

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

GUILHERME BARBOSA LIMA

**APLICAÇÃO DO FLUXO DE CARGA CONTINUADO VISANDO REDUÇÃO DAS
PERDAS E AMPLIAÇÃO DAS MARGENS DE ESTABILIDADE ESTÁTICA DE
TENSÃO**

Ilha Solteira
2020

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GUILHERME BARBOSA LIMA

APLICAÇÃO DO FLUXO DE CARGA CONTINUADO VISANDO REDUÇÃO DAS PERDAS E AMPLIAÇÃO DAS MARGENS DE ESTABILIDADE ESTÁTICA DE TENSÃO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Câmpus de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de Conhecimento: Sistemas de Potência.

Dilson Amancio Alves
Orientador

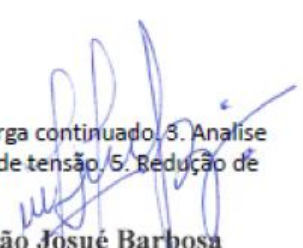
FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

L732a Lima, Guilherme Barbosa Lima.
Aplicação do fluxo de carga continuado visando redução das perdas e
ampliação das margens de estabilidade estática de tensão / Guilherme Barbosa
Lima Lima. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2020
112 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2020

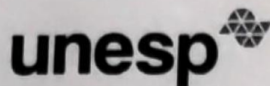
Orientador: Dilson Amancio Alves
Inclui bibliografia

1. Estabilidade estática de tensão. 2. Fluxo de carga continuado. 3. Análise
modal estática. 4. Margem de Estabilidade estática de tensão. 5. Redução de
perdas totais de potência.



João Josué Barbosa

Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
Diretor Técnico
CRB 8-5642



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

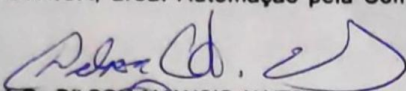
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Aplicação do Fluxo de Carga Continuado Visando Redução das Perdas e a Ampliação das Margens de Estabilidade Estática de Tensão

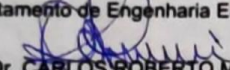
AUTOR: GUILHERME BARBOSA LIMA

ORIENTADOR: DILSON AMANCIO ALVES

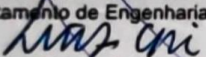
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. DILSON AMANCIO ALVES

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MINUSSI

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Prof. Dr. LUIZ CARLOS PÉREIRA DA SILVA

Departamento de Sistemas de Energia Elétrica / Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Ilha Solteira, 14 de fevereiro de 2020

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus alunos: passados, atuais e futuros. Me qualifico para melhor servi-los.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família e amigos, que sempre acreditaram em mim, e ao acolhimento e hospitalidade dos meus tios na cidade de Ilha Solteira.

Agradeço também ao inestimável apoio do meu Orientador.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

"The real voyage of discovery consists, not in seeking new landscapes, but in having new eyes."

Marcel Proust

RESUMO

Neste trabalho apresentam-se e comparam-se metodologias alternativas para a alocação de compensação reativa *shunt* visando a melhoria das margens de estabilidade estática de tensão e a redução das perdas totais de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão. Os locais mais apropriados para a instalação de compensação são determinados com base nos fatores de participação de barra fornecidos pela análise modal estática, enquanto que o montante de compensação a ser alocado é determinado com base no traçado das curvas de perda total de potência ativa e reativa versus a magnitude de tensão da barra. Entre os efeitos investigados, estão a redução das perdas ativa, reativa, aparente e média, a variação na margem de estabilidade estática de tensão e as alterações do perfil de tensão. Os resultados obtidos para os sistemas testes do IEEE de 14, 57, 118 e 300 barras mostram que os procedimentos proporcionam redução nas perdas de potência, bem como aumentos da margem de carregamento e melhoras no perfil de tensão.

Palavras-chave: Estabilidade estática de tensão. Fluxo de carga continuado. Análise modal estática. Margem de Estabilidade estática de tensão. Redução de perdas totais de potência.

ABSTRACT

This work presents and compares alternative methodologies for the allocation of shunt reactive compensation aiming at improving static voltage stability margins and reducing total active and reactive power losses on transmission lines. The most appropriate locations for installing compensation are determined based on the bus participation factors provided by static modal analysis, while the amount of compensation to be allocated is determined based on the curves of total active and reactive power loss versus voltage of a chosen bus. Among the investigated effects are the reduction of active, reactive, apparent and average power, variation of static voltage stability margin and the voltage profile changes. The results obtained for the IEEE test systems of 14, 57, 118 and 300 buses show that the procedures provide reduction in power losses, as well as increases on the load margin and improvements on the voltage profile.

Keywords: Static voltage stability. Continuation power flow. Static modal analysis. Stability margin. Reduction of total power losses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Regiões de operação.....	18
Figura 2	- Curvas Q-V.....	22
Figura 3	- IEEE-14: barra 14, curva P-V pré e pós-contingência LT ₅₋₆	23
Figura 4	- IEEE-14: contingência N-1, curvas Q-V.....	27
Figura 5	- IEEE-14: contingência N-1, critérios WSCC.....	27
Figura 6	- IEEE14: contingência N-2, curvas P-V.....	29
Figura 7	- IEEE-14: contingência N-2, curvas Q-V.....	29
Figura 8	- Técnica de parametrização local.....	35
Figura 9	- Perda total de potência reativa versus a magnitude de tensão.....	49
Figura 10	- Perda total de potência reativa versus potência reativa do banco..	49
Figura 11	- Perda total de potência ativa versus potência reativa do banco.....	50
Figura 12	- Perda total de potência ativa versus a magnitude de tensão.....	50
Figura 13	- Perda total de potência reativa versus potência reativa do banco..	51
Figura 14	- Perda total de potência reativa versus a magnitude de tensão.....	51
Figura 15	- Perda total de potência aparente versus potência reativa do banco.....	52
Figura 16	- Perda total de potência aparente versus a magnitude de tensão.	52
Figura 17	- IEEE-14: diagrama unifilar.....	54
Figura 18	- IEEE-14: curvas P-V.....	55
Figura 19	- IEEE-14: fatores de participação das barras.....	55
Figura 20	- IEEE-14: ganho da margem de carregamento em relação à potência do banco de capacitor <i>shunt</i> .	58
Figura 21	- IEEE-14: ganho da margem de carregamento após a instalação individual de um banco de capacitor <i>shunt</i> de 6,607 Mvar em cada barra.....	58
Figura 22	- IEEE-14: redução nas perdas totais de potência ativa, reativa e aparente em relação à potência do banco de capacitor <i>shunt</i>	59
Figura 23	- IEEE-14: redução na perda total de potência reativa após a instalação individual de um banco de capacitor <i>shunt</i> de 6,607 Mvar em cada barra.....	59
Figura 24	- IEEE-14: curvas de perda total de potência em função da tensão na barra 4.....	60
Figura 25	- IEEE-57: diagrama unifilar.....	61
Figura 26	- IEEE-57: curvas P-V.....	62
Figura 27	- IEEE-57: fatores de participação das barras.....	62
Figura 28	- IEEE-57: perfil de tensão do sistema operando no caso base.....	63
Figura 29	- IEEE-57: perfil de tensão do sistema operando no PMC.....	63
Figura 30	- IEEE-57 barras, dez maiores fatores de participação de barras....	65
Figura 31	- IEEE-57 barras, ganho da margem de carregamento em relação à potência do banco de capacitor <i>shunt</i>	66
Figura 32	- IEEE-57 barras, redução nas perdas totais de potência ativa, reativa e aparente em relação à potência do banco de capacitor <i>shunt</i>	66
Figura 33	- Sistemas com problemas de estabilidade de tensão com	68

	características predominantemente local, curvas P-V.....	
Figura 34	- Sistemas com problemas de estabilidade de tensão com características predominantemente local, curva P-V típica de uma barra.....	68
Figura 35	- Modelo π (π) de uma linha de transmissão.....	69
Figura 36	- IEEE-118-N: curvas de perdas totais de potência ativa, reativa e média em função da magnitude de tensão e da potência reativa gerada na barra 117.....	71
Figura 37	- IEEE-118-I: curvas P-V.....	74
Figura 38	- IEEE-118-I: perfil de tensão do sistema operando no PMC.....	74
Figura 39	- IEEE-118-I: fatores de participação das barras.....	74
Figura 40	- IEEE-118-I: diagrama unifilar com as barras indicadas pelo fator de participação de barra correspondente ao modo crítico.....	75
Figura 41	- IEEE-118-I: detalhe da área crítica.....	75
Figura 42	- IEEE-118-I: dez maiores fatores de participação de barras.....	77
Figura 43	- IEEE-118-I: ganho da margem de carregamento em relação à potência do banco de capacitor <i>shunt</i>	77
Figura 44	- IEEE-118-I: redução nas perdas totais de potência ativa, reativa e média em relação à potência do banco de capacitor <i>shunt</i>	77
Figura 45	- IEEE-118-I: curva P-V da barra crítica (barra 52) antes e depois da aplicação de um banco <i>shunt</i> de 209,2123 Mvar na barra 59...	78
Figura 46	- IEEE-118-I: perfil de tensão na vizinhança da barra 59.....	78
Figura 47	- IEEE-118-N: curvas P-V.....	80
Figura 48	- IEEE-118-N: perfil de tensão do sistema operando no PMC.....	80
Figura 49	- IEEE-118-N: fatores de participação das barras.....	80
Figura 50	- IEEE-118-N: diagrama unifilar com as barras indicadas pelo fator de participação de barra correspondente ao modo crítico.....	81
Figura 51	- IEEE-118-N: detalhe da área crítica.....	81
Figura 52	- IEEE-118-N: dez maiores fatores de participação de barras.....	83
Figura 53	- IEEE-118-N: ganho da margem de carregamento em relação à potência a do banco de capacitor <i>shunt</i>	83
Figura 54	- IEEE-118-N: redução nas perdas totais de potência ativa, reativa e média em relação à potência do banco de capacitor <i>shunt</i>	83
Figura 55	- IEEE-118-N: curva P-V da barra crítica (barra 117) antes e depois da aplicação de um banco <i>shunt</i> de 97,9184 Mvar na barra 5.....	84
Figura 56	- IEEE-118-N: perfil de tensão na vizinhança da barra 5.....	84
Figura 57	- IEEE-118-N considerando a contingência LT ₁₁₋₁₃ : curvas P-V.....	86
Figura 58	- IEEE-118-N considerando a contingência LT ₁₁₋₁₃ : perfil de tensão do sistema operando no PMC.....	86
Figura 59	- IEEE-118-N considerando a contingência LT ₁₁₋₁₃ : fatores de participação das barras.....	87
Figura 60	- IEEE-118-N considerando a contingência LT ₁₁₋₁₃ : detalhe da área crítica.....	87
Figura 61	- IEEE-118-N c/ cont. da LT ₁₁₋₁₃ : dez maiores fatores de participação de barras.....	89
Figura 62	- IEEE-118-N c/ cont. da LT ₁₁₋₁₃ : ganho da margem de carregamento em relação à potência a do banco de capacitor <i>shunt</i>	89

Figura 63	- IEEE-118-N c/ cont. da LT ₁₁₋₁₃ : redução nas perdas totais de potência ativa, reativa e média em relação à potência do banco de capacitor <i>shunt</i>	89
Figura 64	- IEEE-118-N c/ cont. da LT ₁₁₋₁₃ : curva P-V da barra crítica (barra 13) antes e depois da aplicação de um banco <i>shunt</i> de 20,43 Mvar na barra 13.....	90
Figura 65	- IEEE-118- N c/ cont. da LT ₁₁₋₁₃ : perfil de tensão na vizinhança da barra 13.....	90
Figura 66	- IEEE-300: curvas P-V.....	93
Figura 67	- IEEE-300: perfil de tensão do sistema operando no PMC.....	93
Figura 68	- IEEE-300: fatores de participação das barras.....	93
Figura 69	- IEEE-300: dez maiores fatores de participação de barras.....	95
Figura 70	- IEEE-300: ganho da margem de carregamento em relação à potência a do banco de capacitor <i>shunt</i>	95
Figura 71	- IEEE-300: redução nas perdas totais de potência ativa, reativa e média em relação à potência do banco de capacitor <i>shunt</i>	95
Figura 72	- IEEE-300: detalhe da área crítica.....	96
Figura 73	- IEEE-300: curva P-V da barra crítica (barra 236) antes e depois da aplicação de um banco <i>shunt</i> de 166,6210 Mvar na barra 56....	96
Figura 74	- IEEE-300: perfil de tensão.....	96
Figura 75	- IEEE-300: dez maiores fatores de participação de barras.....	104
Figura 76	- IEEE-300: ganho da margem de carregamento em relação à potência a do banco de capacitor <i>shunt</i> (sem limite de tensão).....	104
Figura 77	- IEEE-300: redução nas perdas totais de potência ativa, reativa e média em relação à potência do banco de capacitor <i>shunt</i> (sem limite de tensão).....	104
Figura 78	- IEEE-14: ganho da margem de carregamento em relação à potência do banco de capacitor <i>shunt</i>	106
Figura 79	- IEEE-14: redução nas perdas totais de potência ativa, reativa, aparente e média em relação à potência do banco de capacitor <i>shunt</i>	106
Figura 80	- IEEE-57: ganho da margem de carregamento em relação à potência do banco de capacitor <i>shunt</i>	107
Figura 81	- IEEE-54: redução nas perdas totais de potência ativa, reativa, aparente e média em relação à potência do banco de capacitor <i>shunt</i>	107
Figura 82	- Sistema exemplo.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Critérios de avaliação.....	24
Tabela 2	- Relação de Curvas.....	47
Tabela 3	- Valores obtidos pelo método $P_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-14.....	57
Tabela 4	- Valores obtidos pelo método $Q_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-14.....	57
Tabela 5	- Valores obtidos pelo método $ S _{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-14.....	57
Tabela 6	- Valores obtidos pelo método $P_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-57.....	64
Tabela 7	- Valores obtidos pelo método $Q_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-57.....	64
Tabela 8	- Valores obtidos pelo método $ S _{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-57.....	64
Tabela 9	- IEEE-118: perdas totais de potência para o caso base ($\lambda = 1$ p.u.).....	68
Tabela 10	- Valores obtidos pelo método $P_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-118-I.....	76
Tabela 11	- Valores obtidos pelo método $Q_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-118-I.....	76
Tabela 12	- Valores obtidos pelo método Média $_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-118-I.....	76
Tabela 13	- Valores obtidos pelo método $P_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-118-N.....	82
Tabela 14	- Valores obtidos pelo método $Q_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-118-N.....	82
Tabela 15	- Valores obtidos pelo método Média $_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-118-N.....	82
Tabela 16	- Valores obtidos pelo método $P_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-118-N c/ cont. da LT ₁₁₋₁₃	88
Tabela 17	- Valores obtidos pelo método $Q_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-118-N c/ cont. da LT ₁₁₋₁₃	88
Tabela 18	- Valores obtidos pelo método Média $_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-118-N c/ cont. da LT ₁₁₋₁₃	88
Tabela 19	- Valores obtidos pelo método $P_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-300.....	94
Tabela 20	- Valores obtidos pelo método $Q_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-300.....	94
Tabela 21	- Valores obtidos pelo método Média $_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-300..	94
Tabela 22	- Valores obtidos pelo método $P_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-300.....	103
Tabela 23	- Valores obtidos pelo método $Q_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-300.....	103
Tabela 24	- Valores obtidos pelo método Média $_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-300..	103
Tabela 25	- Valores obtidos pelo método Média $_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-14...	105
Tabela 26	- Valores obtidos pelo método Média $_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-57...	105
Tabela 27	- Modo 1.....	111
Tabela 28	- Modo 2.....	111

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CB	Caso base
FC	Fluxo de carga
FCC	Fluxo de carga continuado
FTCT	Força Tarefa “Colapso de Tensão”
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LT	Linha de transmissão
MC	Margem de carregamento
MR	Margem de reativo
MVA	Mega volt-ampère
Mvar	Mega volt-ampère reativo
MW	Mega watt
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PMC	Ponto de máximo carregamento
p.u.	Por unidade
WSCC	<i>Western Systems Coordinating Council</i>
WECC	<i>Western Electricity Coordinating Council</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

θ	Vetor ângulo das tensões nodais
V	Vetor magnitude das tensões nodais
λ	Fator de carregamento (escalar)
P	Potência ativa
Q	Potência reativa
$P_{\text{especificado}}$	Potência ativa especificada
$Q_{\text{especificado}}$	Potência reativa especificada
P_{gerada}	Potência ativa gerada
Q_{gerada}	Potência reativa gerada
P_{carga}	Potência ativa consumida
P_{carga}	Potência reativa consumida
ΔP	Desbalanço (<i>mismatch</i>) de potência ativa
ΔQ	Desbalanço (<i>mismatch</i>) de potência reativa
PQ	Barra de carga
PV	Barra de geração
$P-V$	Curva da magnitude de tensão em função da potência ativa
$Q-V$	Curva da magnitude de tensão em função da potência reativa
G	Vetor composto pelas equações dos balanços de potência
t	Vetor tangente
σ	Tamanho do passo preditor
Y	Matriz admitância
G	Parte real da matriz admitância
B	Parte imaginária da matriz admitância
J	Matriz Jacobiana
$J_{P\theta}$	Matriz de sensibilidade $P\theta$
$J_{Q\theta}$	Matriz de sensibilidade $Q\theta$
J_{PV}	Matriz de sensibilidade PV
J_{QV}	Matriz de sensibilidade QV
J_R	Matriz Jacobiana reduzida
Φ	Matriz dos autovetores à direita de J_R

Γ	Matriz dos autovetores à esquerda de $\mathbf{J}_R$
Λ	Matriz diagonal dos autovalores de $\mathbf{J}_R$
λ_i	Autovalor referente ao i-ésimo modo
$\Delta \mathbf{v}_m$	Vetor de variação modal de tensão
$\Delta \mathbf{q}_m$	Vetor de variação modal de potência reativa
f_{pki}	fator de participação da barra k no i-ésimo modo
$f_{p_{kli}}$	fator de participação do ramo k-l no i-ésimo modo
$f_{p_{gki}}$	fator de participação do gerador g, na barra k, no i-ésimo modo
V_k	Magnitude de tensão na barra k
θ_k	Ângulo de fase da tensão na barra k
r_{kl}	Resistência série do ramo k-l
x_{kl}	Reatância série do ramo k-l
b_{kl}^{sh}	Susceptância <i>shunt</i> do ramo k-l
k	Índice variando entre 1 e NB, sendo NB o número de barras do sistema
b^{sh}	Susceptância <i>shunt</i>
G_{kk}	Elemento próprio (diagonal) pertencente à matriz $\mathbf{G}$
G_{kl}	Elemento mútuo (não diagonal) pertencente à matriz $\mathbf{G}$
B_{kk}	Elemento próprio (diagonal) pertencente à matriz $\mathbf{B}$
B_{kl}	Elemento mútuo (não diagonal) pertencente à matriz $\mathbf{B}$
Ω_k	Conjunto de todas as barras diretamente conectadas à barra k
K_k	Conjunto de todas as barras diretamente conectadas à barra k, incluindo a barra k
P_{perdas}	Perda total de potência ativa
Q_{perdas}	Perda total de potência reativa
$ S _{perdas}$	Perda total de potência aparente
$Média_{perdas}$	Média entre a perda total de potência ativa e reativa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2	MÉTODOS DE ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TENSÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.....	17
2.1	INTRODUÇÃO GERAL.....	17
2.2	CURVAS P-V.....	18
2.2.1	Margem de carregamento.....	20
2.3	CURVAS Q-V.....	21
2.4	CONDIÇÕES OPERATIVAS.....	22
2.5	FLUXO DE CARGA PELO MÉTODO DE NEWTON-RHAPSON.....	30
2.6	O FLUXO DE CARGA CONTINUADO (FCC).....	33
2.6.1	Parametrização e preditor tangente.....	34
2.6.2	Passo corretor e controle do passo preditor.....	37
2.7	ANÁLISE MODAL ESTÁTICA.....	38
2.7.1	A matriz jacobiana reduzida.....	39
2.7.2	Instabilidade de tensão do ponto de vista modal.....	40
2.7.3	Fatores de participação das barras.....	41
2.7.4	Fatores de participação das linhas e geradores.....	41
3	MÉTODO PROPOSTO PARA COMPENSAÇÃO DE REATIVOS.....	46
3.1	RESULTADOS OBTIDOS - SISTEMAS IEEE DE 14 e 57 BARRAS.....	53
3.1.1	IEEE-14.....	54
3.1.2	IEEE-57.....	61
3.2	RESULTADOS OBTIDOS - SISTEMAS IEEE DE 118 BARRAS.....	67
3.2.1	IEEE-118-I.....	72
3.2.2	IEEE-118-N.....	79

3.2.3	IEEE-118-N considerando a contingência da linha de transmissão entre as barras 11 e 13.....	85
3.3	RESULTADOS OBTIDOS - SISTEMA IEEE DE 300 BARRAS.....	91
4	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	97
	REFERÊNCIAS.....	99
	ANEXO A – IEEE-300 SEM LIMITE DE TENSÃO.....	103
	ANEXO B – IEEE-14 E IEEE-57: REDUÇÃO DAS PERDAS MÉDIAS	105
	APÊNDICE A – TUTORIAL ANÁLISE MODAL.....	108
	APÊNDICE B – TRABALHOS PUBLICADOS.....	112

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência devem atender as cargas de maneira contínua e segura, levando em conta sempre o critério econômico, pois, via de regra obras de expansão e medidas preditivas ou corretivas em qualquer um dos estágios do sistema, desde a geração, transmissão até a distribuição, acarretam em custos significativos que muitas vezes inviabilizam certas medidas que seriam, do ponto de vista técnico e teórico, as mais indicadas.

O gradual aumento da demanda de cargas nas últimas décadas e a difusão de técnicas e equipamentos de geração distribuída em diversos pontos dos sistemas, tais como centros de geração eólicos e solares, além da proliferação de pequenas centrais hidrelétricas (visando melhor aproveitamento dos recursos hídricos de menor porte), tem influenciado na topologia dos sistemas elétricos de potência, que tem se expandido e ramificado rapidamente, principalmente em países de grande extensão territorial como Brasil, Estados Unidos, Índia e China. Neste contexto, os estudos de fluxo de potência são de primordial importância nas fases de planejamento e de operação dos sistemas, com o intuito de equilibrar fatores técnicos com econômicos, atender quesitos normativos e manter os padrões de qualidade, segurança e confiabilidade do fornecimento de energia.

A análise estática da estabilidade de tensão é um tema que recebe atenção especial nos estudos e em todas as ações de planejamento e operação, devido às grandes implicações de ordens econômicas e sociais que problemas de instabilidade de tensão acarretam. A instabilidade de tensão está intimamente relacionada com a incapacidade do sistema de manter o suprimento de potência reativa, dando o suporte de tensão necessário para o sistema como um todo, muitas vezes resultando em um colapso da tensão (KUNDUR, 1994).

Para entender como os balanços de ativos e reativos afetam e são afetados por alterações na tensão, empresas do setor elétrico nacional (FORÇA TAREFA COLAPSO DE TENSÃO - FTCT, 1999) e internacional (WESTERN SYSTEMS COORDINATING COUNCIL - WSCC, 1998) recomendam o traçado de curvas do perfil de tensão das barras em função do seu carregamento (curvas P-V e Q-V). A curva Q-V oferece informações sobre o mínimo de potência reativa necessária para o funcionamento estável do sistema e a margem de reativo, enquanto a curva P-V mostra como o ponto de operação se altera de acordo com o carregamento, sendo

também útil na determinação do ponto de máximo carregamento do sistema (PMC), que marca o limite entre sua operação estável e instável e, também, define a margem de estabilidade (KUNDUR, 1993). Em (GAO, 1992) é proposto um método baseado na análise modal para determinar a partir de um dado ponto de operação (normalmente o PMC), as áreas de maior susceptibilidade ao colapso de tensão e definindo fatores de participação para os elementos do sistema. A análise modal aliada às curvas P-V e Q-V tem sido ferramentas importantes e confiáveis nos estudos de estabilidade estática de tensão para planejamento e definição de locais e estratégias de reforço para sistemas, sendo a compensação reativa *shunt* a principal estratégia de reforço relacionada manutenção da estabilidade estática de tensão.

A ONS estabelece critérios para o dimensionamento de compensação reativa em derivação, definindo que a compensação pode ser do tipo fixa, sendo feita por bancos de indutores ou capacitores, sendo que os estudos de estabilidade de tensão devem ser efetuados em condições de cargas leve e pesada, e em situações de operação normal e de emergência, avaliando se o sistema atende os critérios de desempenho e de segurança estabelecidos e com a finalidade de avaliar qualitativamente as diversas opções possíveis de obras de compensação (Procedimentos de Rede, Módulo 4, Submódulo 4.5 – Procedimentos para a Determinação das Ampliações e Reforços na Rede Básica, 2000).

Neste trabalho são dadas condições para o entendimento das técnicas do fluxo de carga continuado e da análise modal, e como estas técnicas podem ser utilizadas como ferramentas adequadas e eficazes no estudo de estabilidade estática de tensão.

1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A motivação principal para a elaboração do trabalho é desenvolver uma ferramenta alternativa que possa ser aplicada a sistemas de crescente complexidade e diversidade, tendo como enfoque da proposta o aumento das margens de estabilidade estática de tensão dos sistemas analisados aliada a diminuição de perdas de potência ativa e reativa na transmissão.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O texto foi distribuído em quatro capítulos, abrangendo a revisão dos principais conceitos envolvidos ao tema, passando pela abordagem e aplicação da metodologia proposta e discussão dos resultados e conclusões.

CAPÍTULO 2: MÉTODOS DE ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TENSÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Apresenta-se neste capítulo uma contextualização sobre os métodos de análise de estabilidade estática de tensão utilizados no trabalho, incluindo o traçado das curvas de potência ativa e reativa versus magnitude de tensão (curvas P-V e Q-V, respectivamente), o fluxo de carga continuado e a análise modal estática.

CAPÍTULO 3: MÉTODO PROPOSTO PARA COMPENSAÇÃO DE REATIVOS

É desenvolvida e aplicada, neste capítulo, a proposta alternativa para a determinação do montante de compensação reativa *shunt* baseado no traçado das curvas de perda total de potência ativa, reativa, aparente e média, versus magnitude de tensão. O método é aplicado aos sistemas IEEE de 14, 57, 118 e 300 barras.

CAPÍTULO 4: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo apresenta conclusões e comentários finais sobre o conjunto do trabalho, relacionando também limitações sobre a metodologia proposta e sugestões para trabalhos futuros.

Informações complementares às análises realizadas para os sistemas IEEE de 14, 57 e 300 barras são apresentadas em dois anexos. Dois apêndices encerram o trabalho, o primeiro traz um breve tutorial detalhando aspectos matemáticos da aplicação da análise modal estática para um sistema exemplo de quatro barras, enquanto o segundo apêndice relaciona trabalhos publicados pelo autor.

2 MÉTODOS DE ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TENSÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1 INTRODUÇÃO GERAL

Na primeira seção deste capítulo, serão abordados os conceitos relacionados ao traçado das curvas de Potência Ativa versus Tensão (P-V) e Potência Reativa versus Tensão (Q-V), bem como as formulações utilizadas, relacionando a importância de seu estudo para o monitoramento de estabilidade estática de tensão e a prevenção contra colapsos.

Para o traçado das curvas é utilizado um algoritmo baseado no fluxo de carga continuado (FCC), uma reformulação do fluxo de carga convencional (FC) que permite realizar a variação de carregamento necessária para o traçado das curvas para diferentes cenários de carga e condições operativas, sem os problemas relacionados com a singularidade da matriz Jacobiana presentes no fluxo de carga convencional (AJJARAPU; CHRISTY, 1992). Assim por meio de sucessivas soluções o FCC possibilita a obtenção dos perfis de tensão a partir de um caso base até o ponto de máximo carregamento (PMC).

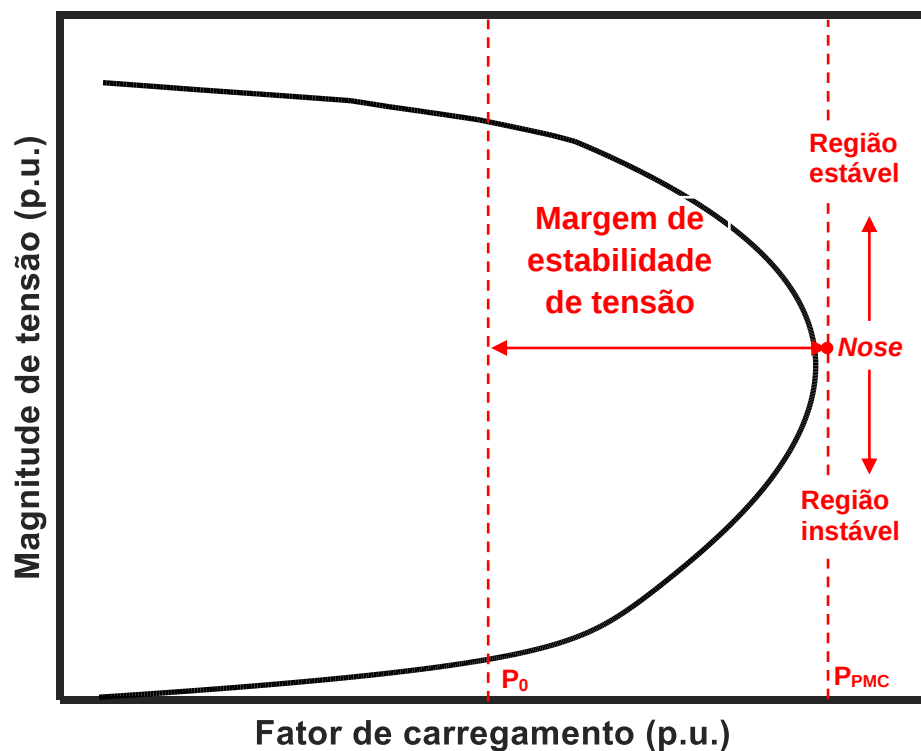
Na segunda seção deste capítulo é apresentada uma breve revisão (MONTICELLI, 1983) sobre o fluxo de carga convencional usando o método de Newton-Raphson para resolução das equações do fluxo de carga determinando o estado da rede (as magnitudes e ângulos das tensões nodais, V e θ , os valores das potências ativa e reativa (P e Q) para cada barra do sistema, assim como os fluxos nas linhas). Na sequência é feita a relação de como a solução de sucessivos fluxos de carga, para variações incrementais de carga podem ser utilizados no traçado de curvas P-V e Q-V, introduzindo dessa maneira o FCC, sendo abordados seus aspectos teóricos, matemáticos e a construção de um algoritmo baseado no FCC.

A terceira e última parte da revisão literária trata da técnica da análise modal estática e sua aplicação no estudo da análise de estabilidade estática de tensão (GAO, 1993), sendo esta uma ferramenta eficiente na análise dos mecanismos da instabilidade de tensão, bem como sobre as áreas mais vulneráveis a problemas de instabilidade de tensão.

2.2 CURVAS P-V

O estudo da estabilidade estática dos sistemas de potência, parte fundamentalmente da análise do comportamento da tensão nas barras, de acordo com a variação no carregamento. Considerando um sistema simples que esteja sendo carregado incrementalmente, a partir de um caso base, a tendência é de que as barras apresentem queda de tensão. A **Figura 1** representa um exemplo deste perfil, o carregamento é aumentado até atingir o ponto de inflexão (*nose*) que representa o Ponto de Máximo Carregamento (PMC) deste sistema, definindo também o limite de estabilidade estática de tensão.

Figura 1 - Regiões de operação.



Fonte: Elaboração do autor.

É possível observar que para cada nível de carregamento existem dois níveis de magnitude de tensões possíveis, um na região estável e outro na região instável. 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, concluímos assim que o balanço de reativo está intimamente relacionado às regiões estáveis e instáveis da curva P-V. Podemos organizar as regiões da curva P-V da seguinte maneira:

- **Região Estável** – Partindo-se de um ponto de operação estável e incrementando-se a carga, o ponto de operação caminhará em direção a um outro também localizado na região estável, sendo que o efeito do aumento da carga, e o consequente desbalanço no reativo da rede, causará a esperada queda de tensão nas barras envolvidas. É válido salientar que se tratando de redes reais tais afundamentos da magnitude de tensão têm limites estabelecidos por lei pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2005) de acordo com os parâmetros nominais de cada setor do sistema visando garantir a qualidade do fornecimento, mas para efeitos de estudo e pesquisa, tais parâmetros são alterados livremente. Como tal queda é esperada e calculável, torna-se, então, um dos principais objetivos de planejamento e operação manter o sistema sempre em um ponto de operação estável respeitando uma margem de carregamento e de segurança suficiente, sendo que para tal são necessárias quase sempre estratégias de remanejamento ou corte de cargas e/ou reforço de sistema, como a instalação de dispositivos para fornecimento de reativo em locais estratégicos.
- **Região Instável** – Nesta região não existe ponto de operação possível, pois um incremento de carga leva a um acréscimo da magnitude tensão para pelo menos uma barra do sistema, ao mesmo tempo em que um decréscimo de carga causa um decréscimo na magnitude da tensão. Pode-se entender como incremento/decrécimo de carga num sentido mais geral, como a variação da transferência de potência entre as áreas ou entre barras específicas, essa variação também pode ser definida em termos de potência ativa (P) e reativa (Q). (XU; MANSOUR, 1993), (VAN CUTSEN; VOURNAS, 1998).
- **Ponto de Máximo Carregamento (PMC)** – Este ponto representa o limite físico de carregamento que o sistema suporta antes do colapso de tensão. Matematicamente, ele representa o ponto da curva P-V em que, para uma determinada condição de carga, existirá apenas uma solução, definindo assim o limite entre as regiões de operação estável e instável. A determinação precisa do PMC é fundamental para a aplicação da técnica da análise modal.

2.2.1 Margem de carregamento

Na operação do sistema, é necessária aos operadores uma grandeza prática que relacione os níveis de magnitude de tensão, topologia da rede e balanços de potências ativa e reativa para áreas ou barras individuais do sistema, objetivando monitorar os pontos de operação e garantir que estes se mantenham dentro nos limites de segurança aceitáveis, levando em consideração as possíveis configurações do sistema e eventuais situações de contingência que a rede pode experimentar.

Para o cálculo do grau de segurança do sistema com relação ao limite de estabilidade estática de tensão, é preciso, então, disponibilizar meios de se obter a distância de um dado ponto de operação ao ponto crítico, o PMC, tal distância é dada por grandezas físicas, usualmente em MW ou em % (MANSOUR, 1993), de acordo com a **Figura 1** ter-se-ia então:

$$\Delta P = P_{PMC} - P_0 \quad (1)$$

Com ΔP sendo a margem de carregamento ou margem de estabilidade, definida pelo maior aumento da demanda possível, mantendo-se o sistema operando dentro da região estável, ou seja, antes que ocorra o colapso de tensão. A severidade das implicações econômicas e sociais que os problemas relacionados à instabilidade de tensão podem acarretar tem tornado este um tema de grande interesse e foco de pesquisa, de forma que, órgãos reguladores e concessionários vêm definindo distâncias de segurança a serem respeitadas em relação ao PMC e, consequentemente, em relação a margem de carregamento. O Western Systems Coordinating Council – WSCC (1998) sugere o atendimento de uma margem de segurança mínima de 5% considerando a ocorrência de uma contingência simples, 2,5% para contingências duplas e uma margem que seja maior do que zero para o caso de múltiplas contingências. Já no Brasil, o Operador Nacional do Sistema Brasileiro – ONS (2001) tem recomendado 6% de margem para contingências simples. Em 1999 foi estabelecida uma força tarefa para estudar o problema no Brasil, visando o planejamento da expansão do sistema (FORÇA TAREFA COLAPSO DE TENSÃO – FTCT, 1999).

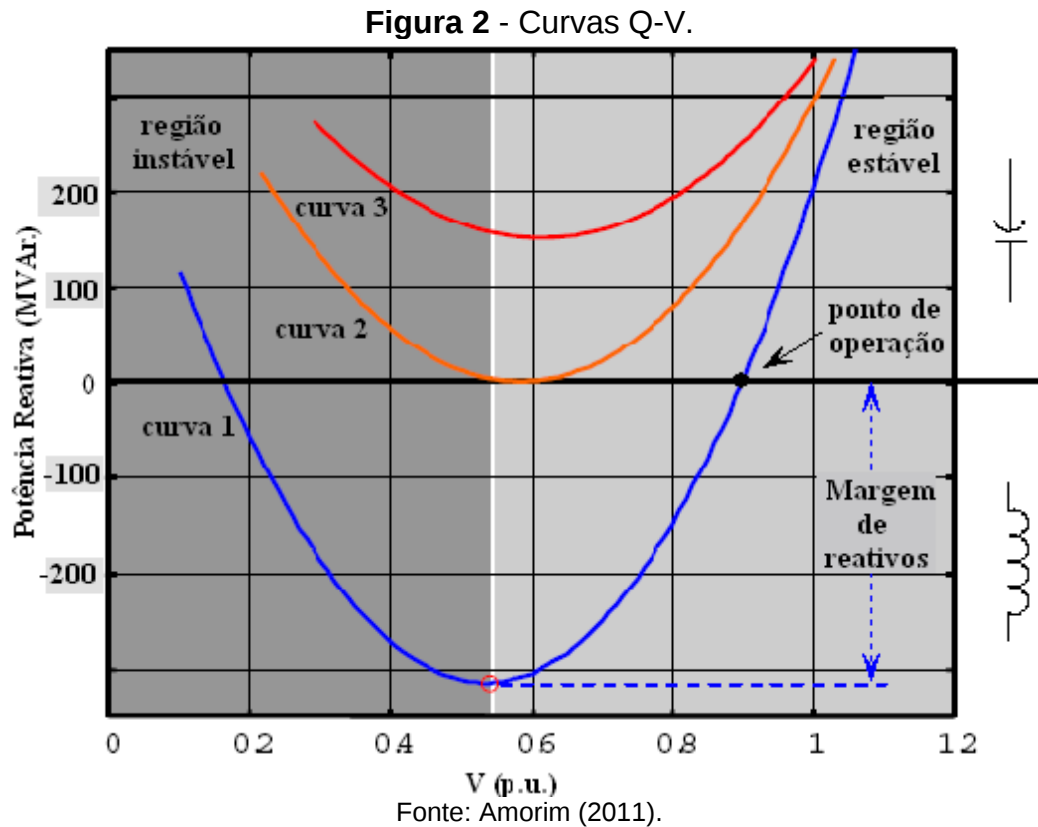
2.3 CURVAS Q-V

O método da curva Q-V é um procedimento simples aplicado às barras de um sistema para se determinar suas margens de reativo. As curvas Q-V expressam a relação entre o suporte de reativos (disponível ou necessário) numa dada barra versus a tensão. A determinação das margens de reativo (MR) das barras críticas do sistema é tema de fundamental importância na análise e planejamento de contingências, pois através da curva Q-V determina-se a compensação de potência reativa necessária para levar o sistema a um ponto de operação seguro (estável). O Western Electricity Coordinating Council (WECC) dentre outras referências adota principalmente o método da curva Q-V.

O traçado das curvas Q-V é feito adicionando-se um condensador síncrono fictício na barra a ser analisada, ou seja, transformando-a em uma barra PV sem limite de reativos. A curva mostrará a variação da magnitude de tensão em função da potência reativa. Partindo de um caso base, o valor de tensão é fixado e a injeção de reativo é calculada por meio da solução de um fluxo de potência, assim são especificados sucessivos valores para a magnitude de tensão e os correspondentes valores da potência reativa são obtidos, ao final a curva com os valores armazenados é traçada, com a magnitude de tensão no eixo das abcissas e os respectivos valores de potência reativa no eixo das ordenadas, conforme representado na **Figura 2** Amorim (2011).

A intersecção da curva com o eixo das abcissas representa o ponto de operação, pois nesse ponto a potência reativa é nula. A margem de reativo disponível é definida como a diferença entre o ponto de operação (potência reativa de saída nula do condensador síncrono), e o ponto na base da curva Q-V. A fronteira da região de instabilidade fica no ponto em que a sensibilidade dQ/dV é zero e define o mínimo de reativo necessário para a operação estável do sistema. Conforme representado, à medida que o carregamento aumenta, a curva Q-V se desloca para cima, demonstrando o esgotamento das reservas de reativo. No caso da curva 1, o sistema ainda possui reativo necessário para manter a estabilidade sem necessidade de compensação local, ou seja, nesta situação um aumento do carregamento ainda é possível. A curva 2 tangencia o eixo da magnitude de tensão em apenas um ponto, indicando o limite máximo de transferência de potência ativa sem compensação de reativo, o sistema neste caso encontra-se no limite de

estabilidade (PMC). Já a curva 3 encontra-se acima do eixo das abscissas, indicando que nenhum ponto de operação pode ser atingido nessas condições de carregamento, neste caso a operação só poderá ser restabelecida com compensação de reativos.

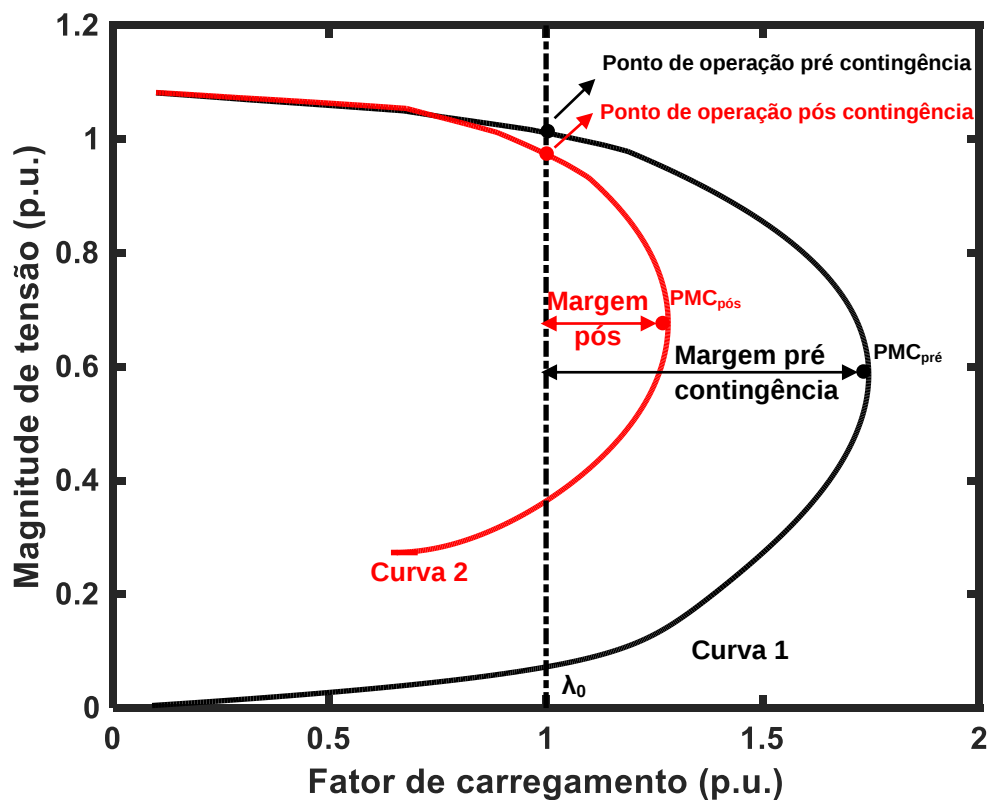


2.4 CONDIÇÕES OPERATIVAS

Ao levar em consideração as margens de estabilidade, deve-se sempre atentar para as situações em que o sistema opera fora das condições normais, como nos casos de contingências de elementos do sistema, tais análises são fundamentais na elaboração de propostas de expansão e reforço de sistemas. Em conformidade com o manual da ONS – Procedimentos de Rede, Módulo 23, Submódulo 23.3 – Diretrizes e Critérios para estudos elétricos (2010), as análises de fluxo de potência para verificar o comportamento dos sistemas com relação a estabilidade estática de tensão devem ser efetuadas em regime permanente, considerando-se cargas com 100% de potência constante, e as simulações efetuadas em condições de operação normais e durante emergências, simulando situações de contingência em que haja perdas de uma linha de transmissão simples ou de circuito duplo

Enquanto num sistema elétrico de potência, operando em condições normais e em regime permanente, as variações de carregamento acontecem em regime dinâmico relativamente lento, numa situação de contingência como a perda súbita de uma linha de transmissão ou de um grande banco de reativos, a mudança acontece de forma drástica e muito rápida na topologia do sistema. Na **Figura 3** ilustra-se, para o sistema IEEE de 14 barras uma situação pré-contingência e uma situação pós-contingência correspondente à retirada da linha de transmissão que interliga as barras 5 e 6 (LT₅₋₆).

