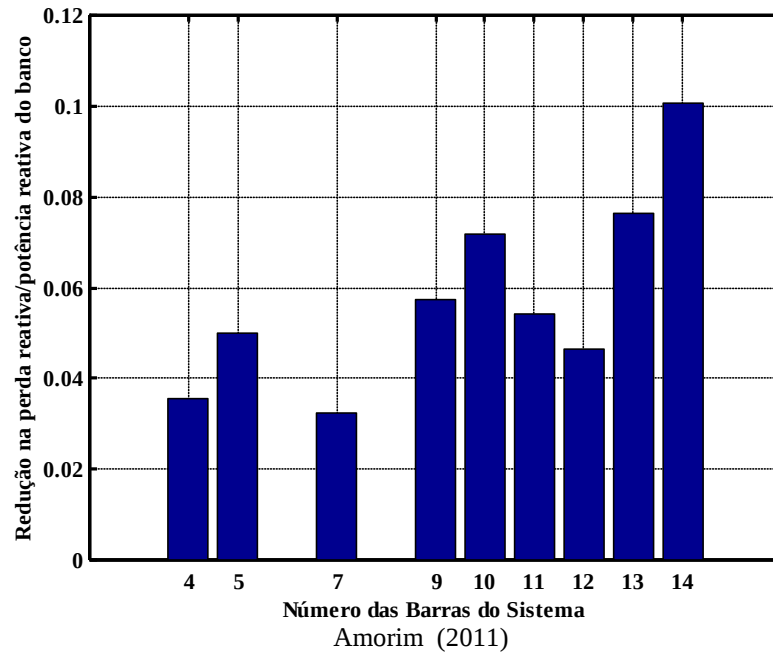
* mais 19,0 Mvar existente: 12,9381 + 19 = 31,9381

Figura 5. 17 – Aumento na margem de carregamento após a instalação do banco shunt em relação à potência do banco de capacitor, considerando os limites de potência reativa nas barras PV.



Amorim (2011)

Figura 5. 18 – Redução na perda total de potência reativa em relação à potência do banco de capacitor, com limites de potência reativa nas barras PV.



As Figuras 5.19 e 5.20 apresentam os respectivos aumentos na margem de carregamento e reduções na perda total de potência reativa, a instalação individual de um banco *shunt* de 5 Mvar em cada barra do sistema, considerando os limites de potência reativa nas barras PV. Comparando com os resultados apresentados nas Figuras 5.17 e 5.18, pode se constatar que em termos de eficiência as barras indicadas pelas curvas de perda total de potência reativa versus magnitude de tensão são praticamente as mesmas.

Figura 5. 19 – Aumento na margem de carregamento após a instalação de um banco *shunt* de 5 Mvar em cada barra, considerando os limites de potência reativa nas barras PV.

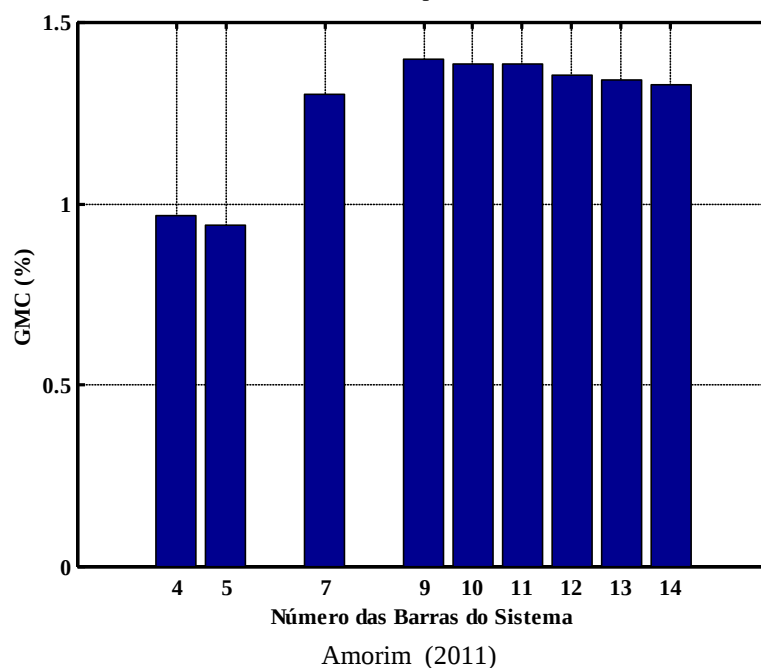
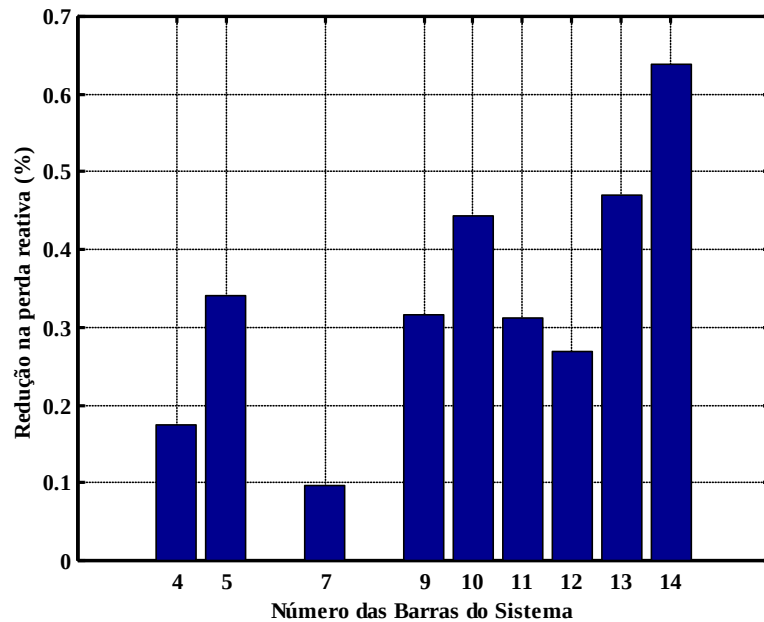


Figura 5. 20 – Redução na perda total de potência reativa após a instalação de um banco shunt de 5 Mvar em cada barra, considerando os limites de potência reativa nas barras PV

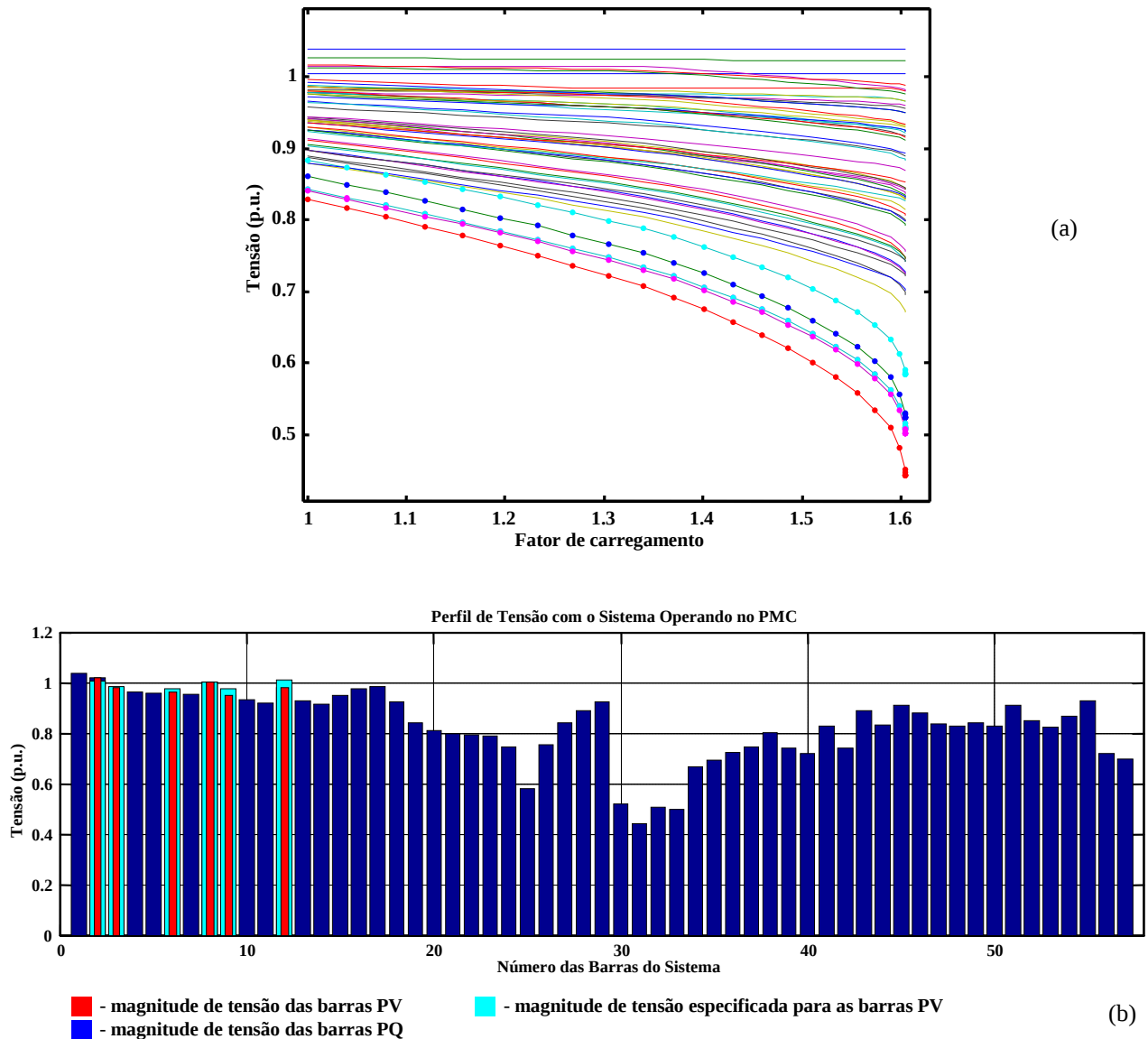


Amorim (2011)

5.4.3 Análise do sistema IEEE-57 considerando os limites de potência reativa

As curvas PV para o sistema IEEE-57 com limites de potência reativa nas barras PV são apresentadas na Figura 5.21(a). O fator de carregamento do caso base (λ) é igual a 1, enquanto que o valor de λ no PMC é igual a 1,6033 p.u. As respectivas perdas ativa e reativa do caso base são 27,5275 MW e 4,0109 Mvar. Observando o perfil de tensão apresentado na Figura 5.21(b) pode-se ver que no PMC as menores magnitudes de tensão em ordem crescente ocorrem para as barras 31, 33, 32, 30 e 25. Portanto, a menor magnitude de tensão ocorre para a barra 31. Do perfil de tensão apresentado na Figura 5.21(b) também se pode verificar que apesar dos valores especificados para as magnitudes de tensões das barras PV serem praticamente atendidos no PMC, as magnitudes de tensões de 44 barras PQ ficaram abaixo de 0,95 p.u. Este afundamento de tensão ocorre particularmente na vizinhança da barra crítica (barra 31) deste sistema, e que pode ser vista (em vermelho) no diagrama unifilar da Figura 5.22.

Figura 5. 21 – Sistema IEEE-57 com limites de potência reativa nas barras PV: (a) curvas PV e (b) perfil de tensão no PMC.



Amorim (2011)

Na Tabela 5.7 apresentam-se os vinte menores autovalores para o IEEE-57. A Tabela 5.8 apresenta os resultados obtidos pelo método para as barras indicadas pelos fatores de participação calculados para o menor autovalor encontrado ($-9,264 \times 10^{-7}$). O valor negativo indica que o ponto de operação corresponde a um ponto muito próximo ao PMC, mas localizado na parte inferior da curva PV, i.e., na parte instável. A primeira coluna indica as barras segundo a ordem dada pelos fatores de participação (segunda coluna). Da mesma forma que o feito para o sistema IEEE-14, com o intuito de se possibilitar a identificação de quais locais (barras) são mais eficientes para se efetuar a compensação *shunt* visando à redução das perdas e o aumento da margem de carregamento, apresentam-se respectivamente

na Figura 5.23(a) e Figura 5.23(b), os valores da redução das perdas reativas e do aumento da margem de carregamento por unidade de Mvar do banco. Na Figura 5.23(c) apresentam-se os fatores de participação de algumas das barras escolhidas para se analisar a alocação do banco de capacitores *shunt*. Novamente, em termos de eficiência as barras mais indicadas para o aumento na margem de carregamento são as barras 25, 30, 31, 32 e 33. Esse mesmo grupo de barras (fisicamente interligadas) foi indicado pelos fatores de participação de barras (fp_{ki}) obtidos com a aplicação da análise modal. Observe no diagrama do sistema IEEE-57 apresentado na Figura 5.22, que na barra 25 já se verifica a existência de um banco de 5,9 Mvar, confirmando assim os resultados da análise. No caso da redução na perda total de

Tabela 5. 7– Autovalores obtidos para o IEEE 57 operando no PMC ($\lambda=1,6033$ p.u.), considerando os limites de potência reativa nas barras PV.

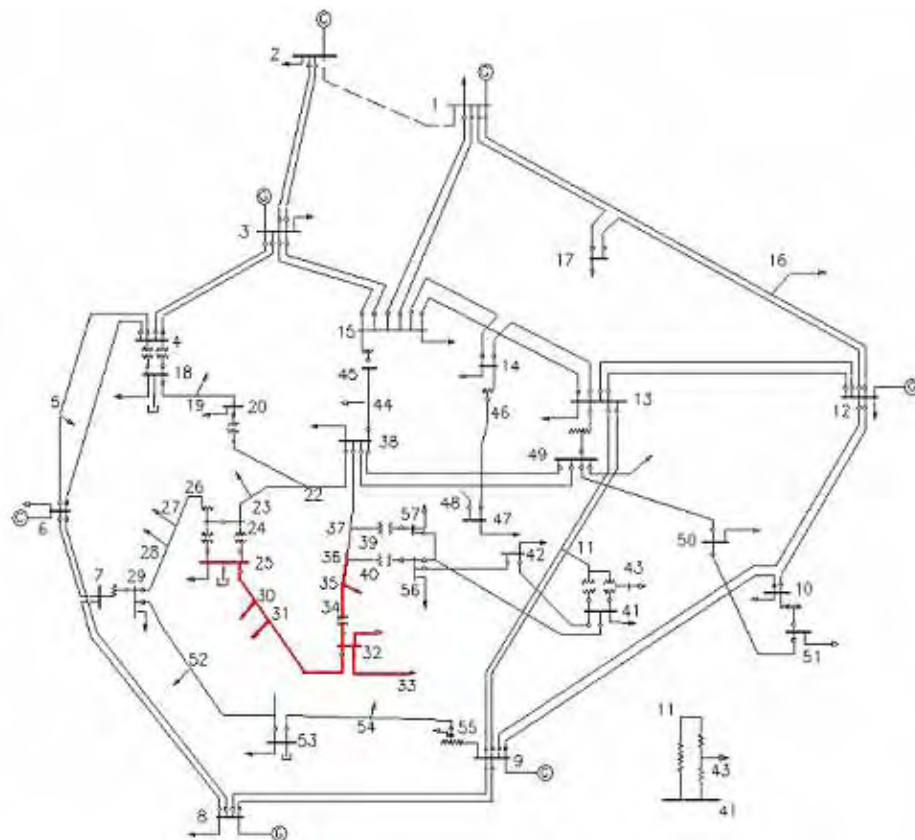
Autovalores									
1	$-9,264 \times 10^{-7}$	5	0,9006	9	2,2062	13	4,9062	17	6,3808
2	0,3291	6	1,1450	10	2,6207	14	5,3490	18	6,6475
3	0,5119	7	1,6772	11	3,8682	15	6,2310	19	7,6628
4	0,6609	8	1,8328	12	4,4958	16	6,3484	20	8,2396

Tabela 5. 8 – Sistema IEEE-57: Valores obtidos pelo método das curvas de perda total de potência reativa versus magnitude de tensão para cada uma das barras de carga, considerando os limites de potência reativos para as barras PV.

