



EDGARDO GUILLERMO CAMACHO PALOMINO

REFORÇO DAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE DE TENSÃO NA OPERAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

TESE DE DOUTORADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO

RIO DE JANEIRO, 9 DE MAIO DE 2002

EDGARDO GUILLERMO CAMACHO PALOMINO

**REFORÇO DAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE DE
TENSÃO NA OPERAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO**

Tese apresentada ao Departamento de
Engenharia Elétrica da PUC/RJ como
parte dos requisitos para obtenção do
título de Doutor em Ciências em
Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: RICARDO B. PRADA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO

RIO DE JANEIRO, 9 DE MAIO DE 2002

A meus queridos Pais
Juan Cancio e Victoria,
A Mary e minhas filhas
Jenifer e Tainara

Agradecimentos

Todo trabalho que objetiva dar ou acrescentar uma nova visão aos problemas que o homem enfrenta na sua caminhada para o futuro é fruto não só de um esforço individual mas também de um conjunto de pessoas em suas mais variadas atividades.

Inicialmente, agradeço a Deus por me fazer forte o bastante para, mesmo nas horas de desânimo, prosseguir no ideal de concretizar o trabalho.

Ao professor Ricardo B. Prada, por toda a dedicação e excelente orientação dispensadas ao longo do desenvolvimento desta tese. Seu apoio técnico foi decisivo neste trabalho.

A Luis Pilloto e André Bianco, pelas importantes discussões técnicas, pela confiança e pela gentileza em responder as minhas questões e, com isso, sanar minhas dúvidas.

Aos meus Pais e irmãos, que dedicaram toda a sua atenção e carinho, e cabe a mim dizer que este trabalho também lhes pertence.

À minha esposa Mary, e minhas filhas Jenifer e Tainara, por sua compreensão, apoio e carinho.

À Pontifícia Universidade Católica (PUC-Rio), por ter-me dado a grande oportunidade de lhe conhecer, será inolvidável para meu futuro profissional e pessoal.

Ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), pelos subsídios operacionais que viabilizaram este trabalho.

Ao CNPq, por ter materializado minhas aspirações.

E aos colegas de sala, que muitas vezes funcionaram como um suporte técnico em eventuais dúvidas e conceitos.

RESUMO

Na medida em que as redes de transmissão de energia elétrica ficaram mais malhadas, os limites térmicos de linhas e transformadores passaram a restringir menos a transmissão de potência. Similarmente, o uso de sistemas estáticos de compensação de potência reativa e estabilizadores na excitação dos geradores aumentou a capacidade de transmissão de potência nos sistemas antes limitados por problemas de estabilidade angular. Hoje as linhas de transmissão estão mais carregadas e isto deu origem ao problema da instabilidade de tensão.

Neste trabalho, as condições de estabilidade de tensão são avaliadas por condições nodais associadas ao máximo fluxo de potência ativa e reativa que pode ser transmitida dos geradores para as cargas. Estas condições nodais são avaliadas por uma ferramenta analítica com base em modelo matemático, simples mas poderoso, de uma direta interpretação física do fenômeno. Índices abrangentes e significativos são obtidos a partir da matriz Jacobiano do sistema. Eles indicam a região de operação na curva $V \times P, Q$, a margem em MVA para o máximo carregamento, a importância relativa entre as barras, uma medida de dificuldade de transmissão, e o índice de influência que relaciona as margens de potência entre dois pontos de operação, o que caracteriza a eficácia ou não, por exemplo, de uma ação de controle.

O método proposto nesta tese para reforçar as condições de estabilidade de tensão consiste de três etapas sequenciais. Primeiramente, avalia-se as condições de estabilidade de tensão determinando-se a barra crítica da rede através do cálculo da margem de potência. Determina-se o "caminho de transmissão crítico", conceito novo usado neste trabalho, entre os vários existentes para transportar potência de geradores para aquela barra crítica. Determina-se então o "ramo crítico" deste caminho, conceito introduzido neste trabalho. Um programa de fluxo de potência ótimo é usado para aliviar o carregamento desse ramo crítico. A sequência começa novamente com a avaliação das condições no novo ponto de operação. Todas as etapas são repetidas até que as margens resultantes sejam julgadas adequadas.

Barras de carga, de geração e de tensão controlada por compensadores de potência reativa em paralelo com a rede podem ser eleitas como a barra crítica. Somente o método de avaliação nodal usado é capaz de lidar com qualquer tipo de barra. Da mesma forma, o procedimento proposto para reforçar as condições de estabilidade de tensão é adequado para qualquer tipo de barra.

São mostrados inúmeros testes, tanto ilustrativos como com sistemas reais, em pontos de operação também reais, inclusive na situação de iminente colapso de tensão. Verifica-se que o método proposto realmente produz os resultados desejados.

ABSTRACT

As the electric power transmission networks became more interconnected, the thermal limits of lines and transformers restrict less the power transmission. Similarly, the use of static systems of reactive power compensation increases the power transmission capacity in systems whereas before they were limited by problems of angular stability. Actually, transmission lines are more loaded and create the voltage stability problem.

In this work, voltage stability conditions are assessment by nodal conditions associated to the maximum active and reactive power flow that can be transmitted from generators to loads. These nodal conditions are assessment using an analytical tool, based on a simple but sound mathematical background, modelling a straightforward physical characterisation of the phenomena. Comprehensive and meaningful indices are obtained from system Jacobean matrix. They indices indicate the operating region in $V \times P, Q$ curve, the MVA margin to the maximum load, the relative importance among buses, the buses loading ranking, a measure of difficult for power transmission, and the influence indices that relates power margins between two operating points, which characterises efficiency or not, for example, of a control action.

In order to reinforce voltage stability condition, the thesis proposes a method consisting of three sequential stages. Firstly, voltage stability is analysed, deciding network critical bus using the power margin calculation. Next, the "critical transmission path" is decided, which is a new concept used in this work, in between several existing used to transport generators power for that critical bus. Then, "critical branch" is obtained through this path, concept introduced in this work. An optimal power flow program is used to alleviate load flow in the critical branch. The sequence starts again with the stability condition assessment in the new operating point. All stages are repeated until resultant margins are judged suitable.

Load, generation and voltage-controlled bus by shunt reactive power compensators could be considered critical bus. The nodal method used is the only one capable of handling any bus type.