Figura 3 – IEEE14: barra 14, curva P-V pré e pós-contingência LT₅₋₆.



Fonte: Elaboração do autor.

Constata-se na figura que o eixo “O” representa o ponto de operação do caso base, cortando o eixo das abscissas em $\lambda_0 = 1$ p.u., este carregamento é fixo e não se altera durante a contingência. Na situação pré-contingência representa-se que o ponto de operação encontra-se distante do ponto de máximo carregamento pré-contingência ($PMC_{pré}$), localizado em $\lambda = 1,7444$ p.u., portanto tem-se uma margem de carregamento de 74,44%, agora analisando-se a

curva 2 de pós-contingência, a topologia do sistema é modificada pela retirada da linha enquanto o carregamento se mantém o mesmo. Da curva P-V resultante para este caso se constata que o máximo carregamento pós-contingência ($PMC_{pós}$) encontra-se em $\lambda = 1,2817$ p.u., ou seja, uma margem de carregamento de 28,17%, uma redução de 62,15% na margem de carregamento em relação ao caso pré-contingência, apesar disso a margem de carregamento ainda atende o mínimo de 5% necessário. Caso o $PMC_{pós}$ estivesse localizado antes do eixo “O”, a margem mínima não teria sido observada e a contingência causaria o colapso de tensão.

O levantamento de ambas as curvas, P-V e Q-V, são as metodologias recomendadas pelo WSCC (WSCC, 1998) para assegurar que a margem mínima requerida seja atendida. Já o ONS, considera o traçado da curva P-V como a metodologia mais apropriada para a determinação da margem de estabilidade, e o levantamento da curva Q-V como uma metodologia complementar para avaliar as margens de potência reativa e os locais para o reforço do sistema (ONS, 2002).

O WSCC e a FTCT (FTCT, 1999) definem critérios de avaliação para análise de contingência, especificados em termos de margens mínimas de potência ativa (MC) e reativa (MR), de acordo com quatro categorias de desempenho (A, B, C e D):

Tabela 1 - Critérios de avaliação.

Nível de Desempenho	Distúrbio ^{(1), (2), (3)} iniciado por: Com ou sem falta; Distúrbio em CCAT	Margem ^{(4), (5), (6)} em MW (Método P-V)	Margem ^{(5), (6)} em MVar (Método Q-V)
A	Qualquer elemento: Gerador, circuito, transformador, fonte de reativos	$\geq 5 \%$	Cenário do pior caso ⁽⁷⁾
B	Seção do barramento	$\geq 2,5 \%$	50% da margem requerida no nível A
C	Qualquer combinação de dois ou mais elementos: LT + Gerador, LT + fonte de reativos, dois geradores, duas LT, bipólo CC, etc.	$\geq 2,5 \%$	50% da margem requerida no nível A
D	Qualquer combinação de três ou mais elementos: Subestação, usina, etc.	$\geq 0 \%$	$\geq 0 \%$

Fonte: adaptado de WSCC (1998).

(1) A tabela se aplica igualmente a sistemas com todos os elementos em serviço (normal) e a sistemas com um elemento removido (sob contingência simples: N -1) e o sistema reajustado. Os ajustes do sistema, após a remoção de um elemento no caso base (para os níveis A - D), incluem todos os ajustes que podem ser realizados dentro de um período de 60 minutos para levar o sistema para a próxima condição de operação estável de regime posteriormente à remoção do elemento, por exemplo: redespacho da geração, ajustes de *taps* e de intercâmbios, etc.

Tabela 1 – Continua.

Tabela 1 – Conclusão.

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

De acordo com a **Tabela 1**, a categoria de desempenho A representa a perda de uma única linha (Contingência N-1), como no exemplo da **Figura 3**. Para este caso a margem de reativo MR mínima deve ser determinada para o cenário do pior caso, sendo que o pior caso é a pior contingência possível, ou seja, a linha que apresenta a maior redução da margem de carregamento MC quando retirada. Os passos do processo seguem a seguinte proposta:

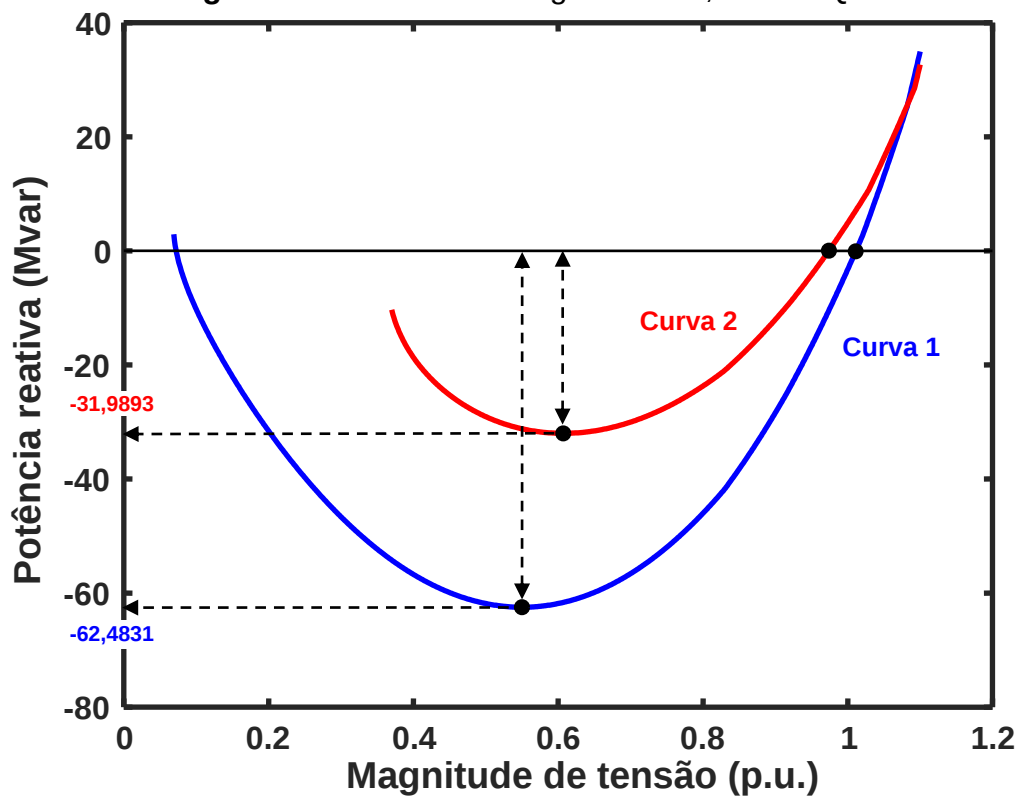
1. Determinar a pior contingência para o Nível A, por meio de simulações retirando uma linha por vez e monitorando a margem de carregamento MC por meio de curvas P-V.
2. Quando a pior contingência for determinada, a curva Q-V desta deve ser traçada na sequência, determinando o primeiro ponto que será usado no cálculo da variação da Margem de Reativo MR.

3. Aumentar o carregamento em 5% e traçar novamente a curva Q-V correspondente.

A variação entre as margens das curvas Q-V (itens 2 e 3) é o valor de margem de potência reativa que deveria ser providenciada de acordo com o critério vigente. Esta é chamada de requisito de potência reativa e é determinado pela diferença entre o ponto mínimo da curva Q-V para o carregamento do caso base e o ponto mínimo da curva Q-V para o carregamento do caso base mais 5%, ambos os casos considerando a pior contingência N-1. A razão da aplicação desta margem é a de assegurar a reserva de reativo adequada que leva em conta as incertezas operacionais tais como uma carga maior do que a prevista.

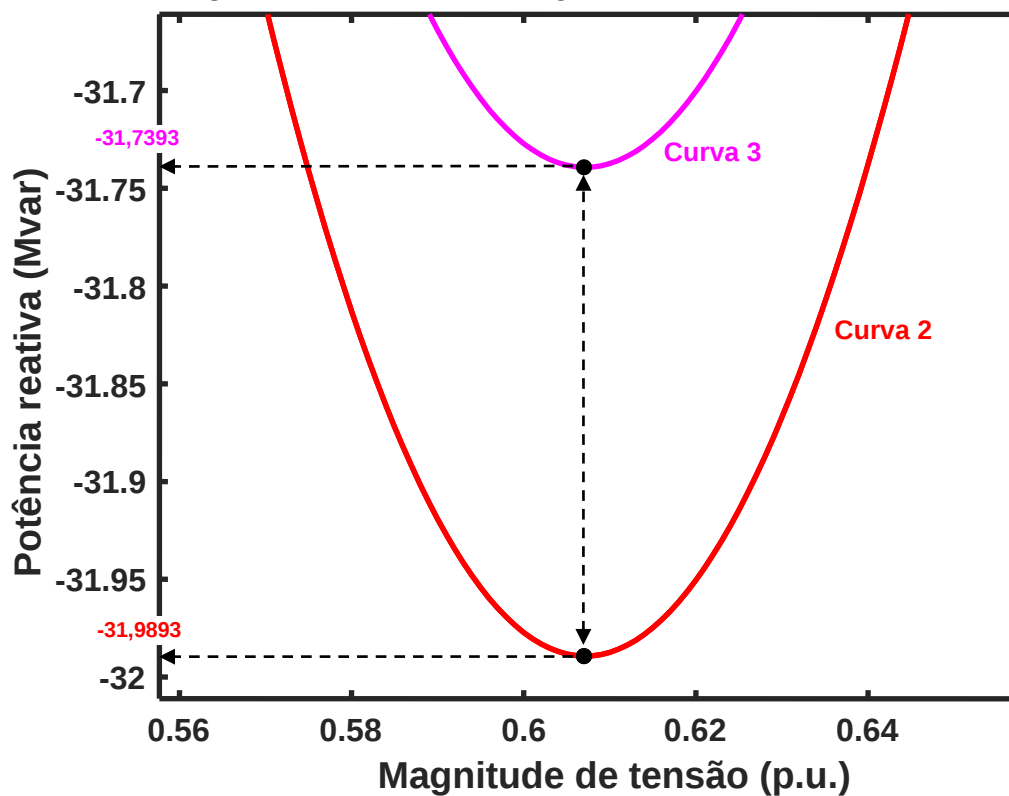
As seguintes simulações feitas para o sistema IEEE-14 barras exemplificam o procedimento descrito. O sistema operando sem contingências tem uma margem de carregamento de 74,44% conforme pode ser visto na Curva 1 da **Figura 3**. Nestas condições a curva Q-V indica uma margem de reativos disponível de 62,4831 Mvar (Curva 1, **Figura 4**). A pior contingência N-1 foi identificada por meio do traçado de curvas P-V como sendo a retirada da linha de transmissão entre as barras 5 e 6 do sistema, o que leva a MC para 28,17% (Curva 2, **Figura 3**), uma queda de 62,15%. Em seguida a curva Q-V foi traçada para o caso base (fator de carregamento $\lambda = 1$ p.u.) com a contingência presente, resultando em uma MR disponível de 31,9893 Mvar (Curva 2, **Figura 4**), uma queda significativa de 48,8%, o que implica que na pior condição operativa o sistema deverá dispor de 30,4938 Mvar de reserva de potência reativa para suportar esta contingência (62,4831 – 31,9893 Mvar). Na sequência outra curva foi gerada para o caso base + 5% ($\lambda = 1,05$ p.u.) para levar em conta as incertezas de previsão de carga, a margem disponível calculada foi de 31,7393 Mvar (Curva 3, **Figura 5**), uma redução extra de 0,25 Mvar. Assim o sistema deverá dispor de um total de 30,7438 Mvar (30,4938 + 0,25) para suportar esta contingência e atender ao critério definido pelo WSCC, visto nesta situação de contingência que o sistema dispõe de 31,9893 Mvar, conclui-se que ele está de acordo com os critérios.

Figura 4 - IEEE-14: contingência N-1, curvas Q-V.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 5 - IEEE-14: contingência N-1, critérios WSCC.

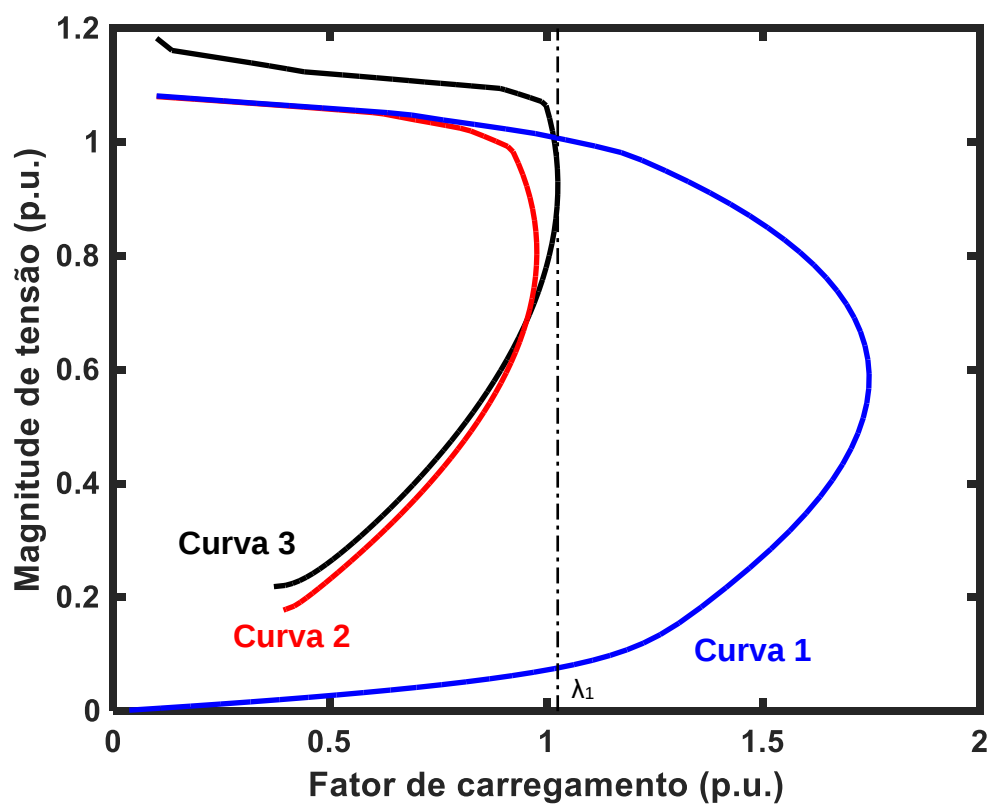


Fonte: Elaboração do autor

Analisando-se, também, o caso em que ocorre a perda de duas linhas de transmissão, mais especificamente a linha dupla que liga as barras 1 e 2 do sistema (LT₁₋₂), tem-se que esta contingência do tipo N-2 se enquadra na categoria de desempenho C, sendo que, então, o requisito de potência reativa é de 2,5%. A curva P-V do sistema pós contingência (Curva 2, **Figura 6**) mostra o $PMC_{pós}$ localizado em $\lambda = 0,9775$ p.u., o que implica numa margem de carregamento de -2,25%, uma diminuição de 103,02% em relação ao $PMC_{pré}$ (Curva 1, **Figura 6**). Para atender ao critério do WSCC é necessário, ainda, considerar uma redução de 2,5% do valor do $PMC_{pós}$. Consta-se da **Figura 7** que a margem de reativos que era de 62,4831 Mvar no caso base sem contingência (Curva 1, **Figura 7**) agora apresenta um déficit de 9,2012 Mvar (Curva 2, **Figura 7**), uma contingência deste tipo não só deixaria de atender ao critério do WSCC, como levaria o sistema a situação de colapso de tensão, é necessário, então, providenciar compensação de reativo.

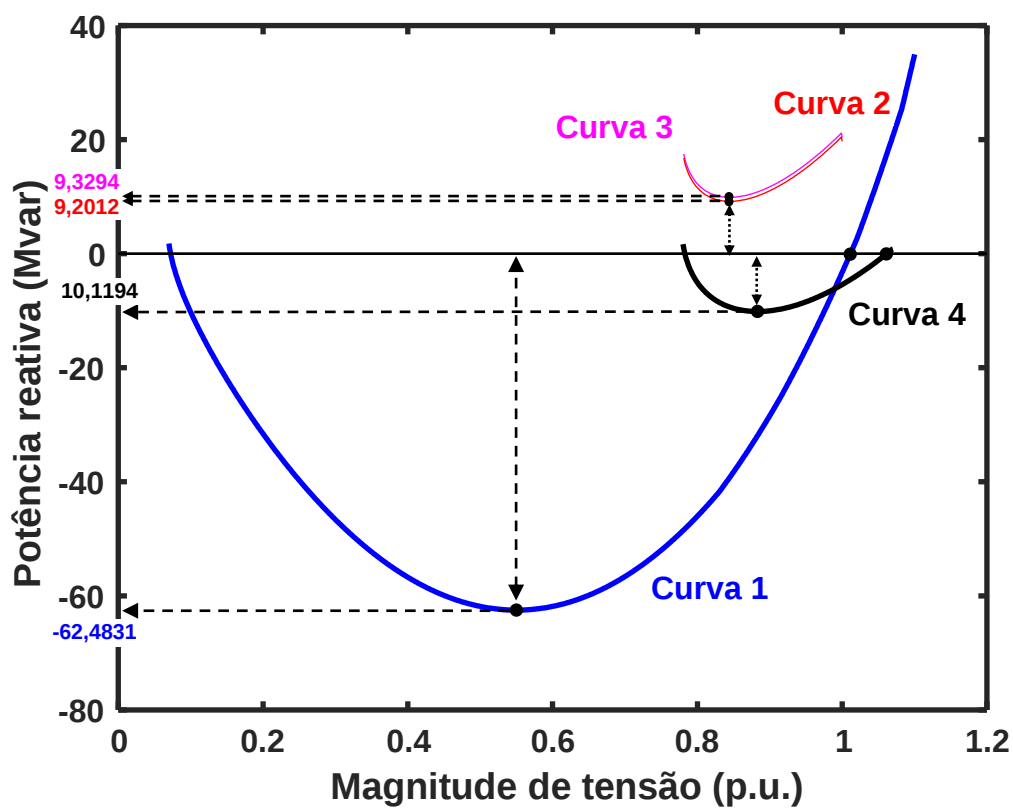
Considerando agora a instalação de um banco de capacitores *shunt* na barra 14, o objetivo é que o fator de carregamento do ponto de operação do caso base seja inferior ao obtido após a contingência a consideração da redução de mais 2,5% no valor do $PMC_{pós}$, ou seja, o valor de λ no $PMC_{pós}$ deve ser maior ou igual a 1,02564 p.u. (eixo λ_1 , **Figura 6**) sendo este valor calculado por $1/0,975$. Na **Figura 7** a Curva 3 representa a curva Q-V da barra 14 considerando a contingência N-2 e um fator de carregamento $\lambda = 1,02564$ p.u., o ponto mínimo desta curva indica um déficit de 9,3294 Mvar a uma tensão de 0,84 p.u.. Nestas condições, quando a tensão da barra é 1 p.u. o déficit de reativo vale aproximadamente 26 Mvar, sendo esse o valor mínimo da potência do banco *shunt* de capacitores a ser considerado, a Curva 4 da **Figura 7** corresponde a contingência N-2 considerando-se o carregamento do caso base e a inserção do banco de 26 Mvar, com o sistema apresentando agora 10,1194 Mvar de reserva de reativo. Finalmente da Curva 3 da **Figura 6** comprova-se que a compensação aplicada leva o $PMC_{pós}$ para $\lambda = 1,0259$ p.u., assim, o sistema passa a atender ao critério do WSCC.

Figura 6 – IEEE14: contingência N-2, curvas P-V.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 7 – IEEE-14: contingência N-2, curvas Q-V.



Fonte: Elaboração do autor

2.5 FLUXO DE CARGA PELO MÉTODO DE NEWTON-RHAPSON

O problema do fluxo de carga consiste na necessidade de se determinar o “estado” do sistema, para um dado ponto de operação. Ou seja, parte-se de que, para cada barra do sistema, existem quatro parâmetros que precisam ser conhecidos: magnitude (V) e ângulo de fase (θ) da tensão nodal e os valores das injeções de potência ativa (P) e reativa (Q). Na formulação convencional, as barras do sistema são separadas em três tipos distintos: barras de carga (PQ), nas quais são conhecidos os valores de P e Q , mas não os de V e θ ; barras de geração (PV), nas quais são conhecidos P e V , mas não Q e θ , e uma barra de referência ou “slack”, em que V e θ são conhecidos, sendo então necessária a determinação de P e Q para fechar o balanço de potência. Assim, uma rede qualquer terá NPV barras PV, NPQ barras PQ e uma barra de referência, portanto nesta rede são conhecidos $(NPV + NPQ + 1)$ parâmetros sendo necessário determinar outros $(NPV + NPQ + 1)$ parâmetros.

Para determinação dos parâmetros, encontrando assim o estado do sistema, o método iterativo de Newton-Rhapson é, sem dúvida, o mais utilizado tanto nos meios acadêmicos quanto empresariais e industriais, ele oferece um comportamento de convergência mais robusto do que outros métodos de iteração de ponto fixo, como Gauss-Seidel (CROW, 2009), e é ponto de partida que dá origem a uma diversidade de outros métodos desacoplados que, também, se baseiam nas sensibilidades (derivadas parciais) representadas pelos elementos da matriz Jacobiana, podendo esta ser manipulada e trabalhada de maneira a atender diferentes objetivos, mostrando o grande potencial e flexibilidade do método. Partindo-se das equações estáticas do fluxo de carga, a forma mais simples de utilizar o método consiste em estabelecer equações definindo o problema na forma $\mathbf{G}(\mathbf{x}) = 0$, por conveniência adotamos as equações em termos de coordenadas polares (MONTICELLI, 1983):

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}) = \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) = \begin{cases} \Delta P_k(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) = P_k^{\text{especificado}} - V_k \sum_{l \in \kappa_k} (G_{kl} \cos \theta_{kl} + B_{kl} \sin \theta_{kl}) V_l = 0 \\ \Delta Q_k(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) = Q_k^{\text{especificado}} - V_k \sum_{l \in \kappa_k} (G_{kl} \sin \theta_{kl} - B_{kl} \cos \theta_{kl}) V_l = 0 \end{cases} \quad (2)$$

O conjunto k representa as barras diretamente conectadas à barra k , incluindo a barra k , e $\Delta P(\theta, V)_k$ e $\Delta Q(\theta, V)_k$ representa o desbalanço (*mismatch*) de potência da barra k , ou seja, a diferença entre a potência especificada na barra e a calculada pela iteração vigente. O processo iterativo do método de Newton-Raphson consiste na redução de $\Delta P(\theta, V)_k$ e $\Delta Q(\theta, V)_k$ até um valor menor do que uma tolerância ϵ pré-especificada. O conjunto $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ formado pelas equações dos desbalanços de potência ativa ($\Delta \mathbf{P}$) e reativa ($\Delta \mathbf{Q}$), pode ser linearizado em torno de um ponto inicial ($\mathbf{x}^v$), apropriadamente escolhido, por intermédio da série de Taylor $\mathbf{G}(\mathbf{x}^v + \Delta \mathbf{x}^v) \approx \mathbf{G}(\mathbf{x}^v) + \mathbf{J} \Delta \mathbf{x}^v = 0$, sendo a matriz Jacobiana $\mathbf{J}$ expressa por (MONTICELLI, 1983):

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{P\theta} & \mathbf{J}_{PV} \\ \mathbf{J}_{Q\theta} & \mathbf{J}_{QV} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Com os elementos das submatrizes representados por:

- $\mathbf{J}_{P\theta} = \frac{\partial \Delta \mathbf{P}}{\partial \theta}$, representando as relações entre P e θ (4)

- $\mathbf{J}_{PV} = \frac{\partial \Delta \mathbf{P}}{\partial V}$, representando as relações entre P e V (5)

- $\mathbf{J}_{Q\theta} = \frac{\partial \Delta \mathbf{Q}}{\partial \theta}$, representando as relações entre Q e θ (6)

- $\mathbf{J}_{QV} = \frac{\partial \Delta \mathbf{Q}}{\partial V}$, representando as relações entre Q e V (7)

Considerando-se as expressões dos vetores $\Delta \mathbf{P}$ e $\Delta \mathbf{Q}$ dadas na equação (2) e lembrando-se de que P_{esp} e Q_{esp} são constantes, a matriz Jacobiana também pode ser escrita da seguinte forma (MONTICELLI, 1983):

:

$$\mathbf{J} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial V} \\ \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial V} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \quad (8)$$

A equação geral do método de Newton-Raphson aplicado ao problema do fluxo de carga pode ser expressa na forma compacta da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}^r \\ \Delta \mathbf{Q}^r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} \end{bmatrix}^{(r)} = \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta}^r \\ \Delta \mathbf{V}^r \end{bmatrix} \quad (9)$$

O processo iterativo para a solução do problema do fluxo de potência via método de Newton-Rhapson é expresso no seguinte algoritmo (MONTICELLI, 1983):

- 1 Iniciar contador de iterações $r = 0$;
- 2 Estimar valores iniciais para módulo e ângulo das tensões: $\mathbf{V}^r$ e $\boldsymbol{\theta}^r$;
- 3 Calcular injeções de potência ativa (para barras PV e PQ) e reativa (para barras PQ) utilizando as expressões do fluxo de carga:

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

Em seguida determinar os respectivos desbalanços de potência ativa $\Delta \mathbf{P}$ para as barras PV e PQ e desbalanços de potência reativa $\Delta \mathbf{Q}$ para as barras PQ utilizando as equações (2);

- 4 Verificar a convergência do processo iterativo comparando os desbalanços de potência ativa com a tolerância ϵ_P pré-especificada $\left(|P_k^{\text{especificado}} - P_k^{\text{calculado}}| \leq \epsilon_P \right)$ para barras do tipo PV e PQ, e comparando os desbalanços de potência reativa com a tolerância ϵ_Q pré-especificada $\left(|Q_k^{\text{especificado}} - Q_k^{\text{calculado}}| \leq \epsilon_Q \right)$ para barras do tipo PQ. A convergência é alcançada e o processo é encerrado quando todos os desbalanços forem menores do que as tolerâncias, caso contrário continuar;
- 5 Montagem da matriz Jacobiana (equações (3) a (8))
- 6 Resolver sistema linear da equação (9) determinando vetores de correção de estado $\Delta \boldsymbol{\theta}^r$ e $\Delta \mathbf{V}^r$ e atualizar os vetores de variáveis:

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

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

$$r = r + 1$$

- 7 Retornar ao passo 3.

Para as barras PV é necessário verificar se os limites de fornecimento de potência reativa foram violados. Caso Q_g esteja fora dos limites, é necessário fixar Q_i

no limite violado e tratar a barra como uma barra de carga (PQ), a partir desse ponto tanto o módulo quanto o ângulo da tensão da barra devem ser calculados via processo iterativo; (observe que neste caso o sistema linear a ser resolvido a cada iteração terá suas dimensões alteradas com a adição de uma linha/coluna na matriz Jacobiana).

A maior vantagem do método de Newton-Raphson é sua taxa de convergência quadrática que o torna, em geral, mais rápido do que outros métodos, convergindo para a solução em poucas iterações. A principal desvantagem desta técnica é que ela irá convergir sempre para a solução mais próxima da estimativa inicial. Teoricamente o problema do fluxo de carga possui tantas soluções quanto o número de barras do sistema, na prática, porém a solução aceitável é bem distinta, tal que ou ela é obtida após um número reduzido de iterações, ou a solução diverge, mostrando uma grande dependência do método em relação à estimativa inicial (MONTICELLI, 1983).

2.6 O FLUXO DE CARGA CONTINUADO (FCC)

O fluxo de carga continuado (FCC) consiste na solução de sucessivos fluxos de potência para diferentes valores de carregamento, partindo de um caso base e seguindo um perfil de incremento de carga definido, desta maneira é possível traçar a curva PV para as barras do sistema e encontrar o ponto de máximo carregamento. De acordo com Ajjarapu e Christy (1992) e Seydel (1994), nas equações do fluxo de potência passa a ser incluído o fator de carregamento, representado pelo parâmetro λ .

$$\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda) = 0 \quad (10)$$

A solução do FCC para $\lambda = 1$ fornece o ponto na curva P-V correspondente ao caso base (ALVES; BONINI NETO, 2008), sendo que o aumento do carregamento e consequente proximidade do ponto de operação com o ponto de máximo carregamento implicam que a matriz Jacobiana irá se tornar singular neste ponto, o que limita o traçado da curva P-V a apenas a metade superior da curva (região estável). Para contornar este problema, uma importante característica do FCC é que

a obtenção das sucessivas soluções de fluxo de carga pode ser obtida modificando-se o parâmetro associado ao carregamento do sistema. Por meio da variação automática do parâmetro utilizado no traçado da curva, é possível traçar a curva P-V em sua totalidade sem preocupação com a singularidade da matriz Jacobiana. (AMORIM, 2011)

Os diversos métodos de FCC presentes na literatura geralmente são compostos por quatro passos (AJJARAPU; CHRISTY, 1992):

- Parametrização;
- Passo preditor;
- Passo corretor;
- Controle de passo.

Nesta seção estes passos serão detalhados na construção de um algoritmo de fluxo de carga continuado que utiliza a técnica de parametrização local, em seguida alguns resultados são mostrados para o sistema IEEE-14 barras.

2.6.1 Parametrização e preditor tangente

As equações do fluxo de carga $\mathbf{G}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) = \mathbf{0}$ são alteradas com a adição do novo parâmetro λ , portanto, a matriz Jacobiana também é alterada. Desenvolvendo-se as equações a partir da equação (10), tem-se (AJJARAPU; CHRISTY, 1992):

$$\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda) = \begin{cases} \Delta \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda) = \lambda(\mathbf{P}_g - \mathbf{P}_c) - \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) = 0 \\ \Delta \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda) = \mathbf{Q}_g - \lambda \mathbf{Q}_c - \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

A montagem da nova matriz Jacobiana fica da seguinte forma:

$$[\mathbf{G}_\theta \quad \mathbf{G}_V \quad \mathbf{G}_\lambda] \quad (12)$$

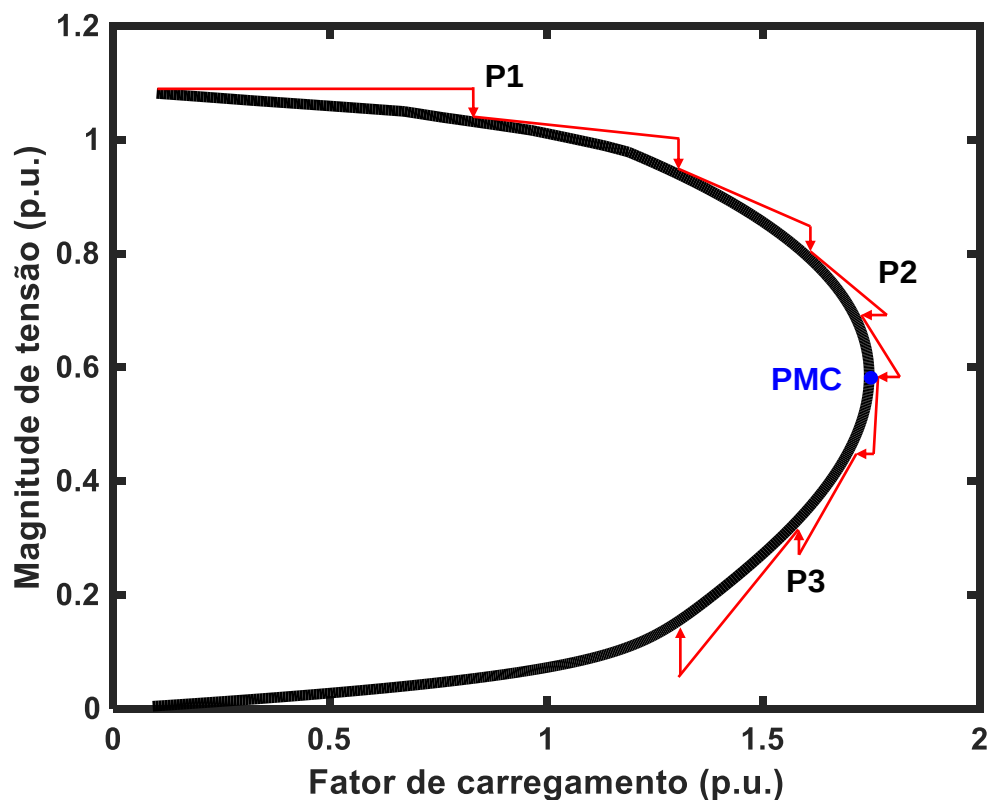
Com cada termo $\mathbf{G}$ representando as respectivas derivadas parciais (sensibilidades), da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta \mathbf{P}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \Delta \mathbf{P}}{\partial \mathbf{V}} & \frac{\partial \Delta \mathbf{P}}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial \Delta \mathbf{Q}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \Delta \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{V}} & \frac{\partial \Delta \mathbf{Q}}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Observe que as duas primeiras colunas representam a matriz Jacobiana do FC convencional, pode-se, então, representar a nova matriz Jacobiana como $[J \ G_\lambda]$.

Além de incluir o fator de carregamento λ , o objetivo da parametrização das equações do FC é definir a trajetória de soluções, evitando os problemas relacionados com o mal condicionamento da matriz em torno do PMC e a singularidade. A técnica de parametrização local utilizada (AJJARAPU; CHRISTY, 1992; SEYDEL, 1994), consiste na troca de parâmetro próximo ao PMC. O processo é iniciado tendo o fator de carregamento λ como parâmetro, conforme mostrado no ponto P1 da **Figura 8**. Em seguida o carregamento vai sendo incrementado até que, próximo ao PMC, o parâmetro muda para a magnitude de tensão V (ponto P2, **Figura 8**), voltando posteriormente para λ (ponto P3, **Figura 8**). O critério de mudança de parâmetro é baseado no vetor tangente, sendo a variável escolhida aquela que apresentar a maior variação, sendo que λ passa a ser, a partir daí, tratado como variável dependente, enquanto que a variável escolhida passa a ser o novo parâmetro.

Figura 8 – Técnica de parametrização local.



Fonte: Elaboração do autor.

O cálculo do vetor tangente ($\mathbf{t}$) é obtido tomando-se o diferencial da equação **(11)**, que, na forma matricial, é dada por (AJJARAPU; CHRISTY, 1992):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_\theta & \mathbf{G}_V & \mathbf{G}_\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J} & \mathbf{G}_\lambda \end{bmatrix} \mathbf{t} = 0 \quad (14)$$

Uma vez que o número de equações é menor do que o número de incógnitas, uma variável do vetor tangente deve ser especificada com um valor diferente de zero. Esta variável é denominada parâmetro da continuação. Uma nova equação ($\mathbf{I}_k \mathbf{t} = t_k = \pm 1$) é acrescida ao sistema **(14)** (AJJARAPU; CHRISTY, 1992):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_\theta & \mathbf{G}_V & \mathbf{G}_\lambda \\ & \mathbf{I}_k & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \mathbf{J}_m \mathbf{t} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Sendo $\mathbf{I}_k$ 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 garantindo que a matriz Jacobiana modificada ($\mathbf{J}_m$) não seja 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 tangente, a estimativa para a próxima solução é dada por (AJJARAPU; CHRISTY, 1992):

$$\begin{bmatrix} \theta^e \\ V^e \\ \lambda^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (16)$$

O sobrescrito “e” representa a estimativa para a próxima solução, isto é, o vetor tangente é usado para obter uma estimativa para a próxima solução a partir da solução atual. Finalmente, σ é um escalar que define o tamanho do passo preditor.

2.6.2 Passo corretor e controle do passo preditor

Após cada estimativa de solução feita pelo preditor tangente, é preciso corrigir a solução aproximada, ou seja, encontrar a solução correta que pertence à curva P-V. Esta correção será feita pelo passo corretor, que consiste na solução do fluxo de potência partindo do ponto previsto, o qual irá convergir para o ponto mais próximo da curva P-V, considerando que o passo preditor tenha sido executado com tamanho e direção adequados. O método de Newton-Rhapson é o mais usado no passo corretor, no qual uma equação do tipo $y - y^e = 0$, onde y e y^e correspondem à variável escolhida como parâmetro de continuação e seu respectivo valor estimado, obtido pelo passo preditor, é acrescentada à equação (11). Assim, o sistema de equações da etapa de correção passa a ser:

$$\begin{cases} \mathbf{G}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}, \lambda) = 0 \\ y - y^e = 0 \end{cases} \quad (17)$$

o qual é resolvido por um método de Newton. O processo preditor seguido do corretor é executado sucessivamente, traçando a curva P-V em etapas.

O tamanho do passo preditor (σ) determina o estado aproximado do próximo ponto da curva a ser traçada, sendo desejável, para efeitos de eficiência de processamento que se tenham passos maiores no início, e que estes se tornem cada vez menores de acordo com a proximidade com o PMC. Desta maneira, é possível aliar agilidade no traçado da curva e precisão na determinação do PMC. A escolha adequada do tamanho do passo de cálculo é fundamental, pois um passo grande demais pode levar a condição de divergência caso este se localize fora do raio de convergência do método de Newton-Rhapson, enquanto que um passo excessivamente pequeno fará com que o tempo de processamento se torne inviável.

Faz-se necessária então a presença de uma estratégia de controle que irá adaptar o tamanho do passo de acordo com a condição de carga do sistema, com passos maiores nas condições de carga leve ou normal, e passos cada vez menores de acordo com ao aumento do estresse do sistema, em direção ao PMC.

Uma estratégia utilizada é o controle de passo baseado na norma euclidiana do vetor tangente (ZAMBRONI *et al.*, 1997), o tamanho do passo é definido como:

$$\sigma = \sigma_0 / \|\mathbf{t}\|_2 \quad (18)$$

Sendo σ_0 é um escalar prédefinido e $\|\mathbf{t}\|_2$ é a norma euclidiana do vetor tangente $\mathbf{t} = [d\boldsymbol{\theta}^T \quad d\mathbf{V}^T \quad d\lambda]^T$. À medida que o sistema vai sendo carregado, o módulo do vetor tangente aumenta e, conseqüentemente, σ diminui. A eficiência do processo depende de uma boa escolha do escalar σ_0 , entretanto foram obtidos bons resultados para diversos sistemas para $\sigma_0 = 1$ (CAÑIZARES; ALVARADO, 1993).

2.7 ANÁLISE MODAL ESTÁTICA

Esta seção apresenta uma revisão sobre a técnica da análise modal proposta em por Gao (1992), e seu uso no estudo da análise de estabilidade estática de tensão. A análise modal é uma ferramenta que oferece informações importantes acerca dos mecanismos e áreas propensas à instabilidade de tensão, baseando-se em uma análise da matriz Jacobiana reduzida, que considera, na formulação, apenas as variações de potência reativa $\Delta\mathbf{Q}$ e tensão $\Delta\mathbf{V}$. A justificativa é que a matriz Jacobiana completa apresenta todas as relações completas entre as sensibilidades (ou variações), sendo essas $(\Delta\mathbf{Q}-\Delta\mathbf{V})$, $(\Delta\mathbf{Q}-\Delta\boldsymbol{\theta})$, $(\Delta\mathbf{P}-\Delta\mathbf{V})$ e $(\Delta\mathbf{P}-\Delta\boldsymbol{\theta})$. A retirada de $\Delta\boldsymbol{\theta}$ da formulação facilita a distinguir as relações entre as variações de tensão $\Delta\mathbf{V}$ e as respectivas variações de potência ativa $\Delta\mathbf{P}$ e reativa $\Delta\mathbf{Q}$, que são de interesse primordial para a análise de estabilidade estática de tensão, e ponto de partida para a análise modal.

A análise modal pode ser aplicada com foco nas análises das potências ativa ou reativa; tais “pontos de vista” da análise modal são distintos, mas complementares entre si. A análise parte da simplificação da matriz Jacobiana, que pode resultar numa matriz reduzida “ativa” que apresenta a relação $(\Delta\mathbf{P}-\Delta\boldsymbol{\theta})$ e é útil no estudo de ações relativas à potência ativa, de maneira semelhante a matriz reduzida “reativa” apresenta a relação $(\Delta\mathbf{Q}-\Delta\mathbf{V})$ e é útil no estudo de ações relativas a potência reativa para melhoria da margem de estabilidade e perfil de tensão e diminuição de perdas.

2.7.1 A Matriz Jacobiana reduzida

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 “reativa” 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:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (19)$$

Sendo:

- $\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$ o vetor das variações incrementais de potência ativa e reativa respectivamente;
- $\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}$ o vetor das variações incrementais do ângulo e do módulo das tensões nodais respectivamente;
- $\begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix}$ ou J a matriz Jacobiana completa, com seus elementos representando as sensibilidades entre as injeções de potências ativas e reativas e as variações de tensão e ângulo de fase nas barras do sistema.

Para a definição da matriz Jacobiana reduzida J_R faz-se a hipótese de que, para cada ponto de operação, as variações de potência ativa são nulas ($\Delta P = 0$), e a estabilidade é avaliada considerando-se somente a relação incremental entre V e Q (KUNDUR, 1993), ou seja:

$$\Delta Q = J_R \Delta V \text{ ou } \Delta V = J_R^{-1} \Delta Q \quad (20)$$

sendo a matriz Jacobiana reduzida definida então por: $J_R = [J_{QV} - J_{Q\theta} (J_{P\theta}^{-1}) J_{PV}]$. É possível observar pela fórmula de Schur $\det(J) = \det(J_{P\theta}) \times \det(J_R)$, que a matriz

Jacobiana $\mathbf{J}$ se torna singular quando a matriz Jacobiana reduzida $\mathbf{J}_R$ se torna singular, ou, quando a matriz $\mathbf{J}_{P\theta}$ se torna singular (MANSOUR, 1993). Isto implica que considerando que não existam problemas de instabilidade angular no sistema, então $\mathbf{J}$ se torna singular no mesmo ponto que $\mathbf{J}_R$.

Por meio das sensibilidades V-Q das barras do sistema é possível analisar de maneira eficiente e organizada a estabilidade do sistema. Para uma dada barra, uma sensibilidade V-Q positiva implica que a injeção de potência reativa irá causar um aumento na tensão, o que indica a operação dentro da área de estabilidade, enquanto que uma sensibilidade V-Q negativa indica a queda de tensão para injeção de reativo. Conclui-se que o sistema é considerado estável se as sensibilidades V-Q de todas as barras apresentarem sinal positivo, bastando que apenas uma se torne negativa para indicar que o sistema se encontra instável. É importante ressaltar também que a sensibilidade se torna infinita no limite da estabilidade de tensão, i.e., no ponto de máximo carregamento, onde as matrizes $\mathbf{J}$ ou $\mathbf{J}_R$ se tornam singulares.