Barra	fp_{ki}	Perda total		Potência do Banco (Mvar)	$ V_{CB} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re	
		Mvar	MW			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/PB	(%)	(%)/PB
31	0,2497	1,3620	27,0231	14,1653	0,9675	1,6741	0,5016	11,7355	0,8285	66,0425	4,6623
30	0,1601	1,5609	27,0878	14,7248	0,9860	1,6817	0,4848	12,9952	0,8825	61,0835	4,1483
33	0,1601	1,2565	26,9187	14,8280	0,9835	1,6792	0,4805	12,5808	0,8484	68,6729	4,6313
32	0,1554	1,1377	26,8433	15,4934	0,9875	1,6835	0,4825	13,2936	0,8580	71,6348	4,6236
25	0,1134	1,6797	27,1062	15,3355*	1,0005	1,6868	0,4779	13,8405	0,9025	58,1216	3,7900
34	0,0198	0,3100	27,0352	28,9922	0,9735	1,6806	0,4587	12,8129	0,4419	92,2711	3,1826
24	0,0137	0,8466	27,3857	31,8459	0,9870	1,6867	0,4601	13,8240	0,4341	78,8925	2,4773
35	0,0136	-0,3097	26,9859	35,3762	0,9780	1,6865	0,4589	13,7908	0,3898	107,7215	3,0450
26	0,0116	1,1201	27,3375	30,3501	0,9865	1,6782	0,4577	12,4151	0,4091	72,0736	2,3747
36	0,0097	-0,8934	26,9042	42,3775	0,9860	1,6939	0,4595	15,0174	0,3544	122,2743	2,8854
44	0,0025	-1,5144	26,9600	62,0812	1,0155	1,6909	0,4564	14,5201	0,2339	137,7571	2,2190
52	0,0005	2,6056	27,4556	23,0713	0,9850	1,6180	0,4444	2,4366	0,1056	35,0370	1,5186
5	0,0001	2,3726	27,5267	39,8721	1,0150	1,6117	0,4385	1,3923	0,0349	40,8462	1,0244

* na barra 25 já se encontra instalado um banco de 5,9 Mvar.

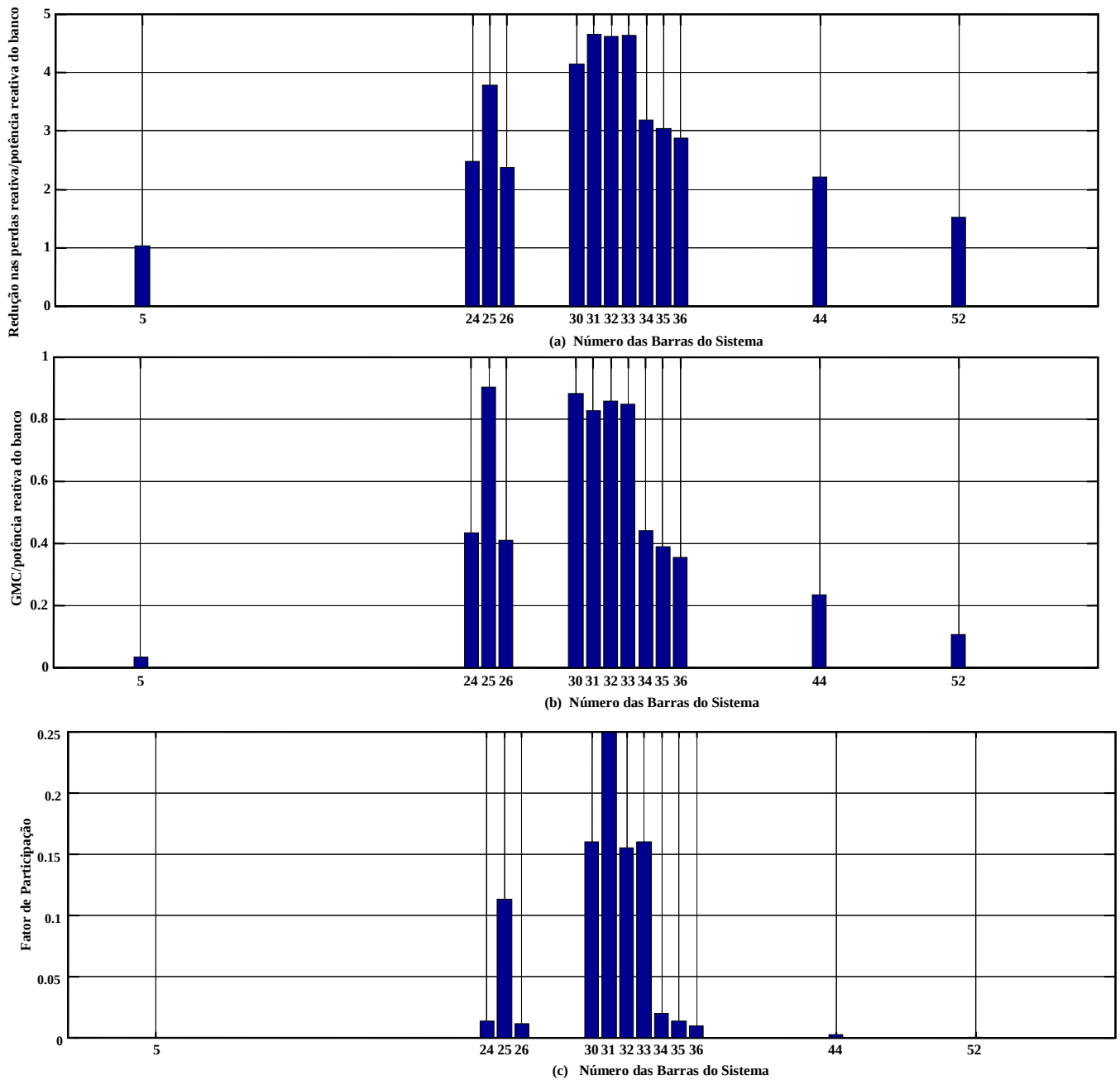
Figura 5. 22 – Diagrama unifilar do sistema IEEE 57 barras.



Universidade de Washington (2010)

potência reativa, a barra 25 diminui um pouco sua eficiência. Outro ponto que deve ser observado das duas últimas colunas da Tabela 5.8 é que os valores de ganho na margem de carregamento (GMC) e redução na perda total de potência reativa (Re) são relativamente maiores. Assim, se pode verificar a importância maior que a compensação *shunt* tem para sistemas com restrição de fornecimento de potência reativa nos geradores.

Figura 5. 23 – Sistema IEEE-57: (a) Redução na perda total de potência reativa em relação à potência do banco de capacitor e (b) ganho na margem de carregamento após a instalação do banco shunt em relação à potência do banco de capacitor, (c) fatores de participação da barra



Amorim (2011)

5.4.4 Análise do sistema IEEE-118 considerando os limites de potência reativa

As curvas PV para o sistema IEEE-118 com limites de potência reativa nas barras PV são apresentadas nas Figuras 5.24(a), 5.24(b) e 5.24(c). O fator de carregamento do caso base (λ) é igual a 1, enquanto que o valor de λ no PMC é igual a 1,8378 p.u. As respectivas perdas ativa e reativa do caso base são 131,3463 MW e -591,6907 Mvar. Observa-se que no PMC 79 barras, das quais 25 são PV, apresentam uma magnitude de tensão menor que 0,95 p.u. Do perfil de tensão apresentado na Figura 5.24(d) pode-se ver que as menores magnitudes de tensão (menores que 0,8 p.u.) em ordem crescente ocorrem para as seguintes barras: 52, 53, 59, 51, 58, 55(PV), 56(PV), 57, 44, 54(PV), 76(PV), 45 e 63. Portanto, a menor magnitude de tensão ocorre para a barra 52. Do perfil de tensão apresentado na Figura 5.24(d) também se pode verificar que as magnitudes de tensões de várias barras PV não foram atendidos no PMC e ficaram abaixo de 0,95 p.u. Este afundamento de tensão ocorre particularmente na vizinhança da barra 52, que é a barra crítica deste sistema.

A Tabela 5.9 apresenta os vinte menores autovalores para o IEEE-118. A Tabela 5.10 apresenta os resultados obtidos pelo método para as barras indicadas pelos fatores de participação calculados para o menor autovalor encontrado ($4,946 \times 10^{-7}$), e que se encontram apresentados na Figura 5.25. O valor positivo do menor autovalor indica que o ponto de operação corresponde a um ponto muito próximo ao PMC, localizado na parte superior da curva PV, i.e., na parte estável. A primeira coluna indica as barras segundo a ordem dada pelos fatores de participação (segunda coluna). Os locais (barras) mais eficientes para se efetuar a compensação *shunt* visando o aumento da margem de carregamento são apresentados na Figura 5.26. Esses valores correspondem aos aumentos na margem de carregamento por unidade de Mvar do banco.

Da comparação entre as Figuras 5.25 e 5.26 pode-se verificar que em termos de eficiência as barras mais indicadas para o aumento na margem de carregamento são as barras de número 43 a 61. Esse mesmo grupo de barras foi indicado pelo fator de participação de barra (fp_{ki}) correspondente ao menor autovalor obtido com a aplicação da análise modal,

Figura 5. 24 – Sistema IEEE-118 considerando os limites de potência reativa nas barras PV: (a) curvas PV, (b) curvas PV das barras PQ pertencentes ao grupo de barras indicadas pelos fatores de participação de barras correspondentes ao modo mais crítico, (c) curvas PV das barras PV pertencentes ao grupo de barras indicadas pelo fator de participação de barras correspondente ao modo mais crítico, e (d) perfil de tensão no PMC.

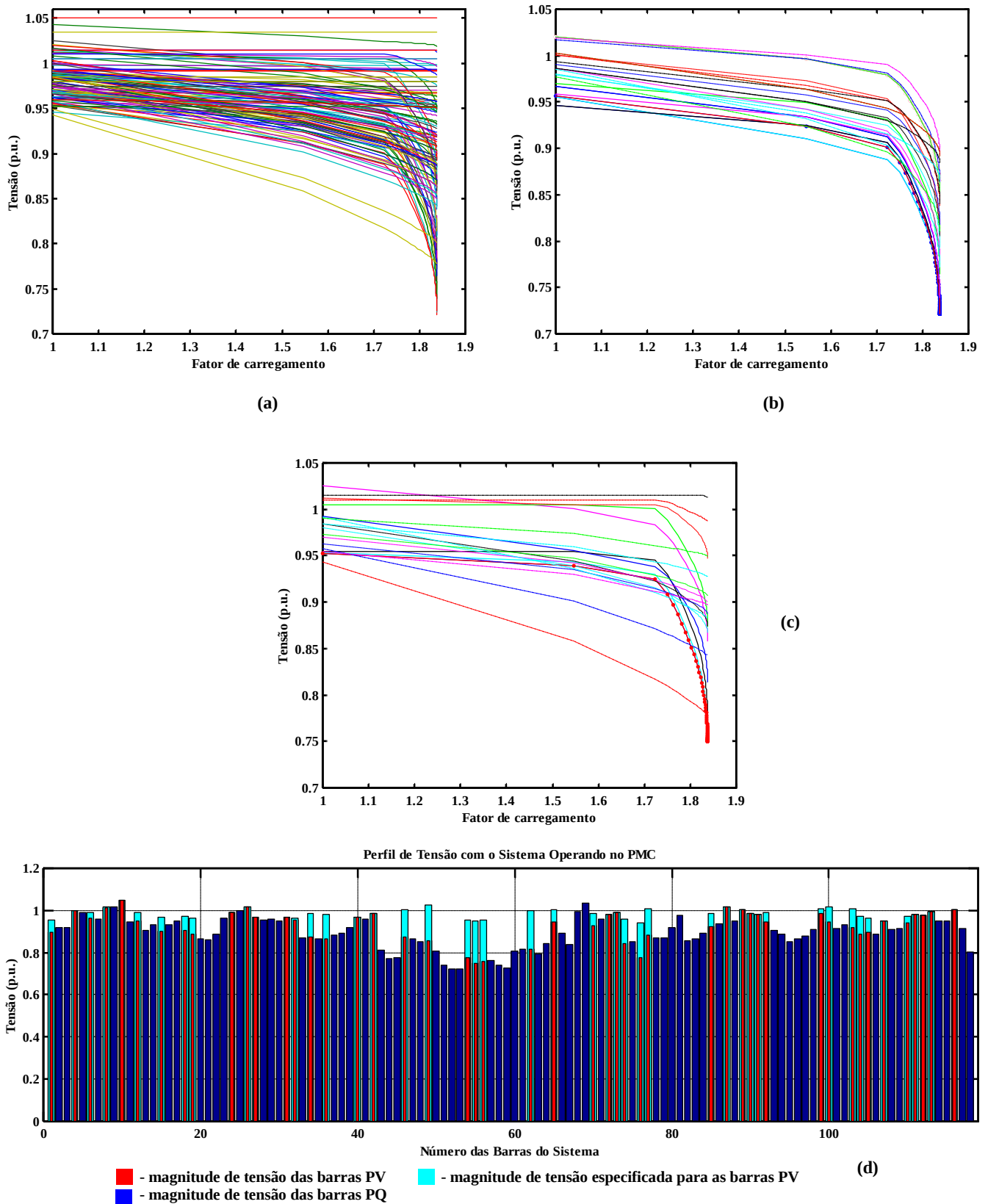


Tabela 5. 9– Autovalores obtidos para o IEEE-118 operando no PMC ($\lambda=1,8378$ p.u.), considerando os limites de potência reativa nas barras PV.

Autovalores									
1	$4,946 \times 10^{-7}$	5	3,3898	9	4,4632	13	7,4076	17	10,5757
2	1,7650	6	3,4162	10	6,1982	14	7,9466	18	10,6147
3	2,0266	7	3,6250	11	6,5128	15	9,0333	19	10,7795
4	2,6308	8	4,3515	12	6,7705	16	9,9510	20	11,8178

conforme se vê nos detalhes apresentados nas Figuras 5.27(c) e 5.27(d), e na coluna dois da Tabela 5.10. Observe que a análise modal indica uma área crítica, conforme ilustrado no diagrama unifilar do sistema IEEE-118 da Figura 5.28, formada por um conjunto de barras fisicamente interligadas (indicadas em vermelho na figura), e que é propensa ao colapso de tensão.

Nas Figuras 5.27(a) e (b) se podem ver os fatores de participação das barras PV que foram convertidas para barras PQ porque atingiram os seus respectivos limites máximos de potência reativa. Esses fatores de participação também podem ser vistos com maiores detalhes na Figura 5.29 e na coluna dois da Tabela 5.11. Na coluna dez da Tabela 5.11 também podem ser observados os respectivos aumentos na margem de carregamento do sistema após o incremento individual de 10 Mvar no limite máximo de potência reativa de cada um desses geradores (barras PV). Comparando-se as Figuras 5.29(e) e 5.29(f) constata-se que o espectro de aumento na margem de carregamento segue de perto o espectro indicado pelos fatores de participação de barras obtidos com a aplicação da análise modal.