Several cases are shown, illustrative as well as real systems using real operating points, including imminent voltage collapse situations. It is verified that the proposed method really produces the desired results.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XIX
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	
1.1 Considerações Gerais	1
1.2 Objetivo	3
1.3 Estrutura da Tese	4
CAPÍTULO 2 CARACTERIZAÇÃO DO FENÔMENO DA ESTABILIDADE DE TENSÃO E ÍNDICES PARA AVALIAÇÃO	
2.1 Introdução	6
2.2 Regiões de Operação & Efeitos de Ações de Controle de Tensão	10
2.3 Análise Nodal	14
2.3.1 Sistema de Duas Barras	14
2.3.2 Sistema Multi – Nó	19
2.4 Índices para Avaliação Nodal do Carregamento da Rede de Transmissão	20
2.4.1 O Programa ESTABTEN	21
2.4.1.1 Magnitude do Determinante da Matriz [D']	21
2.4.1.2 Sinal do Determinante da Matriz [D']	25
2.4.2 Índices Adicionais	27
2.4.2.1 Margem de Potência	27

2.4.2.2	Índice de Influência	28
2.5	Avaliação do Sistema do SAGE e Visualização dos Índices Resultantes	31
2.5.1	Descrição do Sistema	31
2.5.2	Avaliação do Sistema	34
2.5.2.1	Visualização das Margens de Potência	37
2.5.2.2	Visualização dos Índices de Influência	38
2.6	Conclusões	39

CAPÍTULO 3 CAMINHO DE TRANSMISSÃO CRÍTICO

3.1	Introdução	51
3.2	Transformação do Sistema Multi-Nó	52
3.2.1	Equivalente 1	52
3.2.2	Equivalente 2	53
3.2.3	Equivalente 3	54
3.2.4	Eliminação de Barras Intermediárias	56
3.3	Aplicação	63
3.3.1	Aplicação da Ferramenta Computacional CaTrans	66
3.3.2	Aplicação da Ferramenta Computacional FLUPOT	67
3.4	Conclusões	70

CAPÍTULO 4 REFORÇO DAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE DE TENSÃO EM BARRAS DE CARGA

4.1	Aplicação no Sistema S35 do SAGE	71
4.1.1	Aumento da Margem de Potência da Barra de Carga	74
4.1.1.1	Minimização do Fluxo de Potência Ativa em um Ramo Pertencente Somente ao Pior Caminho de Transmissão	74

4.1.1.2	Minimização do Fluxo de Potência Ativa Simultaneamente em Seis Ramos	76
4.1.1.3	Minimização do Fluxo de Potência Ativa em um Ramo Comum aos Piores Caminhos	77
4.1.1.4	Comparação e Conclusão	78
4.1.2	Estudo do Máximo Carregamento da Barra	81
4.1.2.1	Máximo Carregamento Considerando Somente Redespacho de Potência Reativa	81
4.1.2.2	Máximo Carregamento Considerando Redespacho de Potência Ativa e Reativa	84
4.1.2.3	Comparações e Conclusões	90
4.1.3	Aumento da Margem de Potência da Barra de Carga com Reforço no Ramo Crítico	91
4.1.3.1	Reforço em Uma Única Etapa	93
4.1.3.2	Reforço em Duas Etapas	96
4.1.3.3	Reforço em Três Etapas	99
4.1.1.4	Conclusões	104
4.1.4	Aumento Sequencial da Margem de Potência da Barra de Carga com Reforço no Ramo Crítico	105
4.1.4.1	Etapa 1 de Reforço	106
4.1.4.2	Etapa 2 de Reforço	108
4.1.4.3	Etapa 3 de Reforço	111
4.1.4.4	Etapa 4 de Reforço	114
4.1.4.5	Etapa 5 de Reforço	116
4.1.4.6	Etapa 6 de Reforço	119
4.1.4.7	Etapa 7 de Reforço	122
4.1.4.8	Conclusões	124
4.2	Aplicação no Sistema IEEE 24 Barras	126
4.2.1	Caso 1: Aumento da Margem de Potência na Barra 8	128

4.2.1.1	Etapa 1 de Reforço	131
4.2.1.2	Etapa 2 de Reforço	133
4.2.2	Caso 2: Aumento da Margem de Potência nas Barras de 138 kV	137
4.2.3	Conclusões	143

CAPÍTULO 5 REFORÇO DAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE DE TENSÃO EM BARRAS DE TENSÃO CONTROLADA

5.1	Aumento da Margem em Barras de Geração	145
5.1.1	Etapa 1 de Reforço: Redespacho Reativo	148
5.1.2	Etapa 2 de Reforço: Redespacho Ativo	149
5.1.3	Conclusões	151
5.2	Aumento da Margem de Potência em Barras com Compensação Reativa	152
5.2.1	Reforço na Barra de Compensação Reativa 44 GRAJAU---2CS	155
5.2.1.1	Etapa 1 de Reforço: Redespacho Reativo	156
5.2.1.2	Etapa 2 de Reforço: Redespacho Ativo	156
5.2.2	Reforço na Barra de Compensação Reativa 48 IBIUNA---3CS	159
5.2.2.1	Etapa 1 de Reforço: Redespacho Reativo	159
5.2.2.2	Etapa 2 de Reforço: Redespacho Ativo	160
5.2.3	Conclusões	162
5.3	Aumento da Margem de Potência em Barras com Geradores e Barras com Compensação Reativa	164
5.3.1	Reforço de Barras Individualmente	166
5.3.1.1	Reforço na Barra de Compensação Reativa 44 GRAJAU--2CS	167
5.3.1.2	Reforço na Barra de Geração 1107 ITAIPU60-7MQ	168
5.3.1.3	Reforço na Barra de Compensação Reativa 48 IBIUNA-3CS	171
5.3.2	Reforço da Barra Crítica Determinada após cada Redespacho	174

5.3.2.1	Etapa 1 de Reforço: Redespacho Reativo	175
5.3.2.2	Etapa 2 de Reforço: Redespacho Ativo	175
5.3.3	Reforço Simultâneo de Todas as Barras	183
5.3.3.1	Etapa 1 de Reforço: Redespacho Reativo	183
5.3.3.2	Etapa 2 de Reforço: Redespacho Ativo	183
5.3.4	Conclusões	188

CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1	Conclusões	191
6.2	Contribuições Originais	194
6.3	Desenvolvimentos Futuros	195

APÊNDICE I Métodos de Avaliação e Reforço das Condições de Estabilidade de Tensão

I.1	Generalidades	196
I.2	Métodos de Análise Estática	199
I.2.1	Métodos com base em Fluxo de Potência Convencional	199
I.2.2	Método pela Análise dos Indicadores de Desempenho	200
I.2.3	Método de Ponto de Colapso e Fluxo de Potência Continuado	202
I.2.4	Análise Modal	202
I.2.5	Análise Nodal - Método do Determinante Reduzido	203
I.2.6	Métodos Probabilísticos	203
I.2.7	Método com base na Otimização	203
I.3	Métodos de Reforço da Estabilidade de Tensão	205