2.7.2 Instabilidade de tensão do ponto de vista modal

Apesar de útil, a técnica de análise de estabilidade por meio das sensibilidades V-Q é muito limitada, pois a instabilidade de tensão não acontece para barras individuais, mas para modos individuais. O conceito de modos de operação pode ser entendido de um ponto de vista matemático partindo-se do princípio de que cada tensão “modal” é uma combinação linear das variáveis de tensão do sistema, e cada potência reativa modal é uma combinação linear das respectivas potências reativas das barras do sistema. A análise modal estática, conforme proposta por Kundur (1993), envolve a determinação dos autovalores e autovetores críticos da matriz das sensibilidades V-Q, ou seja, da matriz Jacobiana reduzida $\mathbf{J}_R$. Os autovalores desta matriz identificam os diferentes modos pelos quais o sistema pode se tornar instável. Se um autovalor da matriz tende a zero, isso significa que uma pequena variação de reativo irá causar uma variação muito grande da magnitude de tensão em uma barra ou grupo de barras. Tal característica indica que o sistema encontra-se próximo do ponto de colapso. Na eventualidade de algum autovalor ser negativo, interpreta-se, então, que uma variação no perfil de reativo se traduzirá numa variação infinita de magnitude tensão, indicando que o sistema, neste caso, já se encontra em condição de instabilidade.

A técnica da análise modal estática também permite, a partir dos autovetores esquerdos e direitos, definir fatores de participação para as barras do sistema. Também é possível definir fatores de participação para as linhas e geradores do sistema, por meio da linearização das equações de perdas de potência reativa e potência reativa gerada, conforme será mostrado. Tais 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 V-Q da barra i . A partir de uma transformação modal, pode-se escrever que (GAO, 1992):

$$\mathbf{J}_R = \Phi \Lambda \Gamma \quad (21)$$

sendo:

- Φ a matriz dos autovetores a direita de $\mathbf{J}_R$;
- Λ a matriz dos autovalores de $\mathbf{J}_R$;
- Γ a matriz dos autovetores a esquerda de $\mathbf{J}_R$.

Partindo das equações (20) e (21), chega-se à seguinte relação (GAO, 1992):

$$\Delta \mathbf{V} = [\Phi \Lambda^{-1} \Gamma] \Delta \mathbf{Q} = \sum_i \frac{\Phi_i \Gamma_i}{\lambda_i} \Delta \mathbf{Q} \quad (22)$$

sendo:

- Φ_i a i -ésima coluna do autovetor a direita de $\mathbf{J}_R$;
- Γ_i a i -ésima linha do autovetor a esquerda de $\mathbf{J}_R$;
- λ_i o i -ésimo autovalor associado aos autovetores acima;
- $\Delta \mathbf{V}$ e $\Delta \mathbf{Q}$ representam os valores das variações incrementais de tensão e potência reativa.

Cada autovalor λ_i de $\mathbf{J}_R$ e os correspondentes Φ_i e Γ_i define o i -ésimo modo de operação do sistema. Visto que $\Phi^{-1} = \Gamma$, pode-se reescrever a equação (22) da seguinte maneira:

$$\mathbf{\Gamma \Delta V} = \mathbf{\Lambda^{-1} \Gamma \Delta Q} \quad (23)$$

Chama-se o produto $\mathbf{\Gamma \Delta V}$ de $\mathbf{\Delta v_m}$ e o produto $\mathbf{\Gamma \Delta Q}$ de $\mathbf{\Delta q_m}$, a equação fica:

$$\mathbf{\Delta v_m} = \mathbf{\Lambda^{-1} \Delta q_m} \quad (24)$$

Os vetores $\mathbf{\Delta v_m}$ e $\mathbf{\Delta q_m}$ representam, respectivamente, as variações de tensão e da potência reativa modal. Conforme abordado, cada tensão modal é uma combinação linear das tensões físicas das barras do sistema, enquanto cada potência reativa modal é formada pela combinação das potências físicas. O que as relaciona é a magnitude do autovalor associado ao modo, a equação (24) é então reescrita da seguinte maneira:

$$\mathbf{\Delta v_m} = (1/ \lambda_i) \mathbf{\Delta q_m} \quad (25)$$

É possível notar que $\mathbf{\Delta v_m}$ e $\mathbf{\Delta q_m}$ relacionam-se de maneira inversamente proporcional, sendo o grau de proporcionalidade do i-ésimo modo definido por λ_i . Em outras palavras, a magnitude de λ_i define o grau de estabilidade da i-ésima tensão modal, sendo que $\lambda_i > 0$ implica que as variações $\mathbf{\Delta v_m}$ e $\mathbf{\Delta q_m}$ se dão no mesmo sentido, ou seja, uma injeção de reativos no sistema causa sempre aumento de tensão, o que caracteriza um sistema estável, enquanto que $\lambda_i < 0$ indica que $\mathbf{\Delta v_m}$ e $\mathbf{\Delta q_m}$ variam em direções contrárias, caracterizando uma situação de instabilidade. Para o caso de $\lambda_i = 0$, a i-ésima tensão modal entra em colapso pois qualquer alteração da potência reativa modal causa uma mudança infinita na tensão modal. Conclui-se então que quanto menor o autovalor λ_i , mais próximo o modo se encontra da instabilidade.

Conforme é enfatizado por Xu e Mansour (1993), a conclusão que se pode tirar desta análise 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 via observação dos autovalores da matriz $\mathbf{J_R}$ no ponto de máximo carregamento indicado pela curva P-V.

2.7.3 Fatores de participação das barras

Além de permitir a análise do nível de instabilidade de um dado modo de operação, a análise modal também permite, a partir dos autovetores esquerdo Φ e direito Γ de $\mathbf{J}_R$, definir valores que indicam o nível de participação das barras do sistema no modo de operação. Os fatores de participação de barra fp_{ki} são definidos pelo produto ponto a ponto entre Φ e Γ , então, se λ_i é o i -ésimo autovalor de $\mathbf{J}_R$, ϕ_i e γ_i os respectivos autovetores direito e esquerdo associados a λ_i , o fator de participação de uma dada barra k no i -ésimo modo é dado por:

$$fp_{ki} = \phi_{ki} \gamma_{ik} \quad (26)$$

Estes fatores de participação, também, são denominados fatores de participação reativos de carga, visto que $\mathbf{J}_R$ apresenta somente as sensibilidades para as barras tipo PQ (barras de carga). A análise destes fatores fornece informações valiosas sobre os mecanismos de instabilidade, identificando áreas vulneráveis a problemas de estabilidade de tensão, e podem ser utilizados como indicadores de locais adequados para a aplicação de medidas corretivas, como alocação de compensação reativa *shunt* (bancos de capacitores) visado à melhoria da margem de estabilidade estática de tensão.

2.7.4 Fatores de participação das linhas e geradores

Também é possível, por meio da análise modal, definir fatores de participação para os ramos/linhas e os geradores do sistema. O fundamento da instabilidade de tensão são as perdas de reativo que acontecem quando a potência é transmitida pelas indutâncias reativas associadas às linhas de transmissão. Os fatores de participação das linhas fp_{kli} indicam, para cada modo, quais linhas consomem a maior parte do reativo em resposta a uma mudança incremental na carga reativa. Linhas com altos fatores de participação são interpretadas fisicamente como setores fracos com altos valores de reatância ou linhas sobrecarregadas (GAO, 1992). Os fp_{kli} fornecem informações relacionadas a ações corretivas como alocação de compensação capacitiva série ou remanejamento de carga para aliviar setores sobrecarregados. Os fatores de participação dos geradores fp_{gi} são um indicador,

para cada modo, de quais são os geradores que suprem a maior parte da potência reativa para uma variação incremental no carregamento, tais indicadores são informações úteis utilizadas na adequação da distribuição das reservas de reativos entre as máquinas com o intuito de manter estabilidade de tensão dentro dos níveis de tolerância.

Os fatores de participação das linhas fp_{kli} (fator de participação do ramo k-l no i-ésimo modo), e dos geradores fp_{gi} (fator de participação do gerador g, localizado na barra k, no i-ésimo modo), são calculados por (GAO, 1992):

$$fp_{kli} = \Delta Q_{perdas\ kli} / \max(\Delta Q_{perdas\ kli}) \quad (27)$$

$$fp_{gki} = \Delta Q_{gerado\ gki} / \max(\Delta Q_{gerado\ gki}) \quad (28)$$

os vetores $\Delta Q_{perdas\ kli}$ e $\Delta Q_{gerado\ gki}$ são as variações linearizadas das perdas reativas nas linhas e das potências reativas geradas por barra, respectivamente. Estes valores são então normalizados para que os fatores de participação sejam representados numa escala percentual.

O cálculo de $\Delta Q_{perdas\ kli}$ e $\Delta Q_{gerado\ gki}$ é feito considerando-se que o vetor de variação modal de potência reativa Δq_m tem todos os elementos nulos exceto o i-ésimo, que é igual a 1, assim podemos escrever:

$$\Delta Q_i = \Gamma^{-1} \Delta q_m = \Phi \Delta q_m = \Phi_i \quad (29)$$

sendo Φ_i o i-ésimo autovetor direito de J_R . Assim é possível encontrar o vetor das variações das magnitudes das tensões no modo i (ΔV_i) e o correspondente vetor de variações dos ângulos de fase no modo i ($\Delta \theta_i$):

$$\Delta V_i = \Delta Q_i / \lambda \quad (30)$$

$$\Delta \theta_i = - (J_{P\theta})^{-1} J_{PV} \Delta V_i \quad (31)$$

De posse dos valores de ΔV_i e $\Delta \theta_i$, em (GAO, 1992) é demonstrado que $Q_{perdas\ kl}$ é obtido por:

$$Q_{perdas\ kl} = Q_{serie\ kl} - Q_{shunt\ kl} \quad (32)$$

com:

$$Q_{\text{serie } kl} = x_{kl} \frac{V_k^2 + V_l^2 - 2V_k V_l \cos(\theta_k - \theta_l)}{r_{kl}^2 + x_{kl}^2} \quad (33)$$

$$Q_{\text{shunt } kl} = \frac{b_{kl}^{\text{sh}}}{2} V_k^2 + \frac{b_{kl}^{\text{sh}}}{2} V_l^2 \quad (34)$$

sendo que $\Delta Q_{\text{serie } kl}$ e $\Delta Q_{\text{shunt } kl}$ são dados por:

$$\Delta Q_{\text{ser } kl} = x_{kl} \frac{2[(V_k - V_l \cos(\theta_k - \theta_l))\Delta V_k + (V_l - V_k \cos(\theta_k - \theta_l))\Delta V_l + V_k V_l \sin(\theta_k - \theta_l)(\Delta \theta_k - \Delta \theta_l)]}{r_{kl}^2 + x_{kl}^2} \quad (35)$$

$$\Delta Q_{\text{shunt } kl} = b_{kl}^{\text{sh}} V_k \Delta V_k + b_{kl}^{\text{sh}} V_l \Delta V_l \quad (36)$$

V_k e V_l são as magnitudes das tensões das barras terminais do ramo k-l, enquanto que θ_k e θ_l são os respectivos ângulos de fase. r_{kl} e x_{kl} são a resistência e a reatância série do ramo k-l, e b_{kl}^{sh} é a e a sua susceptância em derivação (*shunt*). De Gao (1992) também é obtida a potência reativa gerada na barra k:

$$Q_{\text{gerado } gk} = -B_{kk} V_k^2 + \sum_{j \in \Omega_k} [G_{kl} V_k V_l \sin(\theta_k - \theta_l) - B_{kl} V_k V_l \cos(\theta_k - \theta_l)] \quad (37)$$

sendo G_{kl} , B_{kl} e B_{kk} , os elementos mútuos (não diagonal) e próprio (diagonal) pertencentes a matriz de admitância nodal, e Ω_k representa o conjunto das barras vizinhas da barra k (diretamente conectadas à ela). A variação da potência reativa gerada na barra k resulta da linearização desta equação:

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\text{gerado } gk} = & -2B_{kk} V_k \Delta V_k + \sum_{j \in \Omega_k} (G_{kl} \sin(\theta_k - \theta_l) - B_{kl} \cos(\theta_k - \theta_l)) (V_k \Delta V_l + V_l \Delta V_k) + \\ & + \sum_{j \in \Omega_k} V_k V_l (G_{kl} \cos(\theta_k - \theta_l) + B_{kl} \sin(\theta_k - \theta_l)) (\Delta \theta_k - \Delta \theta_l) \end{aligned} \quad (38)$$

3 MÉTODO PROPOSTO PARA COMPENSAÇÃO DE REATIVOS

O traçado de curvas Q-V tem por objetivo obter as margens de reativo das barras críticas do sistema. Também permite que se determine a compensação de potência reativa necessária para o sistema operar numa condição considerada segura (estável), i.e., com uma maior margem de carregamento. A curva Q-V apresenta a variação da magnitude da tensão numa determinada barra (originalmente uma barra de carga PQ) em função da injeção de potência reativa. O traçado da curva Q-V 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 (KUNDUR, 1993).

Com o objetivo de não só aumentar a margem de carregamento, mas também reduzir as perdas totais do sistema, aqui se propõem um método que defina o montante de compensação *shunt* baseados nos traçados das curvas de perdas totais de potência ativa, reativa e aparente versus tensão, para cada uma das barras indicadas pelos fatores de participação obtidos pela análise modal. O traçado das curvas é feito de maneira similar ao da curva Q-V, a barra de carga escolhida é transformada em PV com limites de reativo livres, a seguir, partindo de um caso inicial, valores sucessivos de magnitude de tensão (V) são especificados e os respectivos valores de injeção de potência (Q_{gerado}) são obtidos através da solução de um fluxo de potência. Para cada ponto também são computados os correspondentes valores das perdas totais ativas (P_{perdas}), reativas (Q_{perdas}) e aparentes ($|S|_{perdas}$) do sistema. De posse destes parâmetros são traçadas simultaneamente as curvas que relacionam as perdas em função da tensão da barra, e em função da injeção de potência reativa, seis curvas ao todo.

As perdas totais de potência ativa P_{perdas} , reativa Q_{perdas} e aparente $|S|_{perdas}$ são calculadas da seguinte maneira (MONTICELLI, 1983):

$$P_{perdas} = \sum_{k,l \in \Omega} [g_{kl} (V_k^2 + V_l^2 - 2V_k V_l \cos(\theta_k - \theta_l))] \quad (39)$$

$$Q_{perdas} = \sum_{k,l \in \Omega} [-b_{kl}^{sh} (V_k^2 + V_l^2) - b_{kl} ((V_k^2 + V_l^2 - 2V_k V_l \cos(\theta_k - \theta_l)))] \quad (40)$$

$$|S|_{perdas} = \sqrt{P_{perdas}^2 + Q_{perdas}^2} \quad (41)$$

em que V_k , V_l e θ_k , θ_l são as respectivas magnitudes e ângulos de tensão nodal das barras k e l , Ω é o conjunto de todas as barras do sistema, b_{kl} e b_{kl}^{sh} são as respectivas susceptâncias série e *shunt* na linha entre as barras k e l . Já a potência reativa gerada na barra k é dada por (MONTICELLI, 1983):

$$Q_{\text{gerado } k}(\theta, V, \lambda) = \lambda Q_{\text{cargak}}^{\text{especificado } k} + Q_k(\theta, V) \quad (42)$$

λ é o fator de carregamento, V e θ são os respectivos vetores de magnitude e ângulo de tensão nodal e Q_{cargak}^{sp} é a potência reativa consumida nas barras PV. Para uma dada barra k , $Q_k(\theta, V)$ é dado por (MONTICELLI, 1983):

$$Q_k(\theta, V) = V_k \sum_{l=1}^{NB} V_l [G_{kl} \sin(\theta_k - \theta_l) - B_{kl} \cos(\theta_k - \theta_l)] \quad (43)$$

NB é o número de barras do sistema, G_{kl} e B_{kl} são, respectivamente, a parte real e a parte imaginária do elemento kl da admitância nodal da matriz $Y = G + jB$

De posse destes valores, é possível traçar os conjuntos de curvas, que ficam organizados da seguinte maneira:

Tabela 2 – Relação de curvas.

Potência	Curva 1	Curva 2
Ativa	$V - P_{\text{perdas}}$	$Q_{\text{gerado}} - P_{\text{perdas}}$
Reativa	$V - Q_{\text{perdas}}$	$Q_{\text{gerado}} - Q_{\text{perdas}}$
Aparente	$V - S _{\text{perdas}}$	$Q_{\text{gerado}} - S _{\text{perdas}}$

Fonte: Elaboração do autor

A partir destas curvas se determina, para cada caso, o valor de $Mvar$, a ser adicionado à barra, que proporciona a menor perda, bem como a que magnitude de tensão isso acontece.

O valor percentual da redução de perdas é dado por:

$$Re = 100 \times (Perda_{CB} - Perda_B) / Perda_{CB} \quad (44)$$

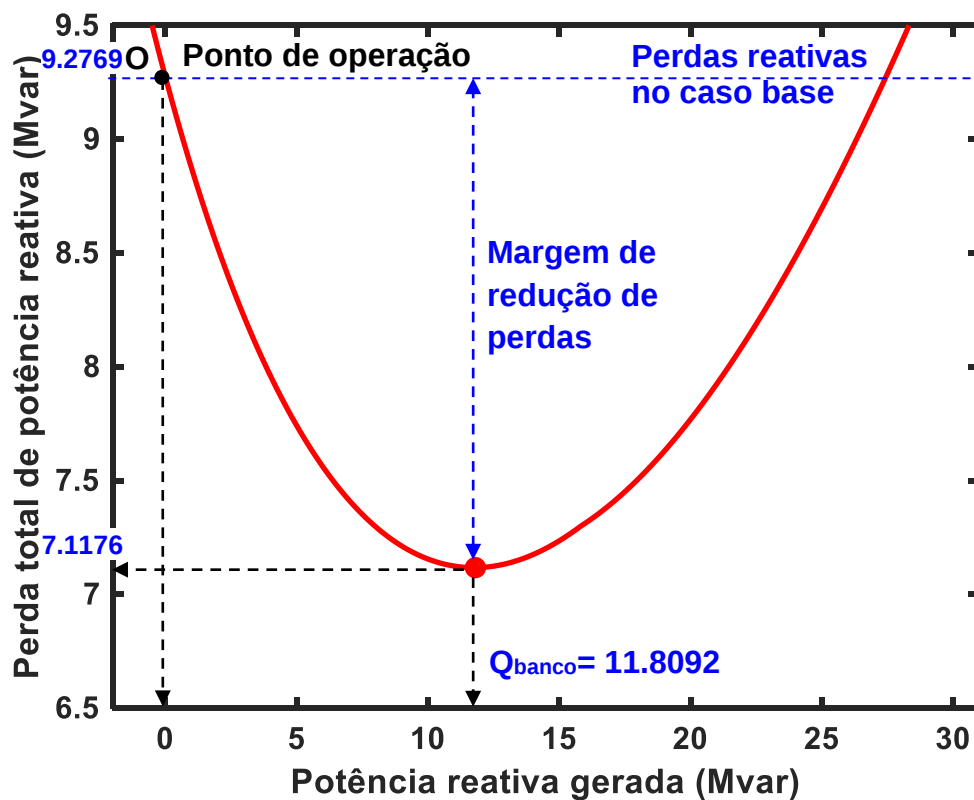
sendo $Perda_{CB}$ e $Perda_B$ as respectivas perdas no caso base e após a compensação.

Nas **Figuras 9 e 10**, ilustram-se, para a barra crítica (barra 31) do sistema IEEE-57, o procedimento usado na definição do montante de compensação reativa para redução da perda total de potência reativa a partir das curvas. A **Figura 7** apresenta a curva de perda total de potência reativa em função da potência reativa injetada na barra (curva $Q_{gerado}-Q_{perdas}$), enquanto a **Figura 8** mostra a curva de perda total em função da tensão (curva $Q_{gerado}-V$).

Nas **Figuras 9 e 10**, o ponto de operação do caso base (**ponto O**) corresponde à intersecção da curva com o eixo das abscissas, onde a potência reativa injetada é nula, conforme apresentado na **Figura 9**. Em ambas as figuras apresenta-se uma reta tracejada que passa pelo ponto **O** que corresponde à perda total de potência reativa do caso base (9,2769 Mvar). O ponto M corresponde a menor perda obtida (7,1176 Mvar) por compensação nessa barra. Nas **Figuras 9 e 10** pode-se ver também a margem de redução de perdas ($9,2769 - 7,1176 = 2,1593$ Mvar), e que corresponde à distância do ponto M a essa reta. Assim, por meio da instalação de um banco de capacitor *shunt* é possível obter uma redução de 23,2761% do valor do caso base. A potência do banco (Q_{banco}) é de 11,8092 Mvar na correspondente magnitude de tensão de 0,949 p.u. Entretanto, a potência reativa fornecida pelo banco de capacitor *shunt* não é uma quantia fixa, ela varia com o quadrado da tensão ($Q = BV^2$). Assim, o valor a ser especificado para o banco de dados é de 13,113 Mvar para uma magnitude de tensão de 1,0 p.u.

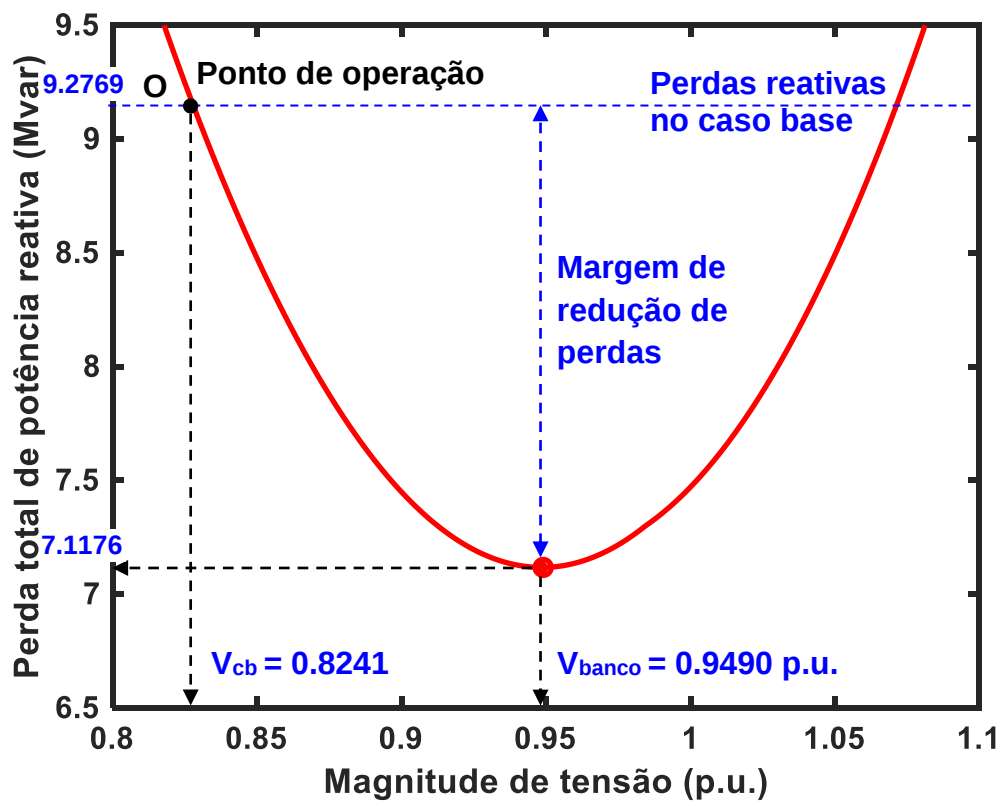
Finalmente, nas **Figuras 11 a 16** ilustra-se o método proposto sendo usado em conjunto com a análise modal descrita na seção 2.6. Nessas figuras são apresentadas as curvas de perda total de potência ativa, reativa e aparente em função da magnitude de tensão na barra e em função da potência reativa injetada para as dez barras de carga (tipo PQ) que apresentam os maiores fatores de participação calculados no modo crítico para o sistema IEEE-57.

Figura 9 - Perda total de potência reativa versus a potência reativa do banco.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 10 - Perda total de potência reativa versus a magnitude de tensão.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 11 - Perda total de potência ativa versus a potência reativa do banco.

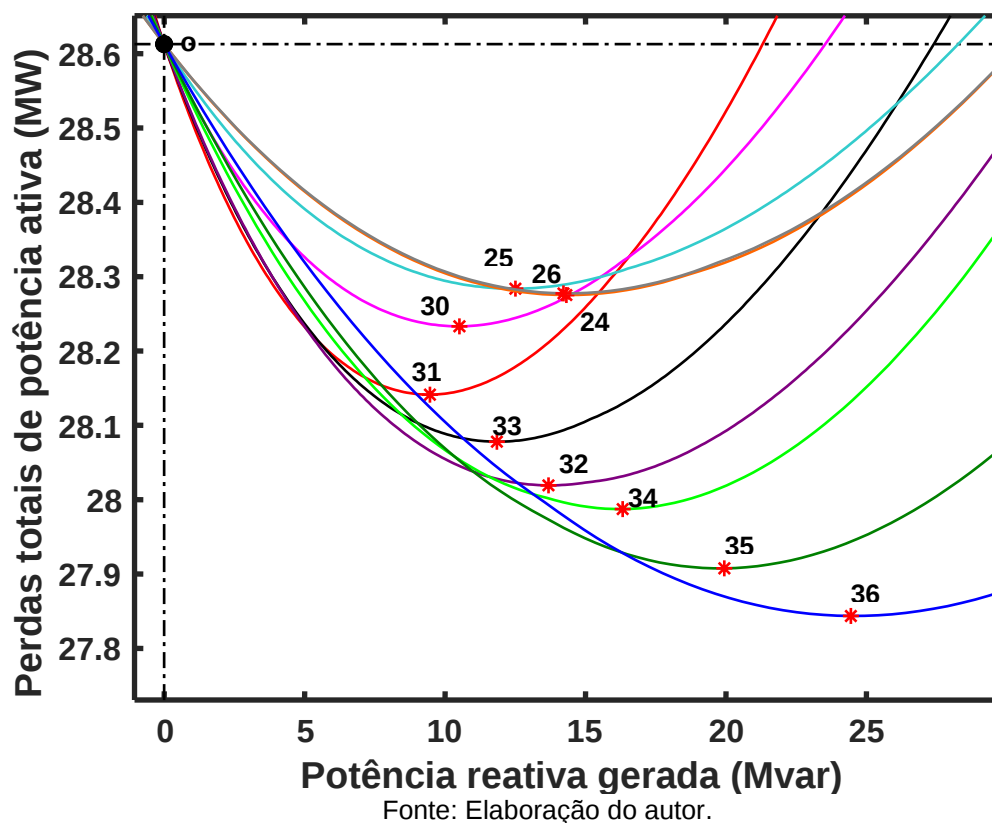


Figura 12 - Perda total de potência ativa versus a magnitude de tensão.

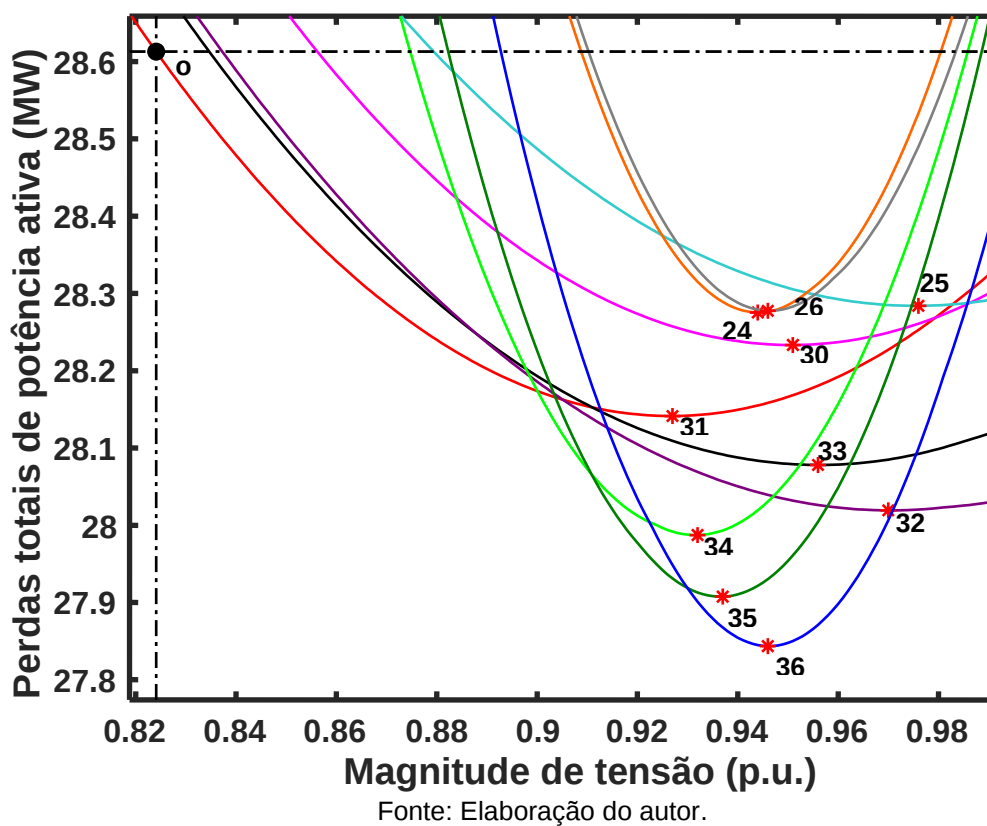


Figura 13 - Perda total de potência reativa versus a potência reativa do banco.

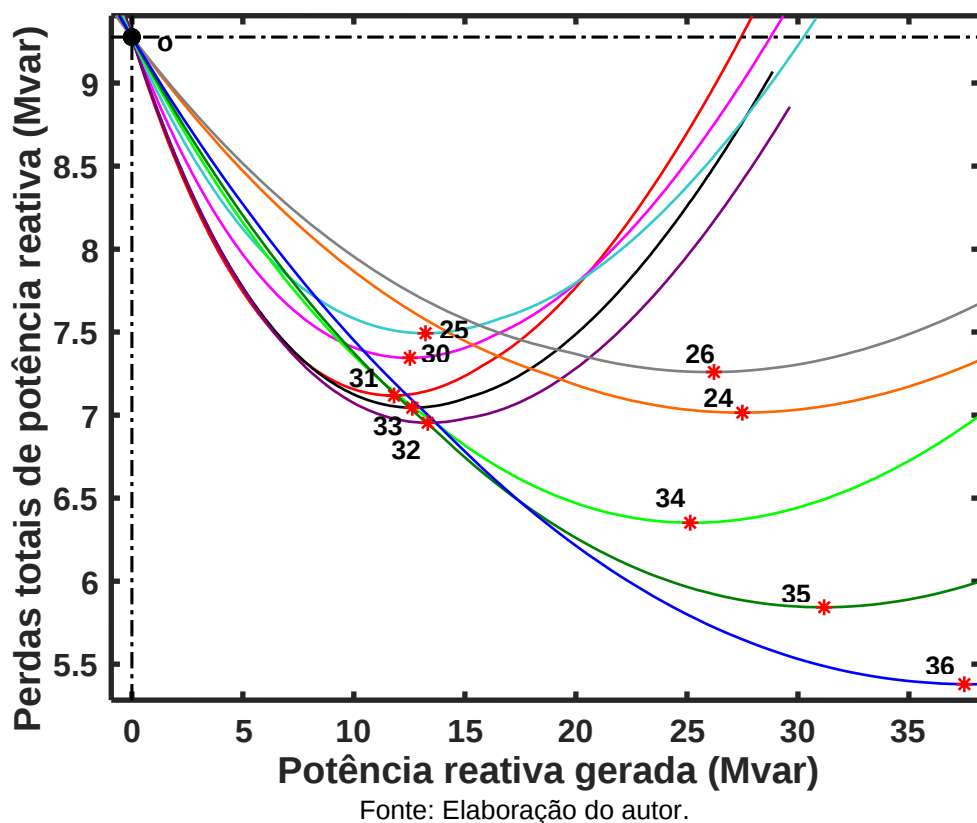


Figura 14 - Perda total de potência reativa versus a magnitude de tensão.

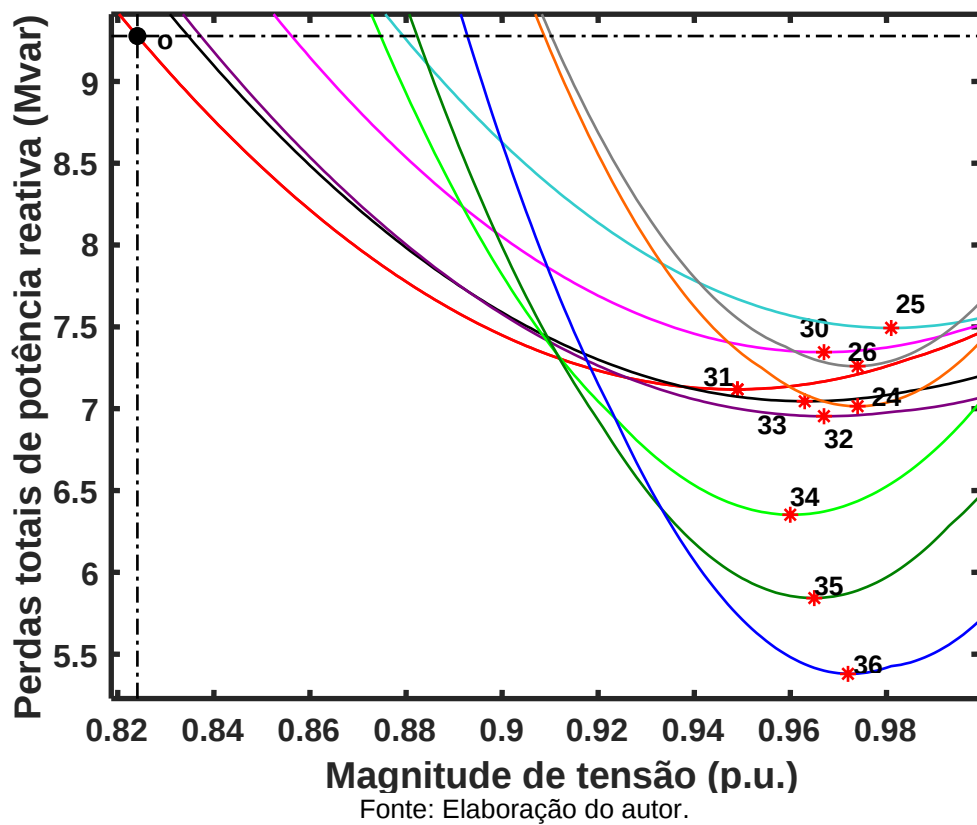


Figura 15 - Perda total de potência aparente versus a potência reativa do banco.

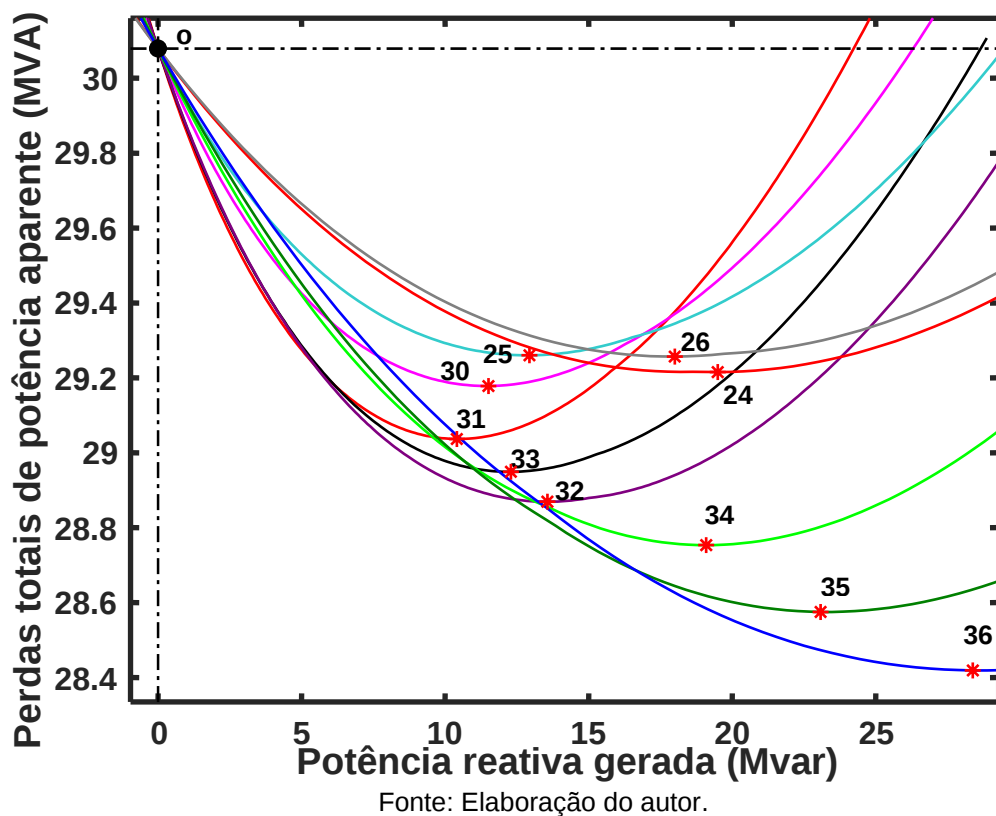
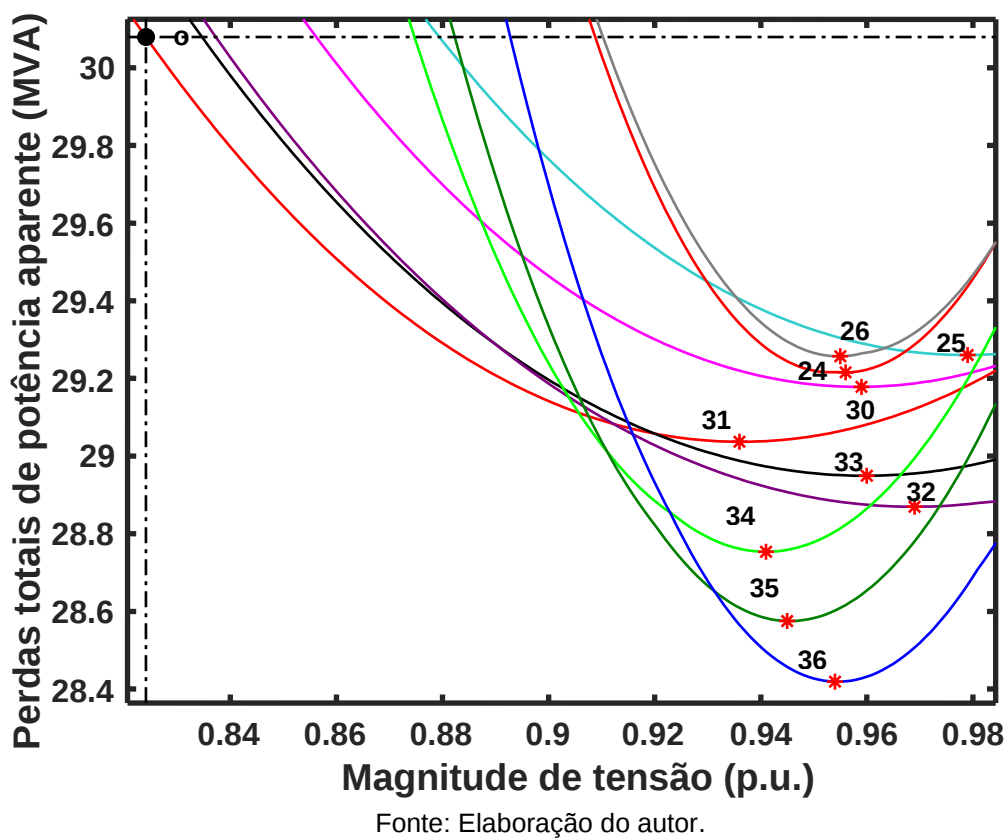


Figura 16 - Perda total de potência aparente versus a magnitude de tensão.



3.1 RESULTADOS OBTIDOS - SISTEMAS IEEE DE 14 e 57 BARRAS

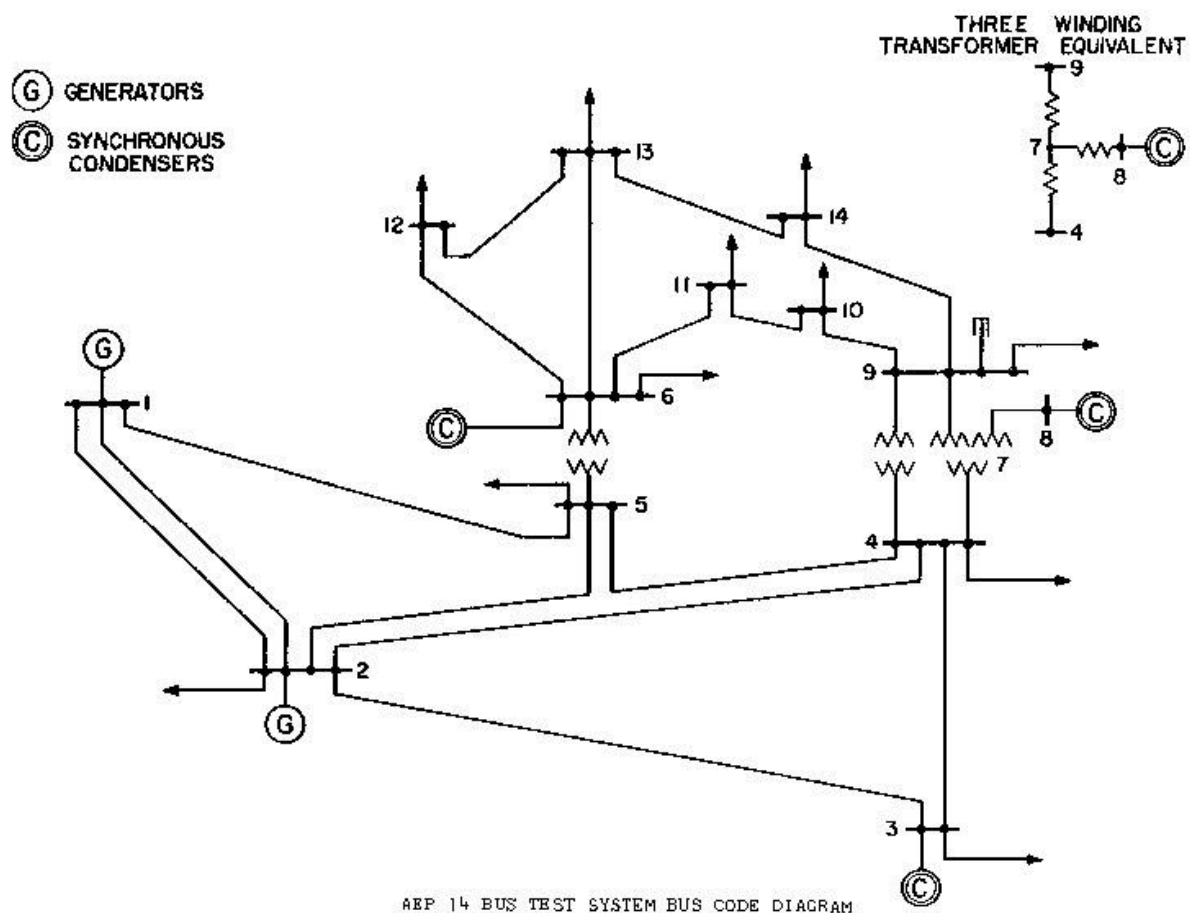
Nesta seção são apresentados os resultados da aplicação do método proposto aos sistemas IEEE-14 e IEEE-57. Estes sistemas são de pequeno porte e topologia simplificada, o que auxilia na compreensão e na análise dos resultados. O objetivo é apresentar exemplos de como o fluxo de carga continuado, aliado ao método da análise modal, podem ser utilizados para o estudo da estabilidade estática de tensão, mostrando resultados simulados com alocação de compensação *shunt* e seus efeitos na margem de estabilidade e perdas totais dos sistemas. Os sistemas IEEE-14 e 57 foram escolhidos devidos às suas diferentes características. O IEEE-14 apresenta uma topologia simples e mais próxima de um sistema radial, enquanto o IEEE-57 consiste numa malha de sistema ramificada com topologia em anel. O carregamento do sistema é incrementado em direção ao PMC e o monitoramento da margem de carregamento é feito por meio do traçado da curva P-V obtida pelo fluxo de carga continuado (FCC). A análise modal é feita no ponto de máximo carregamento (PMC) e usada na identificação das barras críticas e fatores de participação de barras

Para todos os testes realizados, a tolerância adotada para os desbalanços de potência foi de 10^{-5} p.u., excetuando na obtenção dos PMC para o qual se adotou 10^{-8} p.u. O ponto de operação inicial de cada curva é obtido com um fluxo de carga convencional. Os *taps* foram mantidos fixos e os limites de potência reativa nas barras PV's foram considerados.