Num sistema de potência, os geradores (barras PV) são considerados como as principais fontes de potência reativa. Os fatores de participação dos geradores (fp_{Gi}) fornecem uma indicação, para cada modo, de quais geradores suprem a maior quantidade de reativo em resposta a uma mudança incremental de potência reativa do sistema. Assim, esses fatores fornecem uma informação importante relacionada com a distribuição das reservas de potência reativa entre todas as máquinas com o objetivo de manter um adequado nível de estabilidade de tensão.

Na Figura 5.29(c) são apresentados os fatores de participação dos geradores correspondentes às barras PV's (coluna um da Tabela 5.11) que atingiram os seus limites máximos de potência reativa, e que foram calculados por meio da equação (3.13) considerando todas as barras PV's do sistema IEEE-118. Na coluna doze da Tabela 5.11 e na Figura 5.29(g) encontram-se apenas os maiores fatores de participação dos geradores das

barras PV's que atingiram os seus limites máximos de potência reativa, e que correspondem às mesmas barras PV's mostradas nas Figuras 5.27(b) e 5.29(e). Comparando-se as Figuras 5.29(e) e 5.29(g) pode-se verificar que apesar da grande diferença de valores numéricos, ambas apresentam um mesmo espectro, i.e., ambas indicam as mesmas barras como mais eficientes para se obter um aumento da margem de carregamento.

Na coluna 2 da Tabela 5.12 encontram-se os maiores fatores de participação dos geradores das barras PV's (coluna 1 da tabela) que não atingiram os seus limites máximos de potência reativa. Observe que a ordem decrescente indicada pelo fp_{Gi} foi primeiramente os dezenove geradores listados na primeira coluna da Tabela 5.12, seguidos pelos dezenove geradores apresentados na décima primeira coluna da Tabela 5.11. De acordo com os resultados apresentados nas colunas oito e dez da Tabela 5.12, o incremento individual de 10 Mvar no limite máximo de potência reativa de cada um desses geradores (barras PV) não resultou em nenhum aumento na margem de carregamento do sistema. Isso já era esperado porque esses geradores ainda dispunham de reserva de geração de potência reativa. Assim, embora tenham sido classificados primeiro que os da décima primeira coluna da Tabela 5.11, mostraram-se ineficazes para o aumento da margem de carregamento. Com base nestas constatações, calculou-se o fator de participação dos geradores considerando-se apenas as barras PV's que atingiram os seus limites máximos de potência reativa. O número das barras seguindo a ordem decrescente dos fp_{Gi} encontram-se apresentados nas colunas treze e catorze da Tabela 5.11 e nas Figuras 5.29(d) e 5.29(h). Comparando-se as Figuras 5.29(e) e 5.29(h) pode-se verificar que agora não há uma grande diferença de valores numéricos, e que ambas apresentam um mesmo espectro, i.e., ambas indicam as mesmas barras como mais eficientes

Tabela 5. 10– Sistema IEEE-118: Valores obtidos pelo método das curvas de perda total de potência reativa versus magnitude de tensão para cada uma das barras de carga (barras PQ), considerando os limites de potência reativos para as barras PV.

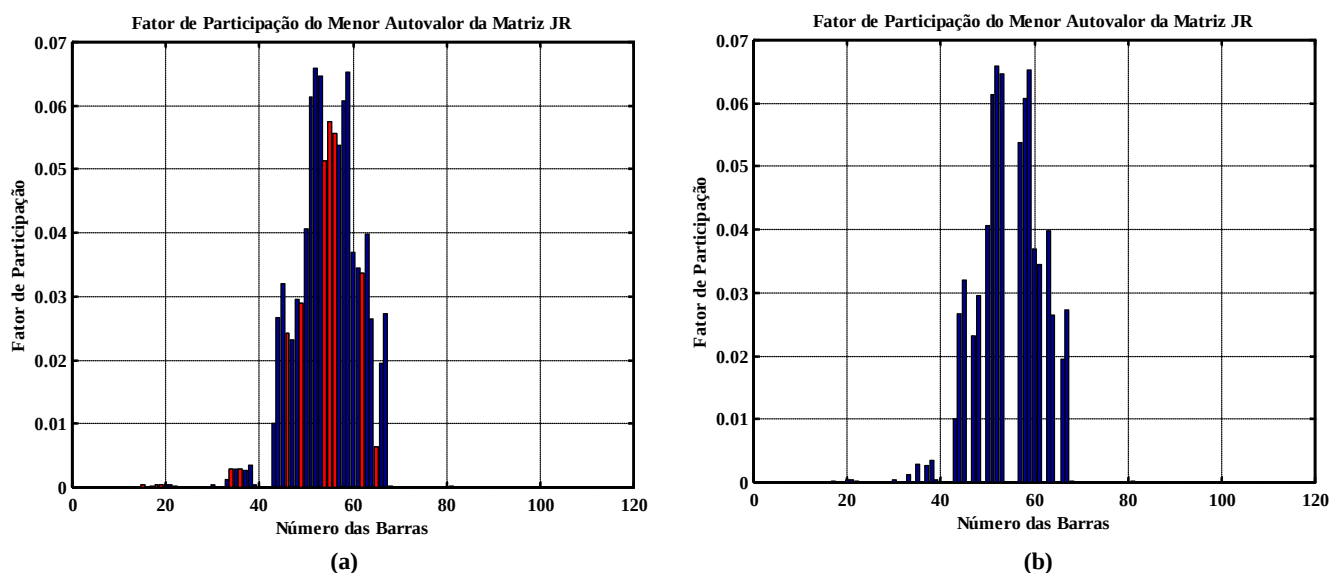
Barra	fp_{ki}	Perda total		Potência do Banco (Mvar)	$ V_{CB} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re	
		Mvar	MW			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/PB	(%)	(%)/PB
52	0,0658	-592,154	131,2817	21,2420	0,9760	1,8475	0,7429	1,1602	0,0546	0,0783	0,0037
59	0,0653	-603,986	130,8150	213,1227	1,0240	1,9505	0,7724	13,4546	0,0631	2,0780	0,0098
53	0,0647	-592,050	131,2907	20,1489	0,9630	1,8468	0,7344	1,0767	0,0534	0,0607	0,0030
51	0,0614	-592,190	131,2776	24,5927	0,9820	1,8492	0,7389	1,3631	0,0554	0,0844	0,0034
58	0,0608	-591,941	131,3192	16,6505	0,9690	1,8453	0,7306	0,8976	0,0539	0,0423	0,0025
57	0,0538	-591,785	131,3479	9,9771	0,9770	1,8423	0,7245	0,5395	0,0541	0,0159	0,0016

Barra	fp _{ki}	Perda total		Potência do Banco (Mvar)	V _{CB} (p.u.)	PMC		GMC		Re	
		Mvar	MW			λ	V (p.u.)	(%)	(%)/PB	(%)	(%)/PB
50	0,0407	-591,767	131,3455	10,4960	1,0070	1,8424	0,7241	0,5515	0,0525	0,0129	0,0012
63	0,0398	-599,892	130,2586	174,0225	1,0400	1,9191	0,7490	9,7066	0,0558	1,3861	0,0080
60	0,0369	-598,810	131,1825	152,7058	1,0460	1,9091	0,7448	8,5130	0,0557	1,2032	0,0079
61	0,0346	-600,176	130,9377	172,9653	1,0490	1,9181	0,7471	9,5872	0,0554	1,4341	0,0083
45	0,0320	-592,034	131,3461	20,1663	1,0010	1,8452	0,7247	0,8857	0,0439	0,0580	0,0029
48	0,0295	-591,698	131,3409	-4,0466	1,0190	1,8361	0,7206	-0,2005	0,0496	0,0012	-0,0003
67	0,0273	-593,584	131,1847	27,5674	1,0210	1,8491	0,7250	1,3512	0,0490	0,3200	0,0116
44	0,0267	-591,864	131,3662	10,5733	0,9980	1,8412	0,7228	0,4082	0,0386	0,0293	0,0028
64	0,0266	-600,827	130,5333	205,4320	1,0480	1,9238	0,7471	10,2676	0,0500	1,5441	0,0075
47	0,0231	-591,730	131,3572	10,6535	1,0210	1,8417	0,7233	0,4679	0,0439	0,0066	0,0006
66	0,0194	-595,685	130,8759	104,6157	1,0430	1,8788	0,7352	4,8963	0,0468	0,6751	0,0065
43	0,0101	-591,844	131,3319	10,4533	0,9900	1,8401	0,7220	0,2769	0,0265	0,0259	0,0025
38	0,0035	-596,585	131,1629	174,1888	1,0500	1,8658	0,7220	3,3446	0,0192	0,8272	0,0047
35	0,0029	-594,218	131,6600	114,1517	1,0220	1,8545	0,7219	1,9958	0,0175	0,4271	0,0037
37	0,0027	-597,323	131,8881	187,4743	1,0320	1,8650	0,7214	3,2491	0,0173	0,9519	0,0051
33	0,0013	-591,852	131,3430	14,9409	0,9790	1,8393	0,7214	0,1814	0,0121	0,0273	0,0018
30	0,0005	-593,899	131,3443	109,0777	1,0270	1,8445	0,7207	0,8021	0,0074	0,3732	0,0034
39	0,0005	-591,917	131,3149	22,2338	0,9770	1,8391	0,7214	0,1576	0,0071	0,0382	0,0017
20	0,0004	-592,497	131,2873	26,5162	0,9810	1,8393	0,7214	0,1814	0,0068	0,1363	0,0051
21	0,0004	-592,843	131,2704	28,5044	0,9890	1,8393	0,7214	0,1814	0,0064	0,1947	0,0068
22	0,0002	-592,908	131,2871	30,2722	0,9980	1,8391	0,7214	0,1576	0,0052	0,2057	0,0068
68	0,0002	-593,649	131,3551	245,2268	1,0200	1,8490	0,7234	1,3393	0,0055	0,3310	0,0013
81	0,0002	-592,871	131,3424	79,2930	1,0290	1,8409	0,7219	0,3724	0,0047	0,1995	0,0025
17	0,0002	-592,181	131,5038	70,3715	0,9980	1,8406	0,7213	0,3366	0,0048	0,0829	0,0012
80	0,0001	-594,546	131,4499	101,1542	1,0260	1,8405	0,7218	0,3247	0,0032	0,4826	0,0048
14	0,0001	-591,691	131,3470	0,8345	0,9840	1,8378	0,7214	0,0024	0,0029	0,0001	0,0001
13	0,0001	-592,068	131,2846	22,3988	0,9820	1,8384	0,7214	0,0740	0,0033	0,0638	0,0028
79	0,0001	-593,487	131,4241	61,9627	1,0140	1,8392	0,7216	0,1695	0,0027	0,3036	0,0049
78	0,0001	-593,564	131,4272	63,9550	1,0070	1,8391	0,7216	0,1576	0,0025	0,3166	0,0050
118	0,0001	-594,560	131,2096	102,2515	1,0060	1,8394	0,7215	0,1934	0,0019	0,4849	0,0047
16	0,0001	-591,815	131,3475	14,4522	0,9910	1,8382	0,7214	0,0501	0,0035	0,0210	0,0015
97	0,0001	-593,577	131,3088	51,9809	1,0200	1,8389	0,7216	0,1337	0,0026	0,3188	0,0061

Barra	fp_{ki}	Perda total		Potência do Banco (Mvar)	$ V_{CB} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re	
		Mvar	MW			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/PB	(%)	(%)/PB
98	0,0001	-592,332	131,3780	28,1758	1,0220	1,8384	0,7215	0,0740	0,0026	0,1084	0,0038
75	0,0001	-594,207	131,4922	129,8603	1,0120	1,8397	0,7214	0,2292	0,0018	0,4253	0,0033
96	0,0000	-595,473	131,4220	108,4340	1,0180	1,8396	0,7217	0,2172	0,0020	0,6392	0,0059
82	0,0000	-594,501	131,6323	87,2847	1,0150	1,8392	0,7216	0,1695	0,0019	0,4750	0,0054
117	0,0000	-591,809	131,3293	8,6860	0,9860	1,8380	0,7214	0,0263	0,0030	0,0200	0,0023
2	0,0000	-592,068	131,2889	34,8340	0,9870	1,8385	0,7214	0,0859	0,0025	0,0638	0,0018
95	0,0000	-595,011	131,0835	80,8624	1,0100	1,8390	0,7216	0,1456	0,0018	0,5612	0,0069
3	0,0000	-592,893	131,1498	50,2823	0,9910	1,8387	0,7214	0,1098	0,0022	0,2032	0,0040
83	0,0000	-594,074	131,5682	72,2247	1,0170	1,8388	0,7216	0,1218	0,0017	0,4028	0,0056
11	0,0000	-592,054	131,2917	53,4365	0,9910	1,8387	0,7214	0,1098	0,0021	0,0614	0,0011
94	0,0000	-594,827	131,1324	102,4883	1,0130	1,8391	0,7216	0,1576	0,0015	0,5301	0,0052
7	0,0000	-591,691	131,3462	5,2370	0,9900	1,8379	0,7214	0,0143	0,0027	0,0001	0,0000
9	0,0000	-597,431	132,4067	234,1774	1,1000	1,8383	0,7207	0,0621	0,0003	0,9702	0,0041
93	0,0000	-593,396	131,1910	54,0675	1,0130	1,8383	0,7215	0,0621	0,0011	0,2882	0,0053
84	0,0000	-593,554	131,4831	56,5540	1,0210	1,8383	0,7215	0,0621	0,0011	0,3149	0,0056
101	0,0000	-592,399	131,2409	29,6348	1,0150	1,8381	0,7215	0,0382	0,0013	0,1197	0,0040
23	0,0000	-593,261	131,4010	80,3379	1,0090	1,8387	0,7214	0,1098	0,0014	0,2654	0,0033
71	0,0000	-591,691	131,3468	0,8601	0,9870	1,8378	0,7214	0,0024	0,0028	0,0001	0,0001
106	0,0000	-592,264	131,3041	50,6271	0,9850	1,8381	0,7215	0,0382	0,0008	0,0969	0,0019
5	0,0000	-592,128	131,4039	98,6116	1,0040	1,8384	0,7207	0,0740	0,0008	0,0739	0,0007
102	0,0000	-592,685	131,2052	40,1419	1,0140	1,8381	0,7215	0,0382	0,0010	0,1680	0,0042
108	0,0000	-591,786	131,3405	12,8118	0,9730	1,8378	0,7215	0,0024	0,0002	0,0161	0,0013
109	0,0000	-591,761	131,3434	12,0798	0,9730	1,8378	0,7215	0,0024	0,0002	0,0119	0,0010
86	0,0000	-592,046	131,4393	37,0486	1,0200	1,8379	0,7215	0,0143	0,0004	0,0600	0,0016
25	0,0000	-593,008	131,2747	71,0762	1,0290	1,8381	0,7214	0,0382	0,0005	0,2226	0,0031
114	0,0000	-591,863	131,3332	30,4849	0,9720	1,8379	0,7214	0,0143	0,0005	0,0291	0,0010
88	0,0000	-592,159	131,3086	54,3526	1,0130	1,8379	0,7215	0,0143	0,0003	0,0791	0,0015
115	0,0000	-591,811	131,3390	28,6351	0,9710	1,8379	0,7214	0,0143	0,0005	0,0203	0,0007
41	0,0000	-591,741	131,3377	11,8955	0,9710	1,8378	0,7214	0,0024	0,0002	0,0085	0,0007
28	0,0000	-591,743	131,3386	8,9069	0,9660	1,8378	0,7214	0,0024	0,0003	0,0088	0,0010
29	0,0000	-591,712	131,3424	6,6449	0,9650	1,8378	0,7214	0,0024	0,0004	0,0036	0,0005

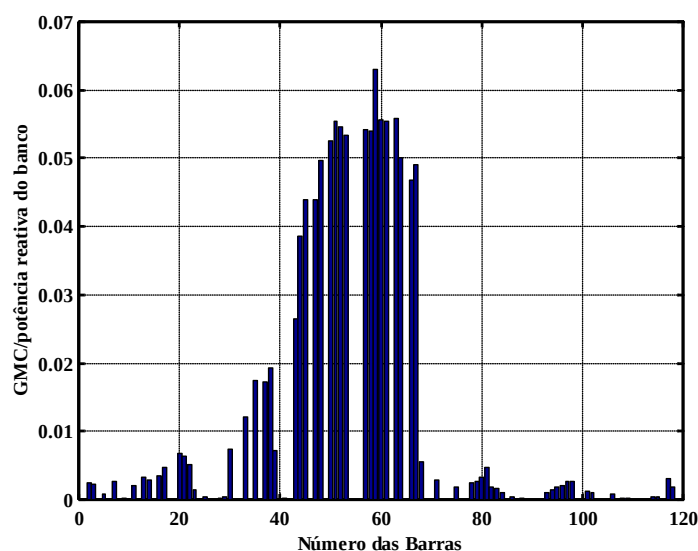
para se obter um aumento da margem de carregamento. Estes resultados mostram que uma vez determinado o fator de participação de barra (fp_{ki}) para as barras PV's que atingiram os seus limites de potência reativa, não se faz necessário o cálculo do fator de participação dos geradores (fp_{Gi}).