APÊNDICE II Critérios para Determinação da Margem de Potência na
Operação de Sistemas Elétricos

II.1	Introdução	212
II.2	Estados Off-Line e On-Line	213
II.3	Margem de Estabilidade de Tensão	214
II.4	Metodologias Estáticas Para Medir Margens	215
II.5	Critérios Para o Planejamento da Operação	218
II.5.1	Critérios Adotados Pelo WSCC	218
II.5.2	Critérios Para Avaliação de Estabilidade de Tensão do Sistema Elétrico Brasileiro	224
REFERÊNCIAS		229

Lista de Figuras

Figura 2.1 -	Sistema - Teste de Duas Barras	6
Figura 2.2 -	Lugar Geométrico da Tensão na Carga para Todos os Níveis de Potência Ativa Constante e Para Alguns Níveis de Potência Reativa Constante	8
Figura 2.3 -	Gráfico $V \times \theta$ com o Lugar Geométrico da Tensão na Carga para P Constante, Q constante, P & Q para ϕ constante	9
Figura 2.4 -	Curva $P_{ik} \times V_i$ Referente ao Sistema de Duas Barras da Figura 2.1	11
Figura 2.5 -	Sistema de Duas Barras com Capacitor na Barra de Carga	12
Figura 2.6 -	Curvas $P_{ik} \times V_i$ Antes e Depois da Instalação do Capacitor na Barra de Carga	13
Figura 2.7 -	Curvas $V_i \times \theta_i$ para P_{ik} e Q_{ik} Constantes	15
Figura 2.8 -	Curvas $V_i \times \theta_i$ para P_{ik} e Q_{ik} Constantes, Considerando a Máxima Potência Transferida da Barra i para a Barra k	15
Figura 2.9 -	Fronteira F entre “Região A” e “Região B” Cruzando os Pontos de Carga Máxima nas Curvas R_i de Carga Variável e Fator de Potência Constante	16
Figura 2.10 -	Posição dos Vetores Gradiente ∇P e ∇Q nas Regiões A e B e na Fronteira	26
Figura 2.11 -	Sinal da Margem na Curva $V \times P, Q$	28
Figura 2.12 -	Movimento dos Pontos de Operação na Curva $V \times P, Q$	29
Figura 2.13 -	Curva $V \times P, Q$ para Análise do Índice de Influência	30
Figura 2.14 -	Sistema - Teste de 35 Barras	32
Figura 2.15 -	Caraterística Tensão x Potência para a Barra 29	34
Figura 2.16 -	Margem de Potência Aparente em pu de S_{max}	42
Figura 2.17.a -	Representação Gráfica dos Índices de Influência [de S35_B até S35_1050 em Relação a S35_B]	43
Figura 2.17.a(cont.) -	Representação Gráfica dos Índices de Influência [de S35_B até S35_1050 em Relação a S35_B]	44
Figura 2.17.b -	Representação Gráfica dos Índices de Influência por Barra [de S35_B até S35_1050 em Relação a S35_B]	45

Figura 2.18.a - Representação Gráfica dos Índices de Influência [de S35_A01 até S35_A06 em Relação a S35_1050]	46
Figura 2.18.a(cont.) - Representação Gráfica dos Índices de Influência [de S35_A01 até S35_A06 em Relação a S35_1050]	47
Figura 2.18.b - Representação Gráfica dos Índices de Influência por Barra [de S35_A01 até S35_A06 em Relação a S35_1050]	48
Figura 2.19.a - Representação Gráfica dos Índices de Influência após Ações de Controle [de S35_R01 e S35_R02 em Relação a S35_A06]	49
Figura 2.19.b - Representação Gráfica dos Índices de Influência por Barra após Ações de Controle [de S35_R01 e S35_R02 em Relação a S35_A06]	50
Figura 3.1 - Equivalente de Duas Barras Assumindo Iguais as Tensões Internas dos Geradores	58
Figura 3.2 - Equivalente de Duas Barras Mantendo a Individualidade dos Geradores	59
Figura 3.3 - Equivalente de Duas Barras Mantendo a Individualidade dos Geradores e de Caminhos de Transmissão Paralelos	59
Figura 3.4 - Sistema-Teste IEEE 24 Barras e a Direção dos Fluxos de Potência Ativa e Reativa	60
Figura 3.5 - Subsistema de Transmissão de Potência Ativa para Alimentar a Barra 14	61
Figura 3.6 - Caminhos de Transmissão de Potência Ativa para a Barra 14	62
Figura 3.7 - Redução de um Caminho de Transmissão a um Equivalente de Duas Barras	63
Figura 3.8 - Sistema - Teste de 5 Barras	64
Figura 3.9 - Representação Gráfica dos Índices de Influência por Barra	69
Figura 4.1 - Representação Gráfica dos Índices de Influência para as Estratégias de Reforço Consideradas	80
Figura 4.2 - Sistema-Teste IEEE 24 Barras	127
Figura 4.3 - Margem de Potência Aparente em pu de S_m na Barra 8	136
Figura 4.4 - Representação Gráfica do Índice de Influência na Barra 8	136
Figura 4.5 - Margem de Potência Aparente em pu de S_m nas Barras 4, 5, 6 e 8	141

Figura 4.6 -	Representação Gráfica do Índice de Influência nas Barras 4, 5, 6 e 8	142
Figura 5.1 -	Sistema Interligado S/SE	146
Figura 5.2 -	Curvas Q x V na Barra de 500 kV Grajaú	153
Figura 5.3 -	Rede de Transmissão ao Redor da Barra 44 GRAJAU---2CS	155
Figura 5.4 -	Rede de Transmissão ao Redor da Barra 48 IBIUNA---3CS	159
Figura 5.5 -	Diagrama Parcial e Simplificado do Sistema Interligado S/SE	165
Figura 5.6 -	Margem de Potência Aparente em pu de S_m nas Barras 44, 48 e 1107	172
Figura 5.7 -	Representação Gráfica do Índice de Influência nas Barras 44, 48 e 1107	172
Figura 5.8 -	Margem de Potência Aparente em pu de S_{max} nas Barras 44, 48 e 1107	180
Figura 5.9 -	Representação Gráfica do Índice de Influência nas Barras 44, 48 e 1107	180
Figura 5.10 -	Margem de Potência Aparente em pu de S_{max} nas Barras 44, 48 e 1107	186
Figura 5.11 -	Representação Gráfica do Índice de Influência nas Barras 44, 48 e 1107	186
Figura I.1 -	Superfície Singular S no Plano P-Q e a Convergência do Processo Iterativo	208
Figura I.2 -	Circuito fechado composto por m_1 Nós e m_1 Ramos	209
Figura II.1 -	Curva P x V	216
Figura II.2 -	Curva V x Q para Ponto de Operação Inicial	217
Figura II.3 -	Curva V x Q para Ponto de Máximo Carregamento	218
Figura II.4 -	Margem de Potência Ativa em Curvas P x V	222
Figura II.5 -	Margem de Potência em Curvas P x V para Todos os Níveis de Segurança	222
Figura II.6 -	Margem de Potência Reativa em Curvas V x Q	223
Figura II.7 -	Margem Requerida de Potência Reativa	224