3.1.1 IEEE-14

Na **Figura 17** apresenta-se o diagrama unifilar do sistema IEEE-14, o sistema é uma representação simplificada de uma porção do sistema elétrico da região meio-oeste dos Estados Unidos em janeiro de 1962 (UNIVERSIDADE DE WASHINGTON, 1993). É formado por seis barras de carga (tipo PQ), as barras 4, 5, 9, 10, 11, 12, 13 e 14, e quatro barras de geração (tipo PV), as barras 2, 3, 6 e 8, sendo a barra 1 a barra de referência (*slack*). A barra 7, apesar de ser tratada como PQ nos cálculos, é excluída da análise por se tratar do nó fictício do modelo de um transformador de três enrolamentos e, portanto, um ponto sem acesso para compensação *shunt*. Outra particularidade a ser levada em consideração é a presença de um banco de capacitores *shunt* de 19 Mvar na barra 9.

Figura 17 - IEEE-14: diagrama unifilar.



Fonte: Universidade de Washington (1993).

As curvas P-V, para todas as barras do sistema são apresentadas na **Figura 18**, estando destacada a barra 14, a crítica (BONINI; ALVES, 2010). O fator de carregamento (λ) do caso base é igual a 1, sendo que o seu valor no ponto de máximo carregamento (PMC) é igual a 1,7444 p.u. As respectivas perdas ativa, reativa e aparente no caso base são 13,359 MW, 26,809 Mvar e 29,953 MVA. Na **Figura 19** são apresentados para todas as barras os fatores de participação correspondentes ao menor autovalor ($9,57 \times 10^{-7}$), i.e., ao modo crítico, obtidos pela aplicação da análise modal no PMC.

Figura 18 – IEEE-14: curvas P-V.

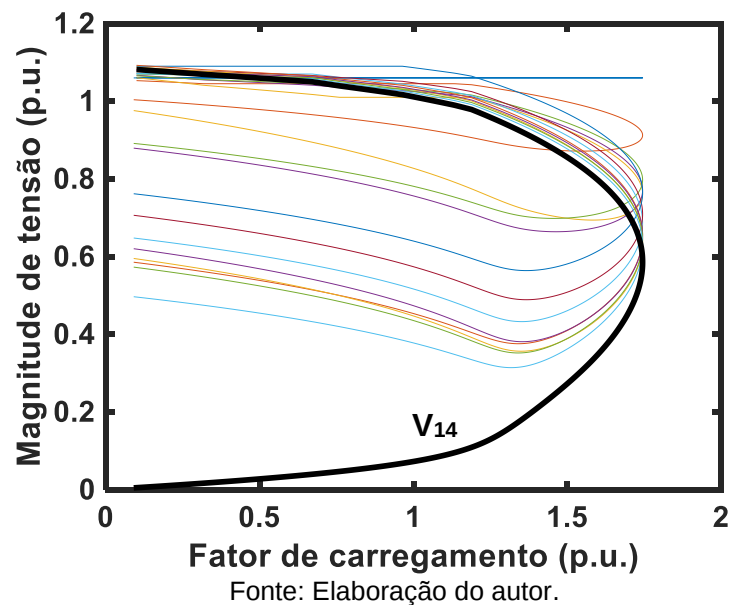
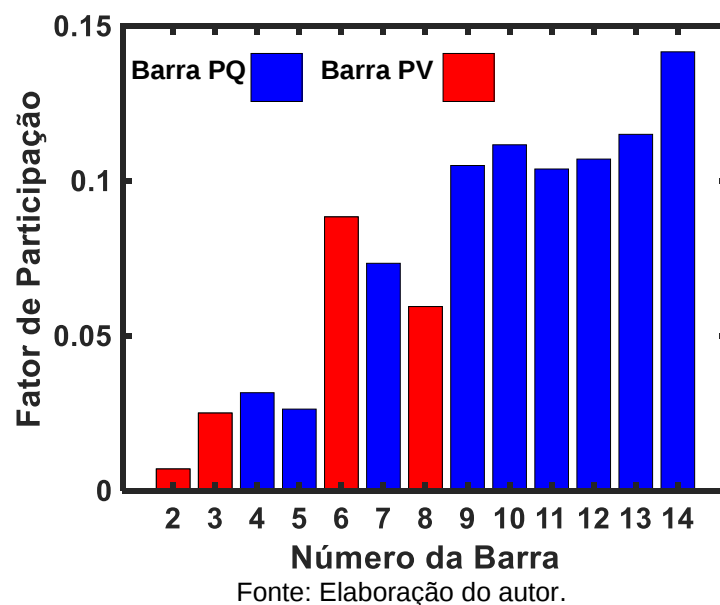


Figura 19 – IEEE-14: fatores de participação das barras.



As **Tabelas 3, 4 e 5** apresentam os resultados alcançados com a inclusão dos bancos de capacitores *shunt* fornecidos pelos três procedimentos de redução da perda total de potência reativa, ativa e aparente. Conforme comentado anteriormente, os valores em Mvar apresentados (coluna 6) correspondem aos valores especificados, i.e., àqueles que serão incluídos no banco de dados considerando uma magnitude de tensão de 1,0 p.u. Nas colunas 2, 3, e 4 de cada tabela são apresentados os valores das perdas ativa, reativa e aparente, sendo a primeira sempre a do procedimento usado. Também são mostrados os valores percentuais de ganho na margem de carregamento (GMC) e redução de perdas (Re) (colunas 10 e 12). Sendo os Mvar dos bancos diferentes, com o intuito de se possibilitar a comparação e a identificação dos locais (barras) mais eficientes para se efetuar a compensação *shunt* visando o aumento da margem de carregamento e a redução das perdas, nas colunas 11 e 13 das tabelas são apresentados os correspondentes valores percentuais do GMC e da Re por unidade de Mvar do banco, os quais também encontram-se exibidos nas **Figuras 20 e 22**, as colunas 8 e 9 mostram, respectivamente, o carregamento λ e a tensão da barra crítica no PMC, enquanto a coluna 7 mostra a magnitude de tensão da barra crítica no caso base. Da **Figura 20**, constata-se que as barras de 9 a 14 mostram praticamente a mesma eficiência para se alcançar um aumento da margem de carregamento (MC). Observa-se que na **Figura 20** não foram inclusos os valores correspondentes à metodologia de redução de perda total de potência ativa para as barras 4 e 9, porque para estas, nesse caso, seria necessária a inclusão de um banco de reatores e não de capacitores, conforme mostrado na **Tabela 3**. Nota-se, pelos valores dos fatores de participação das barras PQ apresentados na **Figura 19**, que as barras de 9 a 14 são as indicadas como as mais eficientes para alocação de compensação visando o aumento da margem de carregamento. Comparando-se as **Figuras 19 e 22** também se constata um padrão similar no que se refere à redução de perda total de potência reativa e aparente, sendo as barras 14, 13, 10, 9 e 11, nessa ordem, as mais apropriadas para se obter uma redução. No diagrama unifilar do sistema mostrado na **Figura 17**, verifica-se que já existe um banco de 19 Mvar instalado na barra 9, confirmando assim os resultados da análise. Um banco dessa quantia localizado na barra 14 ao invés da barra 9, elevaria os valores das perdas totais de potência aparente, ativa e reativa em 1,13%, 0,87% e 1,2% respectivamente, além da redução da MC para 1,7432 p.u.

CASO BASE: $P_{\text{perdas CB}} = 13,3589 \text{ MW}$; $Q_{\text{perdas CB}} = 26,8085 \text{ Mvar}$; $|S|_{\text{perdas CB}} = 29,9526 \text{ MVA}$; $|V| = 1,0113 \text{ p.u.}$; $\lambda_{\text{max}} = 1,7444 \text{ p.u.}$

Tabela 3 – Valores obtidos pelo método $P_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-14.

Barra	$f_{p_{ki}}$	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	$ V_{cb} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re P_{perdas}	
		MW	Mvar	MVA			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/ Q_{gen}	(%)	(%)/ Q_{gen}
14	0,1421	13,3160	26,5969	29,7441	6,2942	1,0320	1,7568	0,6012	1,6714	0,2656	0,3212	0,0510
13	0,1151	13,3136	26,6254	29,7685	7,6759	1,0430	1,7599	0,5964	2,0798	0,2710	0,3389	0,0442
10	0,1118	13,3497	26,6937	29,8458	4,8720	1,0410	1,7544	0,5923	1,3463	0,2763	0,0686	0,0141
12	0,1069	13,3442	26,7624	29,9048	3,1810	1,0370	1,7508	0,5888	0,8562	0,2692	0,1102	0,0346
9*	0,1052	13,3587	26,8118	29,9554	-0,5698	1,0350	1,7432	0,5836	-0,1556	-0,2731	0,0014	0,0025
11	0,1038	13,3492	26,7565	29,9017	3,7621	1,0420	1,7521	0,5898	1,0357	0,2753	0,0724	0,0192
4	0,0319	13,3558	26,8625	29,9995	-3,6183	1,0230	1,7393	0,5845	-0,6875	-0,1900	0,0230	0,0064
5	0,0265	13,3567	26,7487	29,8981	3,0624	1,0310	1,7487	0,5874	0,5761	0,1881	0,0167	0,0054

*No caso da barra 9 existe um banco de 19 Mvar, logo deve se adicionar $18,4302 = 19 - 0,5698 \text{ Mvar}$

Fonte: Elaboração do Autor.

Tabela 4 – Valores obtidos pelo método $Q_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-14.

Barra	$f_{p_{ki}}$	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	$ V_{cb} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re Q_{perdas}	
		Mvar	MW	MVA			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/ Q_{gen}	(%)	(%)/ Q_{gen}
14	0,1421	26,5531	13,3271	29,7099	9,4644	1,0420	1,7632	0,6085	2,5292	0,2672	0,9527	0,1007
13	0,1151	26,6141	13,3170	29,7599	9,4835	1,0480	1,7636	0,6007	2,5774	0,2718	0,7250	0,0764
10	0,1118	26,5889	13,3700	29,7611	11,4128	1,0550	1,7681	0,6001	3,1861	0,2792	0,8193	0,0718
12	0,1069	26,7261	13,3600	29,8794	6,6067	1,0490	1,7577	0,5936	1,7890	0,2708	0,3072	0,0465
9*	0,1052	26,6097	13,3920	29,7896	12,9368	1,0580	1,7715	0,6037	3,6428	0,2816	0,7415	0,0573
11	0,1038	26,6883	13,3648	29,8477	8,2843	1,0540	1,7615	0,5963	2,2975	0,2773	0,4483	0,0541
4	0,0319	26,5858	13,4919	29,8134	23,4095	1,0370	1,7783	0,5959	4,5544	0,1946	0,8307	0,0355
5	0,0265	26,4508	13,4542	29,6759	26,6529	1,0440	1,7822	0,5979	5,0825	0,1907	1,3343	0,0501

*No caso da barra 9 existe um banco de 19 Mvar, logo deve se adicionar $31,9368 = 19 + 12,9368 \text{ Mvar}$

Fonte: Elaboração do Autor.

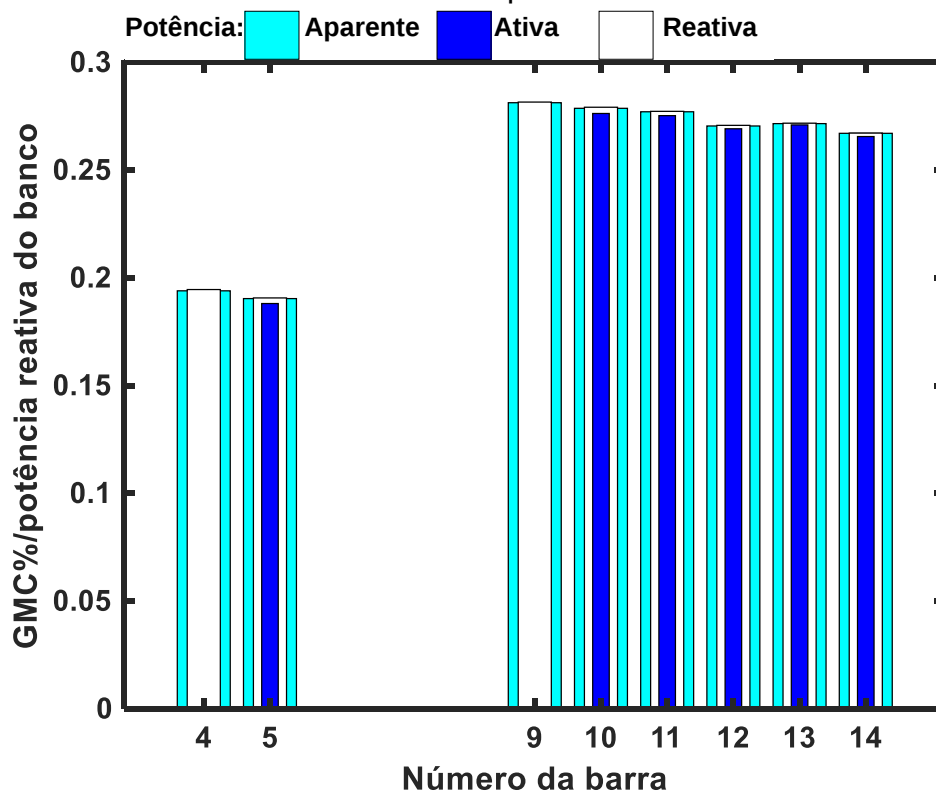
Tabela 5 – Valores obtidos pelo método $|S|_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-14.

Barra	$f_{p_{ki}}$	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	$ V_{cb} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re $ S _{\text{perdas}}$	
		MVA	MW	Mvar			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/ Q_{gen}	(%)	(%)/ Q_{gen}
14	0,1421	29,7096	13,3250	26,5538	9,1499	1,0410	1,7626	0,6075	2,4438	0,2671	0,8113	0,0887
13	0,1151	29,7598	13,3159	26,6146	9,1233	1,0470	1,7628	0,5998	2,4781	0,2716	0,6435	0,0705
10	0,1118	29,7598	13,3646	26,5901	10,4883	1,0530	1,7662	0,5985	2,9233	0,2787	0,6436	0,0614
12	0,1069	29,8780	13,3550	26,7272	6,0345	1,0470	1,7565	0,5948	1,6322	0,2705	0,2489	0,0412
9*	0,1052	29,7888	13,3892	26,6102	12,3062	1,0570	1,7702	0,6023	3,4622	0,2813	0,5469	0,0444
11	0,1038	29,8470	13,3623	26,6889	7,9111	1,0530	1,7607	0,5954	2,1926	0,2771	0,3524	0,0445
4	0,0319	29,8084	13,4561	26,5984	19,3492	1,0350	1,7723	0,5953	3,7539	0,1940	0,4814	0,0249
5	0,0265	29,6724	13,4394	26,4544	24,8177	1,0430	1,7796	0,5967	4,7264	0,1904	0,9355	0,0377

*No caso da barra 9 existe um banco de 19 Mvar, logo deve se adicionar $31,3062 = 19 + 12,3062 \text{ Mvar}$

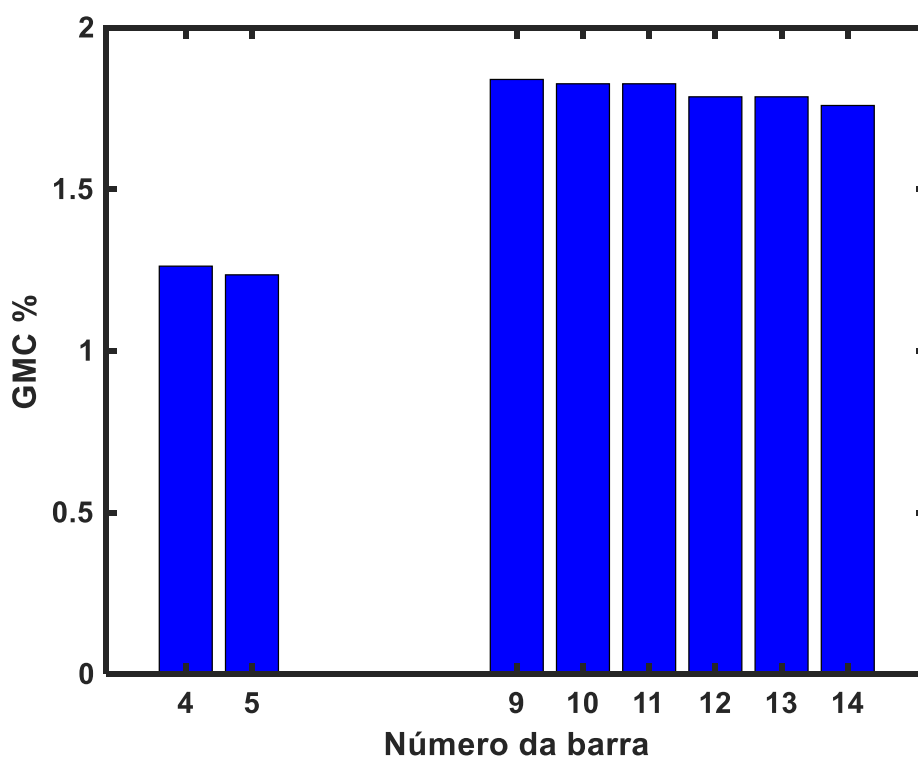
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 20 – IEEE-14: ganho da margem de carregamento em relação à potência do banco de capacitor *shunt*.



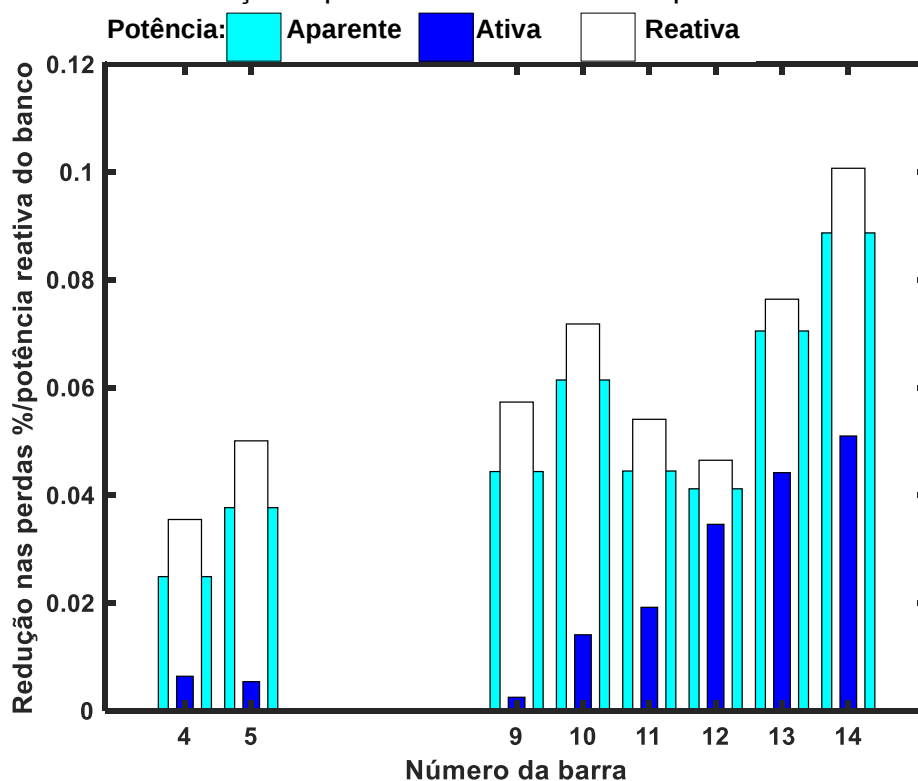
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 21 – IEEE-14: ganho da margem de carregamento após a instalação individual de um banco de capacitor *shunt* de 6,607 Mvar em cada barra.



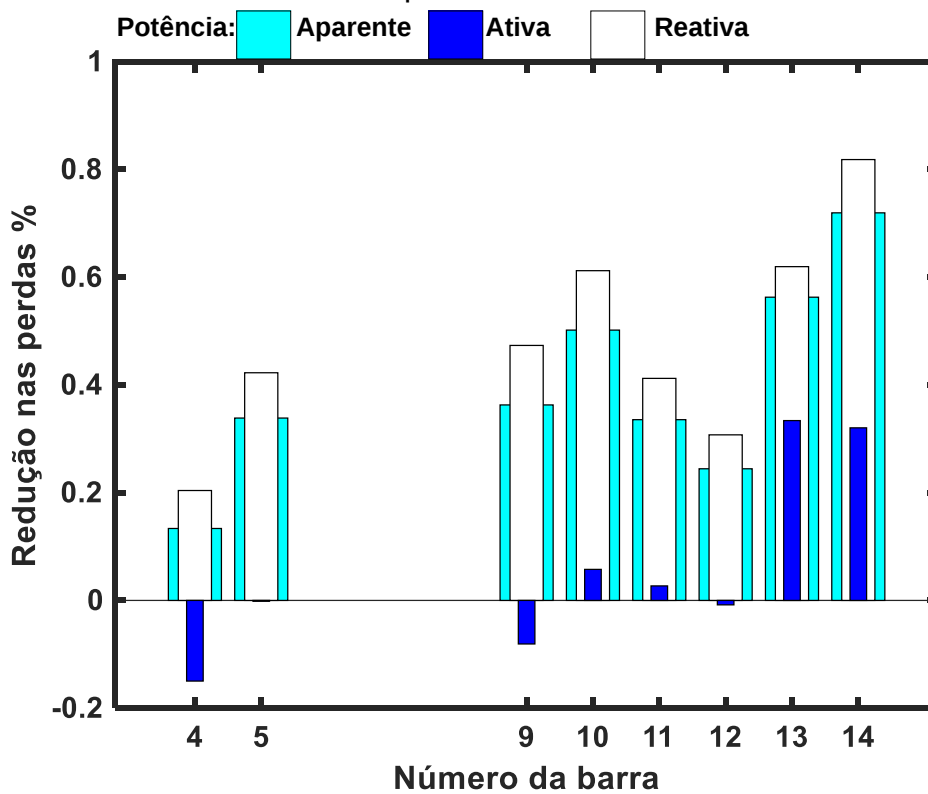
Fonte: Elaboração do Autor

Figura 22 – IEEE-14: redução nas perdas totais de potência ativa, reativa e aparente em relação à potência do banco de capacitor *shunt*.



Fonte: Elaboração do autor.

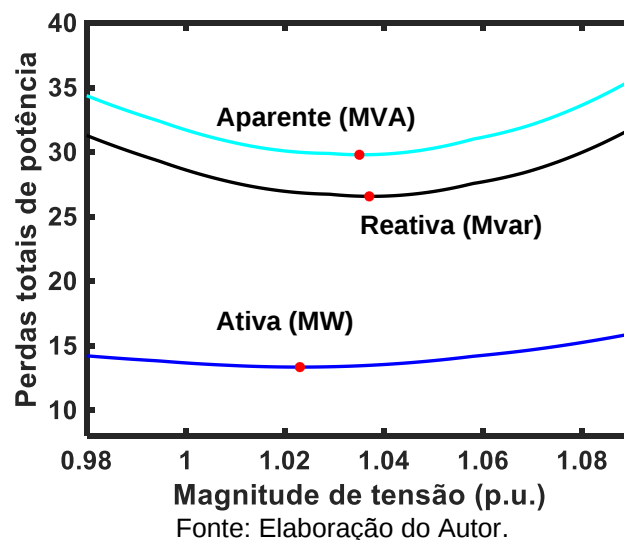
Figura 23 – IEEE-14: redução na perda total de potência reativa após a instalação individual de um banco de capacitor *shunt* de 6,607 Mvar em cada barra.



Fonte: Elaboração do Autor

Conforme abordado, a principal utilidade dos fatores de participação de barras (fp_{ki}) definidos pela análise modal é fornecer valores numéricos que relacionem a participação que cada barra tem dentro de um modo de operação, tais valores então podem ser organizados de forma decrescente, criando um “*ranking*” que servirá como indicador dos locais mais adequados do sistema para aplicação da compensação capacitiva *shunt*, sendo que a proposta apresenta um intuito multiobjetivo; o aumento da margem de carregamento e a diminuição de perdas de potência, diminuição essa que é abordada dos pontos de vista de potência ativa, reativa e aparente. As **Figuras 21 e 23** apresentam em valor percentual, os valores do aumento na margem de carregamento e da variação nas perdas totais de potência ativa, reativa e aparente em relação aos valores do caso base, quando um banco de capacitores *shunt* de 6,607 Mvar é aplicado separadamente em cada uma das barras indicadas. Comparando-se a **Figura 20** com a **Figura 21**, e a **Figura 22** com a **Figura 23**, constata-se um mesmo padrão (espectro) tanto de aumento na margem de carregamento quanto na redução de perdas reativa e aparente, comprovando o resultado apresentado pela análise proposta. Os valores negativos de redução de perda total de potência ativa, quando da compensação nas barras 4, 5, 9 e 12, e que se traduz por um aumento, é consequente do uso de um banco com valor (6,6067 Mvar) maior do que os apresentados na **Tabela 4** e do fato da não coincidência dos pontos de menores perdas das curvas, vide o exemplo da compensação na barra 4 apresentado na **Figura 24**.

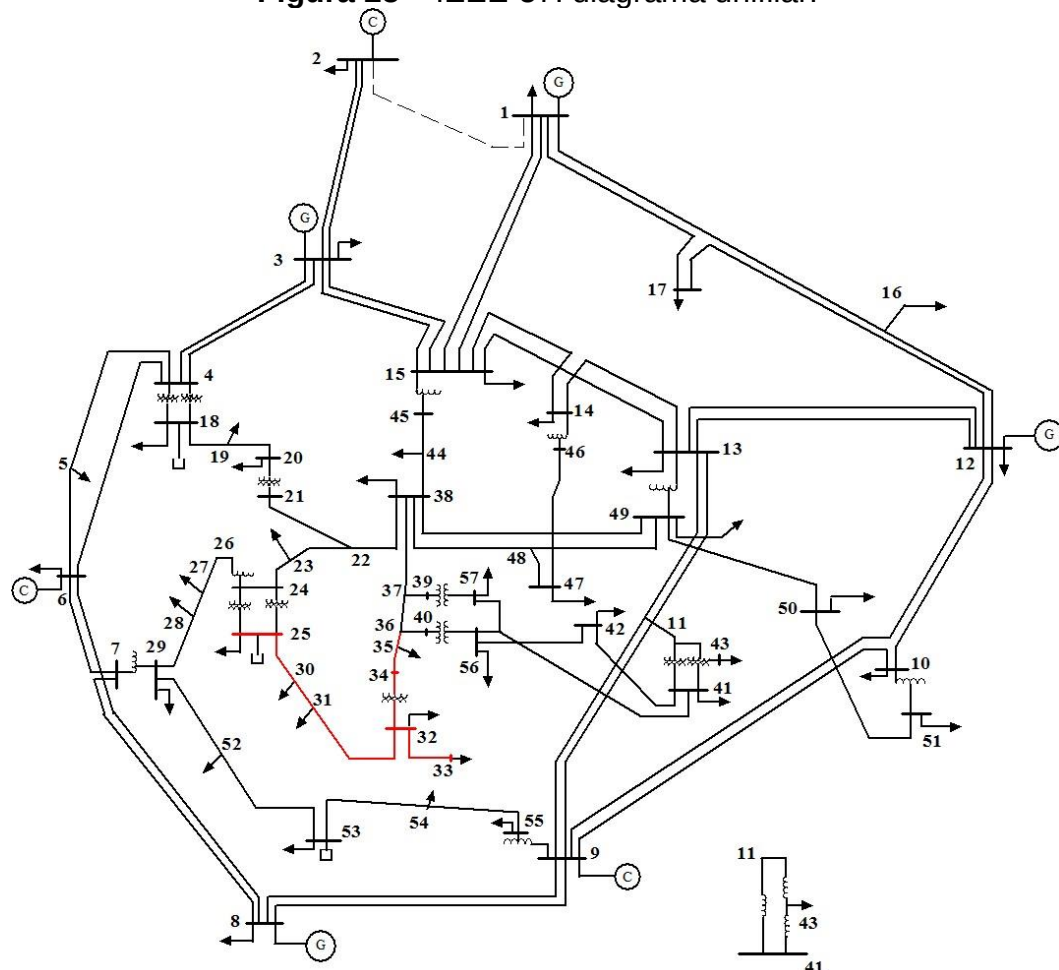
Figura 24 – IEEE-14: curvas de perda total de potência em função da tensão na barra 4.



3.1.2 IEEE-57

O diagrama unifilar do sistema IEEE de 57 é mostrado na **Figura 25** e representa uma aproximação simplificada do sistema elétrico do meio-oeste dos Estados Unidos no início dos anos 60 (Universidade de Washington, 1993), sendo um sistema mais complexo e carregado, com topologia em anel. A barra 1 é a de referência, ou “slack”, e as barras 2, 3, 6, 8, 9 e 12 são barras de geração, do tipo PV, todas as barras restantes são barras de carga tipo PQ. Uma análise semelhante ao do IEEE-14 é feita para o IEEE-57, a barra crítica é a 31, o carregamento é incrementando até o PMC, em $\lambda = 1,5330$ p.u., com 28,6127 MW, 9,2769 Mvar e 30,0790 MVA de perdas ativas, reativas e aparentes no caso base $\lambda = 1$ respectivamente. Na **Figura 26** são apresentadas as curvas P-V para todas as barras do sistema, enquanto na **Figura 27** são apresentados para as barras de carga os fatores de participação correspondentes ao menor autovalor ($4,087 \times 10^{-8}$), i.e., ao modo crítico, obtidos pela aplicação da análise modal no PMC.

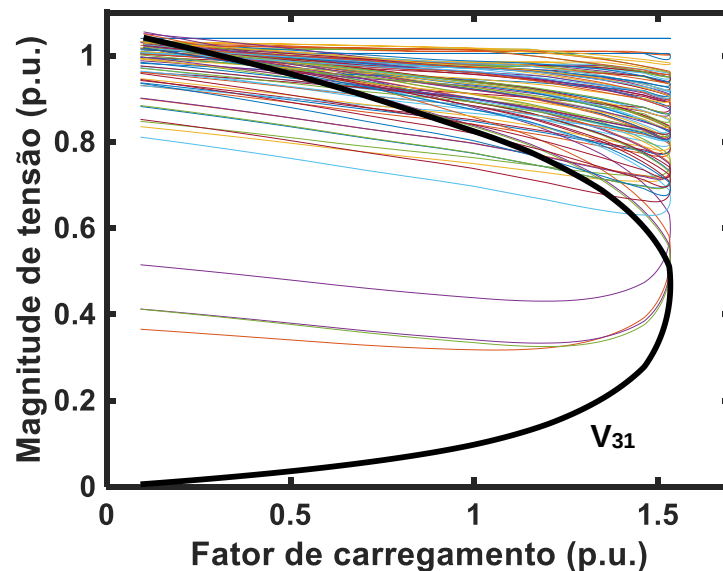
Figura 25 – IEEE-57: diagrama unifilar.



Fonte: Adaptado de Universidade de Washington (1993).

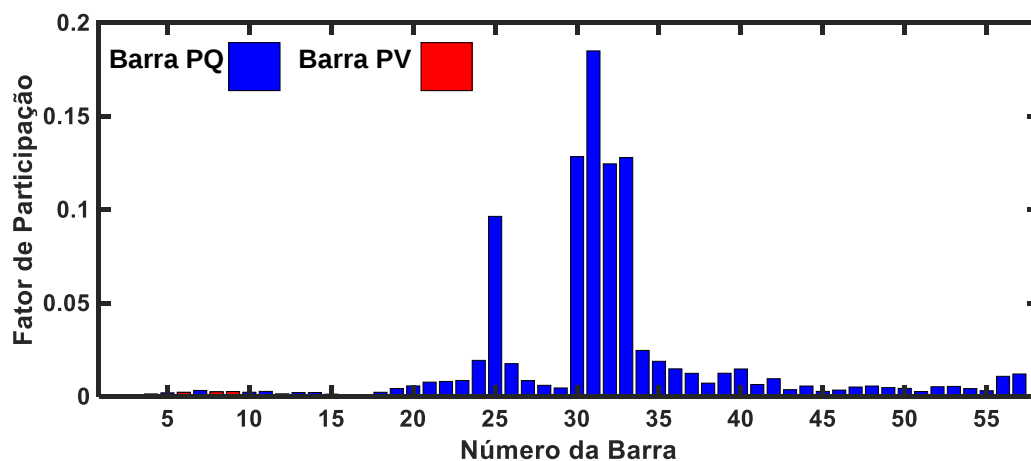
Conforme ilustrado no diagrama unifilar do sistema IEEE-57 da **Figura 25**, a análise modal indica a área crítica, formada por um conjunto de barras fisicamente interligadas (indicadas em vermelho na figura), e que é propensa ao colapso de tensão. Percebe-se, pelos fatores de participação mostrados na **Figura 27**, que as barras pertencentes a esta região crítica possuem fatores de participação mais significativos do que os demais. Nas **Figuras 28 e 29**, é mostrado um estudo comparativo entre os perfis de tensão para todas as barras no caso base e no PMC, é possível observar que os maiores afundamentos de tensão se concentram particularmente na região de instabilidade.

Figura 26 – IEEE-57: curvas P-V.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 27 – IEEE-57: fatores de participação das barras.



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 28 – IEEE-57: perfil de tensão do sistema operando no caso base.

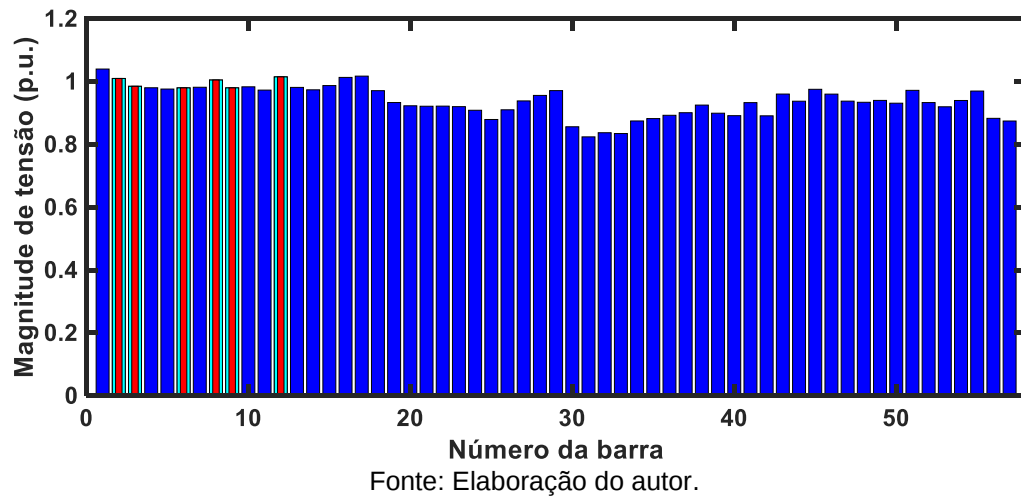
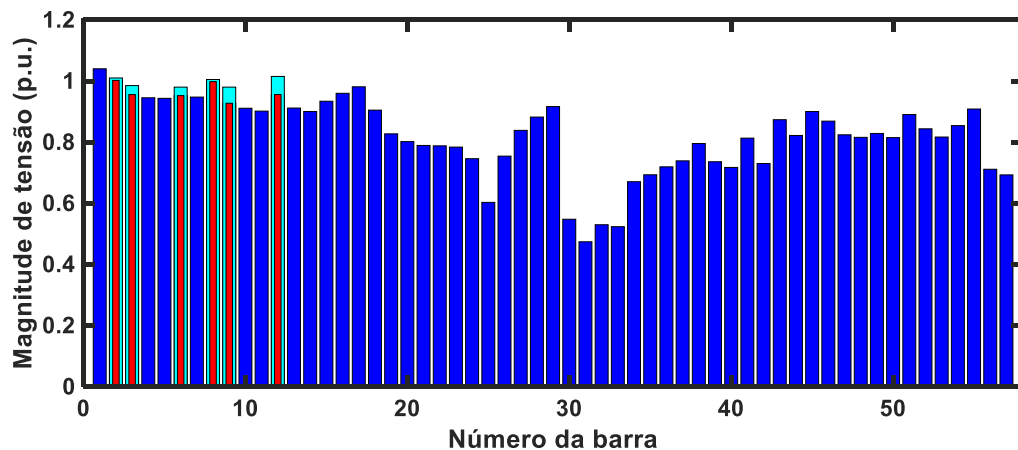


Figura 29 – IEEE-57: perfil de tensão do sistema operando no PMC.



Estão destacadas em vermelho as tensões das barras PV e em azul claro seus valores especificados de tensão. Quando o valor em vermelho é inferior ao valor em azul claro, significa que o limite de geração de reativos da barra PV foi ultrapassado e a barra se tornou PQ, ocorrendo neste caso queda de tensão.

Fonte: Elaboração do Autor.

As **Tabelas 6, 7 e 8** apresentam para as dez primeiras barras PQ indicadas pelos fatores de participação apresentados na **Figura 30**, os resultados alcançados com a inclusão do banco *shunt* fornecidos pelos respectivos procedimentos de redução da perda total de potência reativa, ativa e aparente. O Western Systems Coordinating Council (WSCC, 1998) recomenda uma margem de estabilidade mínima de 5%, enquanto que o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2002) recomenda 6%. Diferente do IEEE-14, para o qual a metodologia proporcionou GMC variando entre 0,5% a 5,1%, das Tabelas pode-se constatar que no caso do IEEE-57 os GMC sempre são superiores a 5%, podendo se alcançar valores de até 11,54%.

CASO BASE: $P_{\text{PERDAS CB}} = 28,6127 \text{ MW}$; $Q_{\text{PERDAS CB}} = 9,2769 \text{ MVAR}$; $|S|_{\text{PERDAS CB}} = 30,0790 \text{ MVA}$; $|V| = 0,8241 \text{ p.u.}$; $\lambda_{\text{max}} = 1,5331 \text{ p.u.}$

Tabela 6 – Valores obtidos pelo método $P_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-57.

Barra	$f_{p_{ki}}$	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	$ V_{cb} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re P_{perdas}	
		MW	Mvar	MVA			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/ Q_{gen}	(%)	(%)/ Q_{gen}
31	0,1873	28,1412	7,1829	29,0435	11,0136	0,9270	1,5643	0,5215	5,8460	0,5308	1,6477	0,1496
30	0,1296	28,2332	7,3839	29,1828	11,6230	0,9510	1,5680	0,5093	6,5525	0,5638	1,3264	0,1141
33	0,1284	28,0779	7,0522	28,9500	12,9605	0,9560	1,5702	0,5092	6,9591	0,5369	1,8691	0,1442
32	0,1250	28,0191	6,9545	28,8693	14,5418	0,9700	1,5751	0,5151	7,8820	0,5420	2,0745	0,1427
25*	0,0971	28,2838	7,4974	29,2607	13,1280	0,9760	1,5736	0,5072	7,5879	0,5780	1,1494	0,0876
34	0,0245	27,9873	6,7025	28,7787	18,7929	0,9320	1,5662	0,4841	6,2170	0,3308	2,1857	0,1163
24	0,0193	28,2752	7,4932	29,2512	16,0708	0,9440	1,5630	0,4825	5,6073	0,3489	1,1796	0,0734
35	0,0186	27,9075	6,2647	28,6021	22,7169	0,9370	1,5701	0,4830	6,9365	0,3053	2,4645	0,1085
26	0,0175	28,2774	7,6246	29,2873	15,8876	0,9460	1,5619	0,4816	5,4018	0,3400	1,1719	0,0738
36	0,0146	27,8435	5,8387	28,4491	27,3202	0,9460	1,5752	0,4863	7,8985	0,2891	2,6884	0,0984

*No caso da barra 25 existe um banco de 5,9 Mvar, logo deve se adicionar $19,028 = 5,9 + 13,1280 \text{ Mvar}$

Fonte: Elaboração do Autor.

Tabela 7 – Valores obtidos pelo método $Q_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-57.

Barra	$f_{p_{ki}}$	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	$ V_{cb} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re $ S _{\text{perdas}}$	
		Mvar	MW	MVA			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/ Q_{gen}	(%)	(%)/ Q_{gen}
31	0,1873	7,1177	28,1639	29,0494	13,1126	0,9490	1,5703	0,5341	6,9730	0,5318	23,2753	1,7750
30	0,1296	7,3450	28,2446	29,1840	13,3940	0,9670	1,5734	0,5160	7,5535	0,5639	20,8251	1,5548
33	0,1284	7,0448	28,0796	28,9498	13,6213	0,9630	1,5721	0,5118	7,3204	0,5374	24,0612	1,7664
32	0,1250	6,9535	28,0195	28,8695	14,2520	0,9670	1,5743	0,5153	7,7220	0,5418	25,0448	1,7573
25*	0,0971	7,4933	28,2849	29,2606	13,7461	0,9810	1,5755	0,5093	7,9451	0,5780	19,2264	1,3987
34	0,0245	6,3518	28,1569	28,8644	27,2914	0,9600	1,5813	0,4921	9,0437	0,3314	31,5314	1,1554
24	0,0193	7,0144	28,5009	29,3513	28,9904	0,9740	1,5870	0,4943	10,1095	0,3487	24,3888	0,8413
35	0,0186	5,8424	28,1158	28,7164	33,4938	0,9650	1,5878	0,4925	10,2616	0,3064	37,0222	1,1053
26	0,0175	7,2592	28,4618	29,3729	27,6420	0,9740	1,5833	0,4907	9,4255	0,3410	21,7493	0,7868
36	0,0146	5,3792	28,0349	28,5463	39,6976	0,9720	1,5946	0,4932	11,5349	0,2906	42,0154	1,0584

*No caso da barra 25 existe um banco de 5,9 Mvar, logo deve se adicionar $19,6461 = 5,9 + 13,7461 \text{ Mvar}$

Fonte: Elaboração do Autor.

Tabela 8 – Valores obtidos pelo método $|S|_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-57.