Figura 5. 25 – Sistema IEEE-118 barras considerando os limites de potência reativa nas barras PV: (a) Fator de participação de barra (barras PV's e PQ's), e (b) fator de participação de barra (apenas as barras PQ).



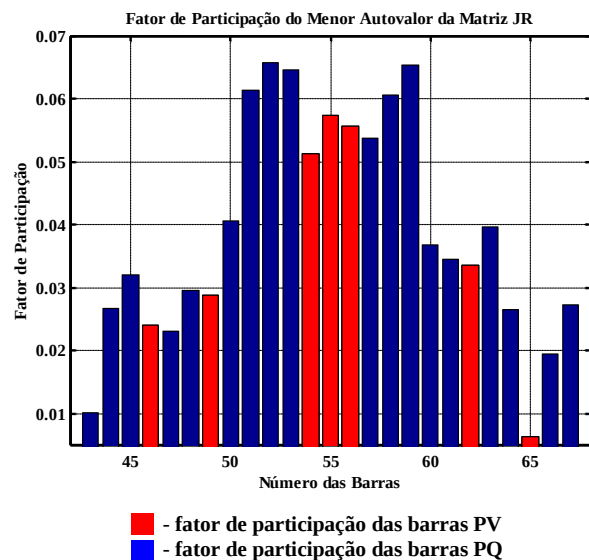
Amorim (2011)

Figura 5. 26 – Aumento na margem de carregamento (após a instalação do banco shunt) em relação a potência do banco de capacitor, considerando os limites de potência reativa nas barras PV.

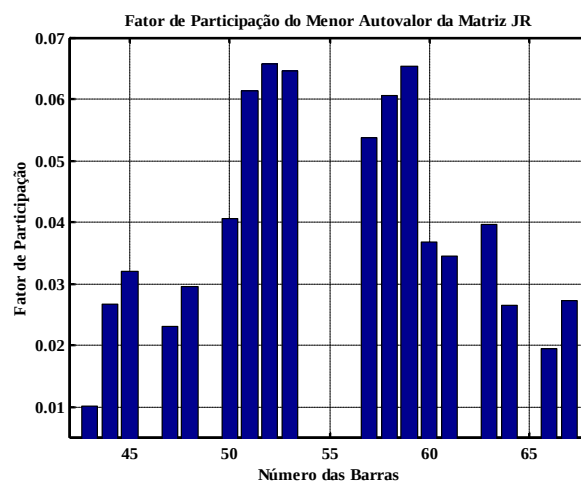


Amorim (2011)

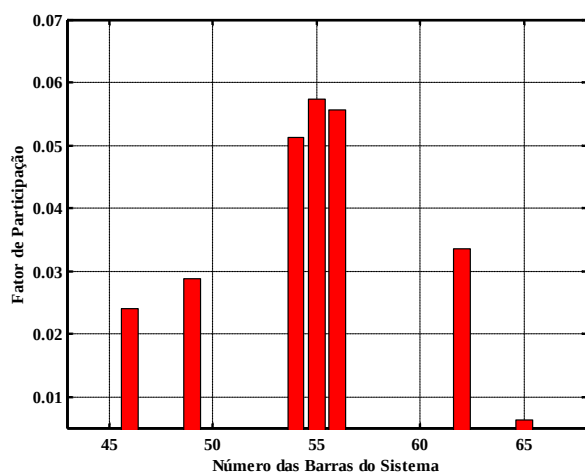
Figura 5. 27 – Sistema IEEE-118: (a) maiores fatores de participação de barra, (b) maiores fatores de participação das barras PV, (c) maiores fatores de participação das barras PQ, (d) maiores ganhos na margem de carregamento (após a instalação do banco shunt obtido pelo método) em relação à potência do banco de capacitor (somente barras PQ).



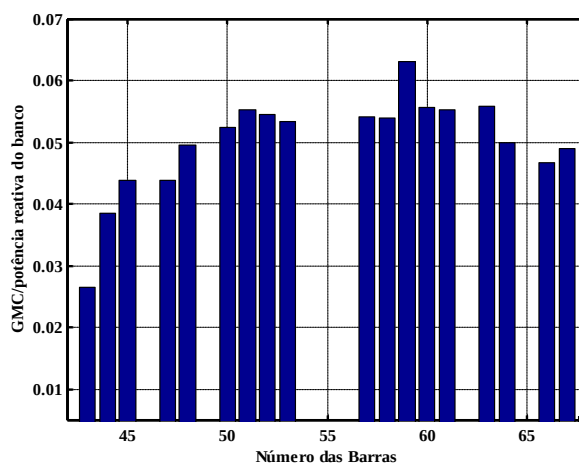
(a)



(b)



(c)



(d)

Amorim (2011)

Figura 5. 28 – Diagrama unifilar do sistema IEEE 118 com as barras indicadas pelo fator de participação de barra correspondente ao modo crítico.

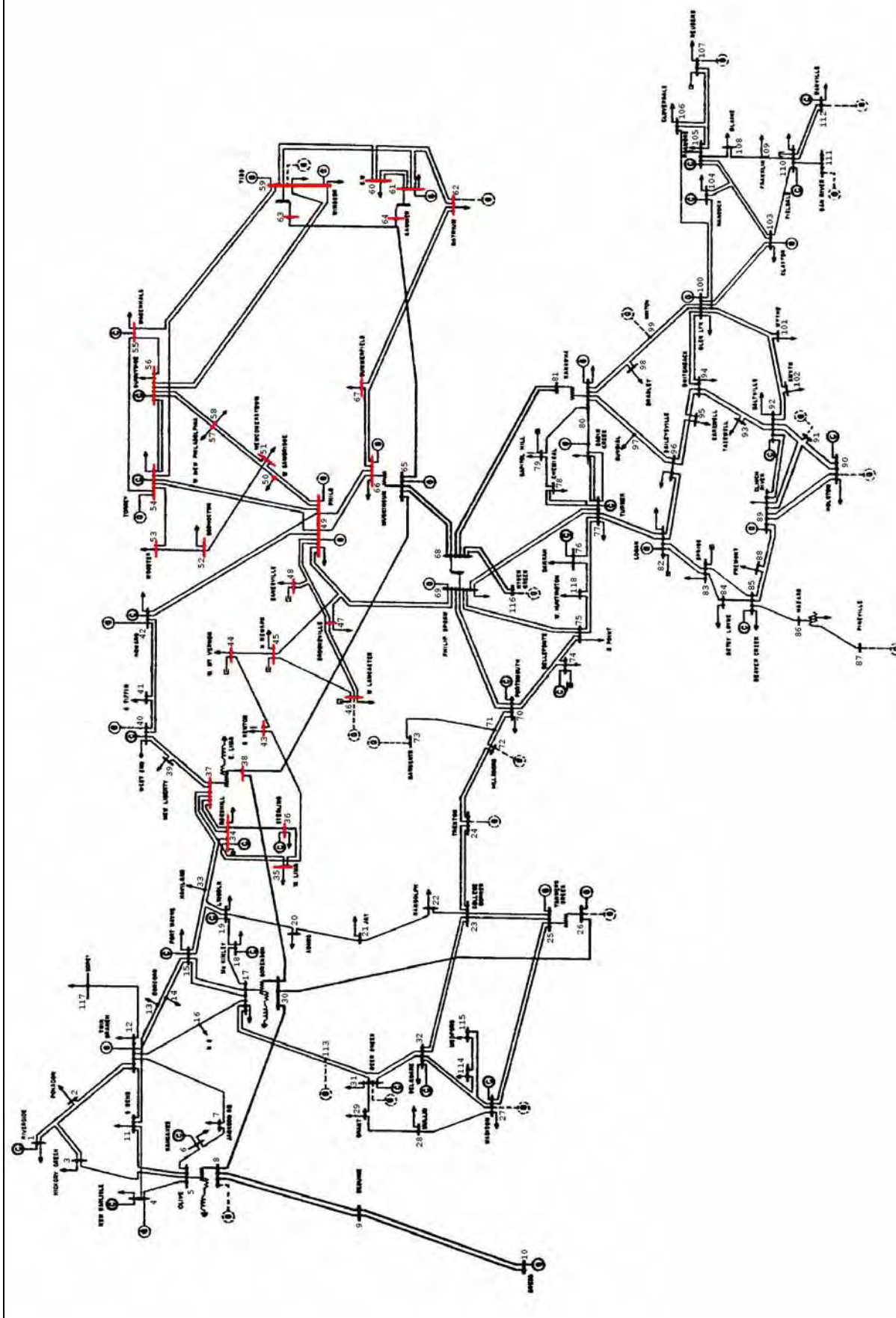


Figura 5. 29 – Resultados para o sistema IEEE-118, para as barras PV convertidas para PQ: (a) fator de participação das barras, (b) ganho na margem de carregamento após o incremento de 10 Mvar no limite máximo de potência reativa da barra, (c) fatores de participação dos geradores (fp_{Gi}) calculados considerando todas as barras PV, (d) fp_{Gi} calculados considerando apenas as barras PV convertidas para PQ, (e) maiores fatores de participação das barras PV, (f) maiores ganhos na margem de carregamento após o incremento de 10 Mvar no limite máximo de potência reativa das barras PV, (g) detalhe da figura (c) apresentando os fp_{Gi} correspondente às barras PV da figura (e), e (h) detalhe da figura (d) apresentando os fp_{Gi} correspondentes às barras PV da figura (e).

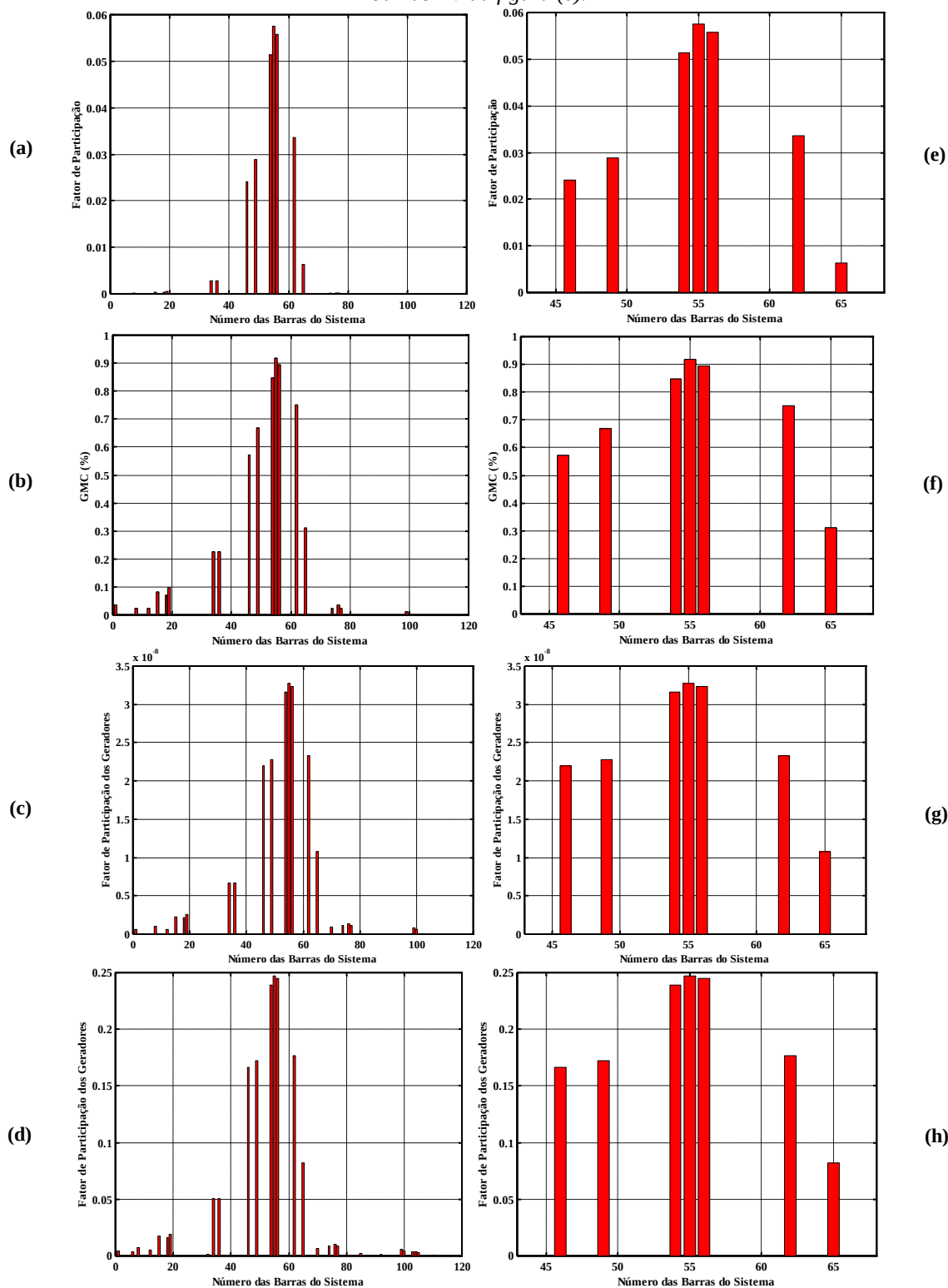


Tabela 5. 11– Aumento na margem de carregamento do sistema IEEE-118 após o incremento individual de 10 Mvar no limite máximo de potência reativa das barras PV's convertidas para PQ.