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 -	Ordem Cronológica de Alguns Incidentes Associados a Colapso de Tensão	1
Tabela 2.1 -	Variação de Carga e Ajuste de Controles no Sistema Teste de 35 Barras	33
Tabela 2.2 -	Índices $\det[D'] \cdot V$ para Todas as Barras e Pontos de Operação do Sistema	35
Tabela 2.3 -	Ângulo β Para Todas as Barras e Pontos de Operação	36
Tabela 2.4 -	Margem de Injeção de Potência Aparente no Sistema-Teste de 35 Barras	41
Tabela 3.1 -	Dados de Barra e Linha do Sistema - Teste de 5 Barras	64
Tabela 3.2 -	Geração e Carga / Caso-Base	65
Tabela 3.3 -	Fluxos de Potência nas Linhas / Caso-Base	65
Tabela 3.4 -	Índices de Avaliação da Estabilidade / Caso-Base	66
Tabela 3.5 -	Caminhos Associados à Barra de Carga / Caso-Base	66
Tabela 3.6 -	Geração e Carga /Caso "Mínima Transferência de Potência" (MTP)	67
Tabela 3.7 -	Fluxo em Linhas / Caso "Mínima Transferência de Potência"	68
Tabela 3.8 -	Índices de Avaliação da Estabilidade / Caso "Mínima Transferência de Potência"	68
Tabela 3.9 -	Caminhos Associados à Barra de Carga	69
Tabela 4.1 -	Relatório de Estabilidade de Tensão do Caso-Base S35_A06 Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET	72
Tabela 4.2 -	Determinação dos Caminhos Críticos de Transmissão para o Caso-Base S35_A06	73
Tabela 4.3 -	Gerações Ativa e Reativa	75
Tabela 4.4 -	Avaliação da Margem de Potência da Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 21-22	76
Tabela 4.5 -	Avaliação da Margem de Potência da Barra 29 após Minimização do Fluxo dos Ramos 18-17, 18-19, 20-19 (1), 20-19 (2), 21-17 e 21-22	77
Tabela 4.6 -	Avaliação da Margem de Potência da Barra 29 após Minimização do Fluxo no Ramo 30-28	78
Tabela 4.7 -	Margens e Índices de Influência para as Estratégias Consideradas	80

Tabela 4.8 - Índices de Avaliação da Estabilidade da Barra 29 / Caso-Base	81
Tabela 4.9 - Geração e Carga no Máximo Carregamento da Barra 29 realizado diretamente pelo programa FLUPOT	82
Tabela 4.10 - Índices de Avaliação na Barra 29 / Carga da Tabela 4.9	82
Tabela 4.11 - Geração e Carga Após a Minimização do Fluxo no Ramo 22-21	83
Tabela 4.12 - Índices de Avaliação na Barra 29	83
Tabela 4.13 - Geração e Carga no Máximo Carregamento da Barra 29 após Sucessivos Aumentos de Carga (o fluxo de carga diverge para cargas maiores)	84
Tabela 4.14 - Índices de Avaliação da Barra 29 / Carga da Tabela 4.13	84
Tabela 4.15 - Geração e Carga no Máximo Carregamento da Barra 29 realizado diretamente pelo programa FLUPOT	85
Tabela 4.16 - Índices de Avaliação da Barra 29 / Carga da Tabela 4.15	85
Tabela 4.17 - Carga da Barra 29 até a Não-Convergência do Fluxo de Carga	86
Tabela 4.18 - Índices de Avaliação na Barra 29 / Cargas da Tabela 4.17	86
Tabela 4.19 - Caminhos Críticos de Transmissão no Ponto de Operação S35_B03	87
Tabela 4.20 - Avaliação da Margem de Potência da Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 21-17 através do Redespacho Ativo e Reativo	88
Tabela 4.21 - Carga na Barra 29 até a Não-Convergência do Fluxo de Carga	88
Tabela 4.22 - Índices de Avaliação na Barra 29 / Cargas da Tabela 4.21	89
Tabela 4.23 - Geração e Carga no Máximo Carregamento da Barra 29 após Sucessivos Aumentos de Carga	89
Tabela 4.24 - Índices de Avaliação da Barra 29 / Carga da Tabela 4.23	90
Tabela 4.25 - Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão para o Caso-Base S35_A06	92
Tabela 4.26 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema	95
Tabela 4.27 - Avaliação da Máxima Carga na Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 28-29	95
Tabela 4.28 - Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão para o Caso S35_A06 $\pm 50\%$	97
Tabela 4.29 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema	98

Tabela 4.30 - Avaliação da Máxima Carga na Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 31-17	99
Tabela 4.31 - Determinação do Caminho Crítico e sub-caminhos de Transmissão para o Caso S35_A06 $\pm 30\%$ de Redespacho de Potência Ativa	100
Tabela 4.32 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema	101
Tabela 4.33 - Avaliação da Máxima Carga na Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 17-18	102
Tabela 4.34 - Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão para o Caso S35_A06 $\pm 30\% \pm 10\%$	102
Tabela 4.35 - Valores das Margens após as Ações de Reforço	105
Tabela 4.36 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema	106
Tabela 4.37 - Avaliação da Máxima Carga na Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 28-29	107
Tabela 4.38 - Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão após a Etapa 1 de Reforço	107
Tabela 4.39 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema	109
Tabela 4.40 - Avaliação da Máxima Carga na Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 28-29	109
Tabela 4.41 - Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão após a Etapa 2 de Reforço	110
Tabela 4.42 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema	112
Tabela 4.43 - Avaliação da Máxima Carga na Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 28-29	112
Tabela 4.44 - Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão após a Etapa 3 de Reforço	113
Tabela 4.45 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema	114
Tabela 4.46 - Avaliação da Máxima Carga na Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 28-29	115
Tabela 4.47 - Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão após a Etapa 4 de Reforço	115