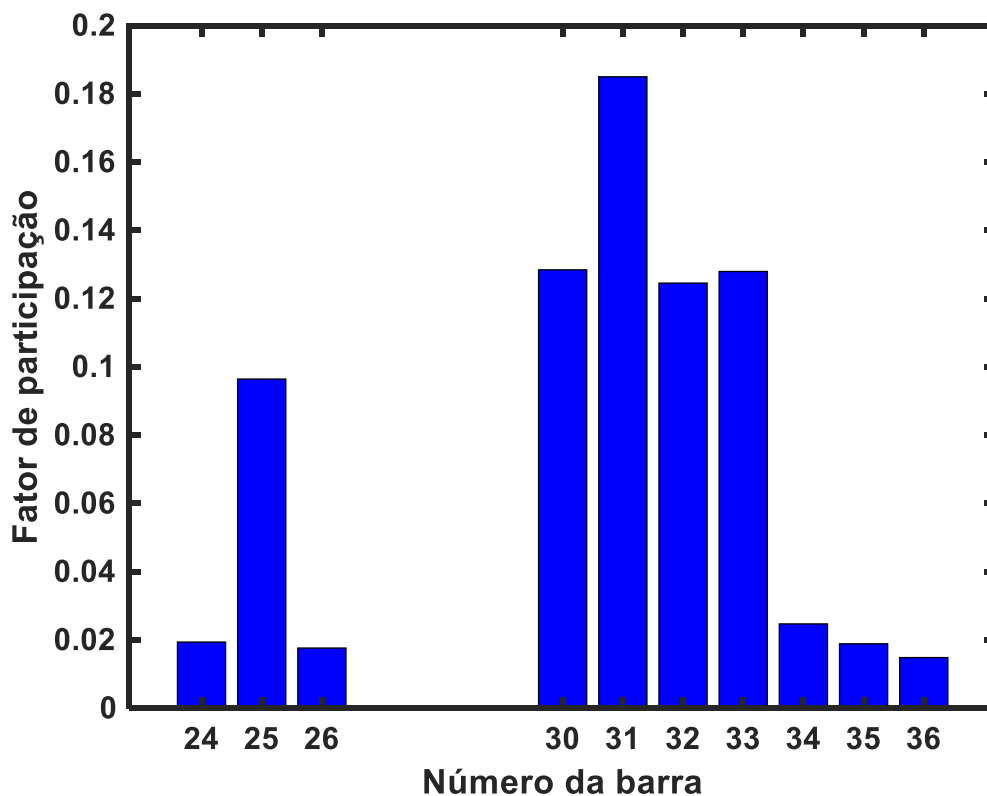
Barra	$f_{p_{ki}}$	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	$ V_{cb} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re $ S _{\text{perdas}}$	
		MVA	MW	Mvar			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/ Q_{gen}	(%)	(%)/ Q_{gen}
31	0,1873	29,0366	28,1452	7,1397	11,8820	0,9360	1,5667	0,5273	6,3116	0,5312	3,4654	0,2917
30	0,1296	29,1781	28,2361	7,3542	12,5147	0,9590	1,5707	0,5111	7,0563	0,5638	2,9950	0,2393
33	0,1284	28,9491	28,0784	7,0463	13,3391	0,9600	1,5713	0,5093	7,1656	0,5372	3,7565	0,2816
32	0,1250	28,8692	28,0192	6,9539	14,4453	0,9690	1,5748	0,5140	7,8286	0,5419	4,0220	0,2784
25*	0,0971	29,2601	28,2842	7,4939	13,4995	0,9790	1,5747	0,5071	7,8025	0,5780	2,7223	0,2017
34	0,0245	28,7535	28,0056	6,5153	21,5662	0,9410	1,5712	0,4865	7,1390	0,3310	4,4067	0,2043
24	0,0193	29,2152	28,3125	7,2065	21,3306	0,9560	1,5728	0,4861	7,4419	0,3489	2,8716	0,1346
35	0,0186	28,5750	27,9256	6,0574	25,8458	0,9450	1,5752	0,4847	7,8998	0,3057	5,0003	0,1935
26	0,0175	29,2567	28,2967	7,4335	19,7369	0,9550	1,5689	0,4833	6,7176	0,3404	2,7336	0,1385
36	0,0146	28,4187	27,8608	5,6034	31,1860	0,9540	1,5812	0,4888	9,0307	0,2896	5,5197	0,1770

*No caso da barra 25 existe um banco de 5,9 Mvar, logo deve se adicionar $19,3995 = 5,9 + 13,4995 \text{ Mvar}$

Fonte: Elaboração do Autor.

Comparando-se a **Figura 30** com as **Figuras 31 e 32** constata-se um mesmo padrão (espectro) tanto de aumento na MC quanto de redução de perda total de potência reativa e aparente. Comprova-se com isso que as barras indicadas pelos fatores de participação não só levam ao aumento da margem de carregamento, mas também à redução da perda total de potência e, particularmente, de potência reativa. Assim, é viável se definir com a metodologia proposta, o montante de compensação reativa *shunt* a serem alocados nas barras indicadas pelos fatores de participação, de forma a se atender a ambos os objetivos, o aumento da margem de carregamento e a redução das referidas perdas. Também neste sistema é possível constatar que numa das barras mais eficientes indicadas pela metodologia, a barra 25, já existe um banco de 5,9 Mvar instalado.

Figura 30 – IEEE-57: dez maiores fatores de participação de barras.



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 31 – IEEE-57: ganho da margem de carregamento em relação à potência do banco de capacitor *shunt*.

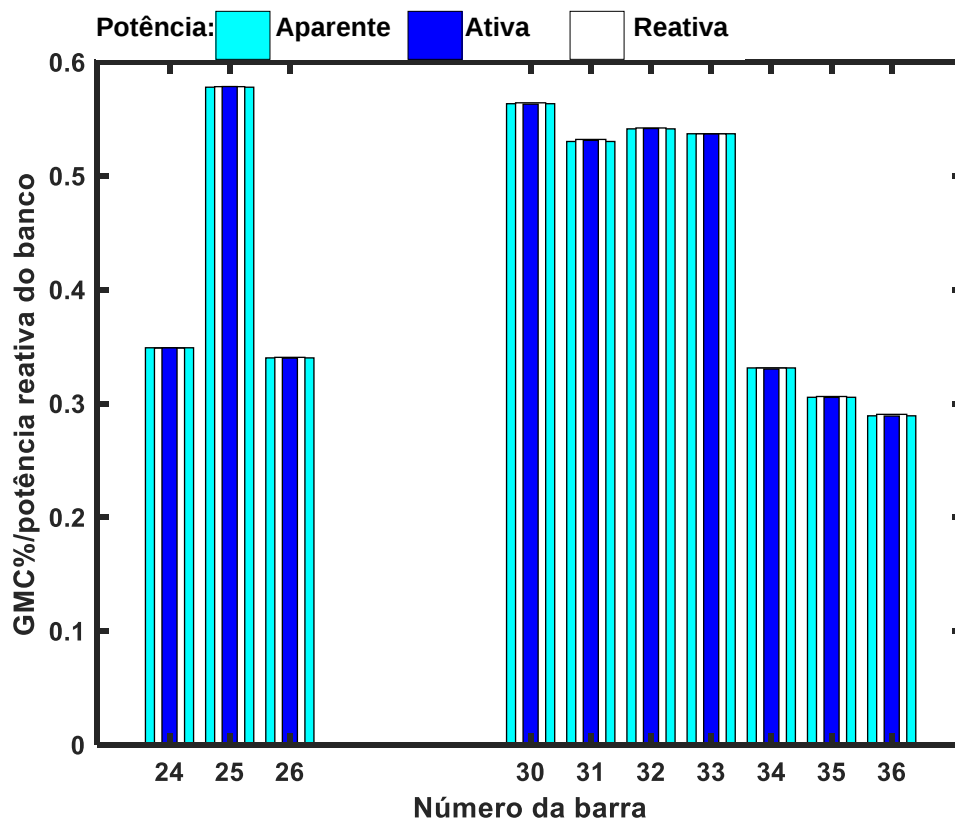
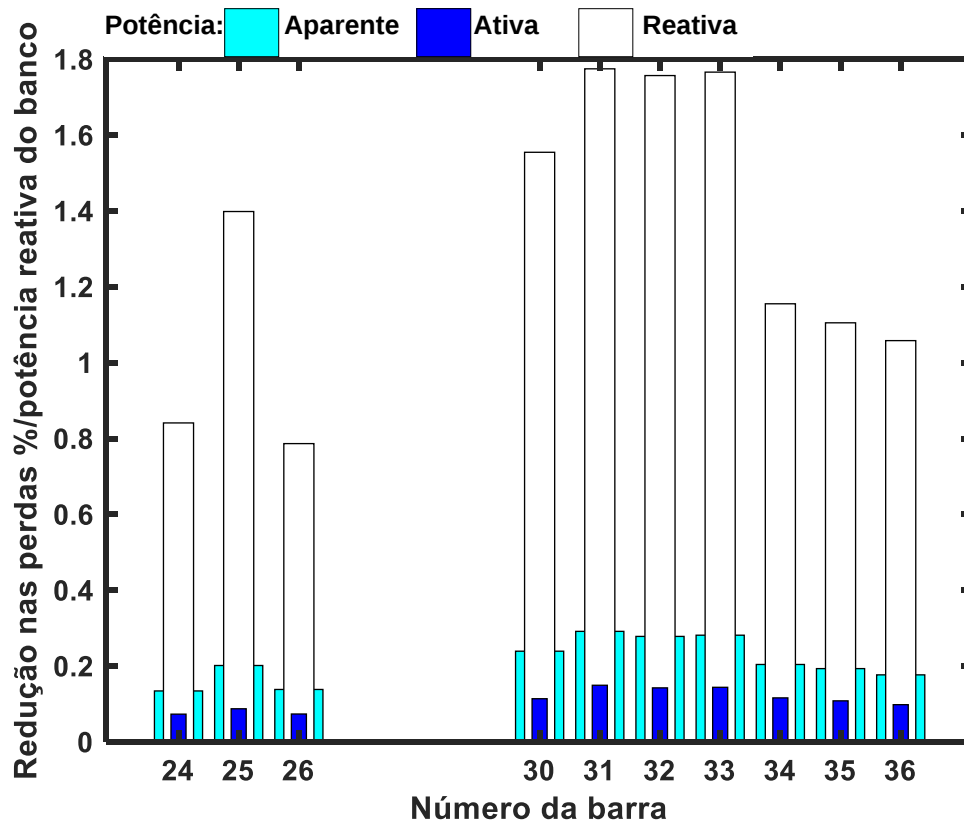


Figura 32 – IEEE-57: redução nas perdas totais de potência ativa, reativa e aparente em relação à potência do banco de capacitor *shunt*.



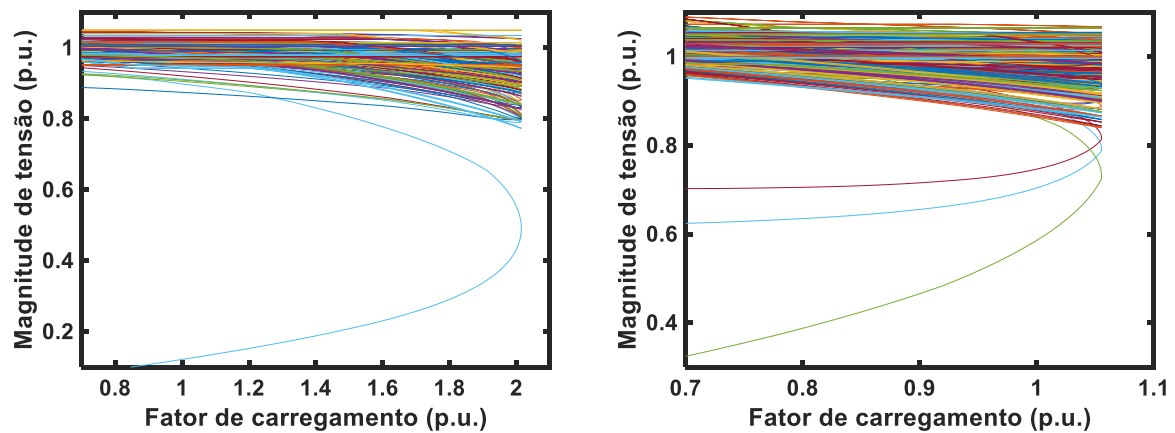
Fonte: Elaboração do Autor.

3.2 RESULTADOS OBTIDOS - SISTEMAS IEEE DE 118 BARRAS

O sistema IEEE-118 representa uma porção do Sistema Elétrico de Potência Norte Americano (especificamente do meio-oeste dos Estados Unidos) a partir de dezembro de 1962. Os dados foram manualmente copiados de um documento datado de dezembro de 1962, o AEP Sistema Teste 118 Barras, e disponibilizado para a indústria elétrica como um “caso teste padrão” (UNIVERSIDADE DE WASHINGTON, 1993).

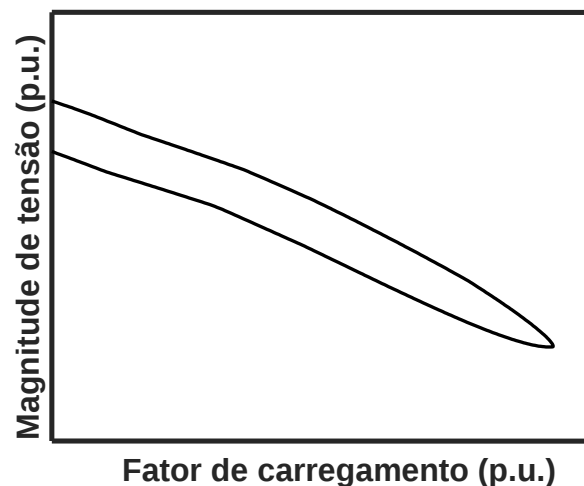
A princípio duas configurações são analisadas, aqui denominadas IEEE-118-I e IEEE-118-N, diferindo principalmente no número de geradores, o que causa diferenças sensíveis no fluxo de potência e nos resultados da análise modal e fatores de participação calculados. O intuito aqui é o de evidenciar a eficiência da análise modal quando aplicada a uma mesma rede, porém em diferentes condições operativas. O IEEE-118-N, banco de dados original disponibilizado pela Universidade de Washington (1993) é constituído por uma barra de referência (barra 69), 53 barras de geração (tipo PV), 63 barras de carga (tipo PQ) e 186 linhas de transmissão, enquanto que na configuração IEEE-118-I, as barras 25, 59, 61, 66 e 80 foram consideradas como barras de carga (tipo PQ). Para o IEEE-118-N, analisa-se também uma condição de contingência: a retirada da linha de transmissão entre as barras 11 e 13. Esta contingência resulta numa condição particular de estabilidade de tensão com características predominantemente local (ZHAO; ZHANG, 2006), i.e., o perfil de tensão de uma pequena área do sistema, ou magnitude de tensão de algumas poucas barras, fica fora da faixa normal de operação, conforme apresentado na **Figura 33**. A curva P-V da maioria das barras deste tipo de sistemas apresentam um "nariz agudo", conforme apresentado na **Figura 34**, onde as partes superior e inferior da curva apresentam praticamente a mesma inclinação, ao invés de um sinal oposto como no caso das barras críticas (BONINI; ALVES, 2008; ZHAO; ZHANG, 2006), e com isso, tanto o fator de carregamento quanto a magnitude de tensão apresentam uma inversão simultânea na sua tendência de variação os “narizes” são coincidentes.

Figura 33 – Sistemas com problemas de estabilidade de tensão com características predominantemente local, curvas P-V.



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 34 – Sistemas com problemas de estabilidade de tensão com características predominantemente local, curva P-V típica de uma barra.



Fonte: Elaboração do Autor.

Outro fato observado para o sistema IEEE-118 é que já no caso base ($\lambda = 1$ p.u.), para todas as configurações analisadas, a perda total de potência reativa é negativa, ao contrário do que acontece nos casos dos sistemas analisados anteriormente, conforme se constata da **Tabela 9**.

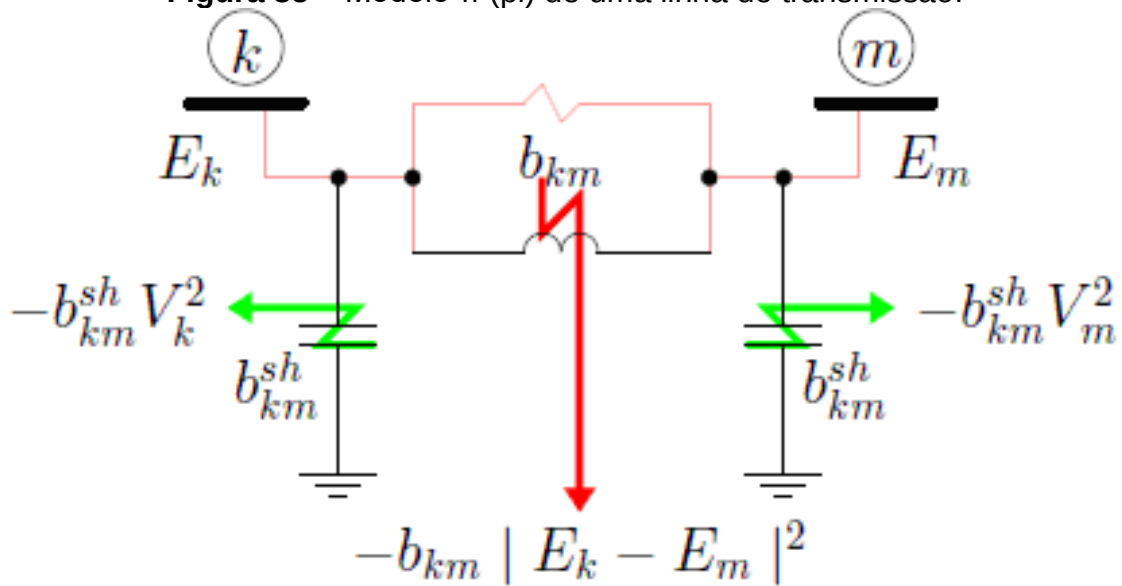
Tabela 9 – IEEE-118: perdas totais de potência para o caso base ($\lambda = 1$ p.u.).

Sistema	Perda		
	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)	Aparente (MVA)
IEEE-118-I	130,3003	-601,4896	615,4412
IEEE-118-N	131,1543	-600,3777	614,5362
IEEE-118-N c/ cont.	132,9049	-590,7125	605,4791

Fonte: Elaboração do Autor.

O fato da perda total de potência reativa para estes sistemas ser negativa pode levar a questionamentos com relação ao conceito de “perda” de potência reativa, que não podem ser interpretadas da mesma maneira que a perda de potência ativa. Nos estudos de fluxo de potência, a quantidade total de potência reativa no sistema é um balanço dos valores de potência reativa em cada linha presente no sistema (MONTICELLI, 1983), conforme equação (45), sendo que cada linha é representada pelo modelo π (pi) apresentado na **Figura 35**.

Figura 35 – Modelo π (pi) de uma linha de transmissão.



Fonte: Adaptado de Castro (2019).

$$Q_{\text{perdas}} = Q_{km} + Q_{mk} = -b_{km}^{\text{sh}} (V_k^2 + V_m^2) - b_{km} |E_k - E_m|^2 \quad (45)$$

De acordo com a equação (45), a potência reativa, em cada linha, é composta de duas parcelas. A segunda parcela $-b_{km} |E_k - E_m|^2$ corresponde à perda reativa no elemento série, e como $b_{km} < 0$, essa parcela é positiva, sendo considerada como potência consumida. A primeira parcela $-b_{km}^{\text{sh}} (V_k^2 + V_m^2)$ corresponde à injeção (geração) de potência reativa pelos elementos *shunt*, e como $b_{km}^{\text{sh}} > 0$, ela é negativa e nesse caso tratada como sendo potência fornecida. Percebe-se que a potência reativa nos elementos série é sempre positiva (consumida), enquanto a potência reativa nos elementos *shunt* é sempre negativa (fornecida). A perda reativa total da linha (Q_{perdas}) consiste no balanço entre a potência reativa consumida e fornecida

pela linha, que pode ser negativo, indicando que a linha tem um excedente de injeção de reativo, ou positivo, indicando que a linha apresenta um déficit de injeção de reativo. Este conceito se reflete ao se estudar as perdas totais do sistema, ou seja, o somatório dos valores de Q_{perdas} para todas as linhas, podendo este valor apresentar então valores tanto positivos quanto negativos, sendo que valores negativos de perda total de potência reativa indicam que, analisando-se o balanço total de reativos, o sistema apresenta um excedente de injeção de potência reativa. Destaca-se aqui novamente o quanto é fundamental o suprimento adequado e corretamente distribuído de potência reativa para a manutenção da estabilidade estática de tensão, de acordo com a ONS:

Uma vez que o próprio sistema de transmissão pode gerar ou absorver reativos – o que é função do ponto de operação – e que as cargas podem ou não cumprir seus requisitos de fator de potência, o dimensionamento da compensação reativa deve prever reserva de potência reativa, em regime permanente e dinâmico, que permita manter a qualidade do suprimento em diferentes situações. (Procedimentos de Rede, Módulo 4, Submódulo 4.3 – Metodologia para elaboração das propostas de ampliações e reforços, 2010, p. 8)

Conforme apresentado no capítulo 2, o método proposto para diminuição das perdas de potência consiste no traçado das curvas de perdas totais (ativa, reativa e aparente) versus valor do banco capacitivo a ser instalado numa dada barra. Este método apresenta uma limitação quando a perda total de potência reativa apresenta um valor negativo, observe como o módulo das perdas totais de potência aparente é calculado:

$$|S_{\text{perdas}}| = \sqrt{P_{\text{perdas}}^2 + Q_{\text{perdas}}^2} \quad (46)$$

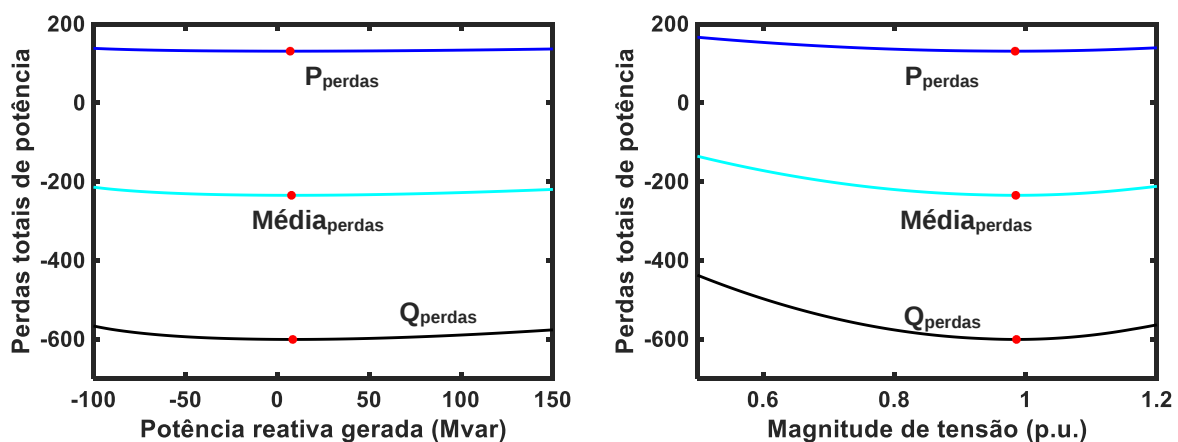
Na equação **(46)** o resultado é o mesmo para perda total de potência reativa, seja ela negativa ou positiva, ou seja, no cálculo do módulo da perda total aparente, o método não diferencia o sinal da perda total de potência reativa. Devido a isso, quando o método é aplicado, o traçado das curvas S_{perdas} total nos casos em que Q_{perdas} total apresenta valor negativo vai mostrar que a menor perda de potência aparente acontece para a instalação de bancos de reatores nas barras escolhidas, o que nestes casos de fato faz sentido para a diminuição das perdas aparentes, entretanto a instalação de compensação reativa indutiva *shunt* tem o efeito contrário

ao desejado na margem de carregamento, tendendo a diminuí-la. Para contornar esta limitação do método e, visto que o objetivo da proposta é a diminuição de perdas de potência aliada ao aumento da margem de carregamento, propõe-se então, que, para os casos em que Q_{perdas} total apresente valores negativos, seja descartada da análise a abordagem de diminuição de perdas aparentes ($|S|_{\text{perdas}}$), e em seu lugar seja analisada a média aritmética entre as reduções das perdas ativa (P_{perdas}) e reativa (Q_{perdas}), a ser calculada da seguinte maneira:

$$\text{Média}_{\text{perdas}} = \frac{P_{\text{perdas}} + Q_{\text{perdas}}}{2} \quad (47)$$

Desta maneira tem-se uma abordagem intermediária entre os pontos de vista de redução de perdas ativa e reativa. As configurações do sistema IEEE-118 apresentadas nesta seção serão analisadas então dos pontos de vista de perdas ativas, reativas e médias, conforme demonstrado no exemplo ilustrativo abaixo (sistema IEEE-118-N, cuja barra crítica é a 117). Na **Figura 36** As curvas de perdas (P_{perdas} , Q_{perdas} e $\text{Média}_{\text{perdas}}$) em função da potência reativa gerada na barra e da magnitude de tensão, ilustram a metodologia aqui proposta.

Figura 36 – IEEE-118-N: curvas de perdas totais de potência ativa, reativa e média em função da magnitude de tensão e da potência reativa gerada na barra 117.



Fonte: Elaboração do Autor.

3.2.1 IEEE-118-I

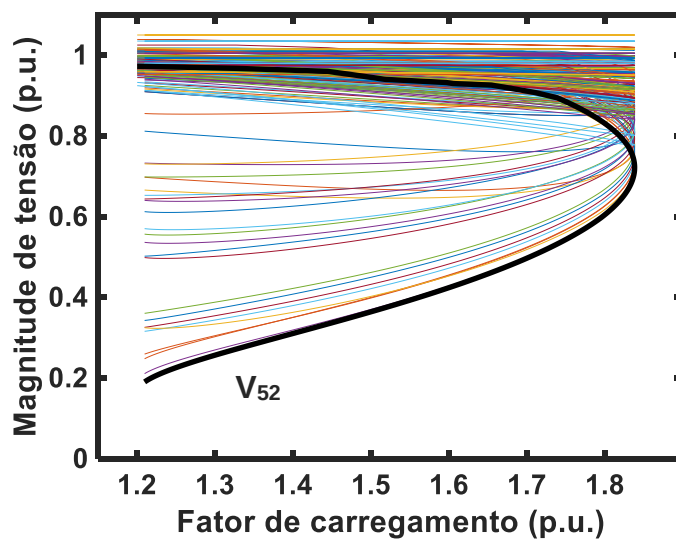
A barra 52 é a barra crítica desta configuração, sendo que os valores das perdas totais ativa, reativa e a média no caso base ($\lambda = 1$) são 130,3003 MW, -601,4896 Mvar e -235,5946, respectivamente. O carregamento é incrementado até atingir o ponto de máximo carregamento em $\lambda = 1,8378$ p.u., ou seja, neste sistema é possível um acréscimo de 83,8% (3.546,4 MW e 1.212,6 Mvar) do carregamento do caso base ($P_{CCB} = 4.233,0$ MW, $Q_{CCB} = 1.447,0$ Mvar). A **Figura 37** mostra as curvas P-V para todas as barras do sistema, com a barra crítica (barra 52) em destaque, e a **Figura 38** apresenta o perfil da magnitude de tensão do sistema operando no PMC, sendo as barras PQ apresentadas em azul, e as PV em vermelho. Os fatores de participação de todas as barras, correspondentes ao menor autovalor ($4,9467 \times 10^{-7}$) obtido para o PMC, são apresentados na **Figura 39**, enquanto que na **Figura 42** estão destacados os dez maiores fatores de participação dentre as barras PQ apenas. Observe que nesse caso a análise modal indica uma área crítica, conforme ilustrado no diagrama unifilar do sistema exibido nas **Figuras 40 e 41**, formada por um conjunto de barras fisicamente interligadas (indicadas em vermelho nas figuras), e que é propensa ao colapso de tensão. Do perfil de tensão apresentado na **Figura 38** também se vê que no PMC há uma redução sensível da magnitude de tensão das barras pertencentes à região da área crítica. Analogamente à análise feita na **seção 3.1** para os sistemas de IEEE de 14 e 57 barras, as **Tabelas 10, 11 e 12** e as **Figuras 42, 43 e 44** apresentam os resultados alcançados com a inclusão dos bancos *shunt* fornecido pelos três procedimentos de redução de perdas totais de potência ativa, reativa e média, respectivamente.

Da coluna 11 das tabelas e da **Figura 43** se verifica que as barras apresentam praticamente a mesma eficiência por unidade do banco. No entanto, conforme coluna 10 das tabelas, os procedimentos de redução de perdas mostram que é possível obter ganhos de margem de carregamento pouco maior que 13% com uma redução das perdas de potência ativa e reativa. Das tabelas pode-se constatar que as barras 59, 63, 61 e 60, nessa ordem, proporcionam os maiores ganhos na margem de carregamento (**Figura 43**), bem como as maiores redução nas perdas (**Figura 44**). Da coluna número seis da **Tabela 11** se verifica que a inclusão de um banco de 209,21 Mvar na barra 59 proporciona uma redução de apenas 1,512 MW nas perdas ativas e um aumento da injeção de reativo de 14,84 Mvar (2,5% em

relação a do caso base). No entanto, com relação à margem de carregamento do caso base, a inclusão do banco acarreta um aumento de 13,2% na MC, o que corresponde a um acréscimo de 558,75 MW (**Figura 45**) além de uma melhora no perfil de tensão na região da barra compensada (**Figura 46**). Observando a coluna número doze da **Tabela 12** se verifica um indicativo de redução da ordem de 3,48% de redução da média das perdas ativa e reativa com a inclusão de um banco de 201,78 Mvar na barra 59, um pouco menor que o indicado na **Tabela 11**. Neste caso ter-se-ia um pequeno acréscimo (61 kW a menos do que o caso anterior) na redução das perdas ativas, enquanto que o aumento da injeção de reativo permaneceria praticamente no mesmo valor anterior (14,82 Mvar), porém as custas de uma redução de 22 MW na margem de carregamento que passaria para 12,68%.

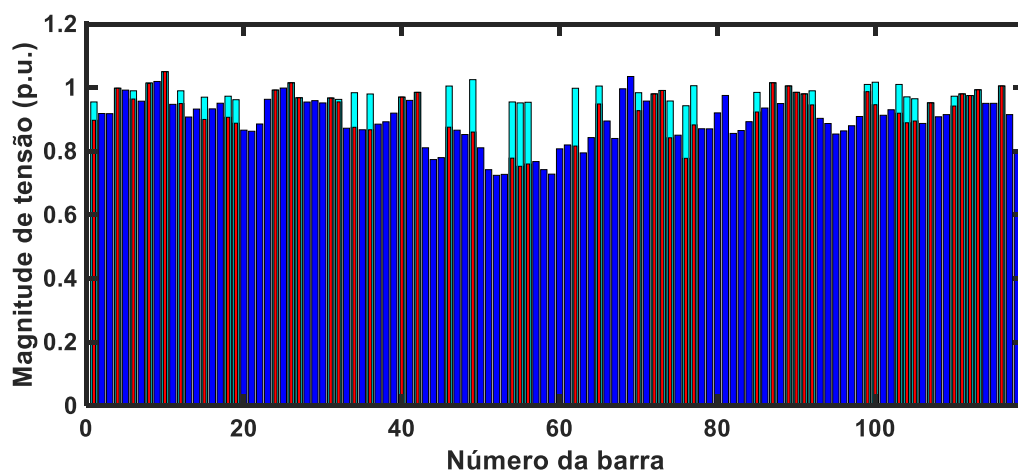
Como já comentado nos sistemas IEEE-118 há muitas barras PV estrategicamente distribuídas, o que proporciona uma maior sustentação da magnitude da tensão do sistema como um todo. Na configuração em questão as barras de geração de números 25, 59, 61, 66 e 80 foram consideradas como PQ, e embora elas variem sua potência ativa gerada proporcionalmente ao seu valor do caso base conforme o sistema é carregado, a potência reativa gerada está com seu valor fixado. Observa-se que as barras 59 e 61, assim como as 60 e 63 pertencentes as suas vizinhanças, estão entre as que proporcionam os maiores ganhos na margem de carregamento (**Figura 43**). Os respectivos limites máximos de potência reativa das barras 25, 59, 61, 66 e 80 são 140, 180, 300, 200 e 280 Mvar, assim, na área crítica se retirou um total de 680 Mvar levando todos os geradores de suas primeiras vizinhanças a atingirem os seus respectivos limites máximos de potência reativa ($Q_{\max}$). Por outro lado, o mesmo não ocorre para o caso do gerador 25 visto que na barra 26 há um gerador cujo limite máximo é de 1000 Mvar. Apesar desse contexto, mesmo neste sistema com um maior número de barras PV foi possível obter simultaneamente um aumento da margem de carregamento e redução de perdas.

Figura 37 – IEEE-118-I: curvas P-V.



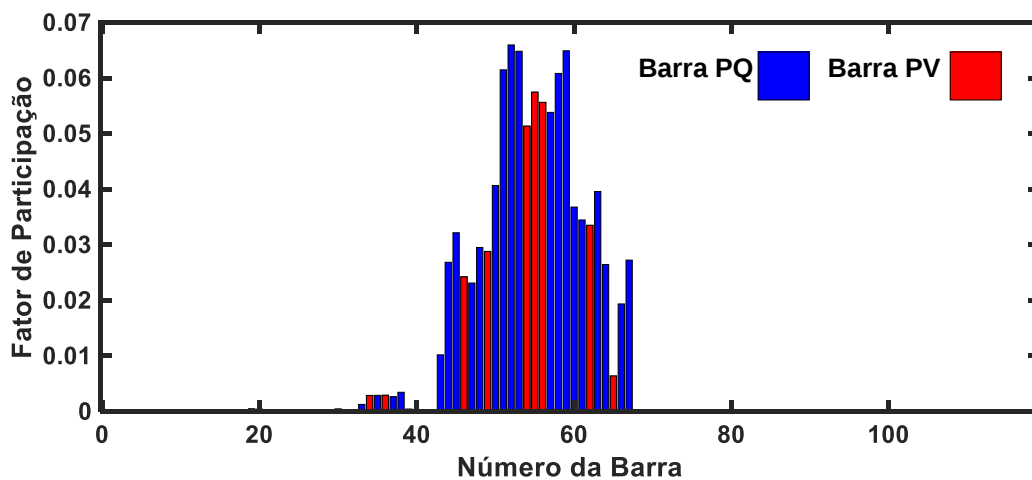
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 38 – IEEE-118-i: perfil de tensão do sistema operando no PMC.



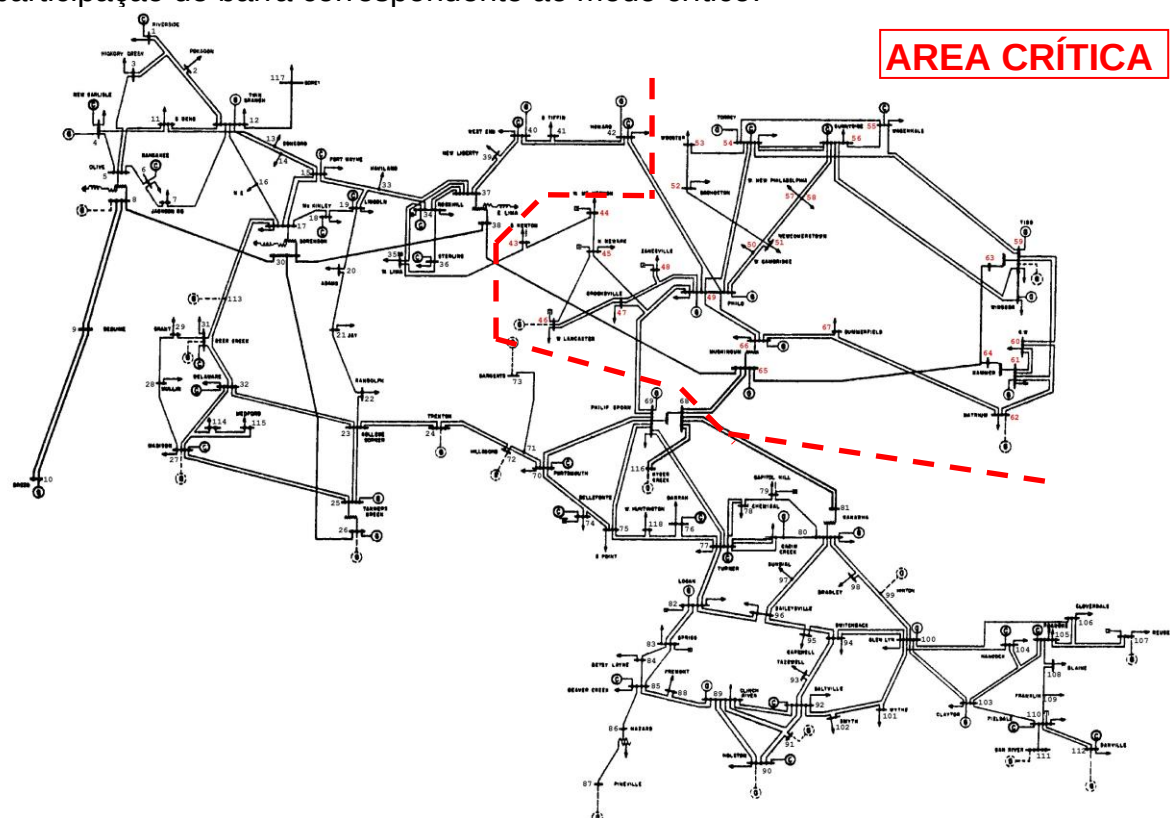
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 39 – IEEE-118-I: fatores de participação das barras.



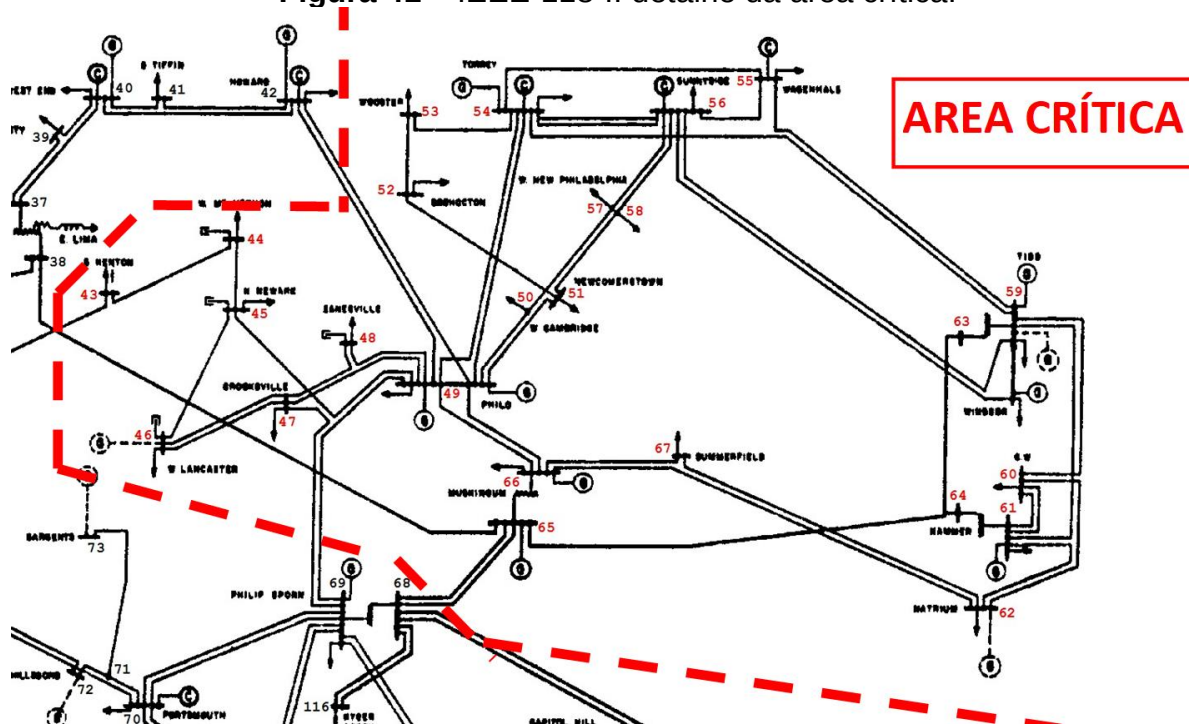
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 40 – IEEE-118-I: diagrama unifilar com as barras indicadas pelo fator de participação de barra correspondente ao modo crítico.



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 41 – IEEE-118-I: detalhe da área crítica.



Fonte: Adaptado de Universidade de Washington (1993).

CASO BASE: $P_{\text{perdas CB}} = 130,3003 \text{ MW}$; $Q_{\text{perdas CB}} = -601,4896 \text{ Mvar}$; Média_{perdas CB} = -235,5946; $|V| = 0,9803 \text{ p.u.}$; $\lambda_{\text{max}} = 1,8378 \text{ p.u.}$

Tabela 10 – Valores obtidos pelo método $P_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-118-I.

Barra	fp _{ki}	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	V _{cb} (p.u.)	PMC		GMC		Re P _{perdas}	
		MW	Mvar	Média			λ	V (p.u.)	(%)	(%)/Q _{gen}	(%)	(%)/Q _{gen}
52	0,0658	130,2361	-601,9392	-235,8515	13,6695	0,9930	1,8440	0,7344	0,7357	0,0541	0,0492	0,0036
59	0,0653	128,5894	-615,3344	-243,3725	164,0419	1,0280	1,9230	0,7596	10,1670	0,0620	1,3130	0,0080
53	0,0647	130,2535	-601,8333	-235,7899	14,3859	0,9920	1,8442	0,7302	0,7630	0,0531	0,0359	0,0024
51	0,0614	130,2189	-602,0344	-235,9077	17,9090	0,9980	1,8460	0,7333	0,9817	0,0547	0,0624	0,0034
58	0,0608	130,2487	-601,8782	-235,8148	14,8528	0,9940	1,8445	0,7294	0,7959	0,0538	0,0396	0,0026
57	0,0538	130,2813	-601,6599	-235,6893	8,5958	0,9990	1,8416	0,7237	0,4582	0,0528	0,0145	0,0016
50	0,0407	130,2886	-601,5805	-235,6459	6,7301	1,0130	1,8407	0,7237	0,3502	0,0514	0,0089	0,0013
63	0,0398	128,6653	-611,9521	-241,6434	186,3128	1,0610	1,9253	0,7508	10,4396	0,0561	1,2548	0,0067
60	0,0369	129,5270	-609,9951	-240,2340	124,9257	1,0450	1,8954	0,7405	6,8768	0,0550	0,5934	0,0047
61	0,0346	129,2738	-611,7776	-241,2519	152,7433	1,0530	1,9082	0,7440	8,4019	0,0550	0,7878	0,0051

Fonte: Elaboração do Autor.

Tabela 11 – Valores obtidos pelo método $Q_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-118-I.