NB	fp _{ki}	Limites de Potência Reativa Gerada (Mvar)		Potência Reativa Gerada Caso Base (Mvar)	V _{CB} (p.u.)	V _{esp} (p.u.)	PMC		GMC (%)	Caso I ⁽¹⁾		Caso II ⁽²⁾	
		Min.	Max.				λ	V (p.u.)		NB	fp _{Gi} (×10 ⁻⁷)	NB	fp _{Gi}
55	0,0575	-8,00	23,00	20,4632	0,9520	0,9520	1,8455	0,7241	0,919	55	0,3270	55	0,2473
56	0,0557	-8,00	15,00	15,0000	0,9536	0,9540	1,8453	0,7243	0,895	56	0,3237	56	0,2448
54	0,0514	-300,00	300,00	20,5121	0,9555	0,9555	1,8449	0,7244	0,847	54	0,3164	54	0,2393
62	0,0336	-20,00	20,00	20,0000	0,9921	0,9980	1,8441	0,7216	0,752	62	0,2335	62	0,1766
49	0,0288	-85,00	210,00	185,2607	1,0250	1,0250	1,8434	0,7229	0,668	49	0,2278	49	0,1723
46	0,0241	-100,00	100,00	-5,3382	1,0050	1,0050	1,8426	0,7226	0,572	46	0,2201	46	0,1665
65	0,0064	-67,00	200,00	-67,0000	1,0120	1,0050	1,8404	0,7217	0,310	65	0,1082	65	0,0818
36	0,0029	-8,00	240,00	14,4035	0,9800	0,9800	1,8397	0,7213	0,226	36	0,0671	36	0,0508
34	0,0029	-8,00	240,00	21,5997	0,9840	0,9840	1,8397	0,7213	0,226	34	0,0671	34	0,0508
19	0,0005	-8,00	240,00	-8,0000	0,96280	0,9620	1,8386	0,7214	0,095	19	0,0257	19	0,0194
15	0,0004	-10,00	30,00	16,0538	0,9700	0,9700	1,8385	0,7214	0,083	15	0,0229	15	0,0173
18	0,0003	-16,00	50,00	34,8032	0,9730	0,9730	1,8384	0,7214	0,071	18	0,0212	18	0,0161
76	0,0001	-8,00	23,00	16,1402	0,9430	0,9430	1,8381	0,7215	0,035	76	0,0136	76	0,0103
77	0,0001	-20,00	70,00	70,0000	0,9913	1,0060	1,8380	0,7215	0,023	74	0,0117	74	0,0088
8	0,0001	-300,00	300,00	-33,4786	1,0150	1,0150	1,8380	0,7214	0,023	77	0,0116	77	0,0088
74	0,0001	-60,00	90,00	-2,2900	0,9580	0,9580	1,8380	0,7214	0,023	8	0,0100	8	0,0076
1	0,0000	-5,00	15,00	-1,4943	0,9550	0,9550	1,8381	0,7214	0,035	70	0,0092	70	0,0069
12	0,0000	-35,00	120,00	96,1562	0,9900	0,9900	1,8380	0,7214	0,023	99	0,0079	99	0,0059
99	0,0000	-100,00	100,00	0,9197	1,0100	1,0100	1,8379	0,7215	0,011	12	0,0066	12	0,0050

⁽¹⁾ Fatores de participação dos geradores calculados considerando todas as barras PV's.

⁽²⁾ Fatores de participação dos geradores calculados considerando apenas as barras PV's que atingiram os seus limites máximos de potência reativa.

Tabela 5. 12– Aumento na margem de carregamento do sistema IEEE-118 após o incremento individual de 10 Mvar no limite máximo de potência reativa das barras PV (geradores).

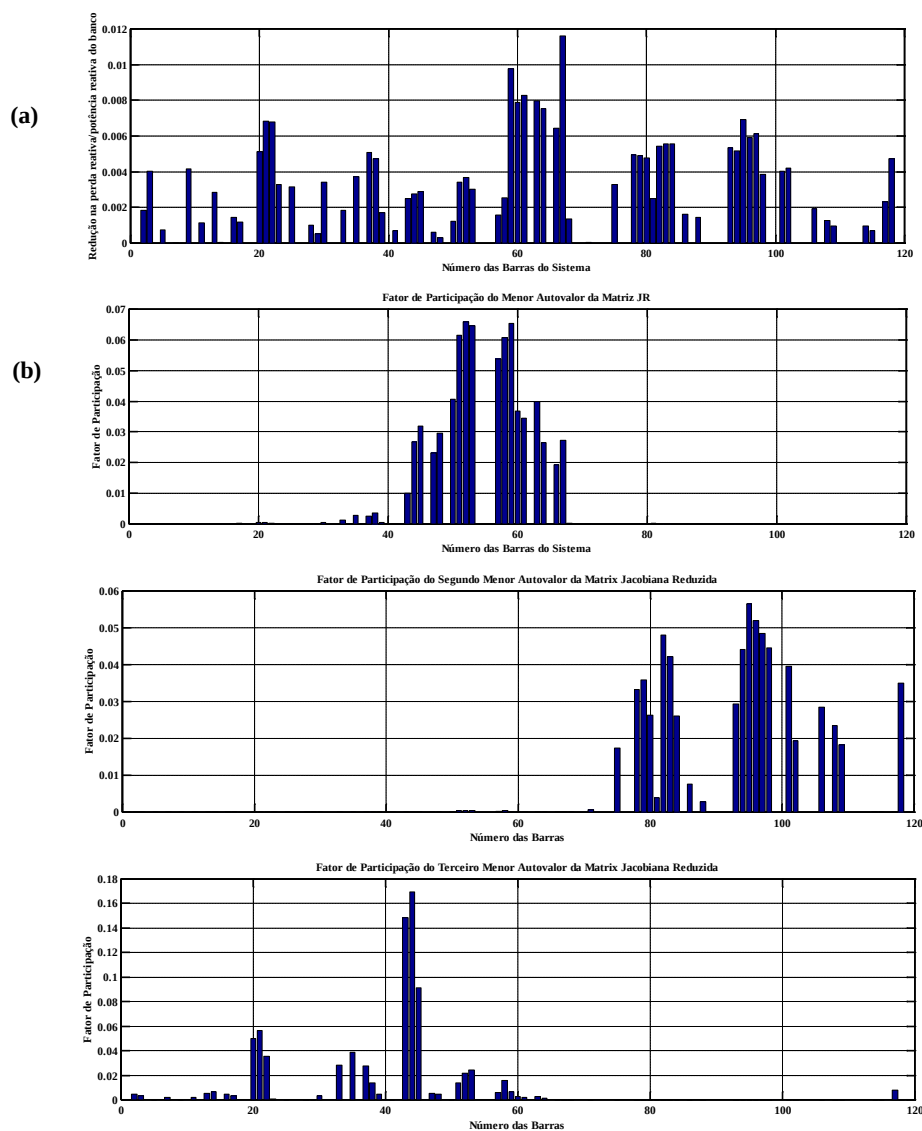
NB	fp_{Gi}	Limites de Potência Reativa Gerada (Mvar)		Potência Reativa Gerada Caso Base (Mvar)	$ V_{CB} $ (p.u.)	$ V_{esp} $ (p.u.)	PMC		GMC (%)
		Min.	Max.				λ	$ V $ (p.u.)	
116	1,0000	-1000,00	1000,0	-158,4030	1,0050	1,0050	1,8378	0,7214	0,0
42	0,3409	-300,00	300,00	40,5357	0,9850	0,9850	1,8378	0,7214	0,0
40	0,1836	-300,00	300,00	33,5971	0,9700	0,9700	1,8378	0,7214	0,0
113	0,1068	-100,00	200,00	19,9989	0,9930	0,9930	1,8378	0,7214	0,0
4	0,0908	-300,00	300,00	29,4026	0,9980	0,9980	1,8378	0,7214	0,0
26	0,0818	-1000,00	1000,0	-27,0040	1,0150	1,0150	1,8378	0,7214	0,0
10	0,0375	-147,00	200,00	51,0422	1,0500	1,0500	1,8378	0,7214	0,0
24	0,0263	-300,00	300,00	9,8506	0,9920	0,9920	1,8378	0,7214	0,0
31	0,0236	-300,00	300,00	35,1132	0,9670	0,9670	1,8378	0,7214	0,0
73	0,0228	-100,00	100,00	9,6446	0,9910	0,9910	1,8378	0,7214	0,0
89	0,0203	-210	300,00	-8,2958	1,0050	1,0050	1,8378	0,7214	0,0
27	0,0147	-300,00	300,00	28,3713	0,9680	0,9680	1,8378	0,7215	0,0
72	0,0113	-100,00	100,00	-11,1426	0,9800	0,9800	1,8378	0,7215	0,0
107	0,0082	-200,00	200,00	5,6951	0,9520	0,9520	1,8378	0,7214	0,0
112	0,0045	-100,00	1000,0	41,5117	0,9750	0,9750	1,8378	0,7214	0,0
91	0,0038	-100,00	100,00	-13,8067	0,9800	0,9800	1,8378	0,7214	0,0
111	0,0036	-100,00	1000,0	-1,8438	0,9800	0,9800	1,8378	0,7214	0,0
87	0,0022	-100,00	1000,0	11,0216	1,0150	1,0150	1,8378	0,7214	0,0
90	0,0001	-300,00	300,00	59,3032	0,9850	0,9850	1,8378	0,7214	0,0

Na Figura 5.30(a) e na coluna 12 da Tabela 5.10 apresentam-se os valores da redução na perda total de potência reativa (coluna 11 da tabela) em relação a potência do banco de capacitor (coluna 5 da tabela). De acordo com o apresentado na coluna 12 da Tabela 5.10, a maior redução, $(-591,691 - (-603,986)) = 12,295$ Mvar ou 2,078%) em relação ao caso base $(-591,6907$ Mvar), na perda total de potência reativa ocorre com a inclusão de um banco de 213,123 Mvar junto a barra 59, e que também é a barra que propicia o maior aumento na margem de carregamento. Do ponto de vista de eficiência da compensação *shunt*, as barras mais eficientes para se efetuar a compensação *shunt* visando a redução das perdas foram as barras 67, 59, 61, 63, 60 e 64. Essas barras também figuram entre as mais indicadas pelos fatores de participação correspondentes ao modo mais crítico conforme se pode ver na Figura 5.31(c) (ou na Figura 5.27(c)). Observe que apesar da barra 67 ser indicada como um pouco mais eficiente no que se refere a redução da perda total de potência reativa em relação à potência do banco de capacitor (ver Figura 5.31(a)), a barra 59 é a mais eficiente como se pode confirmar na Figura 5.31(b), onde se apresenta a redução na perda total de potência

reativa após a instalação individual de um banco *shunt* de 10 Mvar em cada barra. Observe também destas figuras que apesar dos valores dos fatores de participação das barras 51, 52, 53, 57 e 58 serem da mesma ordem do da barra 59, essas barras não apresentaram, no que se refere a redução da perda total de potência reativa, o mesmo desempenho que tiveram para o aumento na margem de carregamento.

Na Figura 5.30 são apresentados também os fatores de participação correspondentes aos cinco menores autovalores. Como se pode constatar, alguns grupos de barras são indicadas pelos fatores de participação de outros autovalores.

Figura 5. 30 – Sistema IEEE-118 considerando os limites de potência reativa nas barras PV: (a) Redução na perda total de potência reativa em relação à potência do banco de capacitor, (b) fatores de participação dos cinco menores autovalores.



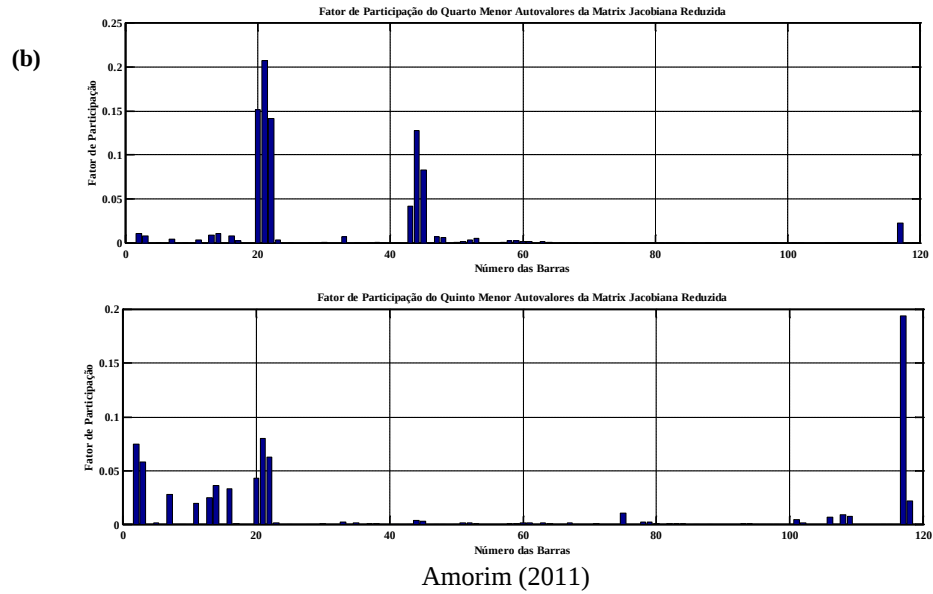
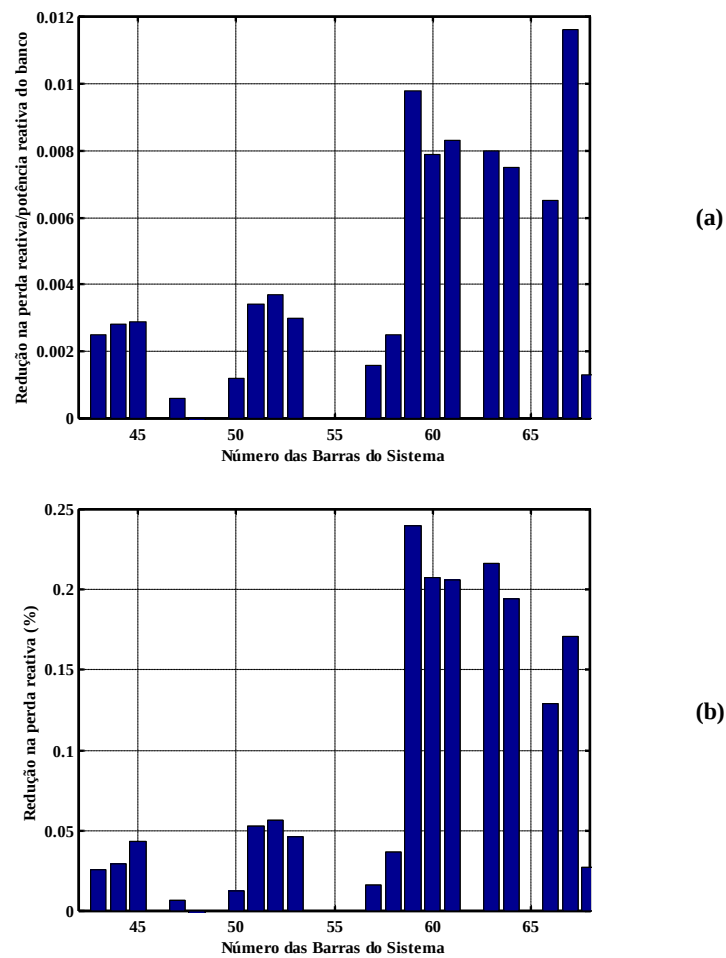
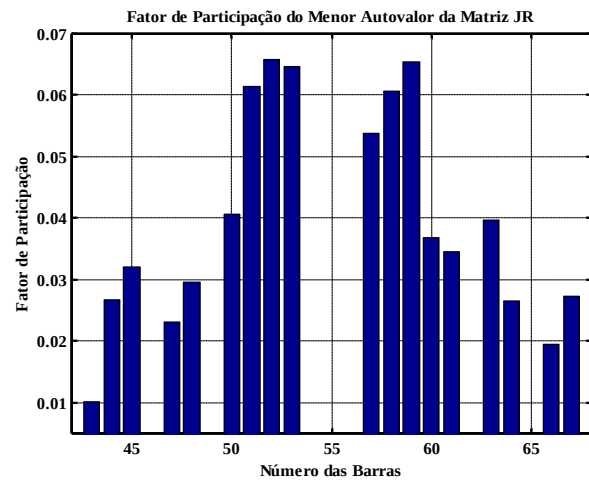


Figura 5. 31 – Sistema IEEE-118 considerando os limites de potência reativa nas barras PV: (a) Redução na perda total de potência reativa em relação à potência do banco de capacitor, (b) redução na perda total de potência reativa após a instalação individual de um banco shunt de 10 Mvar em cada barra, c) maiores fatores de participação das barras PQ.