Tabela 4.48 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema	117
Tabela 4.49 - Avaliação da Máxima Carga na Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 28-29	117
Tabela 4.50 - Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão após a Etapa 5 de Reforço	118
Tabela 4.51 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema	120
Tabela 4.52 - Avaliação da Máxima Carga na Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 28-29	120
Tabela 4.53 - Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão após a Etapa 6 de Reforço	121
Tabela 4.54 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema	122
Tabela 4.55 - Avaliação da Máxima Carga na Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 17-18	123
Tabela 4.56 - Valores das Margens após as Ações de Reforço	125
Tabela 4.57 - Relatório de Estabilidade de Tensão do Caso-Base Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET	128
Tabela 4.58 - Relatório de Estabilidade de Tensão do Ponto de Colapso - Caso 1 Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET	129
Tabela 4.59 - Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão para o Ponto de Colapso do Caso 1	130
Tabela 4.60 - Gerações Ativa, Reativa e Perdas Ativas no Sistema	131
Tabela 4.61 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Minimização do Fluxo do Ramo 9-8	132
Tabela 4.62 - Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão para o Ponto de Operação após a Etapa 1 de Reforço	133
Tabela 4.63 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Minimização do Fluxo do Ramo 10-8	134
Tabela 4.64 - Avaliação das Condições de Estabilidade na Barra 8	135
Tabela 4.65 - Fluxos de Potência Ativa nos Ramos onde Houve Minimização	135
Tabela 4.66 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema	137

Tabela 4.67 - Relatório de Estabilidade de Tensão no Ponto de Colapso - Caso 2	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET	138
Tabela 4.68 - Avaliação das Condições de Estabilidade na Barra 4 após 6 Etapas	139
Tabela 4.69 - Avaliação das Condições de Estabilidade na Barra 5 após 6 Etapas	139
Tabela 4.70 - Avaliação das Condições de Estabilidade na Barra 6 após 6 Etapas	140
Tabela 4.71 - Avaliação das Condições de Estabilidade na Barra 8 após 6 Etapas	140
Tabela 4.72 - Fluxos de Potência Ativa nos Ramos onde Houve Minimização	141
Tabela 4.73 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema	143
Tabela 5.1 - Relatório de Estabilidade de Tensão do Caso-Base	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CTAP CREM; ESTABTEN: EXET	147
Tabela 5.2 - Relatório de Estabilidade de Tensão da Barra 1107	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CTAP CREM; ESTABTEN: EXET	148
Tabela 5.3 - Relatório de Estabilidade de Tensão da Barra 1107	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CTAP CREM; ESTABTEN: EXET	149
Tabela 5.4 - Gerações Ativa e Reativa nas Áreas 1, 9 e 17	150
Tabela 5.5 - Gerações Ativa, Reativa na Barra 1107 e Perdas no Sistema	150
Tabela 5.6 - Relatório de Estabilidade de Tensão do Caso-Base	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CTAP CREM; ESTABTEN: EXET	154
Tabela 5.7 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Reativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET	156
Tabela 5.8 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET	157
Tabela 5.9 - Gerações nas Áreas 1, 9 e barra swing 501	158
Tabela 5.10 - Perdas nas Áreas 1, 5 e 9	158
Tabela 5.11 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Reativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET	160
Tabela 5.12 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET	160
Tabela 5.13 - Gerações nas Áreas 1, 9 e Barra Swing 501	161
Tabela 5.14 - Perdas nas Áreas 1, 5 e 9	162

Tabela 5.15 - Relatório de Estabilidade de Tensão do Caso-Base	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CTAP CREM; ESTABTEN: EXET	166
Tabela 5.16 - Relatório de Estabilidade de Tensão após o Redespacho Reativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET	167
Tabela 5.17 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET	168
Tabela 5.18 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Reativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET	169
Tabela 5.19 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET	169
Tabela 5.20 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET	170
Tabela 5.21 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET	170
Tabela 5.22 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET	170
Tabela 5.23 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Reativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET	171
Tabela 5.24 - Gerações nas Áreas 1, 9 e Barra Swing 501	173
Tabela 5.25 - Perdas nas Áreas 1, 5 e 9	174
Tabela 5.26 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET	176
Tabela 5.27 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET	176
Tabela 5.28 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET	177
Tabela 5.29 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET	178
Tabela 5.30 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET	178

Tabela 5.31 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLM CREM; ESTABTEN: EXET	179
Tabela 5.32 - Gerações Ativa nas Áreas 1, 9 e Barra Swing 501	181
Tabela 5.33 - Perdas nas Áreas 1, 5 e 9	182
Tabela 5.34 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Reativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLM CREM; ESTABTEN: EXET	183
Tabela 5.35 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLM CREM; ESTABTEN: EXET	184
Tabela 5.36 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLM CREM; ESTABTEN: EXET	184
Tabela 5.37 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLM CREM; ESTABTEN: EXET	184
Tabela 5.38 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLM CREM; ESTABTEN: EXET	185
Tabela 5.39 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo	
Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLM CREM; ESTABTEN: EXET	185
Tabela 5.40 - Gerações Ativa nas Áreas 1, 9 e Barra Swing 501	187
Tabela 5.41 - Perdas nas Áreas 1, 5 e 9	188
Tabela 5.42 - Valores das Margens após as Ações de Reforço	190
Tabela II.1 - Níveis de Margem Mínima no WSCC	219
Tabela II.2 - Níveis de Margem Mínima no Sistema Brasileiro	225

Lista de Abreviaturas e Símbolos

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
CCPE	Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos
CIGRÉ	Conférence Internationale des Grand Réseaux Electriques
WSCC	Western Systems Coordination Council
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
SAGE	Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia
ESTABTEN	Programa para Análise de Estabilidade de Tensão
CaTrans	Programa para Determinação de Caminhos de Transmissão
FLUPOT	Programa de Fluxo de Potência Ótimo
NH2	Programa de Análise Probabilística e Avaliação de Confiabilidade de Sistemas de Grande Porte
ANAREDE	Programa de Análise de Redes
FPO	Fluxo de Potência Ótimo
S/SE	Sul / Sudeste
fem	Força Eletromotriz
SVC	Static Var Compensator
V_i	Módulo da Tensão na Barra i
θ_i	Ângulo da Tensão na Barra i
Z_t	Módulo da Impedância Série da Linha
α_t	Ângulo da Impedância Série da Linha
P	Potência Ativa
Q	Potência Reativa
P_g	Potência Ativa Gerada
Q_g	Potência Reativa Gerada
P_{li}	Carga Ativa na Barra i
Q_{li}	Carga Reativa na Barra i