Barra	fp _{ki}	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	V _{cb} (p.u.)	PMC		GMC		Re Q _{perdas}	
		Mvar	MW	Média			λ	V (p.u.)	(%)	(%)/Q _{gen}	(%)	(%)/Q _{gen}
52	0,0658	-602,0142	130,2576	-235,8783	22,0973	1,0010	1,8479	0,7437	1,1996	0,0546	0,0872	0,0039
59	0,0653	-616,3309	128,7887	-243,7711	209,2123	1,0460	1,9483	0,7716	13,1881	0,0630	2,4674	0,0117
53	0,0647	-601,8563	130,2589	-235,7987	18,8857	0,9960	1,8462	0,7340	1,0067	0,0531	0,0609	0,0032
51	0,0614	-602,1303	130,2443	-235,943	28,6713	1,0050	1,8511	0,7423	1,5837	0,0554	0,1065	0,0037
58	0,0608	-601,9489	130,2720	-235,8384	23,9672	1,0000	1,8486	0,7354	1,2933	0,0538	0,0763	0,0031
57	0,0538	-601,7085	130,2961	-235,7062	15,6696	1,0040	1,8449	0,7260	0,8416	0,0541	0,0364	0,0023
50	0,0407	-601,6103	130,2977	-235,6563	13,5522	1,0170	1,8438	0,7254	0,7113	0,0528	0,0200	0,0014
63	0,0398	-611,9798	128,6694	-241,6552	179,5397	1,0580	1,9219	0,7497	10,0357	0,0559	1,7441	0,0097
60	0,0369	-610,6095	129,6299	-240,4898	155,4741	1,0610	1,9105	0,7454	8,6775	0,0558	1,5162	0,0097
61	0,0346	-612,0760	129,3144	-241,3808	174,8217	1,0630	1,9190	0,7480	9,6958	0,0554	1,7601	0,0100

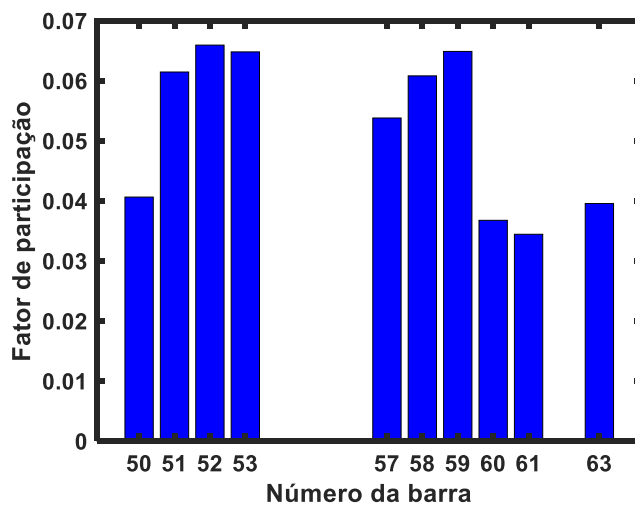
Fonte: Elaboração do Autor.

Tabela 12 – Valores obtidos pelo método Média_{perdas} × V – Sistema IEEE-118-I.

Barra	fp _{ki}	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	V _{cb} (p.u.)	PMC		GMC		Re Média _{perdas}	
		Média	MW	Mvar			λ	V (p.u.)	(%)	(%)/Q _{gen}	(%)	(%)/Q _{gen}
52	0,0658	-235,8814	130,2478	-602,0105	20,0022	0,9990	1,8469	0,7411	1,0837	0,0543	0,1217	0,0060
59	0,0653	-243,7905	128,7275	-616,3085	201,7834	1,0430	1,9441	0,7694	12,6844	0,0629	3,4788	0,0172
53	0,0647	-235,7989	130,2566	-601,8544	17,7640	0,9950	1,8457	0,7334	0,9457	0,0531	0,0867	0,0048
51	0,0614	-235,9452	130,2372	-602,1276	27,1424	1,0040	1,8503	0,7409	1,4978	0,0550	0,1488	0,0054
58	0,0608	-235,8406	130,2652	-601,9463	22,4552	0,9990	1,8479	0,7339	1,2105	0,0537	0,1043	0,0046
57	0,0538	-235,7074	130,2909	-601,7055	14,2601	1,0030	1,8442	0,7255	0,7649	0,0536	0,0478	0,0046
50	0,0407	-235,6577	130,2935	-601,6088	11,8514	1,0160	1,8430	0,7243	0,6211	0,0524	0,0267	0,0022
63	0,0398	-241,6552	128,6694	-611,9798	179,5397	1,0580	1,9219	0,7497	10,0357	0,0559	2,5725	0,0143
60	0,0369	-240,4961	129,6064	-610,5987	151,7039	1,0590	1,9086	0,7453	8,4503	0,0557	2,0805	0,0137
61	0,0346	-241,3821	129,3068	-612,0709	172,6317	1,0620	1,9179	0,7467	9,5666	0,0554	2,4565	0,0142

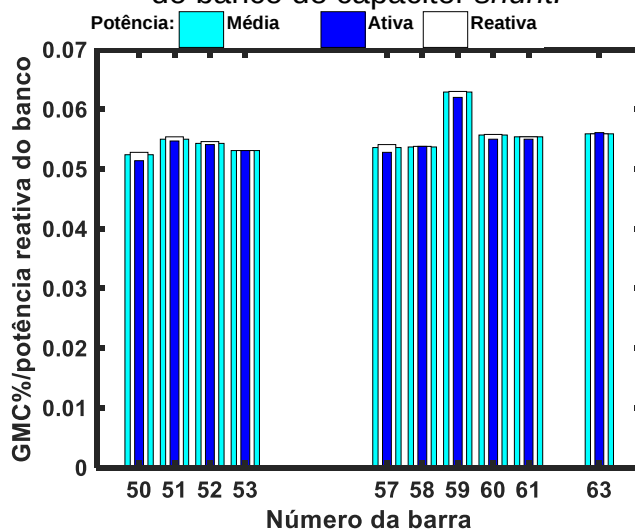
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 42 – IEEE-118-I: dez maiores fatores de participação de barras.



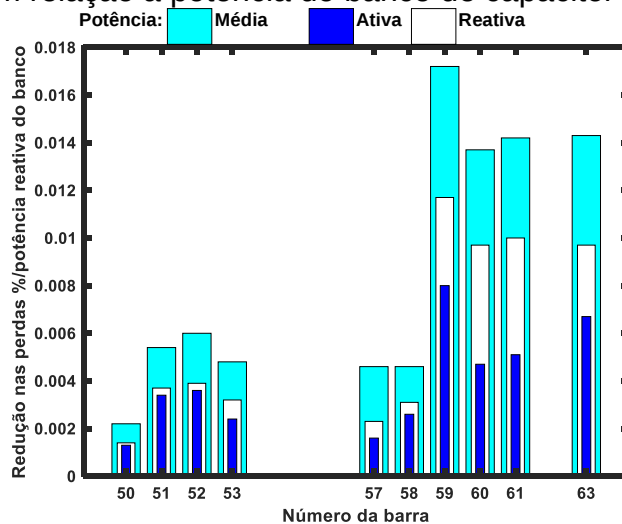
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 43 – IEEE-118-I: ganho da margem de carregamento em relação à potência do banco de capacitor *shunt*.



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 44 – IEEE-118-I: redução nas perdas totais de potência ativa, reativa e média em relação à potência do banco de capacitor *shunt*.



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 45 – IEEE-118-I: curva P-V da barra crítica (barra 52) antes e depois da aplicação de um banco *shunt* de 209,2123 Mvar na barra 59.

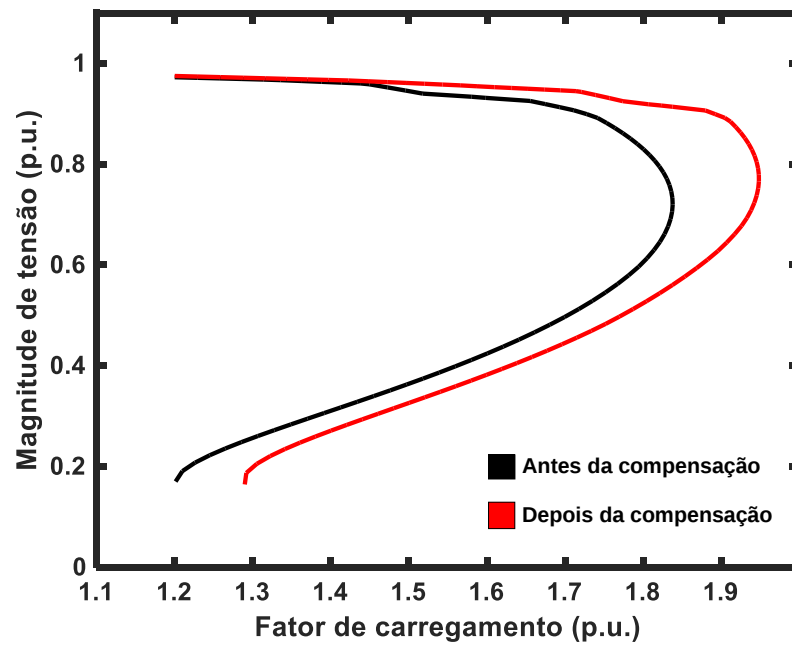
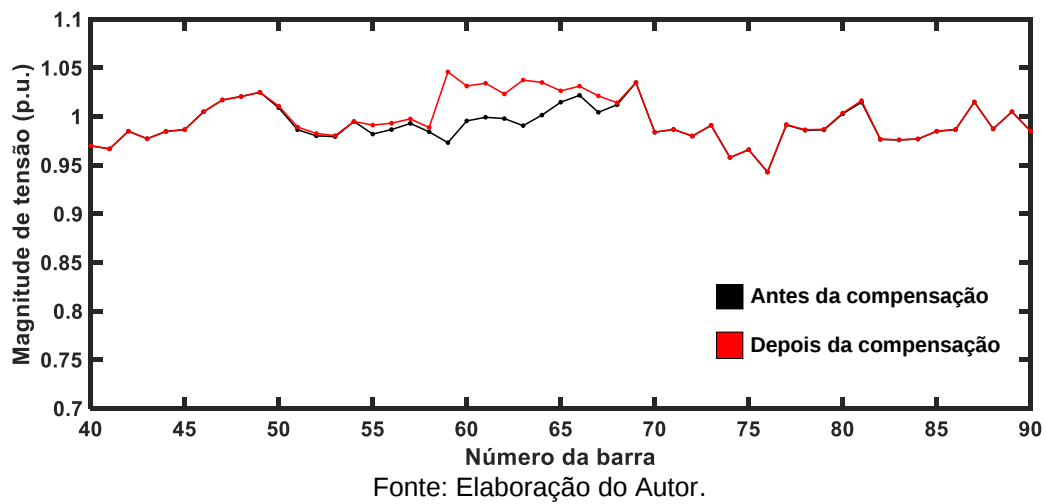


Figura 46 – IEEE-118-I: perfil de tensão na vizinhança da barra 59.



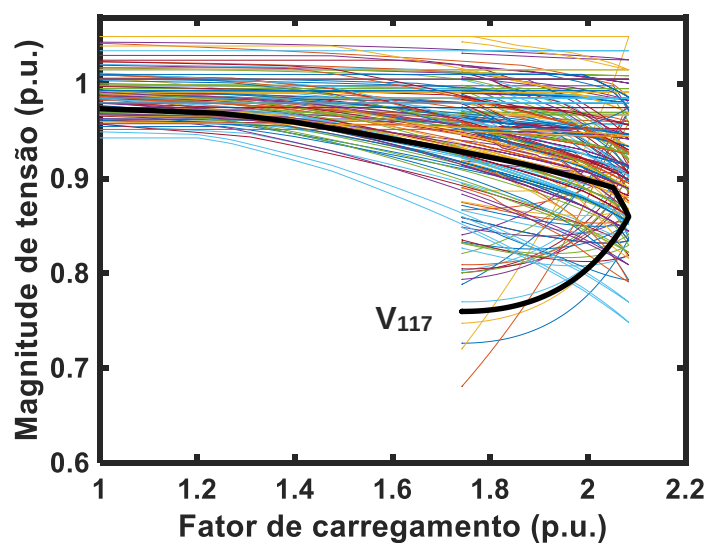
3.2.2 IEEE-118-N

Conforme já comentado, nesta configuração, as barras 25, 59, 61, 66 e 80 encontram-se incluídas no conjunto de barras PV, sendo que os valores das perdas totais ativa, reativa e a média no caso base ($\lambda = 1$) são 131,1543 MW, -600,3777 Mvar e -234,6117, respectivamente. Observa-se que devido a maior disponibilidade de reativo, o ponto de máximo carregamento que era de 1,8378 p.u. aumenta para 2,0835 p.u., ou seja, agora é possível um acréscimo de 108,35% do carregamento do caso base ($P_{CCB} = 4.233,0$ MW, $Q_{CCB} = 1.447,0$ Mvar).

A **Figura 47** mostra as curvas P-V para todas as barras do sistema, com a barra crítica (barra 117) em destaque, e a **Figura 48** apresenta o perfil da magnitude de tensão do sistema operando no PMC. O espectro dos fatores de participação de todas as barras, correspondente ao menor autovalor (0,5303) obtido para o PMC é apresentado na **Figura 49**, da qual se observa que houve uma mudança da área crítica para as vizinhanças da barra 117, conforme ilustrado no diagrama unifilar apresentado nas **Figuras 50 e 51**.

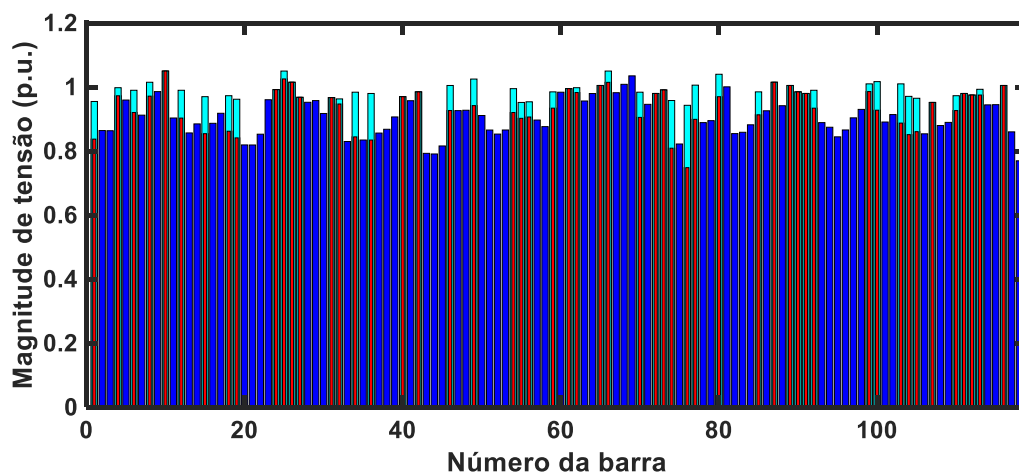
Nas **Tabelas 13, 14 e 15** e nas **Figuras 52, 53 e 54** são apresentados os resultados alcançados com a inclusão do banco *shunt* fornecidos pelos três procedimentos de redução de perdas totais de potência ativa, reativa e média, respectivamente. Da coluna 11 das tabelas e da **Figura 53** se verifica que as barras analisadas, exceto as 14 e 20, apresentam praticamente a mesma eficiência por unidade do banco, sendo as barras PQ's 2, 3, 5, 11, 13 e 117 as mais eficientes. Observa-se que inclusão de um banco *shunt* nestas barras, as quais proporcionam os maiores ganhos margem de carregamento (GMC), pertencem às vizinhanças das barras PV's da área crítica que atingiram os seus limites máximos de injeção de potência reativa, em particular as barras 4, 6, 8 e 12, cujos respectivos limites máximos de potência reativa são 300, 50, 300 e 120 Mvar. Conforme a coluna 10 das tabelas, os procedimentos de redução de perdas mostram que é possível obter um ganho de margem de carregamento de até 5,2% com a inclusão de um banco de 97,9184 Mvar na barra 5 (**Figura 55**) e uma pequena melhora no perfil de tensão na região da barra compensada (**Figura 56**), mas nesse caso, há um ligeiro aumento nas perdas ativas de 2 kW. Conforme se pode ver no detalhe da área crítica mostrado na **Figura 51**, a barra 5 faz parte das vizinhanças das barras 4 e 8, que possuem os maiores limites de potência reativa, 300 Mvar cada uma.

Figura 47 – IEEE-118-N: curvas P-V.



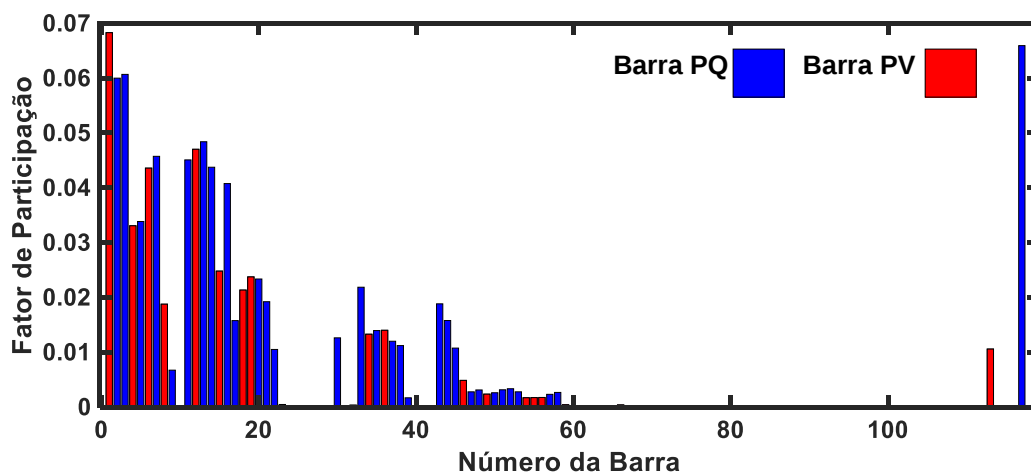
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 48 – IEEE-118-N: perfil de tensão do sistema operando no PMC.



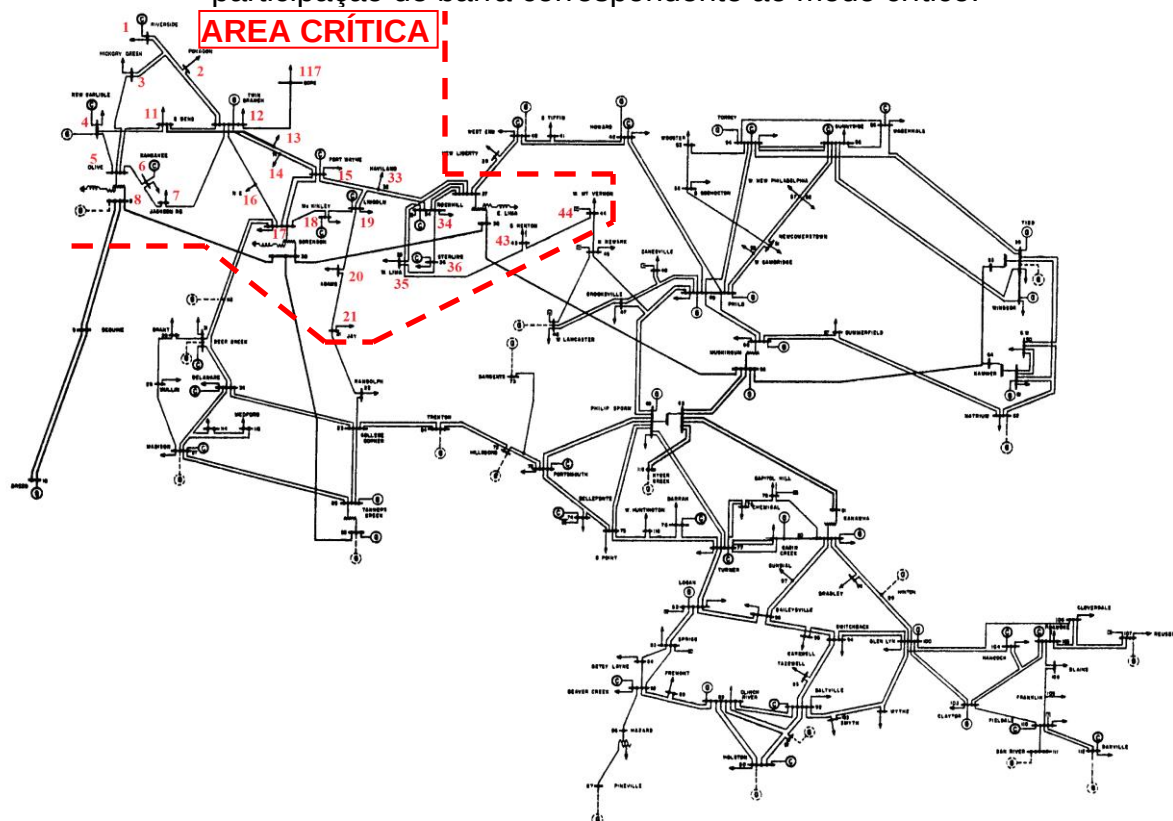
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 49 – IEEE-118-N: fatores de participação das barras.



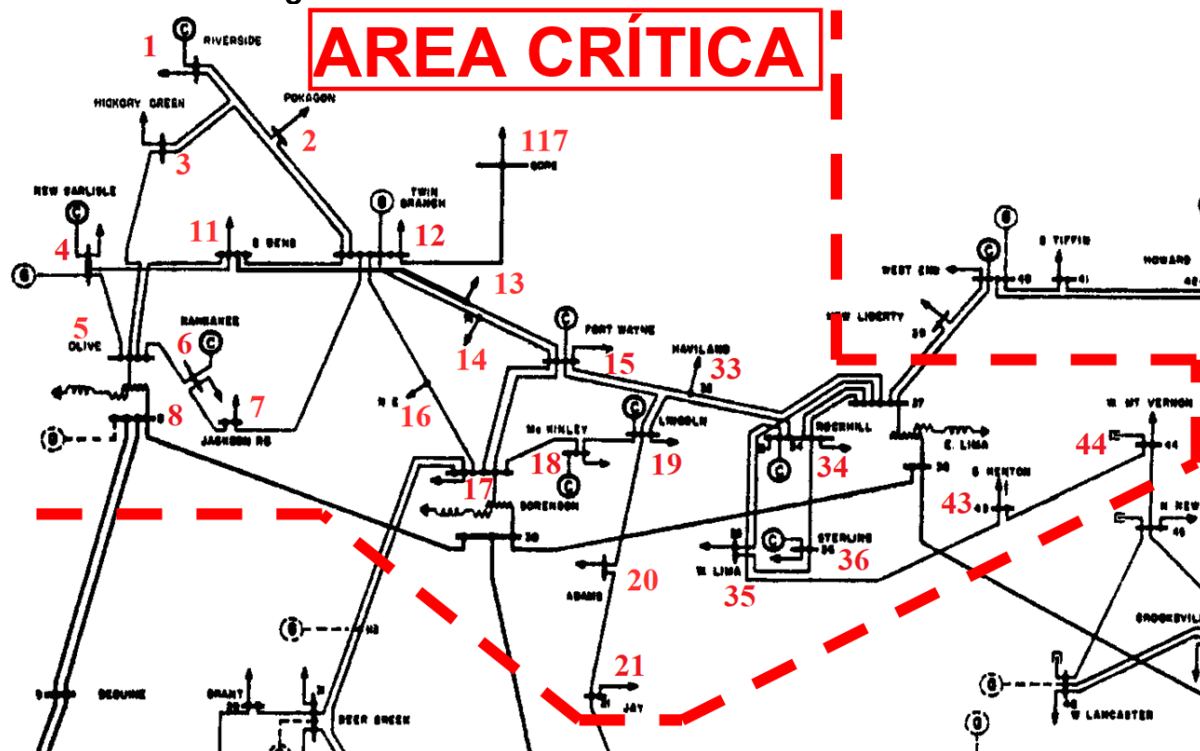
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 50 – IEEE-118-N: diagrama unifilar com as barras indicadas pelo fator de participação de barra correspondente ao modo crítico.



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 51 – IEEE-118-N: detalhe da área crítica.



Fonte: Adaptado de Universidade de Washington (1993).

CASO BASE: $P_{\text{perdas CB}} = 131,1543 \text{ MW}$; $Q_{\text{perdas CB}} = -600,3777 \text{ Mvar}$; $\text{Média}_{\text{perdas CB}} = -234,6117$; $|V| = 0,9738 \text{ p.u.}$; $\lambda_{\text{max}} = 2,0835 \text{ p.u.}$

Tabela 13 - Valores obtidos pelo método $P_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-118-N.

Barra	$f_{p_{ki}}$	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	$ V_{CB} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re P_{PERDAS}	
		MW	Mvar	Média			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/ Q_{gen}	(%)	(%)/ Q_{gen}
117	0,0660	131,1363	-600,4939	-234,6788	7,2733	0,9840	2,0873	0,8720	0,3507	0,0482	0,0137	0,0018
3	0,0608	130,9489	-601,5487	-235,2999	42,5336	0,9870	2,1085	0,8717	2,3073	0,0542	0,1566	0,0036
2	0,0601	131,0905	-600,7401	-234,8248	28,5954	0,9840	2,0994	0,8697	1,4675	0,0513	0,0486	0,0017
13	0,0485	131,0886	-600,7346	-234,823	17,6297	0,9790	2,0922	0,8643	0,8030	0,0455	0,0500	0,0028
7	0,0458	131,1542	-600,3775	-234,6117	5,2526	0,9900	2,0862	0,8612	0,2492	0,0574	0,0000	0,0000
11	0,0451	131,0932	-600,7111	-234,809	36,7247	0,9890	2,1040	0,8705	1,8920	0,0515	0,0465	0,0012
14	0,0438	131,1536	-600,3692	-234,6078	-3,1094	0,9820	2,0817	0,8586	-0,1661	-0,0534	0,0005	0,0001
16	0,0408	131,1470	-600,4751	-234,6641	7,5335	0,9870	2,0870	0,8618	0,3230	0,0429	0,0055	0,0007
5*	0,0339	131,1499	-600,5405	-234,6953	18,2588	1,0000	2,0948	0,8624	1,0429	0,0571	0,0033	0,0001
20	0,0234	131,0838	-601,0087	-234,9624	16,7354	0,9740	2,0878	0,8610	0,3969	0,0237	0,0536	0,0032

*No caso da barra 5 existe um reator de -40 Mvar, logo deve se adicionar $-21,7412 = -40 + 18,2588 \text{ Mvar}$,

Fonte: Elaboração do Autor.

Tabela 14 - Valores obtidos pelo método $Q_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-118-N.

Barra	$f_{p_{ki}}$	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	$ V_{CB} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re Q_{PERDAS}	
		Mvar	MW	Média			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/ Q_{gen}	(%)	(%)/ Q_{gen}
117	0,0660	-600,4967	131,1372	-234,6797	8,6860	0,9860	2,0882	0,8742	0,4338	0,0499	0,0198	0,0022
3	0,0608	-601,5821	130,9576	-235,3122	50,2508	0,9910	2,1129	0,8738	2,7134	0,0540	0,2006	0,0039
2	0,0601	-600,7571	131,0965	-234,8303	34,8281	0,9870	2,1027	0,8722	1,7720	0,0509	0,0631	0,0018
13	0,0485	-600,7515	131,0931	-234,8292	22,3231	0,9820	2,0945	0,8655	1,0152	0,0455	0,0622	0,0027
7	0,0458	-600,3776	131,1542	-234,6117	5,2526	0,9900	2,0862	0,8612	0,2492	0,0474	0,0000	0,0000
11	0,0451	-600,7362	131,1004	-234,8179	53,1728	0,9910	2,1134	0,8754	2,7596	0,0519	0,0597	0,0011
14	0,0438	-600,378	131,1550	-234,6115	0,8049	0,9840	2,0838	0,8601	0,0277	0,0344	0,0000	0,0000
16	0,0408	-600,4984	131,1524	-234,6730	12,6940	0,9900	2,0895	0,8634	0,5538	0,0436	0,0201	0,0015
5*	0,0339	-600,8214	131,2085	-234,8063	97,9184	1,0040	2,1394	0,8741	5,1592	0,0527	0,0738	0,0007
20	0,0234	-601,0915	131,1016	-234,9949	25,5994	0,9830	2,0900	0,8619	0,5999	0,0234	0,1188	0,0046

*No caso da barra 5 existe um reator de -40 Mvar, logo deve se adicionar $57,9184 = -40 + 97,9184 \text{ Mvar}$.

Fonte: Elaboração do Autor.

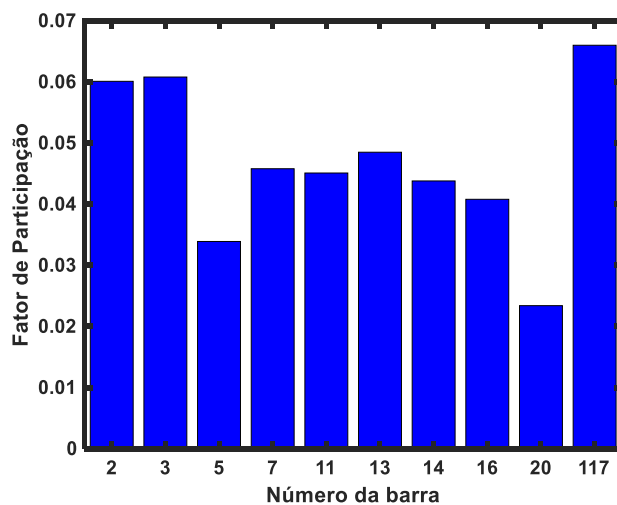
Tabela 15 - Valores obtidos pelo método $\text{Média}_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-118-N.

Barra	$f_{p_{ki}}$	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	$ V_{CB} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re $\text{Média}_{\text{PERDAS}}$	
		Média	MW	MVAR			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/ Q_{gen}	(%)	(%)/ Q_{gen}
117	0,0660	-234,6798	131,1366	-600,4961	7,9803	0,9850	2,0877	0,8728	0,3876	0,0486	0,0290	0,0036
3	0,0608	-235,3135	130,9537	-601,5807	48,327	0,9900	2,1119	0,8737	2,6211	0,0542	0,2991	0,0061
2	0,0601	-234,8318	131,0931	-600,7565	32,7545	0,9860	2,1015	0,8714	1,6613	0,0507	0,0937	0,0028
13	0,0485	-234,8295	131,0906	-600,7497	20,7617	0,9810	2,0937	0,8647	0,9414	0,0453	0,0928	0,0044
7	0,0458	-234,6117	131,1542	-600,3775	5,2526	0,9900	2,0862	0,8612	0,2492	0,0474	0,0000	0,0000
11	0,0451	-234,8196	131,0941	-600,7334	44,9566	0,9900	2,1084	0,8733	2,2981	0,0511	0,0886	0,0020
14	0,0438	-234,6115	131,1550	-600,3780	0,8049	0,9840	2,0838	0,8601	0,0277	0,0344	0,0000	0,0000
16	0,0408	-234,6730	131,1524	-600,4984	12,6940	0,9900	2,0895	0,8634	0,5538	0,0436	0,0261	0,0020
5*	0,0339	-234,8176	131,1820	-600,8172	78,0626	1,0030	2,1296	0,8710	4,2547	0,0545	0,0877	0,0011
20	0,0234	-234,9974	131,0942	-601,0888	23,6432	0,9810	2,0896	0,8615	0,5630	0,0238	0,1643	0,0069

*No caso da barra 5 existe um reator de -40 Mvar, logo deve se adicionar $38,0626 = -40 + 78,0626 \text{ Mvar}$.

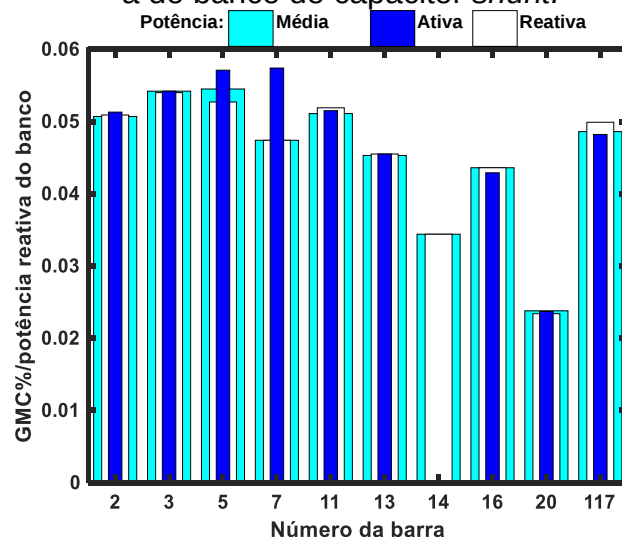
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 52 – IEEE-118-N: dez maiores fatores de participação de barras.



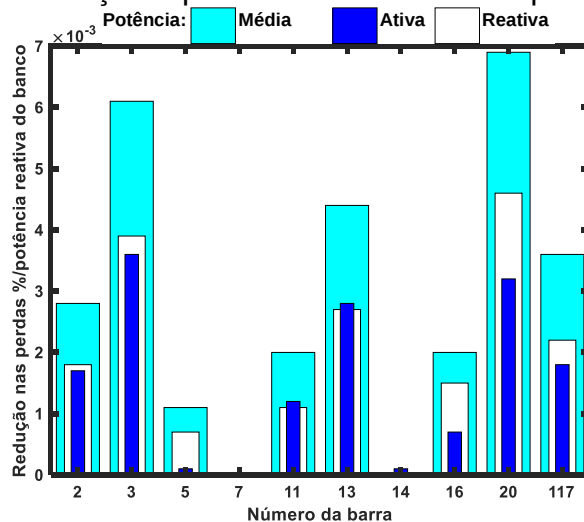
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 53 – IEEE-118-N: ganho da margem de carregamento em relação à potência a do banco de capacitor *shunt*.



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 54 – IEEE-118-N: redução nas perdas totais de potência ativa, reativa e média em relação à potência do banco de capacitor *shunt*.



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 55 – IEEE-118-N: curva P-V da barra crítica (barra 117) antes e depois da aplicação de um banco *shunt* de 97,9184 Mvar na barra 5.

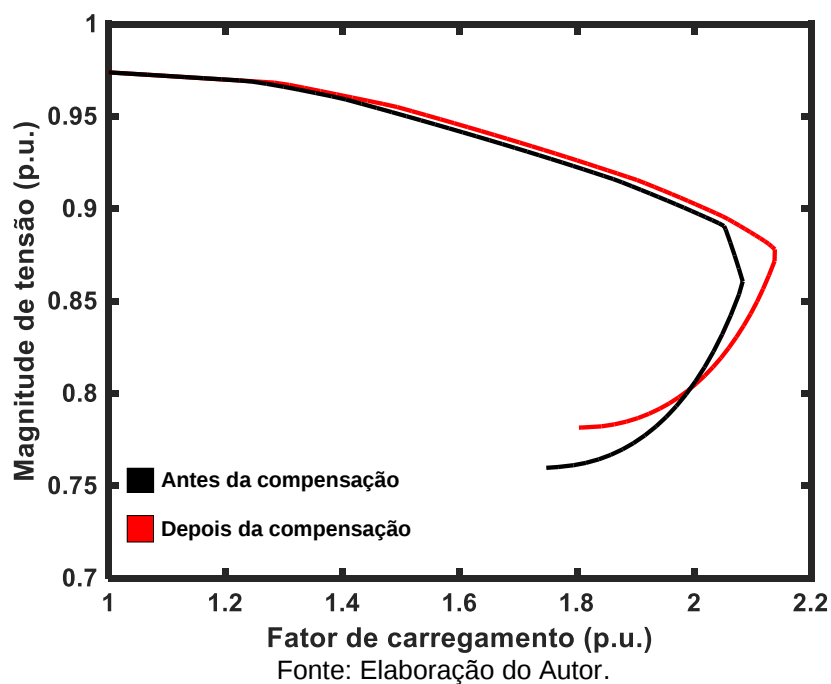
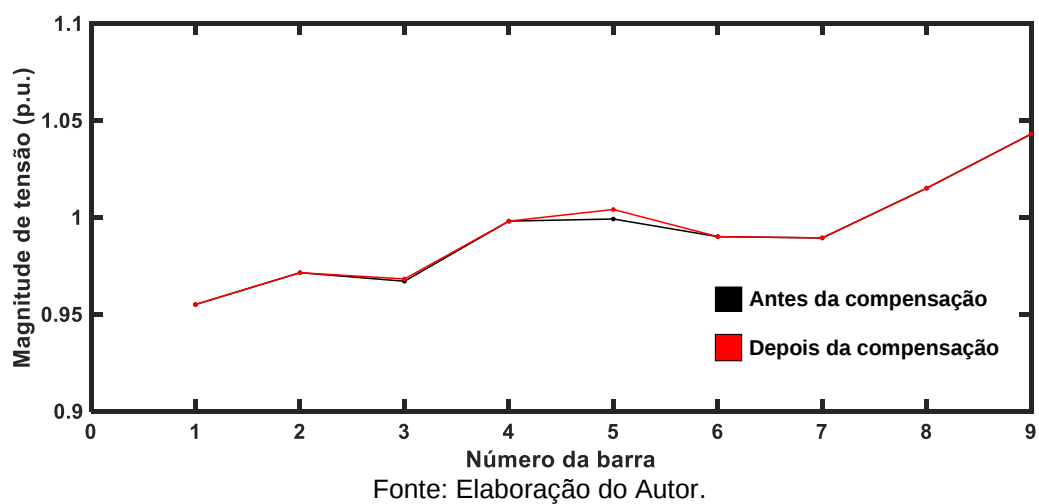


Figura 56 – IEEE-118-N: perfil de tensão na vizinhança da barra 5.



3.2.3 IEEE-118-N considerando a contingência da linha de transmissão entre as barras 11 e 13

Nesta seção se analisa o sistema IEEE-118-N na condição de contingência da linha de transmissão entre as barras 11 e 13 (LT₁₁₋₁₃), que resulta numa condição particular de estabilidade de tensão com características predominantemente local, conforme apresentado na **Figura 57**. Observa-se que o WECC (Western Electricity Coordinating Council) sugere o atendimento de uma margem mínima de 5% considerando contingências simples (N-1).

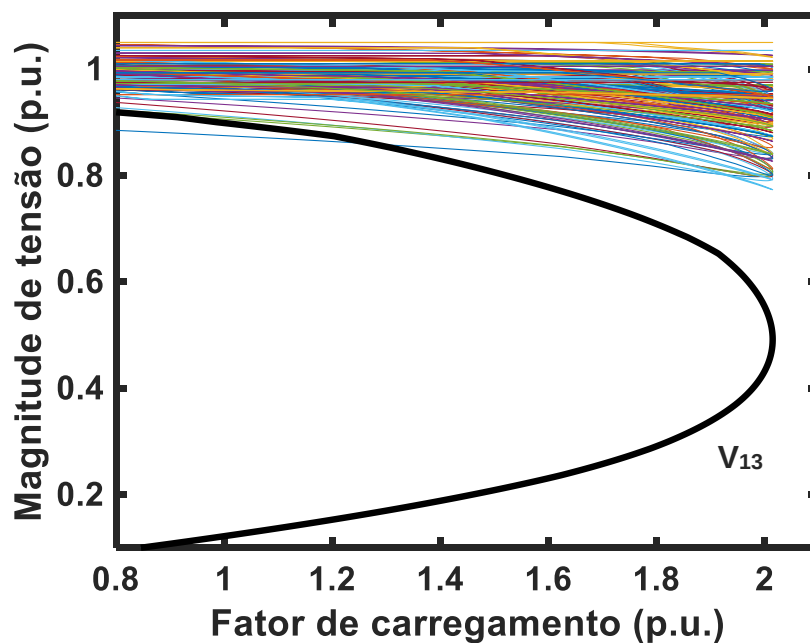
Na **Figura 57** pode se ver as curvas P-V para todas as barras e na **Figura 58** o perfil de tensão do sistema operando no PMC. O espectro dos fatores de participação de todas as barras, correspondente ao menor autovalor ($2,143 \times 10^{-6}$) obtido para o PMC é apresentado na **Figura 59**, de onde se observa a área crítica para as vizinhanças da barra 13, conforme ilustrado no detalhe do diagrama unifilar apresentado na **Figura 60**. Após a contingência os valores das perdas totais de potência ativa, reativa e a média no caso base ($\lambda = 1$) são 132,9049 MW, -590,7125 Mvar e -228,9038, respectivamente. Observa-se que o ponto de máximo carregamento que era de 2,0835 p.u. reduz para 2,0145 p.u., ou seja, não se trata de uma contingência com abrangência sistêmica e nem de área, mas sim de abrangência estritamente local.

A barra 13 (barra PQ) conecta-se com as barras de número 11 (barra PQ) e 15 (barra PV com $Q_{\max} = 30$ Mvar). Observa-se que a retirada da LT isola a barra 13 possibilitando o atendimento da carga apenas via barra 15 e levando todos os geradores da sua vizinhança (15, 18, 19, 34, 36 e 113, ver **Figura 51**) a atingirem os seus respectivos limites máximos de potência reativa.

Nas **Tabelas 16, 17 e 18** e nas **Figuras 61, 62 e 63** apresentam-se os resultados alcançados com a inclusão do banco *shunt* fornecidos pelos três procedimentos de redução de perdas totais de potência ativa, reativa e média, respectivamente. Das colunas 11 e 13 das tabelas e das **Figuras 62 e 63** se constata que das barras analisadas, a 13 é a que apresenta a maior eficiência por unidade do banco, tanto para o ganho da margem quanto para a redução das perdas. Observa-se que inclusão de um banco *shunt* de 20,43 Mvar nesta barra proporciona GMC de 3.73% (**Figura 64**), com uma redução de 342 kW e um aumento de injeção de potência reativa de 1,81 Mvar, além de melhora no perfil de tensão da região (**Figura 65**).

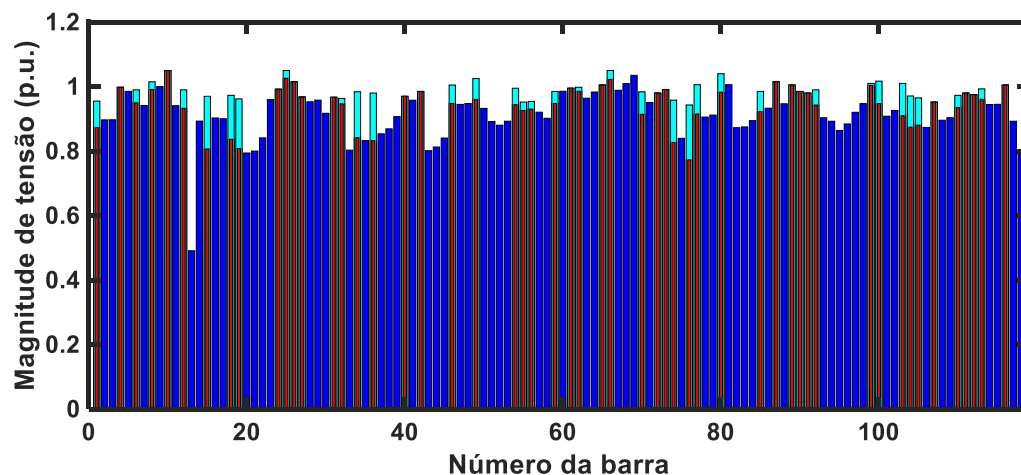
Também se pode observar das tabelas que a inclusão do banco *shunt* pertencentes às vizinhanças das barras PV's da área crítica que atingiram os seus limites $Q_{\max}$, barras de número 37, 35 e 17, proporcionam GMC da mesma ordem ou até maiores, como no caso da barra 37, porém com um aumento das perdas ativas. A inclusão de um banco *shunt* de 164,8 Mvar na barra 37, oito vezes maior que o utilizado na barra 13, proporciona GMC de 5,2% com um aumento de 333,7 kW nas perdas ativas.

Figura 57 – IEEE-118-N considerando a contingência LT₁₁₋₁₃: curvas P-V.