(c)

Amorim (2011)

5.4.5 Compensação série

A definição de quais linhas de transmissão (LT) devem ser compensadas por meio de capacitor série é baseada nos fp_{kli} fornecidos pela análise modal. A potência reativa fornecida pelo capacitor série é proporcional ao quadrado da corrente e é independente das tensões das barras. Assim, considerou-se um valor fixo para a X_c (em p.u.) que corresponde a um grau de compensação de 50% e esse será o valor a ser especificado para o banco de dados.

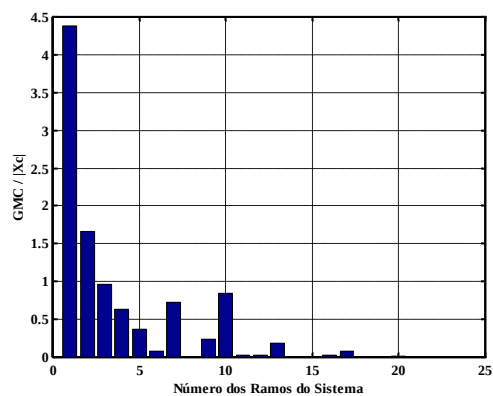
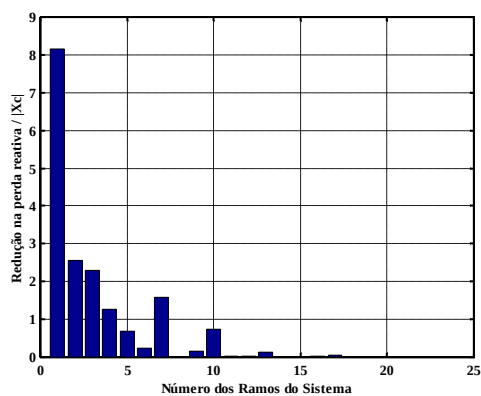
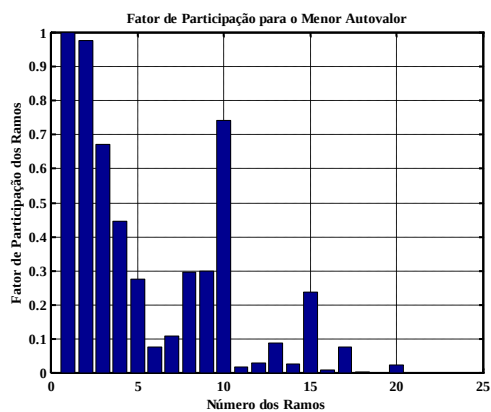
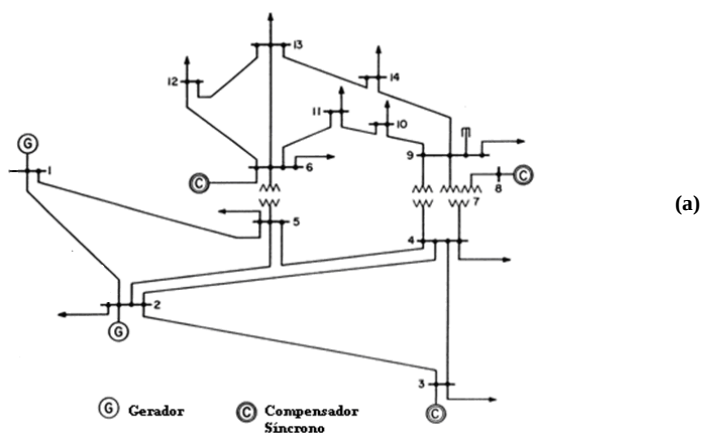
Na Tabela 5.13 são apresentados para o IEEE-14, os efeitos na redução da perda total de potência reativa (Re) e no ganho de margem de carregamento (GMC) por meio da inclusão de capacitor série baseada nos fatores de participação dos ramos (fp_{kli}) fornecidos pela análise modal conforme apresentado na Figura 5.32(b). Nesse caso foram considerados os limites de geração de potência reativa. Assim, através da instalação de um banco de capacitor série é possível obter uma redução de até 28,52% do valor da perda total de potência reativa do caso base (26,8085 Mvar), e um aumento de 18,55% na margem de carregamento do caso base (1,7444 p.u.). Na Figura 5.32(c) pode-se ver os valores da redução das perdas reativas normalizados por X_c (coluna 5 da Tabela 5.13). Observe que no caso deste sistema os fp_{kli} são

Tabela 5. 13– Valores obtidos pela compensação série para o sistema IEEE-14.

Ramo			X (%)	X _c (%)	Perda Total		Re (%)	$\lambda_{\max}$	GMC [%]
NR	De	Para			MW	Mvar			
1	1	2	5,917	2,959	14,0428	20,3372	24,1390	1,8410	12,9769
2	1	5	22,304	11,152	13,6583	19,1640	28,5152	1,8825	18,5519
3	2	3	19,797	9,898	13,4064	20,7107	22,7458	1,8153	9,5244
4	2	4	17,632	8,816	14,2550	23,7857	11,2755	1,7856	5,5347
5	2	5	17,388	8,694	13,8906	25,2383	5,8571	1,7681	3,1838
6	3	4	17,103	8,5515	13,5281	26,2885	1,9397	1,7495	0,6851
7	4	5	4,211	2,105	13,3854	25,9126	3,3419	1,7558	1,5314
9	4	9	55,618	27,809	13,3901	25,6877	4,1808	1,7926	6,4750
10	5	6	25,202	12,600	13,4323	24,3308	9,2422	1,8233	10,5991
11	6	11	19,890	9,940	13,3579	26,7664	0,1570	1,7460	0,2149
12	6	12	25,581	12,791	13,3738	26,7302	0,2921	1,7471	0,3627
13	6	13	13,027	6,514	13,3705	26,5859	0,8303	1,7533	1,1956
16	9	10	8,450	4,225	13,3601	26,7747	0,1261	1,7454	0,1343
17	9	14	27,038	13,519	13,3672	26,6240	0,6882	1,7527	1,1150
18	10	11	19,207	9,604	13,3578	26,8006	0,0295	1,7447	0,0403
19	12	13	19,988	9,994	13,3596	26,8066	0,0071	1,7445	0,0134
20	13	14	34,802	17,401	13,3626	26,7641	0,1656	1,7464	0,2687

Os ramos 8 (4-7), 14 (7-8) e 15 (7-9) não foram considerados por tratar-se de um transformador de enrolamentos.

Figura 5. 32 – Resultados da compensação série de 50% para o sistema IEEE-14: (a) diagrama unifilar, (b) fatores de participação dos ramos, (c) redução na perda total de potência reativa normalizado por X_c , (d) ganho na margem de carregamento normalizado por X_c .



bons indicadores para a alocação de banco de capacitores série.

Na Tabela 5.14 são apresentados para o IEEE-57, os efeitos na redução da perda total de potência reativa (Re) e no ganho de margem de carregamento (GMC) considerando os limites de geração de potência reativa. Para isso considerou-se a inclusão de capacitor série baseada nos fatores de participação dos ramos (fp_{kli}) fornecidos pela análise modal conforme apresentado na Figura 5.33(a). Foram escolhidos os cinco primeiros ramos (veja primeira coluna da Tabela 5.14) indicados pelos fp_{kli} correspondentes aos cinco menores autovalores da Tabela 5.7, e que se encontram na Tabela 5.15. Observe também que alguns ramos, como foi o caso do de número 46 localizado entre as barras 32 e 34, foram indicados por mais de um fp_{kli} . Também foi incluído nas análises o ramo 48 (localizado entre as barras 35 e 36), que corresponde ao ramo crítico, i.e., aquele que conduz a maior redução na margem de carregamento do sistema quando de sua retirada.

Obteve-se uma redução de até 16,06% no valor da perda total de potência reativa do caso base (4,0109 Mvar), e um aumento de 13,99% na margem de carregamento do caso base (1,6033 p.u.). Na Figura 5.33 pode-se ver os resultados da compensação série de 50% aplicada a cada um dos ramos escolhidos. Na Figura 5.33(a) encontram-se todos os fatores de participação dos ramos correspondente ao modo crítico ($\lambda=9,264 \times 10^{-7}$) enquanto que nas Figuras 5.33(b) e 5.33(c) apresentam-se os respectivos ganho na margem de carregamento e ganho na margem de carregamento normalizado por X_c . Da Figura 5.33(b) se verifica que o espectro segue o do fp_{kli} da Figura 5.33(a), porém do ganho na margem de carregamento normalizado por X_c observa-se que as compensações dos ramos 15 e 66 se mostram mais eficientes do que a dos ramos 46, 35 e 36. O mesmo comportamento é constatado com relação a redução na perda total de potência reativa normalizado por X_c (coluna 9 da Tabela 5.14 e Figura 5.33(d)). Esses resultados podem ser confirmado a partir dos resultados apresentados na Tabela 5.16 e Figura 5.34 onde são apresentados os ganho na margem de carregamento e redução na perda total de potência reativa obtidos considerando uma compensação série de 5% individualmente em cada um dos ramos escolhidos.

Tabela 5. 14– Valores obtidos para o sistema IEEE-57 com compensação série de 50% do valor de X.

Ramo			X (%)	Xc (%)	Perda Total		Re		$\lambda_{\max}$	GMC	
NR	De	Para			MW	Mvar	(%)	(%)/ Xc		(%)	(%)/ Xc
46	34	32	95,30	47,65	27,5147	3,3668	16,0587	0,3370	1,6877	13,9897	0,2936
35	24	25	118,20	59,10	27,4881	3,2403	19,2126	0,3251	1,6813	12,9289	0,2188
36	24	25	123,00	61,50	27,4888	3,2605	18,7090	0,3042	1,6792	12,5808	0,2046
15	1	15	9,10	4,55	27,4132	-9,7767	343,7530	75,5501	1,6210	2,9339	0,6448
66	13	49	19,10	9,55	27,0505	1,5443	61,4974	6,4395	1,6323	4,8069	0,5033
54	11	41	74,90	37,45	27,5128	3,0599	23,7104	0,6331	1,6148	1,9062	0,0509
44	31	32	75,50	37,75	27,5290	3,9819	0,7230	0,0192	1,6113	1,3260	0,0351
43	30	31	49,70	24,85	27,5196	3,8936	2,9245	0,1177	1,6150	1,9393	0,0780
56	41	43	41,20	20,60	27,5143	3,2954	17,8389	0,8660	1,6124	1,5084	0,0732
20	4	18	43,00	21,50	27,5221	2,9361	26,7970	1,2464	1,6064	0,5138	0,0239
50	37	38	10,09	5,045	27,5027	3,6304	9,4866	1,8804	1,6170	2,2708	0,4501
48	35	36	5,37	2,685	27,5209	3,9056	2,6253	0,9778	1,6104	1,1769	0,4383

Tabela 5. 15– Fatores de participação de ramos do sistema IEEE-57, obtidos para o PMC (1,6033 p.u.).

Fator de Participação de Ramos																			
$\lambda_1=9,264 \times 10^{-7}$				$\lambda_2=0,3291$				$\lambda_3=0,5119$				$\lambda_4=0,6609$				$\lambda_5=0,9006$			
NR	k	l	fp _{kli}	NR	k	l	fp _{kli}	NR	k	l	fp _{kli}	NR	k	l	fp _{kli}	NR	k	l	fp _{kli}
46	34	32	1,0000	46	34	32	1,0000	46	34	32	1,0000	54	11	41	1,0000	46	34	32	1,0000
35	24	25	0,7505	15	1	15	0,9393	44	31	32	0,9896	56	41	43	0,9010	66	13	49	0,7088
36	24	25	0,7212	35	24	25	0,5793	35	24	25	0,9306	20	4	18	0,7679	50	37	38	0,5984
15	1	15	0,5130	54	11	41	0,5686	43	30	31	0,9112	15	1	15	0,7430	54	11	41	0,5419
66	13	49	0,2437	36	24	25	0,5567	36	24	25	0,8943	66	13	49	0,7226	20	4	18	0,5297
48	35	36	0,0912	48	35	36	0,0090	48	35	36	0,0962	48	35	36	0,0492	48	35	36	0,1641

Tabela 5. 16– Valores obtidos para o sistema IEEE-57 com compensação série de 5%.

Ramo			X (%)	Xc (%)	Perda Total		Re (%)	$\lambda_{\max}$	GMC [%]
NR	De	Para			MW	Mvar			
46	34	32	95,30	5	27,5235	3,9465	1,6056	1,6119	1,4255
35	24	25	118,20	5	27,5241	3,9607	1,2516	1,6083	0,8288
36	24	25	123,00	5	27,5243	3,9645	1,1568	1,6079	0,7625
15	1	15	9,10	5	27,5526	-11,5055	386,8558	1,6221	3,1162
66	13	49	19,10	5	27,2775	2,8998	27,7020	1,6166	2,2045
54	11	41	74,90	5	27,5249	3,9195	2,2788	1,6044	0,1823
44	31	32	75,50	5	27,5276	4,0072	0,0922	1,6043	0,1658
43	30	31	49,70	5	27,5256	3,9878	0,5759	1,6057	0,3978
56	41	43	41,20	5	27,5233	3,8617	3,7199	1,6052	0,3149
20	4	18	43,00	5	27,5251	3,8112	4,9789	1,6039	0,0995
50	37	38	10,09	5	27,5029	3,6339	9,3994	1,6169	2,2543
48	35	36	5,37	5	27,5157	3,8147	4,8917	1,6165	2,1880

Figura 5. 33 – Resultados da compensação série de 50% para o sistema IEEE-57: (a) fatores de participação dos ramos, (b) ganho na margem de carregamento, (c) ganho na margem de carregamento normalizado por X_c (d) redução na perda total de potência reativa normalizado por X_c .