P_{ij}	Fluxo de Potência Ativa no Circuito (ij)
Q_{ij}	Fluxo de Potência Reativa no Circuito (ij)
f_p	Fator de Potência
Φ	Ângulo do Fator de Potência da Carga
tap	Tap de Transformador
Z_c	Módulo da Impedância do Capacitor
∇P	Gradiente do Fluxo de Potência Ativa
∇Q	Gradiente do Fluxo de Potência Reativa
λ	Multiplicador de Lagrange
$\partial P / \partial \theta$	Derivada Parcial do Fluxo de Potência Ativa da Barra em Relação ao Ângulo da Tensão
$\partial Q / \partial \theta$	Derivada Parcial do Fluxo de Potência Reativa da Barra em Relação ao Ângulo da Tensão
$\partial P / \partial V$	Derivada Parcial do Fluxo de Potência Ativa da Barra em Relação ao Módulo da Tensão
$\partial Q / \partial V$	Derivada Parcial do Fluxo de Potência Reativa da Barra em Relação ao Módulo da Tensão
$\det[J]$	Determinante da Matriz Jacobiano
β	Ângulo entre o Gradiente do Fluxo de Potência Ativa ∇P e o Gradiente do Fluxo de Potência Reativa ∇Q
V_1^c	módulo da tensão na carga, na fronteira
θ_1^c	Ângulo da tensão na carga, na fronteira
Z_s	Módulo da Impedância Shunt da Linha
α_s	Ângulo da Impedância do Ramo Paralelo
ΔP	Variação Incremental de Potência Ativa
ΔQ	Variação Incremental de Potência Reativa
ΔV	Variação Incremental de Tensão
$\Delta \theta$	Variação Incremental do Ângulo da Tensão
[A]	Sub-matriz da matriz Jacobiano

[B]	Sub-matriz da matriz Jacobiano
[C]	Sub-matriz da matriz Jacobiano
[D]	Sub-matriz da matriz Jacobiano
[D']	Matriz D' Obtida de uma Redução da Matriz Jacobiano Quando ΔP é Nulo
det [D']	Determinante da Matriz D' Obtida de uma Redução da Matriz Jacobiano
S	Potência Aparente
S_i	Potência Aparente Injetada na Barra i
S_{max}	Máxima Potência Aparente que pode ser Injetada na Barra i
M_i	Margem de Potência Aparente na Barra i
Π_i	Índice de Influência da Barra i Devido à Variação da Margem
pu	Valor por Unidade
I	Injeção de Corrente
Y	Matriz de Admitâncias de Barras
EXLF	Calcula a Solução do Fluxo de Potência (ANAREDE)
NEWT	Solução do Fluxo de potência pelo Método Newton Raphson (ANAREDE)
QLIM	Controle do Limite de Geração de Potência Reativa (ANAREDE)
CTAP	Controle de Tensão por Variação Automática de Tap (ANAREDE)
CREM	Controle Remoto de Tensão por Excitação de Geração (ANAREDE)
EXET	Calcula a Solução de Condições de Estabilidade de Tensão (ESTABTEN)
MXTR	Função Objetivo "Máxima Transferência de Potência Ativa" (FLUPOT)
CMXC	Função Objetivo "Máximo Carregamento" (FLUPOT)
CC	Corrente Contínua
AC	Corrente Alternada
LTC	Load Tap Changing
t	Posição do Tap do LTC
AT	Alta Tensão
UVLS	Undervoltage Load Shedding
LT	Linha de Transmissão
CCAT	Corrente Contínua em Alta Tensão
ULTC	Under-load Tap Changing

OLTC	On-load Tap Changing
R	Resistência
X _c	Reatância Capacitiva
X _l	Reatância Indutiva
G	Condutância
B	Susceptância
CAG	Controle de Frequência do Sistema
BSN	Bifurcação do Tipo Sela-nó
FPC	Fluxo de Potência Continuado
PoC	Ponto de Colapso
PMSFP	Par de Múltiplas Soluções de Fluxo de Potência

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Na medida em que as redes de transmissão de energia elétrica ficaram mais malhadas, os limites térmicos de linhas e transformadores passaram a restringir menos a transmissão de potência. Similarmente, o uso de sistemas estáticos de compensação de potência reativa e estabilizadores na excitação dos geradores aumentou a capacidade de transmissão de potência nos sistemas antes limitados por problemas de estabilidade angular [1].

Devido às incertezas econômicas e às restrições ambientais, hoje as linhas de transmissão estão mais carregadas e isto deu origem ao problema da instabilidade de tensão. A capacidade de mantê-los estáveis sob o ponto de vista de tensão tem causado grande preocupação. Alguns incidentes associados a colapso de tensão são listados na Tabela 1.1 [2]

Tabela 1.1- Incidentes Associados ao Colapso de Tensão

Ordem	Data	Local
1	22/08/70	Japão
2	22/09/70	Nova Iorque - EUA
3	22/09/77	Flórida - EUA
4	19/12/78	França
5	02/03/79	Dinamarca
6	04/08/82	Bélgica
7	02/09/82	Flórida - EUA
8	30/12/82	Flórida - EUA
9	21/05/83	Califórnia - EUA
10	27/12/83	Suécia
11	11/06/84	Região NE - EUA
12	17/05/85	Flórida - EUA
13	05/07/85	Checoslováquia
14	20/05/86	Inglaterra

15	30/11/86	Região SE - Brasil
16	21/01/87	França
17	20/07/87	Illinois e Indiana - EUA
18	23/07/87	Japão
19	22/08/87	Tennessee - EUA
20	10/03/93	RJ e ES - Brasil
21	17/04/97	Região SE - Brasil
22	21/01/02	Região SE - Brasil

Os relatos da maioria dos incidentes comprovam, através da seqüência de eventos, que os problemas de estabilidade angular apenas ocorreram quando o processo de colapso de tensão já havia sido iniciado. Isto comprova que a instabilidade angular, ou eletromecânica, passa a ser consequência do processo de colapso de tensão, e não causa dele .

Um aspecto que merece destaque é o comportamento do consumo de potência da carga em função das variações de tensão. Os relatos dos incidentes de maior duração informam que a carga contribuiu para que os sistemas conseguissem sustentar a operação mesmo em níveis de tensão baixos. Isso se deve à predominância de cargas compostas cujas características de consumo de potência com a tensão se aproximam de cargas do tipo impedância constante ou corrente constante. Com isso, reduções de tensão acarretam reduções no consumo de potência, o que permite aliviar os ramos de transmissão e evitar o colapso [3].