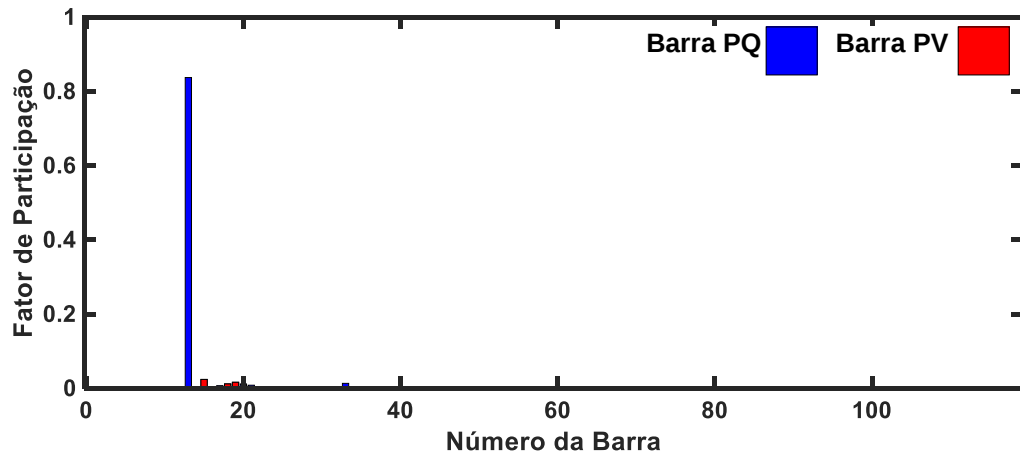
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 58 – IEEE-118-N considerando a contingência LT₁₁₋₁₃: perfil de tensão do sistema operando no PMC.



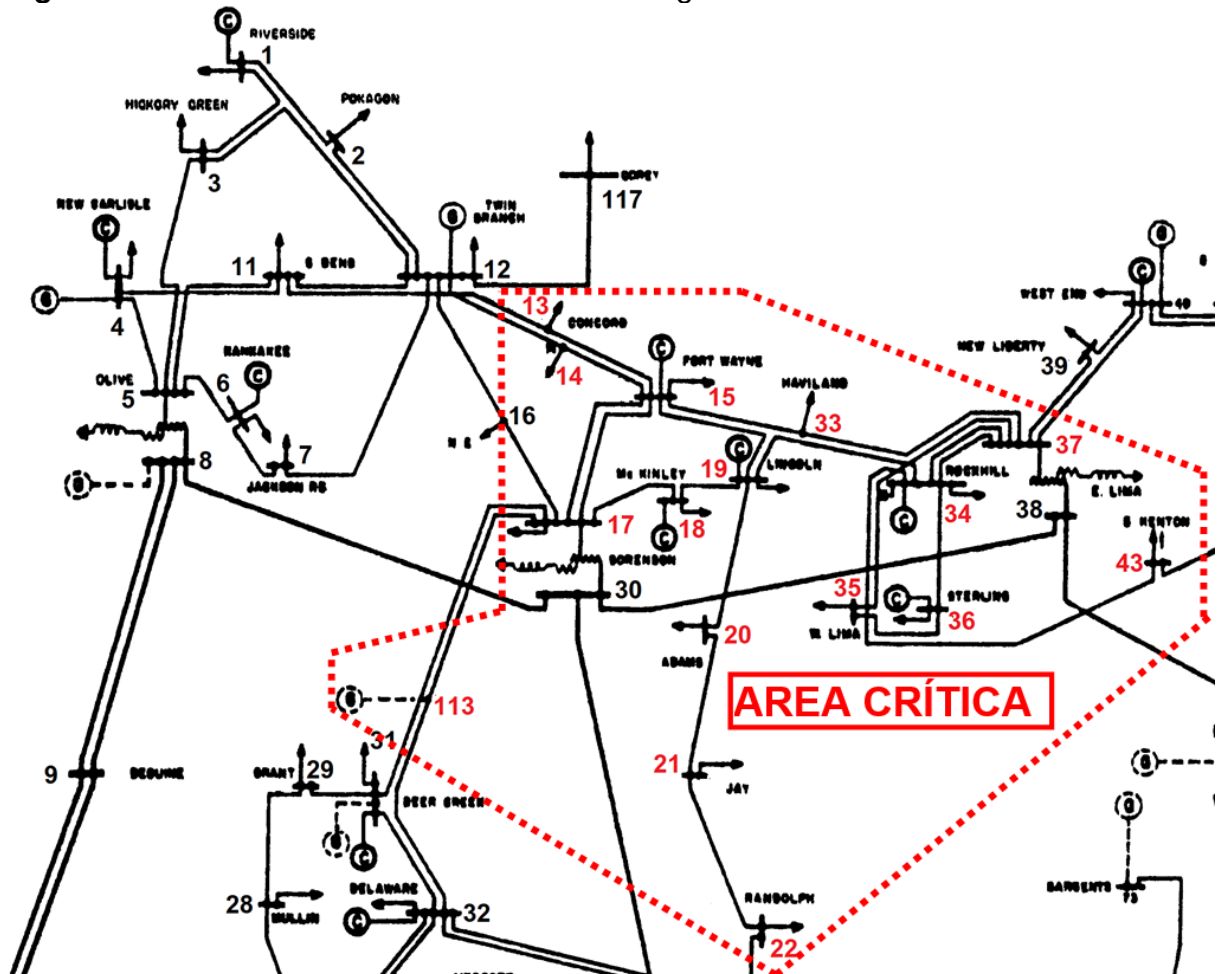
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 59 – IEEE-118-N considerando a contingência LT₁₁₋₁₃: fatores de participação das barras.



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 60 – IEEE-118-N considerando a contingência LT₁₁₋₁₃: detalhe da área crítica.



Fonte: Adaptado de Universidade de Washington (1993)

CASO BASE: $P_{\text{perdas CB}} = 132,9049 \text{ MW}$; $Q_{\text{perdas CB}} = -590,7125 \text{ Mvar}$; $\text{Média}_{\text{perdas CB}} = -228,9038 \text{ MVA}$; $|V| = 0,8985 \text{ p.u.}$; $\lambda_{\text{max}} = 2,0145 \text{ p.u.}$

Tabela 16 - Valores obtidos pelo método $P_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-118-N c/ cont. da LT11-13.

Barra	$f_{p_{ki}}$	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	$ V_{cb} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re P_{PERDAS}	
		MW	Mvar	Média			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/ Q_{gen}	(%)	(%)/ Q_{gen}
13	0,8332	132,5582	-592,4997	-229,9707	18,1248	0,9470	2,0495	0,5310	3,4495	0,1903	0,2608	0,0143
33	0,0135	132,8663	-591,1426	-229,1381	14,3492	0,9780	2,0225	0,4945	0,7871	0,0548	0,0290	0,0020
20	0,0121	132,7965	-591,7534	-229,4784	22,3549	0,9790	2,0263	0,4943	1,1591	0,0518	0,0815	0,0036
21	0,0086	132,7804	-591,9261	-229,5729	21,6150	0,9840	2,0242	0,4940	0,9602	0,0444	0,0937	0,0043
17	0,0071	132,9038	-590,7958	-228,9460	4,1122	0,9910	2,0165	0,4927	0,2004	0,0487	0,0007	0,0001
22	0,0042	132,8052	-591,7483	-229,4715	19,6487	0,9910	2,0212	0,4921	0,6634	0,0337	0,0749	0,0038
35	0,0041	132,8895	-592,1423	-229,6264	70,3972	0,9980	2,0367	0,4950	2,1895	0,0311	0,0115	0,0001
43	0,0038	132,9017	-590,7938	-228,9461	3,2167	0,9810	2,0153	0,4912	0,0818	0,0254	0,0023	0,0007
14	0,0037	132,9048	-590,7193	-228,9073	0,8610	0,9830	2,0148	0,4912	0,0301	0,0350	0,0000	0,0000
37*	0,0037	132,7977	-594,4441	-230,8232	99,7654	1,0040	2,0458	0,4974	3,0814	0,0308	0,0806	0,0008

Fonte: Elaboração do Autor.

Tabela 17 - Valores obtidos pelo método $Q_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-118-N c/ cont. da LT11-13.

Barra	$f_{p_{ki}}$	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	$ V_{cb} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re Q_{PERDAS}	
		Mvar	MW	Média			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/ Q_{gen}	(%)	(%)/ Q_{gen}
13	0,8332	-592,5190	132,5627	-229,9781	20,4341	0,9530	2,0524	0,5365	3,7338	0,1827	0,3058	0,0149
33	0,0135	-591,2831	132,8852	-229,1989	23,5389	0,9850	2,0277	0,4941	1,2997	0,0552	0,0965	0,0041
20	0,0121	-591,8807	132,8262	-229,5272	32,6466	0,9900	2,0318	0,4922	1,7073	0,0522	0,1977	0,0060
21	0,0086	-592,0719	132,8147	-229,6286	31,3796	0,9970	2,0288	0,4918	1,4089	0,0448	0,2301	0,0073
17	0,0071	-591,7186	132,9812	-229,3687	68,1613	0,9980	2,0484	0,4964	3,3414	0,0490	0,1703	0,0024
22	0,0042	-591,9242	132,8427	-229,5408	30,8604	1,0050	2,0252	0,4908	1,0525	0,0341	0,2051	0,0066
35	0,0041	-593,7232	133,1444	-230,2894	109,0498	1,0210	2,0495	0,4981	3,4516	0,0316	0,5096	0,0046
43	0,0038	-590,8721	132,9211	-228,9755	10,6293	0,9900	2,0172	0,4931	0,2710	0,0254	0,0270	0,0025
14	0,0037	-590,7414	132,9108	-228,9153	6,5528	0,9860	2,0168	0,4897	0,2260	0,0344	0,0048	0,0007
37*	0,0037	-596,3261	133,2386	-231,5438	164,7901	1,0260	2,0671	0,4990	5,1848	0,0314	0,0000	0,0000

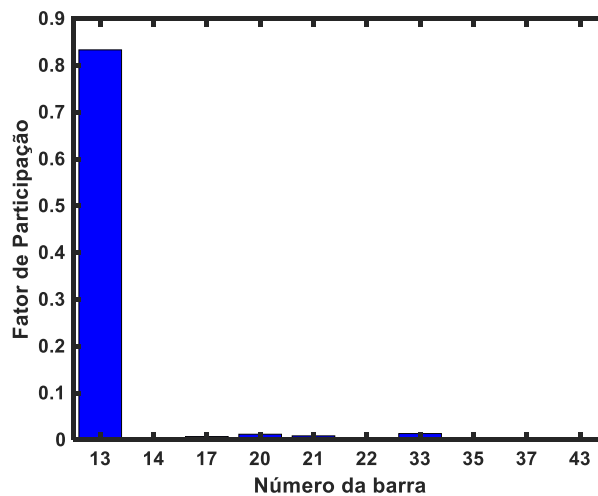
Fonte: Elaboração do Autor.

Tabela 18 - Valores obtidos pelo método $\text{Média}_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-118-N c/ cont. da LT11-13.

Barra	$f_{p_{ki}}$	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	$ V_{cb} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re $\text{Média}_{\text{PERDAS}}$	
		Média	MW	Mvar			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/ Q_{gen}	(%)	(%)/ Q_{gen}
13	0,8332	-229,9785	132,5613	-592,5183	20,0510	0,9520	2,0519	0,5374	3,6879	0,1839	0,4694	0,0234
33	0,0135	-229,1989	132,8852	-591,2831	23,5389	0,9850	2,0277	0,4941	1,2997	0,0552	0,1289	0,0054
20	0,0121	-229,5304	132,8166	-591,8773	30,7918	0,9880	2,0308	0,4927	1,6084	0,0522	0,2737	0,0088
21	0,0086	-229,6318	132,8011	-592,0648	29,1479	0,9940	2,0278	0,4928	1,3064	0,0448	0,3180	0,0109
17	0,0071	-229,3832	132,9450	-591,7111	58,0741	0,9970	2,0434	0,4954	2,8450	0,0489	0,2093	0,0036
22	0,0042	-229,5446	132,8281	-591,9172	28,4832	1,0020	2,0243	0,4925	0,9704	0,0340	0,2799	0,0098
35	0,0041	-230,3010	133,1201	-593,7221	107,3651	1,0210	2,0490	0,4972	3,3966	0,0316	0,6104	0,0056
43	0,0038	-228,9773	132,9136	-590,8682	8,9932	0,9880	2,0168	0,4923	0,2294	0,0255	0,0321	0,0035
14	0,0037	-228,9155	132,9076	-590,7385	4,6592	0,9850	2,0161	0,4916	0,1617	0,0347	0,0051	0,0010
37*	0,0037	-231,5876	133,0998	-596,2749	153,0838	1,0220	2,0632	0,4986	4,8007	0,0313	1,1724	0,0076

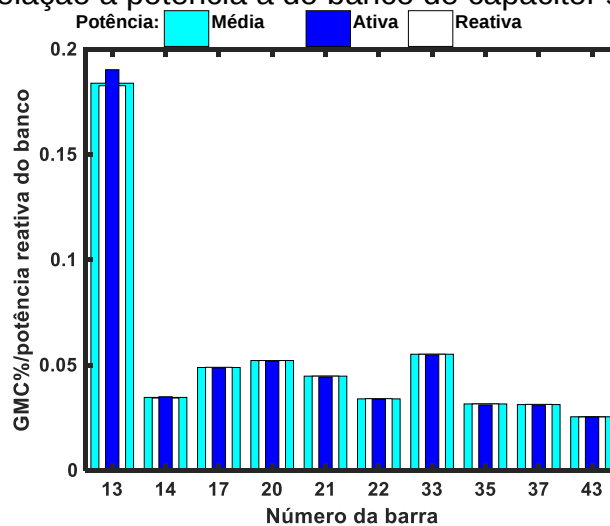
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 61 – IEEE-118-N c/ cont. da LT₁₁₋₁₃: dez maiores fatores de participação de barras.



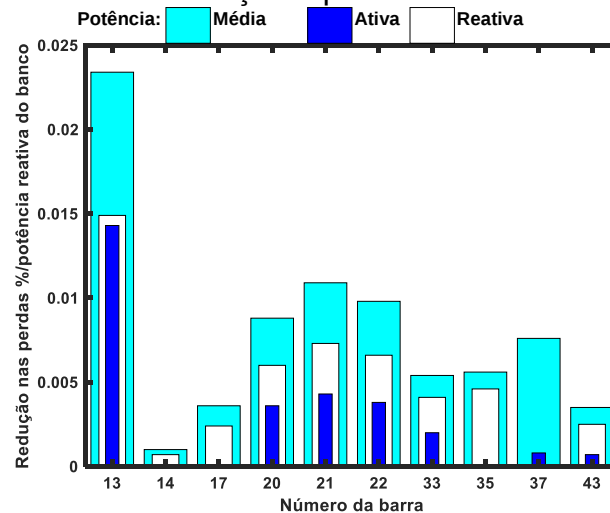
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 62 – IEEE-118-N c/ cont. da LT₁₁₋₁₃: ganho da margem de carregamento em relação à potência a do banco de capacitor *shunt*.



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 63 – IEEE-118-N c/ cont. da LT₁₁₋₁₃: redução nas perdas totais de potência ativa, reativa e média em relação à potência do banco de capacitor *shunt*.



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 64 – IEEE-118-N c/ cont. da LT₁₁₋₁₃: curva P-V da barra crítica (barra 13) antes e depois da aplicação de um banco *shunt* de 20,43 Mvar na barra 13.

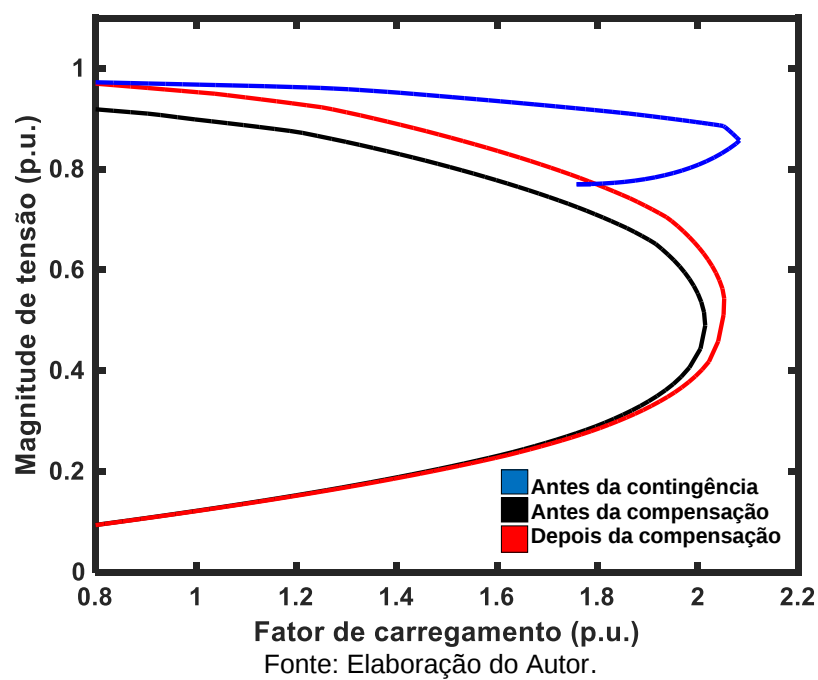
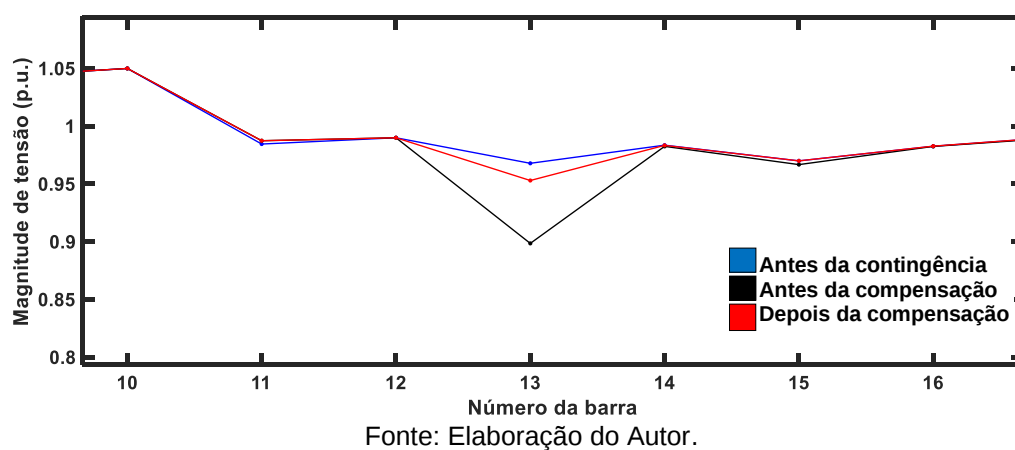


Figura 65 – IEEE-118- N c/ cont. da LT₁₁₋₁₃: perfil de tensão na vizinhança da barra 13.



3.3 RESULTADOS OBTIDOS - SISTEMA IEEE DE 300 BARRAS

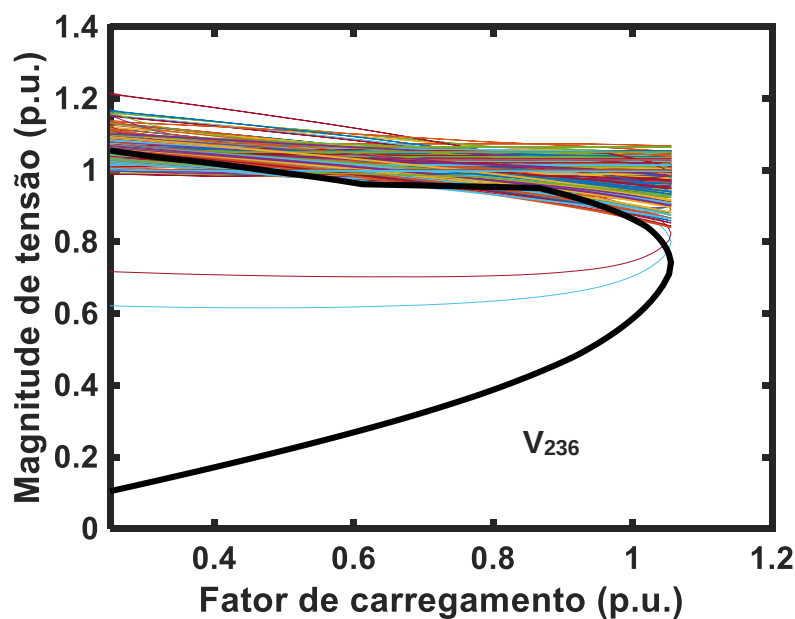
O sistema IEEE-300 é um sistema desenvolvido em 1993 como caso teste, sendo composto por 68 barras PV, 231 barras PQ e 304 linhas de transmissão. Na **Figura 66** são mostradas as curvas P-V para todas as barras do sistema, sendo a barra 236 a crítica. É possível perceber que também se trata de um sistema com problemas de estabilidade de tensão com característica predominantemente local, envolvendo a barra PV de número 63(55), e as PQ de número 64(56) e 526(236), conforme detalhe apresentado na **Figura 72**. O ponto de máximo carregamento é atingido em $\lambda = 1,0552$ p.u., ou seja, uma margem de carregamento de apenas 5,52%, indicando que este é um sistema altamente carregado. Na **Figura 67** mostra-se o perfil da magnitude de tensão do sistema operando no PMC enquanto a **Figura 68** apresenta os fatores de participação para todas as barras, obtidos no menor autovalor (0,0081). Constata-se, conforme esperado, que as menores magnitudes de tensão acontecem nas vizinhanças das barras que apresentam os maiores fatores de participação. A **Figura 69** relaciona os dez maiores fatores de participação apenas para as barras PQ, que são indicadas para a aplicação do banco *shunt* indicado pelos três procedimentos de redução das perdas totais de potência ativa, reativa e média, conforme indicado nas **Tabelas 19, 20 e 21** respectivamente.

A primeira coluna das tabelas (N_{ext}) corresponde à numeração original de cada barra conforme utilizada no banco de dados fornecido pela referência (UNIVERSIDADE DE WASHINGTON, 1993), sendo que esta não segue uma ordem sequencial, ao contrário dos bancos de dados anteriores. As barras são então ordenadas de maneira sequencial, de 1 a 300, sendo que a segunda coluna (N_{int}) apresenta a numeração referente a esta nova organização, que passa a ser a padrão. A aplicação do método neste caso apresenta uma particularidade a ser levada em consideração, para muitas barras a maior redução nas perdas, seja de potência ativa, reativa ou aparente, acontece para a aplicação de um banco que irá operar a uma magnitude de tensão superior à recomendada pela ONS, (Procedimentos de Rede, Módulo 23, Submódulo 23.3 – Diretrizes e Critérios para estudos elétricos, 2010). Por exemplo, conforme apresentado na **Tabela 23** do **ANEXO A**, a maior redução nas perdas reativas, (39,1850%) acontece com a aplicação de um banco de 477,6076 Mvar na barra número 62(54), resultando também em um GMC de 132,4391%, mas para tanto a barra teria de operar a uma

tensão de 1,1590 p.u., o que é do ponto de vista operativo, inviável. Para manter os níveis de tensão de operação das barras candidatas dentro de limites aceitáveis, as **Tabelas 19, 20 e 21** apresentadas limitam tensão de operação a 1.1 p.u., ou seja, o método irá determinar, para cada barra, o valor do banco que resultará na maior redução de perdas, sendo que a tensão máxima de operação não pode ultrapassar 1.1 p.u. No **ANEXO A** podem ser encontradas as tabelas com os valores obtidos sem limitação. Analisando as tabelas e as **Figuras 70 e 71**, é possível constatar (conforme esperado para sistemas que apresentam problemas de estabilidade de tensão predominantemente local), que das barras analisadas, a barra crítica, 526(236), é a barra que apresenta a maior eficiência por unidade do banco, tanto para o ganho da margem de carregamento (coluna 12 das tabelas) quanto para a redução das perdas (coluna 14 das tabelas).

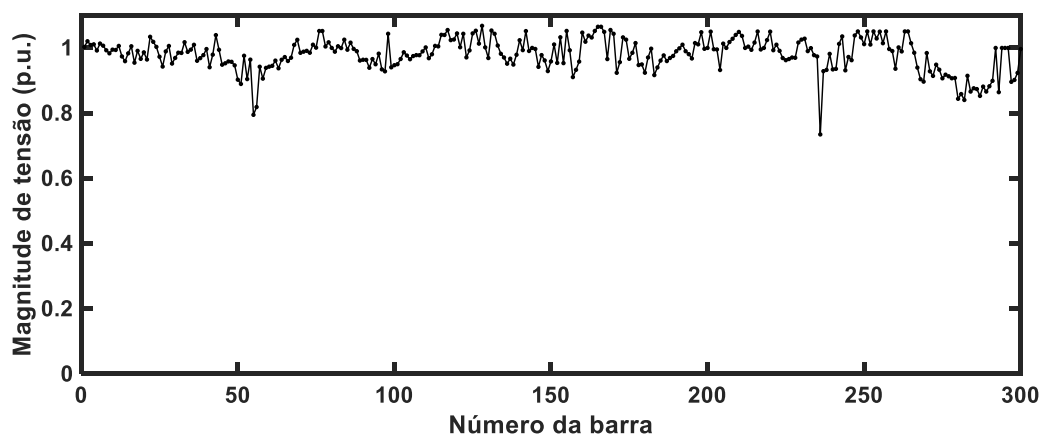
Das tabelas também se verifica que é possível obter ganhos na margem de carregamento acima 132%, reduções nas perdas ativas de quase 2%, além de significativas reduções das perdas reativas, até 34%. A abordagem de redução nas perdas médias é uma alternativa adequada neste caso, de acordo com a **Tabela 21** a instalação de um banco de 351,4839 Mvar na barra 62(54) resulta num GMC de 132,5260%, com redução nas perdas médias de 53,3778% o que equivale a uma redução de 1,8532% nas perdas ativas e 34.3646% nas perdas reativas. Por outro lado, utilizando um banco bem menor, 166,6210 Mvar instalado na barra 64(56), é possível obter resultados semelhantes, GMC de 132,4282% (**Tabela 20 e Figura 73**) e 44,2748% de redução nas perdas médias (equivalente a 1,4837% de redução nas perdas ativas e 28,5950% nas reativas), além de significativa melhora do perfil de tensão na vizinhança da barra (**Figura 74**). Este banco de 166,6210 Mvar, aproximadamente 4,8 vezes maior do que o valor indicado pelos métodos de redução de perdas para a barra crítica (barra 526(236), 34,9406 Mvar), se instalado nela, resultaria num GMC de 132,0414% mas também aumentaria as perdas ativas em 6,8099% o equivalente a 28,7103 MW, e as reativas em 52,8070% o equivalente a 130,7379 Mvar, além de prejudicar o perfil de tensão da vizinhança (e também de possíveis equipamentos existentes nelas).

Figura 66 – IEEE-300: curvas P-V.



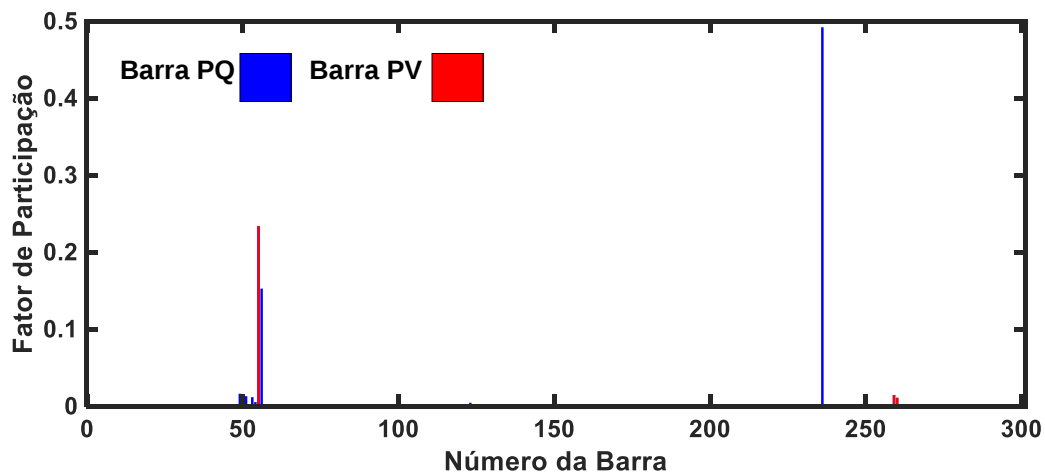
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 67 – IEEE-300: perfil de tensão do sistema operando no PMC.



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 68 – IEEE-300: fatores de participação das barras.



Fonte: Elaboração do Autor.

CASO BASE: $P_{\text{perdas CB}} = 421,5967 \text{ MW}$; $Q_{\text{perdas CB}} = -247,5726 \text{ Mvar}$; $\text{Média}_{\text{perdas CB}} = 87,0120 \text{ MVA}$; $|V| = 0,8636 \text{ p.u.}$; $\lambda_{\text{max}} = 1,0552 \text{ p.u.}$

Tabela 19 - Valores obtidos pelo método $P_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-300.

Barra		$f_{p_{ki}}$	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	$ V_{cb} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re P_{PERDAS}	
N_{ext}	N_{int}		MW	Mvar	Média			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/ Q_{gen}	(%)	(%)/ Q_{gen}
526	236	0,5052	418,4821	-276,6863	70,8979	34,9406	1,0040	1,1054	0,8543	90,6706	2,5950	0,7387	0,0211
64	56*	0,1560	415,3413	-318,366	48,4876	166,6210	1,1000	1,1280	0,9355	131,4282	0,7887	1,4837	0,0089
57	49	0,0161	421,0082	-272,0294	74,4894	110,5109	1,0230	1,0881	0,7297	59,3634	0,5371	0,1395	0,0012
58	50	0,0136	418,9955	-279,8911	69,5522	86,0580	1,0000	1,0882	0,7288	59,4873	0,6912	0,6169	0,0071
59	51	0,0128	417,6533	-296,5865	60,5334	232,2873	1,0230	1,1147	0,7324	107,3795	0,4622	0,9353	0,0040
61	53	0,0116	415,4043	-321,6456	46,8793	439,0909	1,0720	1,1285	0,7690	132,3725	0,3014	1,4688	0,0033
62	54*	0,0053	413,7838	-332,6499	40,5670	351,4839	1,1000	1,1286	0,9336	132,5260	0,3770	1,8532	0,0052
144	123*	0,0045	414,7533	-323,1108	45,8212	310,7641	1,1000	1,1285	0,9041	132,3455	0,4258	1,6232	0,0052
55	48	0,0016	420,9651	-262,5429	79,2111	61,3620	1,0110	1,0646	0,7320	16,8217	0,2741	0,1498	0,0024
60	52*	0,0016	417,2727	-323,3857	46,9435	237,4655	1,1000	1,0945	0,7435	70,9149	0,2986	1,0256	0,0043

*Tensões de operação do banco limitadas a 1,1 p.u.

Fonte: Elaboração do Autor.

Tabela 20 - Valores obtidos pelo método $Q_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-300.

Barra		$f_{p_{ki}}$	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	$ V_{cb} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re Q_{PERDAS}	
N_{ext}	N_{int}		Mvar	MW	Média			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/ Q_{gen}	(%)	(%)/ Q_{gen}
526	236	0,5052	-276,6864	418,4821	70,8979	34,9406	1,0040	1,1054	0,8543	90,6706	2,5950	11,7597	0,3365
64	56*	0,1560	-318,3660	415,3413	48,4876	166,6210	1,1000	1,1280	0,9355	131,4282	0,7887	28,595	0,1716
57	49*	0,0161	-288,3167	424,3576	68,0205	253,1081	1,1000	1,1165	0,7460	110,6038	0,4369	16,4574	0,0650
58	50	0,0136	-287,0683	420,9551	66,9434	202,2764	1,0510	1,1154	0,7351	108,6566	0,5371	15,9532	0,0788
59	51*	0,0128	-303,1219	419,1029	57,9905	448,1496	1,1000	1,1285	0,7925	132,4593	0,2955	22,4376	0,0500
61	53*	0,0116	-327,8368	415,7015	43,9324	456,6842	1,1000	1,1285	0,7768	132,4453	0,2900	32,4205	0,0709
62	54*	0,0053	-332,6499	413,7838	40,5670	351,4839	1,1000	1,1286	0,9336	132,5260	0,3770	34,3646	0,0977
144	123*	0,0045	-323,1108	414,7533	45,8212	310,7641	1,1000	1,1285	0,9041	132,3455	0,4258	30,5115	0,0981
55	48*	0,0016	-280,0158	424,9441	72,4641	168,0314	1,1000	1,0817	0,7265	47,7728	0,2843	13,1045	0,0779
60	52*	0,0016	-323,3857	417,2727	46,9435	237,4655	1,1000	1,0945	0,7435	70,9149	0,2986	30,6226	0,1289

*Tensões de operação do banco limitadas a 1,1 p.u.

Fonte: Elaboração do Autor.

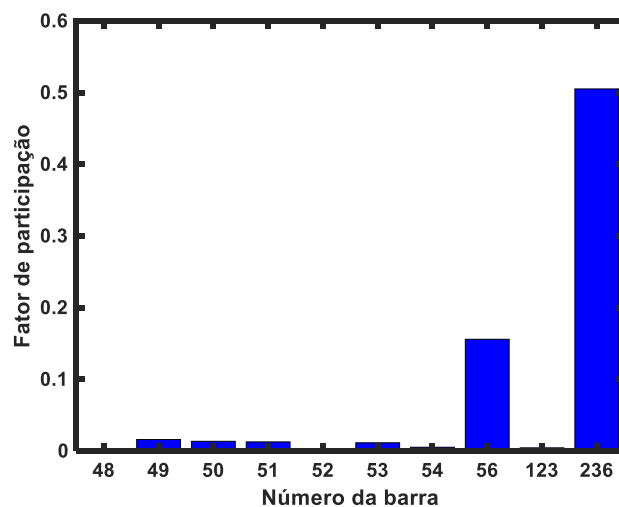
Tabela 21 - Valores obtidos pelo método $\text{Média}_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-300.

Barra		$f_{p_{ki}}$	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	$ V_{cb} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re $\text{Média}_{\text{PERDAS}}$	
N_{ext}	N_{int}		Média	MW	Mvar			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/ Q_{gen}	(%)	(%)/ Q_{gen}
526	236	0,5052	70,8979	418,4821	-276,6863	34,9406	1,0040	1,1054	0,8543	90,670	2,5950	18,5194	0,5300
64	56*	0,1560	48,4876	415,3413	-318,3660	166,6210	1,1000	1,1280	0,9355	131,4282	0,7887	44,2748	0,2657
57	49	0,0161	68,0117	424,0699	-288,0464	250,9391	1,0970	1,1161	0,7456	109,9550	0,4381	21,836	0,0870
58	50	0,0136	66,7467	420,2448	-286,7515	178,1097	1,0400	1,1125	0,7318	103,4893	0,5810	23,2903	0,1307
59	51*	0,0128	57,9905	419,1029	-303,1219	448,1496	1,1000	1,1285	0,7925	132,4593	0,2955	33,3534	0,0744
61	53*	0,0116	43,9324	415,7015	-327,8368	456,6842	1,1000	1,1285	0,7768	132,4453	0,2900	49,5100	0,1084
62	54*	0,0053	40,5670	413,7838	-332,6499	351,4839	1,1000	1,1286	0,9336	132,5260	0,3770	53,3778	0,1518
144	123*	0,0045	45,8212	414,7533	-323,1108	310,7641	1,1000	1,1285	0,9041	132,3455	0,4258	47,3392	0,1523
55	48	0,0016	72,3253	424,0180	-279,3670	155,6834	1,0890	1,0804	0,7265	45,3267	0,2911	16,8789	0,1084
60	52*	0,0016	46,9435	417,2727	-323,3857	237,4655	1,1000	1,0945	0,7435	70,9149	0,2986	46,0494	0,1939

*Tensões de operação do banco limitadas a 1,1 p.u.

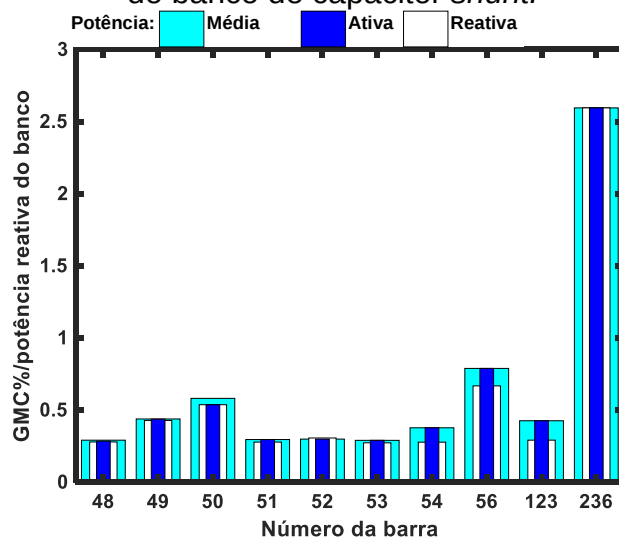
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 69 – IEEE-300: dez maiores fatores de participação de barras.



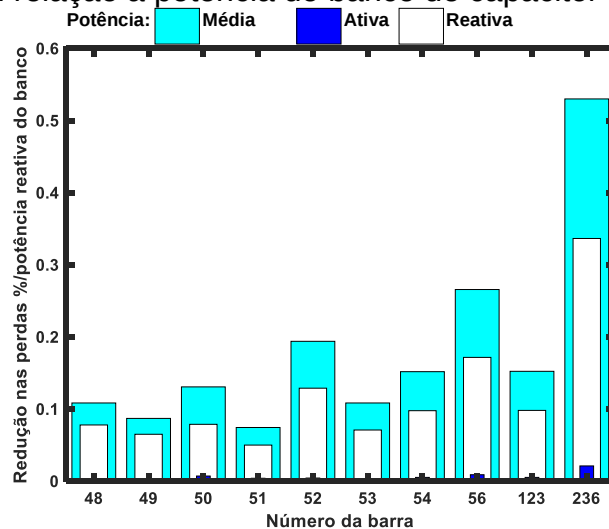
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 70 – IEEE-300: ganho da margem de carregamento em relação à potência a do banco de capacitor *shunt*.



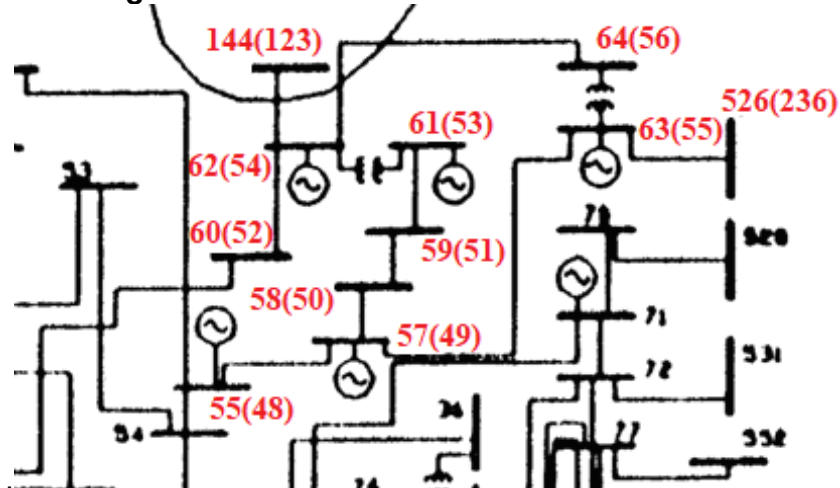
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 71 – IEEE-300: redução nas perdas totais de potência ativa, reativa e média em relação à potência do banco de capacitor *shunt*.



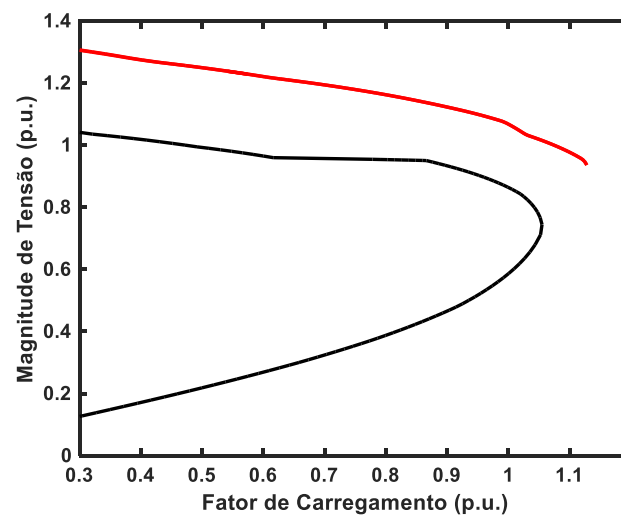
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 72 – IEEE-300: detalhe da área crítica.



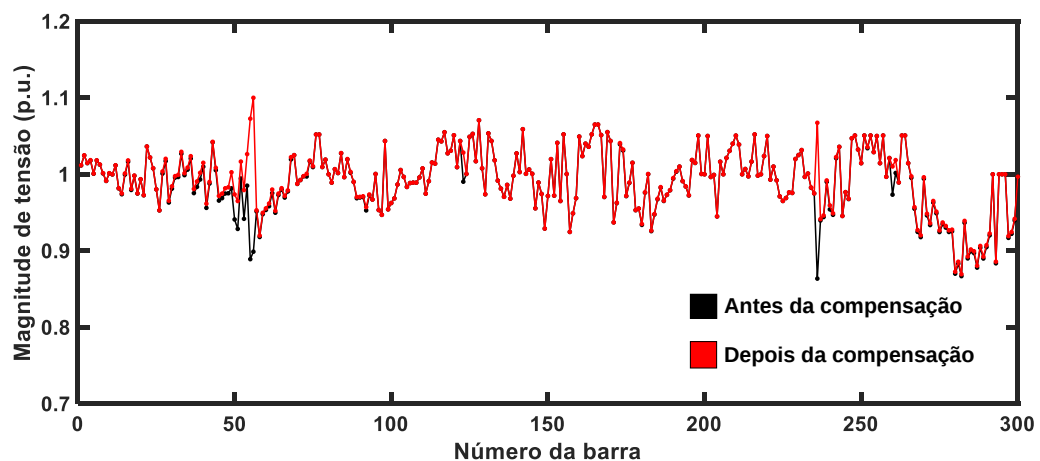
Fonte: Adaptado de Universidade de Washington (1993).

Figura 73 – IEEE-300: curva P-V da barra crítica (barra 236) antes e depois da aplicação de um banco *shunt* de 166,6210 Mvar na barra 64(56).



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 74 – IEEE-300: perfil de tensão.



Obs: A barra 64(56) se liga à barra 63(55), que por sua vez é a única conectada à barra 526(236).

Fonte: Elaboração do Autor.

4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Foi apresentada, neste trabalho, a aplicação de um método para se definir, para cada uma das barras indicadas pela análise modal estática, o montante de compensação reativa *shunt* a ser alocado, visando simultaneamente a melhora da margem de estabilidade estática de tensão e a redução das perdas totais de potência ativa, reativa e aparente na transmissão. Adicionalmente, foi proposta uma abordagem que leva em conta a redução dos valores médios entre as perdas totais de potência ativa e reativa, que pode ser utilizada nos casos em que a metodologia de redução das perdas aparentes se torna inadequada (Seção 3.2). Foram conduzidas análises para os sistemas de 14, 57, 118 e 300 barras do IEEE.