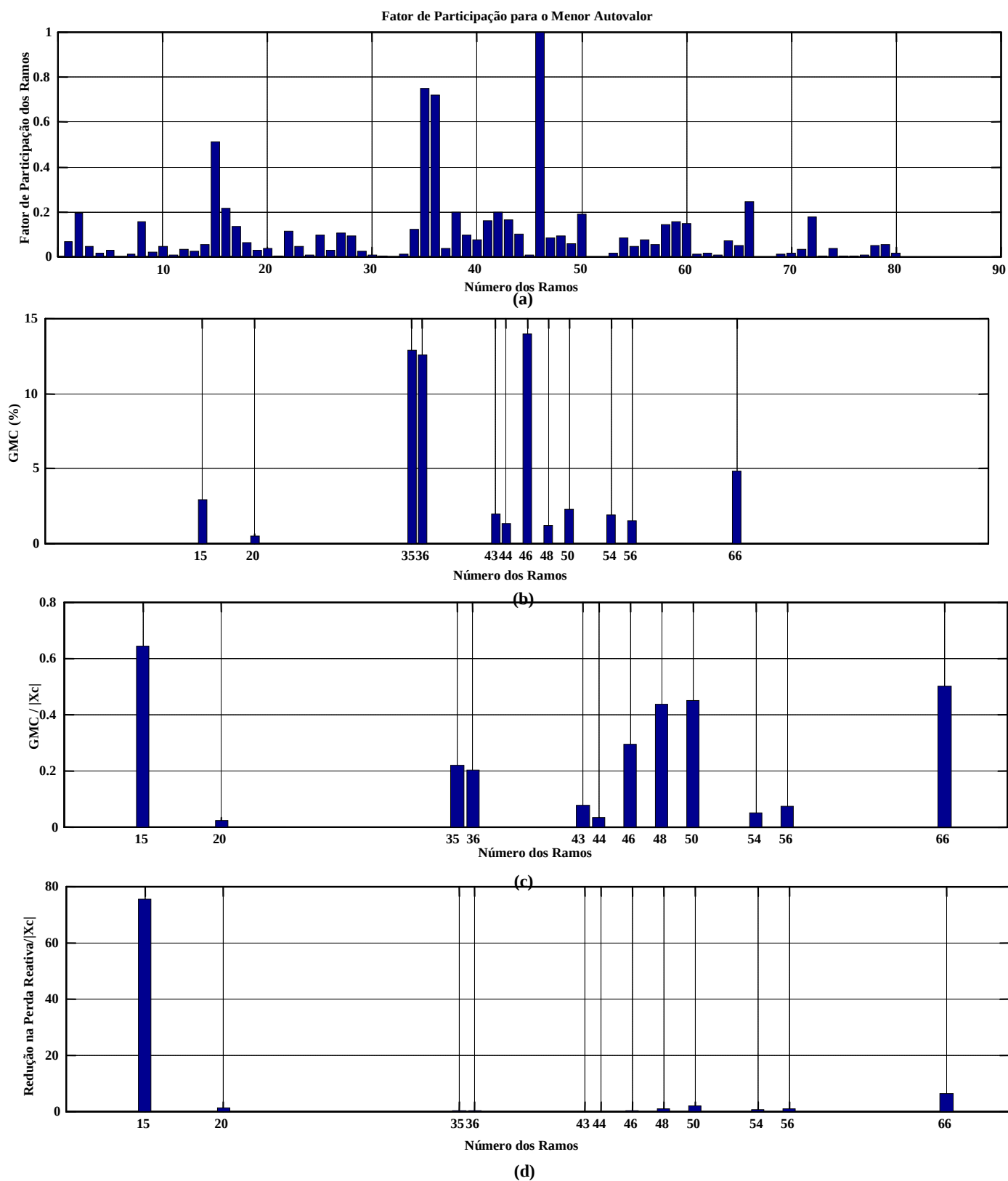
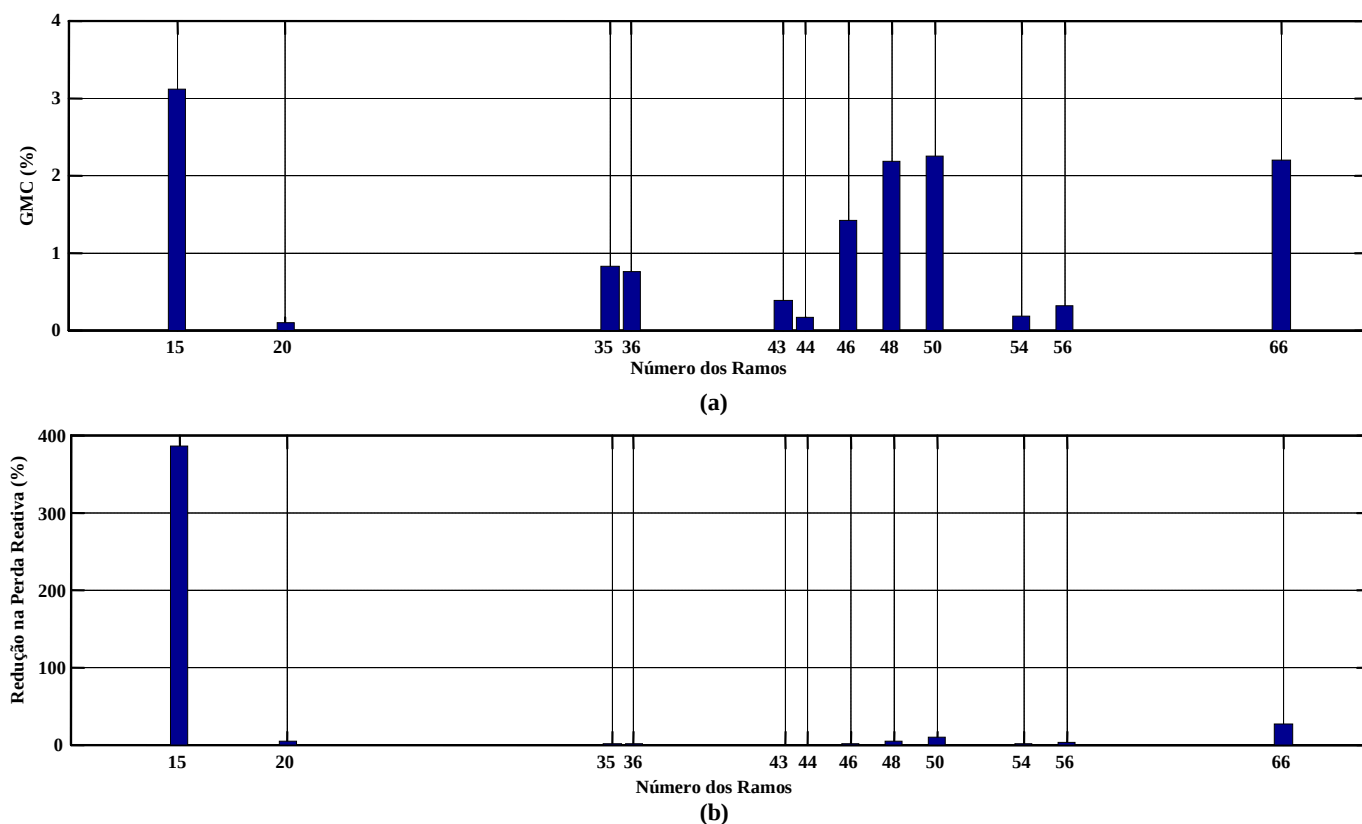


Figura 5. 34 – Resultados da compensação série de 5% para o sistema IEEE-57: (a) ganho na margem de carregamento, (b) redução na perda total de potência reativa.



Amorim (2011)

A redução da perda total de potência reativa (Re) e o ganho de margem de carregamento (GMC) obtidos para o IEEE-118, considerando os limites de geração de potência reativa, podem ser vistos na Tabela 5.17. Os valores foram alcançados considerando-se a inclusão de capacitores série de acordo com os fatores de participação dos ramos (fp_{kli}) fornecidos pela análise modal. Similar ao feito na análise do IEEE-57, foram escolhidos os seis primeiros ramos (veja primeira coluna da Tabela 5.17) indicados pelos fp_{kli} correspondentes aos cinco menores autovalores e que podem ser vistos na Tabela 5.18. Observe novamente que alguns ramos, como foi o caso dos de números 96 e 97, foram indicados por mais de um fp_{kli} . Também foi incluído nas análises o ramo 8 (localizado entre as barras 8 e 5), que corresponde ao ramo crítico, i.e., aquele que conduz a maior redução (70%) na margem de carregamento do caso base, quando de sua retirada.

Tabela 5. 17– Valores obtidos para o sistema IEEE-118 com compensação série de 50% do valor de X.

Ramos			X (%)	Xc (%)	Perda Total		Re (%)	$\lambda_{\max}$	GMC	
NR	De	Para			MW	Mvar			(%)	(%)/ Xc
96	38	65	9,86	4,930	129,4358	-608,7812	2,8884	1,8750	4,4402	0,9006
97	64	65	3,02	1,510	130,5784	-598,8190	1,2047	1,8898	6,2067	4,1104
104	65	68	1,60	0,800	131,3014	-592,7265	0,1751	1,8786	4,8699	6,0874
93	63	59	3,86	1,930	130,2363	-597,7668	1,0269	1,8769	4,6670	2,4181
105	47	69	27,78	13,890	133,7507	-597,3231	0,9519	1,8418	0,4774	0,0344
106	49	69	32,40	16,200	133,9377	-596,3761	0,7919	1,8381	0,0358	0,0022
119	69	77	10,10	5,050	131,7820	-594,5542	0,4840	1,8393	0,1790	0,0355
116	69	75	12,20	6,100	133,2600	-601,2822	1,6210	1,8413	0,4178	0,0685
174	103	110	18,13	9,065	131,3399	-595,8420	0,7016	1,8381	0,0358	0,0040
127	81	80	3,70	1,850	131,3007	-592,3948	0,1190	1,8367	-0,1313	-0,0710
163	100	103	5,25	2,625	131,6319	-595,7607	0,6879	1,8380	0,0239	0,0091
108	69	70	12,70	6,350	131,3620	-594,9650	0,5534	1,8403	0,2984	0,0470
66	42	49	3,23	1,615	131,3881	-592,4097	0,1215	1,8396	0,2148	0,1330
67	42	49	3,23	1,615	131,3881	-592,4097	0,1215	1,8396	0,2148	0,1330
53	37	40	16,80	8,400	131,7656	-593,6161	0,3254	1,8464	1,0265	0,1222
51	38	37	3,75	1,875	130,2783	-603,5479	2,0040	1,8558	2,1485	1,1459
38	26	30	8,60	4,300	130,5227	-612,2423	3,4734	1,8440	0,7400	0,1721
60	34	43	16,81	8,405	131,3145	-591,7236	0,0056	1,8405	0,3223	0,0383
178	17	113	3,01	1,505	131,3592	-591,7643	0,0124	1,8409	0,3700	0,2459
33	25	27	16,30	8,150	133,2463	-610,3777	3,1582	1,8383	0,0597	0,0073
29	22	23	15,90	7,950	131,6825	-594,3696	0,4528	1,8395	0,2029	0,0255
4	3	5	10,80	5,400	131,9201	-597,5133	0,9841	1,8379	0,0119	0,0022
118	76	77	14,80	7,400	131,8903	-594,9267	0,5469	1,8387	0,1074	0,0145
8	8	5	2,67	1,335	131,7216	-606,9361	2,5766	1,8381	0,0358	0,9006

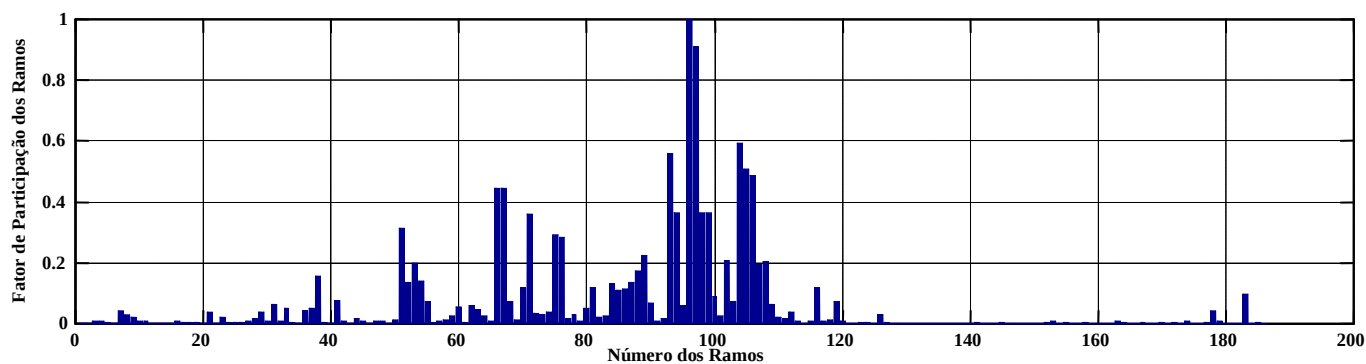
Tabela 5. 18– Fatores de participação de ramos do sistema IEEE-118, obtidos para o PMC (1,8378 p.u.).

Fator de Participação de Ramos																			
$\lambda_1=4,946\times 10^{-7}$				$\lambda_2=1,7650$				$\lambda_3=2.0266$				$\lambda_4=2,6308$				$\lambda_5=3.3898$			
NR	k	l	fp_{kli}	NR	k	l	fp_{kli}	NR	k	l	fp_{kli}	NR	k	l	fp_{kli}	NR	k	l	fp_{kli}
96	38	65	1,0000	119	69	77	1,0000	96	38	65	1,0000	38	26	30	1,0000	116	69	75	1,0000
97	64	65	0,9117	116	69	75	0,8656	66	42	49	0,7797	60	34	43	0,9979	108	69	70	0,6267
104	65	68	0,5944	174	103	110	0,6194	67	42	49	0,7797	178	17	113	0,9210	4	3	5	0,6257
93	63	59	0,5594	127	81	80	0,5478	53	37	40	0,5403	33	25	27	0,8944	96	38	65	0,5926
105	47	69	0,5106	163	100	103	0,5567	51	38	37	0,5007	29	22	23	0,8656	118	76	77	0,5748
106	49	69	0,4853	108	69	70	0,4891	97	64	65	0,3882	97	64	65	0,7625	174	103	110	0,5351
8	8	5	0,0296	8	8	5	0,0044	8	8	5	0,2017	8	8	5	0,4844	8	8	5	0,2133

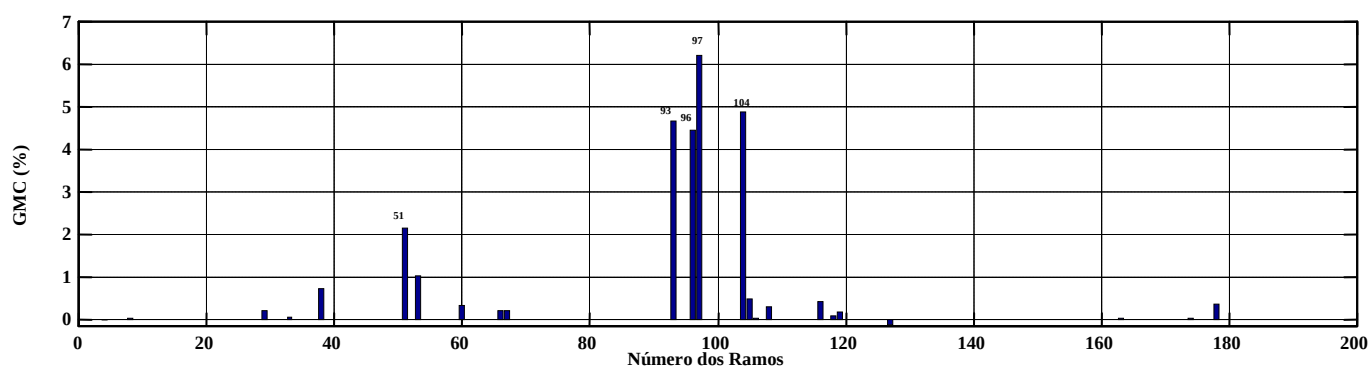
Obteve-se uma redução de 3,47% (coluna oito da Tabela 5.17) no valor da perda total de potência reativa do caso base (-591,6907 Mvar), e um aumento de 6,21% (coluna dez da Tabela 5.17) na margem de carregamento do caso base (1,8378 p.u.). Os resultados da compensação série de 50% aplicada a cada um dos ramos escolhidos são apresentados na Figura 5.35. Na Figura 5.35(a) encontram-se os fatores de participação dos ramos correspondente ao modo crítico ($\lambda=4,946\times 10^{-7}$), enquanto que nas Figuras 5.35(b) e 5.35(c) apresentam-se os respectivos ganho na margem de carregamento e ganho na margem de carregamento normalizado por X_c . Da Figura 5.35(b) verifica-se que novamente o espectro segue o do fp_{kli} da Figura 5.35(a). Do ponto de vista de eficiência da compensação, da Figura 5.35(c), que apresenta o ganho na margem de carregamento normalizado por X_c , observa-se que a inclusão da compensação no ramo 104 se mostra um pouco mais eficiente do que a inclusão no 97, enquanto que a no ramo 96 fica razoavelmente menor. De qualquer forma, em geral, os fp_{kli} são bom indicadores para a compensação série visando o aumento da margem de carregamento do sistema.