Outro aspecto relevante é o fato de se ter registrado colapso de tensão em condições de carga leve, provavelmente devido a perda de unidades geradoras absorvendo potência reativa e ao conseqüente fluxo excessivo nos ramos de transmissão [4].

Segundo R.H. Iveson [5], a evolução cronológica dos fatores mais importantes que contribuíram para o aparecimento do fenômeno da instabilidade da tensão em sistemas elétricos é:

- 1) Uma carga de alta densidade incluindo uma grande parcela de demanda para aquecimento e refrigeração com o respectivo fator de potência pobre.

- 2) Estratégias para correção do fator de potência que resultam em grandes quantidades de capacitores fixos e chaveáveis (até 1 KVAR de capacitores para cada KW de pico de carga) nos circuitos de distribuição (até 34,5 KV).
- 3) Substituição de geradores locais e relativamente pequenos, instalados muitos anos atrás, por unidades geradoras maiores, mais eficientes e remotas. A localização remota é ditada por fontes de energia mais baratas, tais como aproveitamentos hidráulicos, minas de carvão e campos petrolíferos, assim como é ditada por preocupações ambientais e de segurança. O tamanho da unidade geradora é ditado pelos ganhos de economia de escala.
- 4) Como um resultado dos fatores acima, um número limitado de linhas de transmissão, longas e de grande capacidade, foram construídas entre as fontes de geração e as áreas de carga. Houve uma maior utilização das linhas de transmissão, através de compensação de potência reativa [1].
- 5) O quinto fator, produzido por uma combinação de necessidade econômica e da disponibilidade de recursos operacionais, foi um carregamento do sistema maior que o previsto e/ou distúrbios mais severos que os planejados, o que carregou os equipamentos em serviço com grandes fluxos de potência ativa e reativa.

Para os fatores 1 a 4 se tornarem importantes, pode-se levar de 10 a 15 anos. Uma vez presentes, entretanto, o sistema é imediatamente susceptível ao fator 5, acarretando em problemas de estabilidade de tensão.

1.2 - OBJETIVO

A análise da estabilidade de tensão pode ser dividida em duas partes: a avaliação e, se necessário, o reforço. A avaliação pode encontrar dois tipos de resultados distintos: i) em barras de tensão controlada, o efeito de ações de controle podem ter resultado oposto ao esperado, ii) em barras de carga, o fluxo de potência a ela chegando se encontra perto do máximo. Como será visto nos testes numéricos realizados com sistemas e pontos de operação

reais, foram detectados casos de barra de carga operando próximo da ponta da curva $V \times P$, Q e casos de barra PV com e sem geração ativa funcionando na parte inferior da curva devido às relações opostas entre a potência reativa e a tensão.

O objetivo deste trabalho é estabelecer uma metodologia capaz de calcular as ações de controle necessárias para reforçar as condições de estabilidade de tensão, uma vez detectado que isto é necessário. Embora não se procure um ponto ótimo, é usada uma ferramenta de otimização para mover o ponto de operação para uma região onde a estabilidade de tensão esteja mais robusta, aumentando portanto, a capacidade de transmissão, e diminuindo o risco de colapso.

1.3 - ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho é composto por seis capítulos, os quais são descritos em linhas gerais a seguir.

No Capítulo 2 é feita a formulação matemática do fenômeno da estabilidade de tensão, sob o enfoque dado na referência [6]. A princípio utiliza-se um sistema simples de duas barras e depois estende-se a análise a um sistema multi-nó. Os índices de avaliação das condições de estabilidade de tensão são estabelecidos, de acordo com [7,8]. Também identificam-se dois novos índices importantes: Margem de Potência Aparente, diferença entre a potência injetada e a potência que ainda poderia ser injetada na barra em análise, que permite a eleição das barras críticas, e o Índice de Influência que relaciona as margens de potência entre dois pontos de operação, por exemplo, antes e depois de uma ação de controle.

Uma vez detectada a barra da rede com menor margem de potência ou a barra mais afetada negativamente devido a uma determinada ação de controle, no Capítulo 3 são identificados os caminhos de transmissão críticos associados àquela barra crítica usando um programa computacional baseado em análise de circuitos equivalentes aproximados [9, 13]. O reforço das condições de estabilidade de tensão são realizados nos ramos mais carregados dos caminhos de transmissão críticos.

O Capítulo 4 apresenta a aplicação da metodologia de reforço das condições de estabilidade de tensão em barras de carga. Primeiramente faz-se aplicação no sistema de 35 barras utilizado no SAGE do CEPEL para fins de testes e demonstração, e posteriormente no sistema IEEE 24 barras.

O Capítulo 5 apresenta a aplicação da metodologia do reforço das condições de estabilidade de tensão em barras de tensão controlada: barras de geração e barras com compensação reativa. O sistema interligado S/SE é usado nesta aplicação.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões finais deste trabalho, identificando as principais contribuições e sugestões para desenvolvimentos futuros.

No Apêndice I são descritos os métodos existentes na literatura de avaliação e reforço das condições de estabilidade de tensão.

O Apêndice II mostra os critérios e procedimentos relativos à margem de potência na operação de sistemas elétricos, conforme estabelecido pelo ONS e pelo WSCC.

CAPÍTULO 2

CARACTERIZAÇÃO DO FENÔMENO DA ESTABILIDADE DE TENSÃO E ÍNDICES PARA AVALIAÇÃO

2.1 - INTRODUÇÃO

Para a compreensão do fenômeno utiliza-se o circuito série da Figura 2.1, visto que a análise de um caso simples fornece mais chances de se obter explicações simples [6].

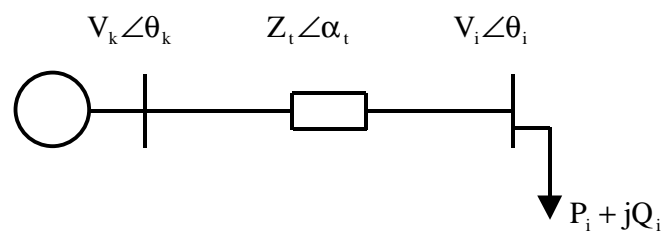


Figura 2.1

Sistema - Teste de Duas Barras

Resolvendo-se as equações estáticas de fluxo de carga, obtém-se a tensão na barra de carga em módulo e ângulo. Essas duas quantidades, junto com aquelas especificadas, caracterizam totalmente o ponto de operação do sistema.