Considerando-se os resultados obtidos com os sistemas de 14 e 57 barras, foram constatados os mesmos padrões de variação na perda total de potência reativa e aumento na margem de carregamento que os fornecidos pela análise modal, sendo possível uma significativa redução no valor da perda total de potência reativa e aumento da margem de estabilidade no IEEE-57.

O sistema IEEE-118 foi analisado em duas variações e uma condição de contingência, que conduz a uma condição particular de estabilidade de tensão com característica predominantemente local. O sistema IEEE-118 possui muitas barras PV estrategicamente distribuídas de forma a proporcionar uma boa sustentação da magnitude da tensão das barras, bem como a uma margem de carregamento que chega a 108,35%. Esta margem reduz para 83,8% na configuração IEEE-118-I em que as barras de geração de números 25, 59, 61, 66 e 80 foram consideradas como PQ. Em ambas as configurações, as análises mostram claramente a importância dos limites máximos de potência reativa das barras PV's no estabelecimento da margem e da região crítica indicada pela análise modal. Mostram também que a inclusão de banco *shunt* nas barras indicadas pelos fatores de participação de barra, e que pertencem às vizinhanças das barras PV's da área crítica que atingiram os seus limites máximos de injeção de potência reativa, proporcionam ganhos maiores na margem de carregamento do que o proporcionado pela barra crítica. Já no caso da contingência da LT localizada entre as barras 11 e 13, constata-se que a barra crítica (barra 13), que apresenta o maior fator de participação de barra indicado pela análise modal, é a que proporciona a maior eficiência por unidade do banco, tanto para o aumento da margem de carregamento, quanto para a redução das perdas.

Assim como a condição de contingência do IEEE-118, o IEEE-300 também apresenta característica de colapso estritamente local, sendo o fator de participação da barra crítica muito mais significativo do que os demais. Este sistema é altamente carregado, apresentando uma margem de estabilidade muito restrita, no que a instalação de compensação *shunt* resulta, então, em altos ganhos na margem de carregamento, de até 132%, a metodologia de diminuição das perdas médias se mostrou adequada neste caso, levando a sensíveis reduções nas perdas, principalmente reativas.

Dando continuidade ao trabalho, sugere-se o uso de um novo fator de participação que leve em conta a primeira vizinhança de uma dada barra (todas as barras diretamente conectadas a ela), baseando-se para isso nas equações linearizadas das perdas de potência nas linhas de transmissão, equações **(35)** e **(36)**. Este fator de participação “local” seria então um conjunto dos fatores de participação das linhas de transmissão que compõe a primeira vizinhança da barra. Objetiva-se com isso determinar regiões de instabilidade de maneira agrupada, executando o ranqueamento das barras candidatas a serem compensadas de acordo com este novo fator de participação “local”. A metodologia de diminuição de perdas totais de potência ativa, reativa, aparente e média, conforme aplicado neste trabalho, seria também alterada, contabilizando apenas as perdas na região abrangida pelo novo fator de participação “local”, e então avaliando o desempenho da compensação reativa *shunt* no ganho de margem de estabilidade e na redução das perdas “locais”. A expectativa é que esta nova proposta de abordagem possa ser uma boa alternativa para casos de sistemas que apresentem características locais de instabilidade de tensão.

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.* Esquemas alternativos para o passo de parametrização do método da continuação baseados em parâmetros físicos. **SBA Controle & Automação**, Campinas, v. 13, n. 3, p. 275-289, 2002.

AMORIM, E. S. **Aplicação da análise modal estática no estudo de estabilidade de tensão**. 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)– Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” - UNESP, Ilha Solteira, 2011.

AMORIM, E. S.; ALVES, D. A. Redução de Perdas Reativas e Aumento da Margem de Carregamento Através da Aplicação Curvas de Perdas versus Tensão. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA- CBQEE, 10., 2013, Araxá. **Proceedings** [...] Araxá: CBQEE, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST**: módulo 3, acesso aos sistemas de distribuição. ed. 7. [S.l.:s.n.], 2017. Disponível em: www.aneel.gov.br. Acesso em: 26 nov. 2019.

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. **SBA Controle & Automação**, Campinas, v. 19, n. 3, p. 350–366, 2008.

BONINI NETO, A.; ALVES, D. A.; MATARUCCO, R.R. Assessment of branch outage contingencies using the continuation method. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, London, v. 55, [S.n.], p. 74–81, 2014.

BONINI NETO, A.; ALVES, D. A. Técnicas de parametrização global para o fluxo de carga continuado. **SBA Controle & Automação**, Campinas, v. 21, n. 4, p. 323–337, 2010.

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

CANOSSA, J. H. **Um programa interativo para estudos de fluxo de potência**. 2007. 166 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” - UNESP, Ilha Solteira, 2017.

CASTRO, C. A. **IT743**. [S.l.:s.n.], 2017. 158 slides. **Capítulo 2 Cálculo de Fluxo de Carga**. Disponível em: <http://www.dsee.fee.unicamp.br/~ccastro/>. Acesso em: 15 set. 2018.

CONDEGA, S. Y. C. **Metodologia para determinação da margem de estabilidade de tensão sob a perspectiva da expansão e da operação de sistemas de potência**. 2013. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

CROW, M. L. **Computational methods for electric power systems**. 2nd. ed. Rolla: CRC Press, 2010. 291 p.

FERRAZ, J. C. R. **Fluxo de potência continuado e análise modal na avaliação da estabilidade de tensão de sistemas de grande porte**. 1998. 142 f. Dissertação (Mestrado)– Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 1998.

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- SNTPEE, 15., 1999, Foz do Iguaçu. **Anais** [...] Foz do Iguaçu: [s.n.] 1999.

FRERIS, L. L.; SASSON, A. M. Investigation of the load-flow problem. In: INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS, 10., 1968, London. **Proceedings** [...] London: IET, 1968. v. 115, p. 1459-1470

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

GAO, B.; KUNDUR, P.; MORISON, K. Practical considerations in voltage stability assessment. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, London, v. 15, n. 4. p. 205–215, 1993.

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

MANSSOUR, Y. **Suggested techniques for voltage stability analysis**. New York: IEEE Power Engineering Society, 1993. 142 p.

MATARUCCO, R. R. **Método da continuação aplicado na Análise de contingências de linhas de transmissão**. 2010. 143 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)– Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” - UNESP, Ilha Solteira, 2010.

MOGER, T.; JOHNSON, T.; DHADBANJAN, T. Significance of reactive power loss and its application to system voltage stability. In: IEEMA ENGINEER INFINITE CONFERENCE, 2018, New Delhi. **Proceedings** [...] New Delhi: IEEE, 2018.

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

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Diretrizes e critérios para estudos elétricos, procedimentos de rede**: módulo 23, submódulo 23.3. Rio de Janeiro: [s.n.], 2010. Disponível em: www.ons.org.br. Acesso em: 10 jan. 2019.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO- ONS. **Procedimentos para a determinação das ampliações e reforços na rede básica**: módulo 4, submódulo 4.5. Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: www.ons.org.br. Acesso em: 10 jan. 2019.

PROUST. M. **À la recherché du temps perdu**. – Paris: [s.n.], 1923. v. 5 La Prisonnière.

SANTOS, R.J. **Diagonalização de matrizes 2x2 e sistemas de equações diferenciais lineares**. [S.l.:s.n.], 2002. 36 p. Disponível em: <http://www.mat.ufmg.br/~regi>. Acesso em: 15 Ago. 2019.

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

UNIVERSIDADE DE WASHINGTON- UW. **Power systems test case archive**. [S.l.:s.n.], 1993. Disponível em: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/> Acesso em: 15 Ago. 2019.

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

VILELA, A. O. R. **Margem de estabilidade de tensão no planejamento dos sistemas elétricos**: análise do impacto do despacho da geração. 2014. 84 f. Dissertação (Mestrado)– Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2014.

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.

XU, W.; E MANSOUR, Y; HARRINGTON, P. G. Planning methodologies for voltage stability limited power systems. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, [S.l.], v. 15, n. 4. p. 221–228, 1993.

WESTERN SYSTEMS COORDINATING COUNCIL- WSCC; REACTIVE POWER RESERVE WORK GROUP- RRWG. **Final report, voltage stability criteria, undervoltage load shielding strategy, and reactive power reserve monitoring methodology**. [S.l.:s.n.], 1998. 158 p.

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

ZHAO, J.; ZHANG, B. Reasons and Countermeasures for Computation Failures of Continuation Power Flow. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, [S.n.], 2006, Montreal. **Proceedings** [...] Montreal: IEEE, 1996. 6 p.

ANEXO A – IEEE-300 SEM LIMITE DE TENSÃO

CASO BASE: $P_{\text{perdas CB}} = 421,5967 \text{ MW}$; $Q_{\text{perdas CB}} = -247,5726 \text{ Mvar}$; $\text{Média}_{\text{perdas CB}} = 87,0120 \text{ MVA}$; $|V| = 0,8636 \text{ p.u.}$; $\lambda_{\text{max}} = 1,0552 \text{ p.u.}$

Tabela 22 - Valores obtidos pelo método $P_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-300.

Barra		$f_{p_{ki}}$	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	$ V_{cb} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re P_{PERDAS}	
N_{ext}	N_{int}		MW	Mvar	Média			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/ Q_{gen}	(%)	(%)/ Q_{gen}
526	236	0,5052	418,4821	-276,6863	70,8979	34,9406	1,0040	1,1054	0,8543	90,6706	2,5950	0,7387	0,0211
64	56*	0,1560	415,2297	-322,4740	46,3775	172,2173	1,1150	1,1282	0,9570	131,8548	0,7656	1,5102	0,0087
57	49	0,0161	421,0082	-272,0294	74,4894	110,5109	1,0230	1,0881	0,7297	59,3634	0,5371	0,1395	0,0012
58	50	0,0136	418,9955	-279,8911	69,5522	86,0580	1,0000	1,0882	0,7288	59,4873	0,6912	0,6169	0,0071
59	51	0,0128	417,6533	-296,5865	60,5334	232,2873	1,0230	1,1147	0,7324	107,3795	0,4622	0,9353	0,0040
61	53	0,0116	415,4043	-321,6456	46,8793	439,0909	1,0720	1,1285	0,7690	132,3725	0,3014	1,4688	0,0033
62	54*	0,0053	410,6077	-332,6279	38,9899	585,9503	1,2150	1,1287	0,9983	132,7149	0,2265	2,6065	0,0044
144	123*	0,0045	412,4225	-303,6175	54,4025	615,7770	1,2580	1,1289	0,9990	133,0444	0,2160	2,1761	0,0035
55	48	0,0016	420,9651	-262,5429	79,2111	61,3620	1,0110	1,0646	0,7320	16,8217	0,2741	0,1498	0,0024
60	52*	0,0016	416,7018	-339,9204	38,3907	274,9294	1,1240	1,1014	0,7473	83,3927	0,3033	1,1610	0,0042

*Tensões de operação do banco acima de 1,1 p.u.

Fonte: Elaboração do Autor.

Tabela 23 - Valores obtidos pelo método $Q_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-300.

Barra		$f_{p_{ki}}$	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	$ V_{cb} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re Q_{PERDAS}	
N_{ext}	N_{int}		Mvar	MW	Média			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/ Q_{gen}	(%)	(%)/ Q_{gen}
526	236	0,5052	-276,6864	418,4821	70,8979	34,9406	1,0040	1,1054	0,8543	90,6706	2,5950	11,7597	0,3365
64	56*	0,1560	-326,1506	416,2260	45,0377	198,4826	1,1730	1,1286	1,0297	132,4903	0,6675	31,7394	0,1599
57	49*	0,0161	-289,3794	427,1226	68,8716	270,9247	1,1250	1,1194	0,7461	115,9697	0,4280	16,8867	0,0623
58	50	0,0136	-287,0683	420,9551	66,9434	202,2764	1,0510	1,1154	0,7351	108,6566	0,5371	15,9532	0,0788
59	51*	0,0128	-308,1092	421,2870	56,5889	475,4725	1,1470	1,1284	0,8021	132,1259	0,2778	24,4521	0,0514
61	53*	0,0116	-331,5652	417,0631	42,7489	484,6612	1,1450	1,1284	0,7874	132,2574	0,2728	33,9265	0,0700
62	54*	0,0053	-344,5839	411,3833	33,3997	477,6076	1,1590	1,1285	0,9336	132,4391	0,2773	39,1850	0,0820
144	123*	0,0045	-324,6467	413,5530	44,4531	454,3191	1,1630	1,1285	0,9336	132,3422	0,2913	31,1319	0,0685
55	48*	0,0016	-280,2338	425,994	72,8801	180,1643	1,1110	1,0831	0,7265	50,2138	0,2787	13,1926	0,0732
60	52*	0,0016	-342,1056	417,1476	37,5210	298,6512	1,1370	1,1059	0,7469	91,4893	0,3063	38,1840	0,1278

*Tensões de operação do banco acima de 1,1 p.u.

Fonte: Elaboração do Autor.

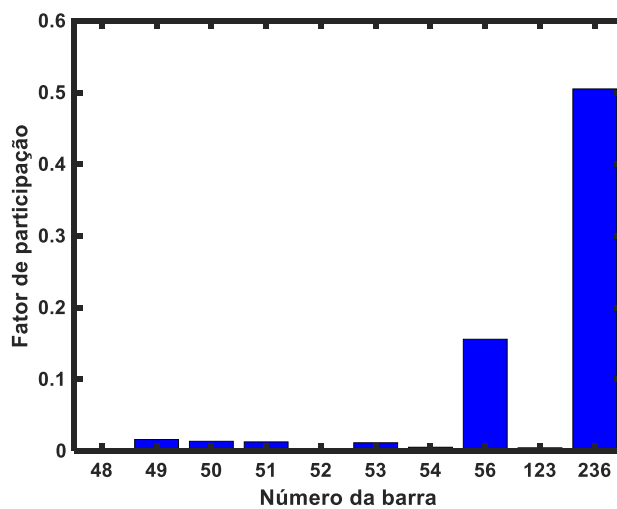
Tabela 24 - Valores obtidos pelo método $\text{Média}_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-300.

Barra		$f_{p_{ki}}$	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	$ V_{cb} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re $\text{Média}_{\text{PERDAS}}$	
N_{ext}	N_{int}		Média	MW	Mvar			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/ Q_{gen}	(%)	(%)/ Q_{gen}
526	236	0,5052	70,8979	418,4821	-276,6863	34,9406	1,0040	1,1054	0,8543	90,670	2,5950	18,5194	0,5300
64	56*	0,1560	44,9692	415,9542	-326,0157	193,5844	1,1620	1,1285	1,0174	132,4383	0,6841	48,3183	0,2496
57	49	0,0161	68,0117	424,0699	-288,0464	250,9391	1,0970	1,1161	0,7456	109,9550	0,4381	21,836	0,0870
58	50	0,0136	66,7467	420,2448	-286,7515	178,1097	1,0400	1,1125	0,7318	103,4893	0,5810	23,2903	0,1307
59	51*	0,0128	56,3646	420,4678	-307,7386	467,2192	1,1330	1,1285	0,7992	132,3001	0,2831	35,2221	0,0753
61	53*	0,0116	42,6351	416,6663	-331,3960	478,4856	1,1350	1,1285	0,7852	132,3333	0,2765	51,0009	0,1065
62	54*	0,0053	33,3757	411,3003	-344,5489	483,5883	1,1620	1,1288	0,9336	132,9685	0,2749	61,6420	0,1274
144	123*	0,0045	44,4279	413,4676	-324,6119	460,0195	1,1660	1,1288	0,9336	132,9858	0,2890	48,9405	0,1063
55	48	0,0016	72,3253	424,0180	-279,367	155,6834	1,0890	1,0804	0,7265	45,3267	0,2911	16,8789	0,1084
60	52*	0,0016	37,4346	416,9335	-342,064	291,0889	1,1330	1,1045	0,7476	88,8973	0,3054	56,9776	0,1957

*Tensões de operação do banco acima de 1,1 p.u.

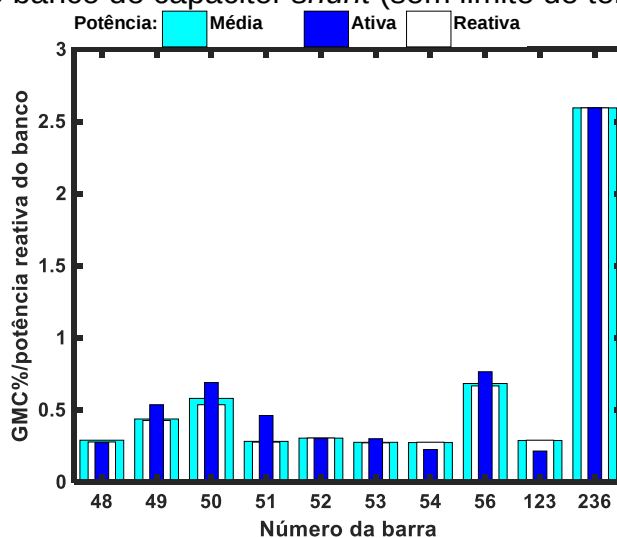
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 75 - IEEE-300: dez maiores fatores de participação de barras.



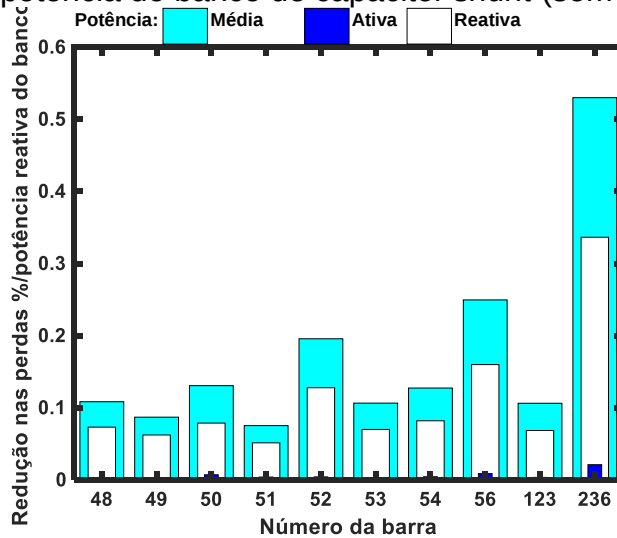
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 76 - IEEE-300: ganho da margem de carregamento em relação à potência a do banco de capacitor *shunt* (sem limite de tensão).



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 77 - IEEE-300: redução nas perdas totais de potência ativa, reativa e média em relação à potência do banco de capacitor *shunt* (sem limite de tensão).



Fonte: Elaboração do Autor.

ANEXO B – IEEE-14 E IEEE-57: REDUÇÃO DAS PERDAS MÉDIAS

Neste anexo é apresentado, como complemento, a metodologia de redução de perdas médias para os sistemas IEEE de 14 e 57 barras, conforme aplicada aos sistemas IEEE de 118 e 300 barras.

CASO BASE: $P_{\text{perdas CB}} = 13,3589 \text{ MW}$; $Q_{\text{perdas CB}} = 26,8085 \text{ Mvar}$; $\text{Média}_{\text{perdas CB}} = 20,0837$; $|V| = 1,0113 \text{ p.u.}$; $\lambda_{\text{max}} = 1,7444 \text{ p.u.}$

Tabela 25 – Valores obtidos pelo método $\text{Média}_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-14.

Barra	$f_{p_{ki}}$	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	$ V_{cb} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re Média _{PERDAS}	
		Média	MW	Mvar			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/ Q_{gen}	(%)	(%)/ Q_{gen}
14	0,1421	19,9392	13,3230	26,5554	8,8349	1,0400	1,7620	0,6065	2,3582	0,2669	0,7194	0,0814
13	0,1151	19,9652	13,3159	26,6146	9,1238	1,0470	1,7628	0,5997	2,4783	0,2716	0,5899	0,0646
10	0,1118	19,9774	13,3623	26,5924	10,0256	1,0520	1,7652	0,6000	2,7923	0,2785	0,5294	0,0528
12	0,1069	20,0408	13,3528	26,7288	5,7479	1,0460	1,7560	0,5943	1,5539	0,2703	0,2135	0,0371
9*	0,1052	19,9993	13,3865	26,6121	11,6758	1,0560	1,7688	0,6009	3,2818	0,2810	0,4201	0,0359
11	0,1038	20,0252	13,3600	26,6903	7,5376	1,0520	1,7599	0,5946	2,0876	0,2769	0,2914	0,0386
4	0,0319	20,0260	13,4402	26,6118	17,3136	1,0340	1,7694	0,5936	3,3540	0,1937	0,2874	0,0166
5	0,0265	19,9439	13,4136	26,4743	21,1373	1,0410	1,7743	0,5961	4,0147	0,1899	0,6958	0,0329

*No caso da barra 9 existe um banco de 19 Mvar, logo deve se adicionar $30,6758 = 19 + 11,6758 \text{ Mvar}$

Fonte: Elaboração do Autor.

CASO BASE: $P_{\text{PERDAS CB}} = 28,6127 \text{ MW}$; $Q_{\text{PERDAS CB}} = 9,2769 \text{ MVAR}$; $\text{Média}_{\text{perdas CB}} = 18,9448$; $|V| = 0,8241 \text{ p.u.}$; $\lambda_{\text{max}} = 1,5331 \text{ p.u.}$

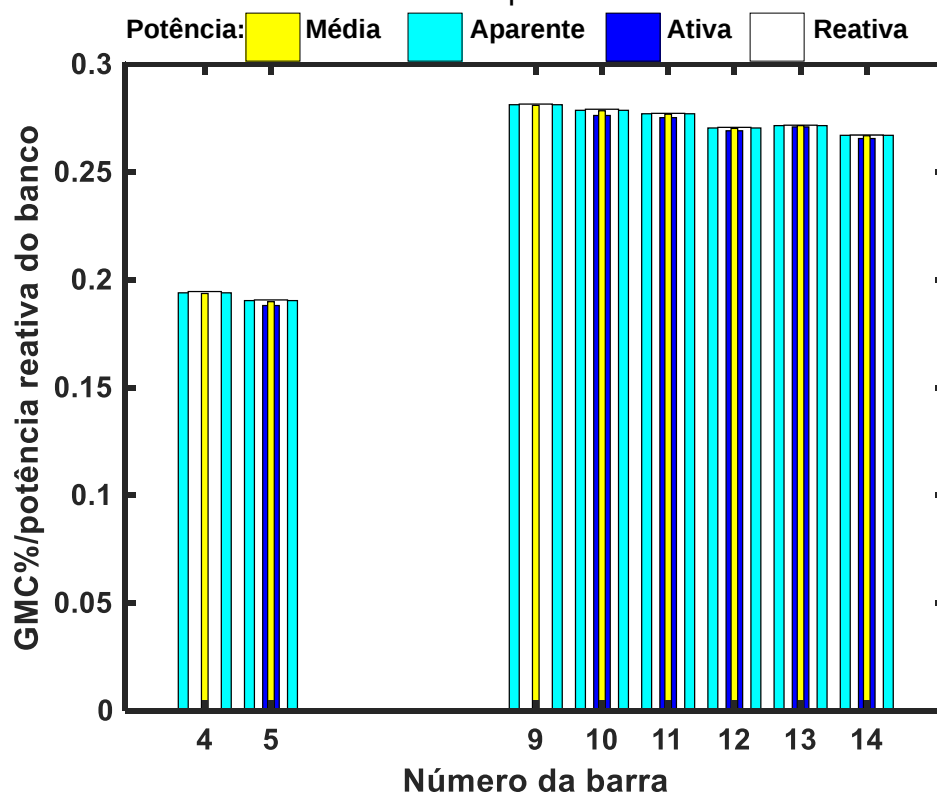
Tabela 26 – Valores obtidos pelo método $\text{Média}_{\text{perdas}} \times V$ – Sistema IEEE-57.

Barra	$f_{p_{ki}}$	Perda total			Pot. do Banco (Mvar)	$ V_{cb} $ (p.u.)	PMC		GMC		Re Média _{PERDAS}	
		Média	MW	Mvar			λ	$ V $ (p.u.)	(%)	(%)/ Q_{gen}	(%)	(%)/ Q_{gen}
31	0,1873	17,6376	28,1533	7,1219	12,5482	0,9430	1,5687	0,5280	6,6696	0,5315	6,8999	0,5498
30	0,1296	17,7934	28,2397	7,3471	12,9563	0,9630	1,5720	0,5152	7,3057	0,5638	6,0778	0,4691
33	0,1284	17,5621	28,0791	7,0450	13,5274	0,9620	1,5719	0,5109	7,2690	0,5373	7,2987	0,5395
32	0,1250	17,4864	28,0193	6,9536	14,3487	0,9680	1,5745	0,5131	7,7751	0,5418	7,6979	0,5364
25*	0,0971	17,8890	28,2845	7,4934	13,6233	0,9800	1,5751	0,5081	7,8742	0,5779	5,5732	0,4090
34	0,0245	17,2280	28,0661	6,3898	24,6019	0,9510	1,5765	0,4897	8,1487	0,3312	9,0624	0,3683
24	0,0193	17,7234	28,3843	7,0625	25,1882	0,9650	1,5799	0,4887	8,7859	0,3488	6,4473	0,2559
35	0,0186	16,9448	28,0043	5,8852	30,0823	0,9560	1,5822	0,4897	9,2075	0,3060	10,5572	0,3509
26	0,0175	17,8312	28,371	7,2913	24,3479	0,9660	1,5773	0,4872	8,2962	0,3407	5,8783	0,2414
36	0,0146	16,6804	27,9343	5,4265	35,9460	0,9640	1,5887	0,4907	10,4296	0,2901	11,9526	0,3325

*No caso da barra 25 existe um banco de 5,9 Mvar, logo deve se adicionar $19,5233 = 5,9 + 13,6233 \text{ Mvar}$

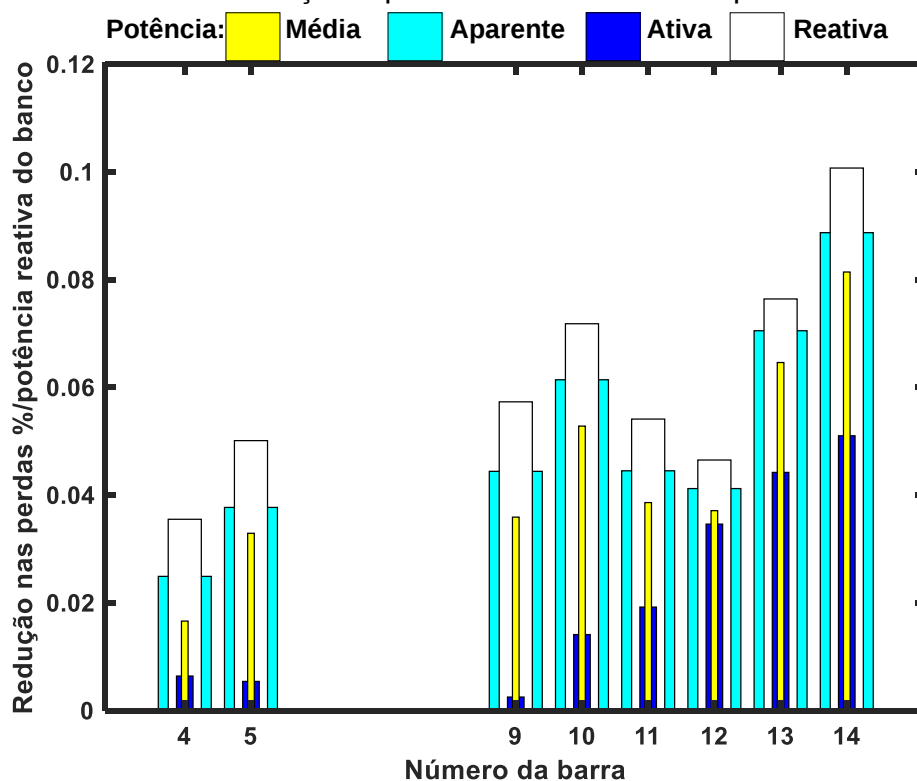
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 78 – IEEE-14: ganho da margem de carregamento em relação à potência do banco de capacitor *shunt*.



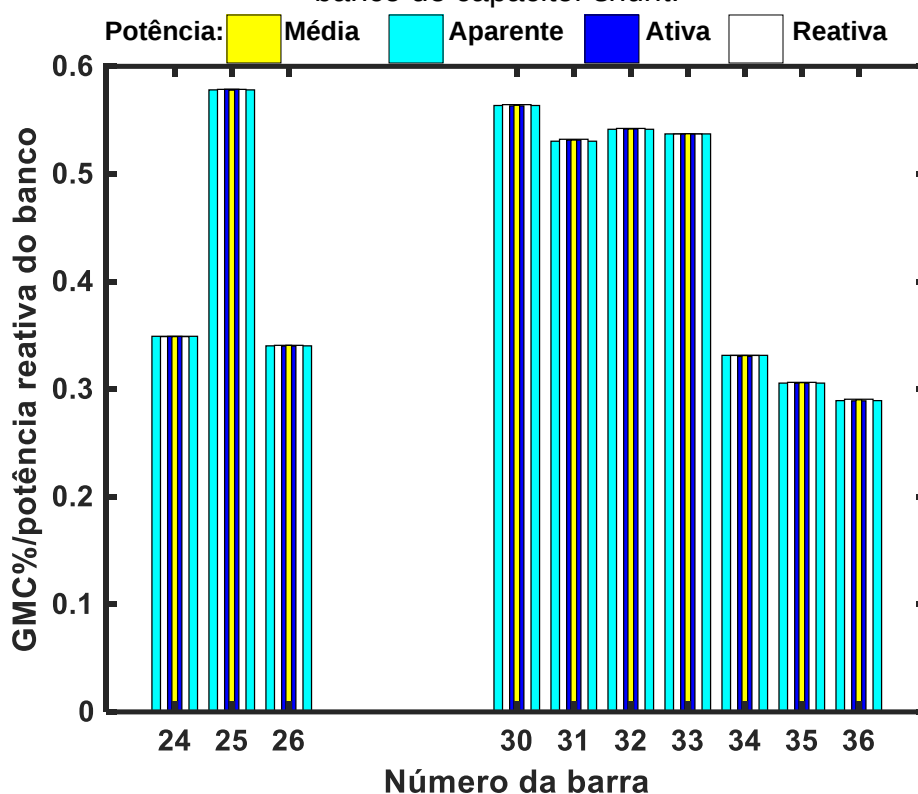
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 79 – IEEE-14: redução nas perdas totais de potência ativa, reativa, aparente e média em relação à potência do banco de capacitor *shunt*.



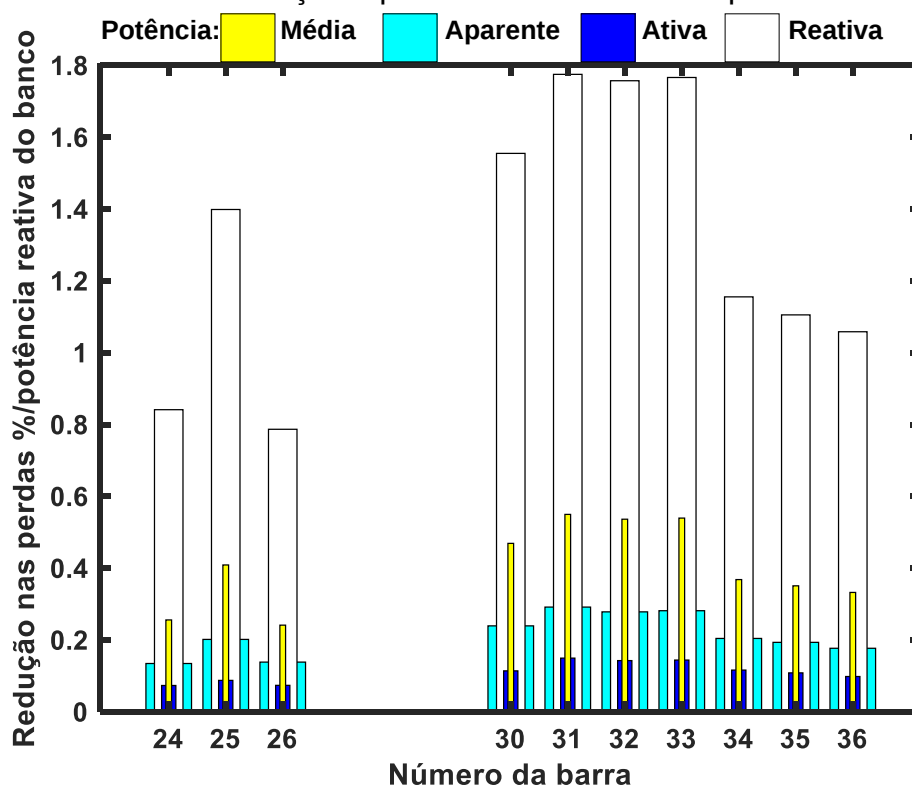
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 80 – IEEE-57: ganho da margem de carregamento em relação à potência do banco de capacitor *shunt*.



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 81 – IEEE-14: redução nas perdas totais de potência ativa, reativa, aparente e média em relação à potência do banco de capacitor *shunt*.



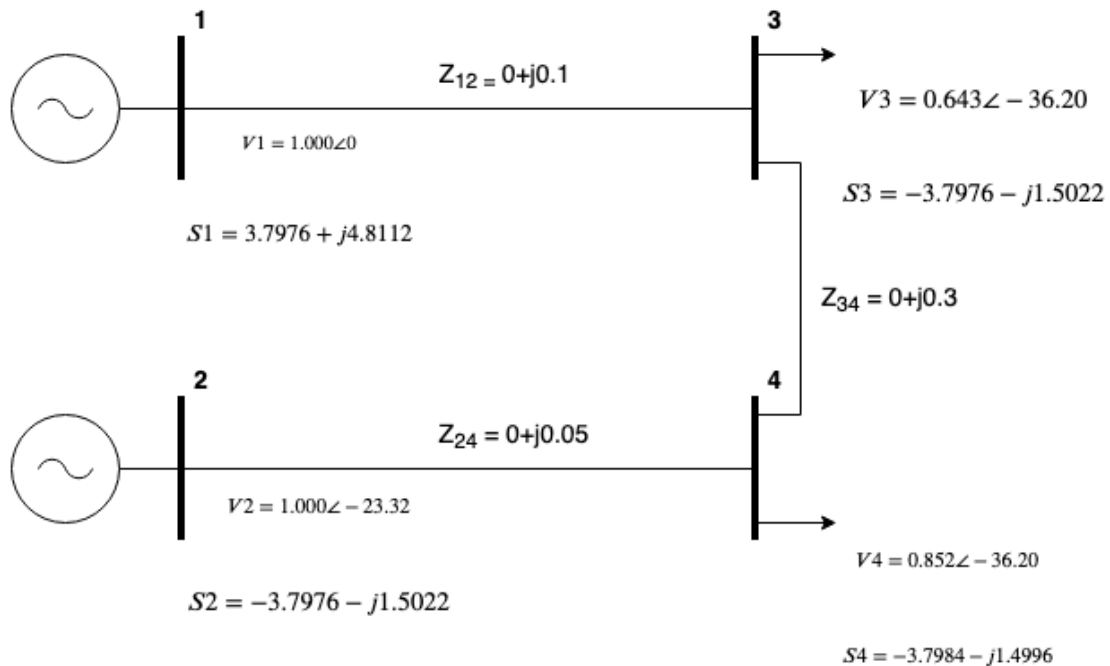
Fonte: Elaboração do Autor.

APÊNDICE A – TUTORIAL ANÁLISE MODAL

Apresenta-se aqui um tutorial exemplificando a aplicação prática dos conceitos básicos da técnica da análise modal. Todos os resultados foram obtidos por meio de software MATLAB e são referentes ao sistema simples de quatro barras (MANSOUR, 1993) apresentado na **Figura 82**. São ilustrados os seguintes conceitos:

- Montagem das matrizes jacobianas completa e reduzida.
- Obtenção dos autovalores e autovetores.
- Definição dos fatores de participação das barras, ramos e geradores.

Figura 82 – Sistema exemplo.



Fonte: Elaboração do Autor.

A matriz admitância nodal do sistema fica da seguinte forma:

$$Y = \begin{bmatrix} (Z_{11})^{-1} & (Z_{12})^{-1} & (Z_{13})^{-1} & (Z_{14})^{-1} \\ (Z_{21})^{-1} & (Z_{22})^{-1} & (Z_{23})^{-1} & (Z_{24})^{-1} \\ (Z_{31})^{-1} & (Z_{32})^{-1} & (Z_{33})^{-1} & (Z_{34})^{-1} \\ (Z_{41})^{-1} & (Z_{42})^{-1} & (Z_{43})^{-1} & (Z_{44})^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 - j10 & 0 & 0 + j10 & 0 \\ 0 & 0 - j20 & 0 & 0 + j20 \\ 0 + j10 & 0 & 0 - j13.3333 & 0 + j3.3333 \\ 0 & 0 + j20 & 0 + j3.3333 & 0 - j23.3333 \end{bmatrix} \quad (48)$$

sendo as matrizes condutância nodal e susceptância nodal, respectivamente:

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (49)$$

$$B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{14} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & B_{24} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & B_{34} \\ B_{41} & B_{42} & B_{43} & B_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & -20 & 0 & 20 \\ 10 & 0 & -13.3333 & 3.3333 \\ 0 & 20 & 3.3333 & -23.3333 \end{bmatrix} \quad (50)$$

As equações básicas do fluxo de carga obtidas pela aplicação das leis de Kirchhoff (MONTICELLI, 1983) são dadas por:

$$\begin{cases} \Delta P_k = P_k^{\text{especificado}} - V_k \sum_{l \in \Omega_k} (G_{kl} \cos \theta_{kl} + B_{kl} \sin \theta_{kl}) V_l = 0 \\ \Delta Q_k = Q_k^{\text{especificado}} - V_k \sum_{l \in \Omega_k} (G_{kl} \sin \theta_{kl} - B_{kl} \cos \theta_{kl}) V_l = 0 \end{cases} \quad (51)$$

Sendo ΔP_k o desbalanço (resíduo, ou *mismatch*) de potência ativa e ΔQ_k o de reativa, $P_k^{\text{especificado}}$ e $Q_k^{\text{especificado}}$ os valores das injeções de potência ativa e reativa especificados para a barra k , Ω_k representa o conjunto de todas as barras diretamente conectadas à barra k , G_{kl} e B_{kl} são, respectivamente, os elementos das matrizes de condutância e admitância nodal, V_k e V_l as respectivas magnitudes de tensão das barras k e l , e θ_k e θ_l seus ângulos de fase correspondentes. O método de Newton consiste na determinação das variáveis de estado por meio de um processo iterativo que tem como objetivo fazer com que os desbalanços de potência se tornem menores do que uma tolerância preestabelecida, conforme foi mostrado na seção 2.5. Para este caso o estado do sistema já está determinado, ou seja, já são conhecidos os valores dos módulos e ângulos de tensão e das injeções de potência nas barras. A matriz Jacobiana completa consiste nas derivadas parciais dos

mismatches em relação à magnitude e ao ângulo de fase da tensão das barras, representando o “grau de sensibilidade” das potências injetadas em cada barra com relação à variação destes parâmetros, cada submatriz representa o conjunto de relações entre potência e parâmetro:

$$\mathbf{J} = - \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{P\theta} & \mathbf{J}_{PV} \\ \mathbf{J}_{Q\theta} & \mathbf{J}_{QV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16.611 & 0 & -16.611 & 0 & 3.8 \\ 0 & 7.018 & -1.827 & -3.8 & 0 \\ -16.611 & -1.827 & 18.438 & 0 & -3.9 \\ 0 & -3.8 & 0 & 4.018 & -1.827 \\ 3.8 & 0 & -3.8 & -1.827 & 15.569 \end{bmatrix} \quad (52)$$

As relações entre a potência reativa Q e a tensão V são de fundamental interesse no estudo da estabilidade estática, a matriz Jacobiana reduzida utilizada na análise modal consiste numa simplificação da matriz completa, focando apenas nestas relações (KUNDUR, 1993):

$$\mathbf{J}_R = [\mathbf{J}_{QV} - \mathbf{J}_{Q\theta}(\mathbf{J}_{P\theta}^{-1})\mathbf{J}_{PV}] = \begin{bmatrix} 1.236 & -1.827 \\ -1.827 & 14.569 \end{bmatrix} \quad (53)$$

Por meio do cálculo da matriz dos autovalores ($\mathbf{\Lambda}$) de $\mathbf{J}_R$ é possível analisar o a estabilidade do sistema, cada autovalor define um “modo” de operação e quanto menor o autovalor, mais próximo o modo está da instabilidade, sendo que um autovalor negativo indica que a instabilidade foi atingida (colapso de tensão). São calculadas também as matrizes dos autovetores direito ($\mathbf{\Phi}$) e esquerdo ($\mathbf{\Gamma}$) de $\mathbf{J}_R$, sendo que associado a cada autovalor existe um par de autovetores esquerdo e direito. De Kundur (1994):

$$\mathbf{J}_R = \mathbf{\Phi} \mathbf{\Lambda} \mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} -0.9911 & -0.1334 \\ -0.1334 & 0.9911 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.9904 & 0 \\ 0 & 14.8145 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.9911 & -0.1334 \\ -0.1334 & 0.9911 \end{bmatrix} \quad (54)$$

Tem-se, então, neste caso dois modos de operação, definidos pelos valores nas diagonais da matriz de autovalores. Os produtos ponto a ponto dos respectivos autovetores esquerdos e direitos relacionados a cada autovalor definem os fatores de participação de barra (fp_{ki}).

Os fatores de participação para as linhas (fp_{kli}) e geradores (fp_{gki}) são calculados por meio das variações linearizadas das perdas reativas nas linhas ($\Delta Q_{perdas\ kli}$) e das potências reativas geradas ($\Delta Q_{gerado\ gki}$), conforme descrito na seção 2.6.4. Os resultados do cálculo dos fatores de participação de barras, linhas e geradores para cada modo deste exemplo são apresentados abaixo e organizados em ordem decrescente. Como nenhum dos autovalores é negativo, é possível concluir que para tais condições o sistema é estável, o autovalor do modo 1 é menor que o do modo dois, portanto o modo 1 é mais crítico, neste modo a barra 3 apresenta um fator de participação de barra (fp_{ki}) muito maior do que o da barra 4, comprovando que ela é de fato a barra crítica e também a mais indicada para compensação *shunt*. Os fatores de participação de linhas (fp_{kli}) do modo 1 também revelam a linha entre as barras 1 e 3 como sendo a mais crítica, o que é fácil perceber, visto que a linha conecta a barra de referência (*slack*) e a barra crítica, sendo que o gerador na barra slack tem um fator de participação (fp_{gki}) muito mais significativo do que o presente na barra 2.

Tabela 27 – Modo 1.

Autovalor = 0.9904					
Barra	fp_{ki}	Linha	fp_{kli}	Gerador	fp_{gki}
3	0,9822	1-3	1,0000	1	1,0000
4	0,0178	3-4	0,1364	2	0,2523
		2-4	0,1012		

Fonte: Elaboração do Autor.

Tabela 28 – Modo 2.

Autovalor = 14.8145					
Barra	fp_{ki}	Linha	fp_{kli}	Gerador	fp_{gki}
4	0,9822	2-4	1,0000	1	1,0000
3	0,0178	3-4	-0,2377	2	-0,0610
		1-3	-0,1786		

Fonte: Elaboração do Autor.

APÊNDICE B – TRABALHOS PUBLICADOS

ALVES, D. A.; LIMA, G. B. Alternative methodology for shunt capacitor bank allocation for power loss reduction and voltage stability margin. In LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION- CLAGTEE, 13., 2019, Santiago. **Proceedings** [...] Santiago: CLAGTEE, 2019.