Com relação a redução na perda total de potência reativa normalizado por X_c (coluna 8 da Tabela 5.17 e Figura 5.35(d)), observa-se que a eficiência na redução da perda total de potência reativa segue em ordem decrescente a compensação dos ramos 8, 51, 38, 97 e 96. Assim, se constata que apesar dos fp_{kli} darem boas indicações para a alocação de compensação série visando o aumento da margem de carregamento do sistema, no que se refere a redução da perda total de potência reativa, estes não conseguem identificar eficientemente todos os ramos, como no caso particular do ramo de número 8 que se mostrou como o mais eficiente nesse sentido.

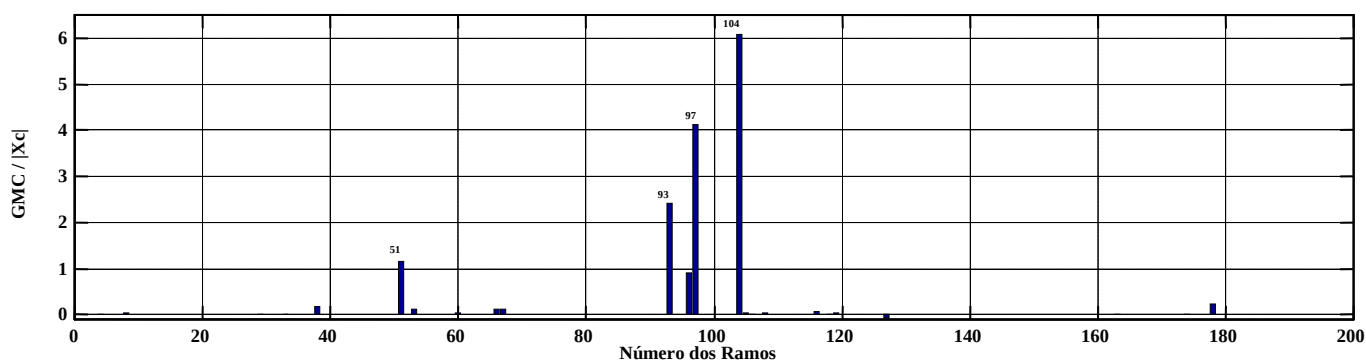
Figura 5. 35 – Resultados da compensação série de 50% para o sistema IEEE-118: (a) fatores de participação dos ramos, (b) ganho na margem de carregamento, (c) ganho na margem de carregamento normalizado por X_c (d) redução na perda total de potência reativa normalizado por X_c .



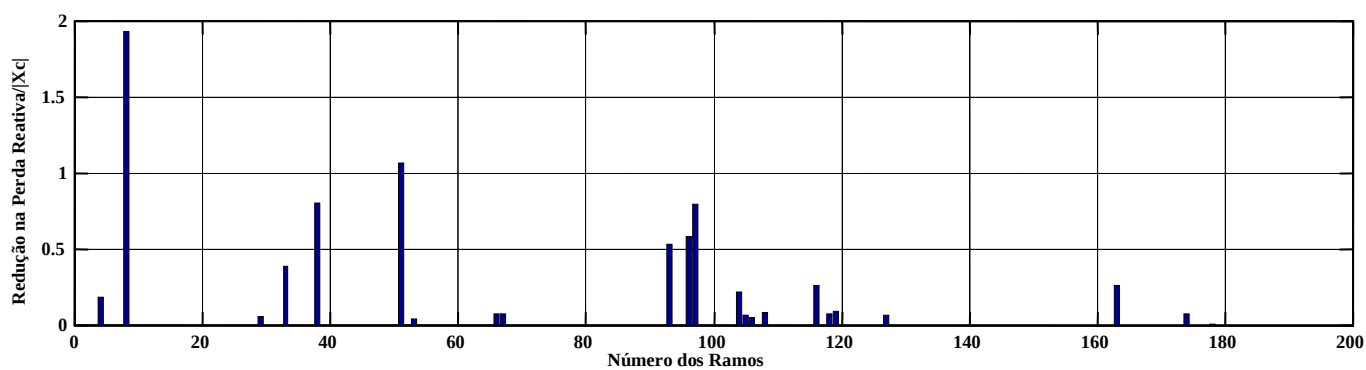
(a)



(b)



(c)



(d)

CAPÍTULO 06

CONCLUSÕES

6.1 Introdução

Devido as restrições econômicas e ambientais que têm sido impostas ao desenvolvimento de novas linhas de transmissão e unidades geradoras, existe uma tendência contínua no planejamento e na operação de sistemas elétricos de potência de maximizar o carregamento dos mesmos, de modo a atender a crescente demanda. A principal consequência desta tendência tem sido a redução das margens de estabilidade destes sistemas. Em virtude destes fatos são utilizados métodos que buscam responder questões relativas a margens de estabilidade de tensão, bem como aos mecanismos da instabilidade.

Os estudos relacionados com a análise de estabilidade estática de tensão têm sido realizados com o objetivo de se identificar a proximidade do ponto de operação em relação ao seu limite operacional. Uma vez calculada a margem de estabilidade de tensão, ou seja, o máximo acréscimo de carga que o sistema pode atender a partir do caso base, deve-se observar se ela atende os valores recomendados pelas empresas do setor elétrico nacional e internacional. Caso as recomendações não sejam atendidas deve-se procurar identificar os tipos, a localização e o tamanho de medidas de reforço adequadas para se evitar a instabilidade de tensão. A análise modal tem sido empregada nesses casos porque ela não só nos permite inferir se o sistema elétrico de potência está operando próximo do ponto de colapso de tensão, mas também identificar quais áreas são mais sensíveis à instabilidade de tensão para que medidas corretivas sejam tomadas. A utilização de compensação reativa *shunt* tem sido uma das formas mais utilizadas em virtude dos vários benefícios que ela proporciona tais como o aumento da margem de carregamento e a diminuição das perdas ativas e reativas na transmissão.

A técnica de análise modal e fatores de participação são aplicados na prática para ajudar a resolver o problema de alocação de fontes de reativos na rede de alta tensão. Os valores dos fatores de participação indicam as melhores áreas para compensação de potência reativa, como alocação de bancos de capacitores, uma vez que associam variação de potência reativa com variação de tensão. Assim, a utilização em conjunto de métodos estáticos, baseados em cálculos de curvas P-V e Q-V, com a análise modal da matriz Jacobiana reduzida tem se mostrado como uma opção simples e confiável para a identificação de tipos, localização e tamanho de medidas de reforço adequadas contra a instabilidade de tensão em sistemas de energia.

6.2 Contribuições

Com o objetivo de facilitar o entendimento das técnicas aplicadas no estudo de estabilidade de tensão, neste trabalho apresentaram-se primeiramente as análises de alguns cenários em sistemas de pequeno porte: o sistema WSCC (*Western Systems Coordinating Council*) constituído por 3 geradores e 9-barras, e o sistema de 14 barras do IEEE. O uso destes sistemas de pequeno porte e de pouca complexidade tem por objetivo facilitar através das análises dos resultados obtidos, o entendimento das técnicas aplicadas no estudo de estabilidade de tensão.

A seguir foi apresentada uma proposta alternativa para a alocação de bancos de capacitores *shunt* visando a redução da perda total de potência reativa. Ambos, a definição do montante de compensação reativa *shunt* a ser alocada e o valor das magnitudes de tensão das barras PV a serem ajustados, são determinados com base nas curvas de perda total de potência reativa na transmissão versus magnitude de tensão da barra. Também foram investigados os efeitos individuais que cada um destes procedimentos traz para o sistema. Entre os efeitos investigados estão: a redução das perdas reativas, a variação na margem de estabilidade estática de tensão, e a melhoria do perfil de tensão. Os resultados obtidos para o sistema IEEE 14 barras mostraram que os procedimentos conduzem a uma sensível redução das perdas de potência reativa nas linhas de transmissão e simultaneamente, uma melhoria no perfil da tensão.

Finalmente foram apresentados vários estudos da aplicação da análise modal estática para se determinar as melhores localidades do sistema para a instalação de bancos de capacitores *shunt* e série, visando a melhoria da margem de estabilidade de tensão e a redução da perda total de potência reativa. As análises foram realizadas utilizando os sistemas de 14, 57 e 118 barras do IEEE considerando a atuação dos limites de potência reativa das barras de geração (barras PV's). Dos resultados confirmou-se que as barras com maiores fatores de participação propiciam um maior aumento na margem de carregamento do sistema. Constatou-se também que em geral, elas também são apropriadas para uma redução na perda total de potência reativa.

Após uma análise mais detalhada dos resultados obtidos com o uso dos fatores de participação das barras PV's que atingiram os seus limites de potência reativa, constatou-se que não é necessário o cálculo do fator de participação dos geradores para obter a lista dos geradores que mais influenciam a margem de carregamento do sistema.

A alocação de bancos de compensação série foi baseada nos fatores de participação dos ramos fornecidos após análise modal. Dos resultados constatou-se que esses fatores de participação, em geral, são bons indicadores para a alocação de compensação série visando o aumento da margem de carregamento do sistema. Por outro lado, verificou-se que apesar disso eles não identificam todos os ramos mais eficientes para a redução na perda total de potência reativa.

6.3 Trabalhos Futuros

Algumas sugestões para dar continuidade aos trabalhos iniciados são apresentadas a seguir.

Assim como os limites de potência reativa dos geradores, outros equipamentos de controle de tensão tais como os SVC (*Static Var Compensator*) e os transformadores do tipo LTC (*Load Tap Changing*) também afetam a margem de estabilidade de tensão dos sistemas elétricos de potência. Dessa forma, a inclusão das respectivas variáveis de controle desses equipamentos (susceptância e *tap*) nas análises poderia ser útil para a definição do ajustes das mesmas.

Em muitos casos o controle da tensão de uma barra é realizado por mais de um equipamento. Nesses casos é comum a existência redundância e/ou de conflito de ajustes

Assim, seria interessante se investigar a possibilidade de uso da análise modal como ferramenta auxiliar na coordenação destes controles de forma a evitar que haja controles conflitantes.

Realizar simulações com sistemas reais de grande porte.

Incluir modelos de carga dependentes da tensão de modo a avaliar melhor a sua influência na estabilidade de tensão.

Considerar as condições de contingência para avaliar o seu impacto na redução da margem de carregamento e verificar através das análises aqui apresentadas, a possibilidade de definição de ações corretivas visando o atendimento das recomendações do WSCC (*Western Systems Coordinating Council*) e da ONS (Operador Nacional do Sistema Brasileiro).

Investigar o uso dos fatores de participação para geradores e cargas propostos em (DA SILVA, 2001), e que são obtidos a partir da matriz reduzida ativa, no projeto e avaliação dos vários meios de reforço do sistema contra instabilidade de tensão, bem como para a definição de medidas de operação para a restauração eficiente das margens de estabilidade mínimas em condições de contingências. De acordo com as análises, o fator de participação ativo revela locais onde ações de controle relacionadas a potência ativa seriam mais eficientes em termos de reforço fornecido ao sistema, enquanto que o fator de participação reativo indica os melhores locais para a compensação de reativos.

REFERÊNCIAS

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

ALVES, D. A. et al. Study of alternative schemes for the parameterization step of the continuation power flow method based on physical parameters-part-i: Mathematical Modeling. **Electric Power Components and Systems**, Lausanne, v. 31, n. 12, p. 1151-1166, 2003.

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**, Washington, v. 24, n.6, p.583-596, 1996.

BONINI NETO, A.; ALVES, D. A. Técnica de parametrização geométrica para o fluxo de carga continuado baseado nas variáveis tensão nodal e fator de carregamento. **Controle & Automação**, Campinas, v. 19, n. 3, p. 350–366, 2008.

CÑIZARES, 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, Fev.1993.

CANOSSA, J. H. **Um programa interativo para estudos de fluxo de potência**. 2007. 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2007.

CHIANG, H. D; FLUENCK, 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, Maio 1995.

SILVA, L. C. P. da. **Uma expansão dos métodos de curvas PV e de análise modal estática para o estudo da estabilidade de tensão em sistemas de energia elétrica**. 2001. 143f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade de Campinas - UNICAMP, Campinas, 2001.

UNIVERSIDADE DE WASHINGTON ELECTRICAL ENGINEERING. **Power systems test case archive**. [S.l.: s.n., 2010?] Disponível em: <www.ee.washington.edu/research/pstca/>. Acesso em: 1 mar. 2010

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

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

GARBELINI, E.; ALVES , D. A.; BONINI NETO, A.; RIGHETO, E.; SILVA, L. C. P. da; CASTRO , C. A. Fluxo de carga continuado utilizando estratégia de parametrização geométrica baseado em parâmetros físicos. **Revista Controle & Automação-SBA**, Campinas, v. 17, n. 3, p. 342-355, Julho/Agosto/Setembro 2006.

GAO, B.; MORISON G. K.; KUNDUR P. Voltage stability evaluation using modal analysis, **IEEE Transactions on Power Systems**, Ontario, v. 7, n. 4, p. 1529-1542, 1992.

GAO, B. **Voltage stability analysis of large power systems**, 149f. Thesis (Doctor of Philosophy Department of Electrical Engineering) - Department of Electrical Engineering, University of Toronto, Canada, 1992.

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

HINAI, A.. **Voltage collapse prediction for interconnected power systems**. 106f. Thesis (Master of Science In Electrical Engineering)- College of engineering and mineral Resources, West Virginia University, Morgantown, 2000.

HUANG, Z.; BAO, L.; XU, W. A method to measure QV curves and its applications in power systems. **Electric Power and Energy Systems**, New York, v. 29, 2007, p. 147-154

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

MANSOUR, Y. Suggested techniques for voltage stability analysis. **IEEE Power Engineering Society**, New York, v. 9, p. 142, 1993.

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

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

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

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

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

WESTERN ELECTRICITY COORDINATING COUNCIL – WECC. **Final report, voltage stability criteria, undervoltage load shedding strategy, and reactive power reserve monitoring methodology**: reactive power reserve work group, 1998. 158 p. disponível em: <http://www.wecc.biz/documents/library/procedures/operating/PCC_ReactiveReserve_07-11-03.pdf>. Acesso em: 10 set. 2009.

XU, W.; E MANSOUR, Y., Voltage stability analysis using generic dynamic load models. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 9, p.1-8, 1993.

SOUZA, A. C. Z. de; 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

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

A1 Publicações

AMORIM, S. E.; ALVES, D. A. Redução de perdas em sistemas elétricos através da aplicação da análise modal. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND COMPUTER EDUCATION – ICECE’2009, 2009, Buenos Aires. **Proceedings....** Buenos Aires: [s.n.], 2009. p. 511-515. 1 CD-ROM.

AMORIM S. E.; ALVES, D. A. Uma nova proposta de redução de perdas reativas na transmissão baseada nas curvas de perdas versus tensão, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND TECHNOLOGY EDUCATION – INTERTECH, 7., 2010, Ilhéus. **Proceedings...** Ilhéu: Editoração Eletrônica, 2010. p. 662-666. 1CD-ROM

AMORIM S. E.; ALVES, D. A. Redução de perdas em sistemas elétricos através da aplicação da análise modal. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS – INDUSCON, 9., 2010, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s.n.], 2010. p. 1-6. 1 CD-ROM. Sessão: PSY1.