As potências ativa e reativa que fluem da barra i para a barra k, são:

$$P_{ik} = \frac{V_i^2}{Z_t} \cos \alpha_t - \frac{V_i V_k}{Z_t} \cos (\theta_{ik} + \alpha_t) \quad (2.1)$$

$$Q_{ik} = \frac{V_i^2}{Z_t} \sin \alpha_t - \frac{V_i V_k}{Z_t} \sin (\theta_{ik} + \alpha_t) \quad (2.2)$$

Os valores de V_i são obtidos para cada θ_i através da solução de uma equação do 2º grau, e portanto poderão ser encontradas 2 soluções.

No circuito simples em análise, as equações estáticas de fluxo de carga coincidem com as equações de fluxos de potência ativa e reativa chegando na barra de carga, igualadas com a potência consumida na carga. Consequentemente, a variação dos valores de carga está diretamente relacionada com a variação do fluxo de potência na linha de transmissão.

Para a curva para ϕ (ângulo do fator de potência) constante definido abaixo, atribui-se um valor desejado a ϕ e obtém-se todos os valores de V_i correspondentes usando a equação:

$$\phi = \arctan \left[\frac{-\left[\frac{V_i \cdot V_k}{Z_t} \cdot \sin(\theta_i - \theta_k + \alpha_t) \right] + \frac{V_i^2}{Z_t} \cdot \sin(\alpha_t)}{-\left[\frac{V_i \cdot V_k}{Z_t} \cdot \cos(\theta_i - \theta_k + \alpha_t) \right] + \frac{V_i^2}{Z_t} \cdot \cos(\alpha_t)} \right] \quad (2.3)$$

Os fatores de potência escolhidos são indutivos e, observando-se a Figura 2.2, vê-se que:

$$P_1 < P_2 < P_3$$

$$Q_1 < Q_2 < Q_3 \quad (\text{Indutivo})$$

$$\cos \theta_1 < \cos \theta_2 < \cos \theta_3$$

O valor do ângulo do fator de potência ϕ foi escolhido como $\arctan(Q/P)$ e assim, as três curvas P, Q, R na Figura 2.3, são concorrentes nas duas soluções.

Os ângulos assumem valores negativos e a carga ativa tem valor maior ou igual a zero. Quanto maior a carga ativa mais à direita está a curva de P cte e quanto maior a carga reativa mais à esquerda está a curva de Q cte. Um valor grande de carga reativa significa um valor grande de potência reativa indutiva, enquanto que uma carga reativa pequena significa um valor grande de potência reativa capacitiva. As curvas R para ϕ cte se movem para direita para fatores de potência mais capacitivos e para esquerda para fatores de potência mais indutivos.

O método gráfico utilizado nas figuras que se seguem foi projetado para se poder representar em um único gráfico, as quatro variáveis associadas à barra de carga: cargas ativa e reativa, módulo e ângulo da tensão [6].

A Figura 2.2 mostra as curvas correspondentes ao lugar geométrico das tensões na barra de carga, em módulo e ângulo, para cargas com P, Q constantes. Os valores numéricos correspondem a $V_k \angle \theta_k = 1,0 \angle 0^\circ$ e $Z_t \angle \alpha_t = 0,2 \angle 70^\circ$.

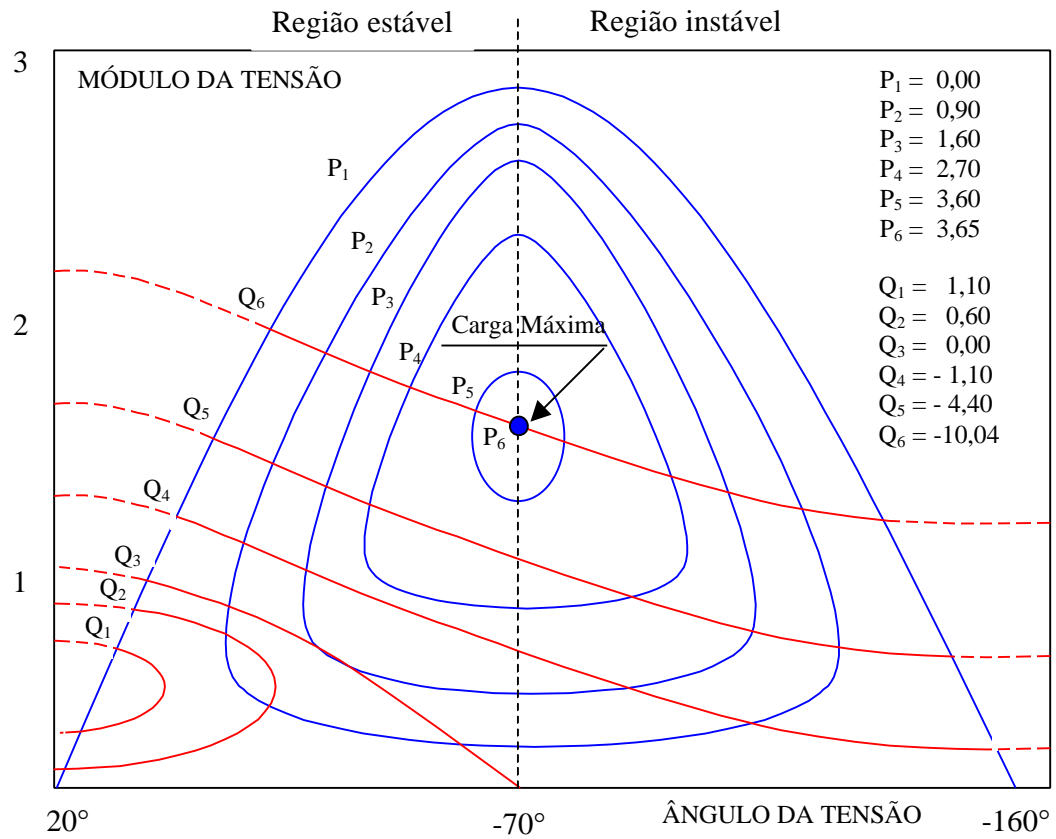


Figura 2.2

Lugar Geométrico da Tensão na Carga para Todos os Níveis de Potência Ativa Constante e
 Para Alguns Níveis de Potência Reativa Constante

Na Figura 2.3 o ângulo do fator de potência das cargas é igual a 41° indutivo. Para P_1 e Q_1 , tem-se duas soluções para a tensão na carga. À medida que se aumentam as cargas, mantendo o fator de potência constante, chega-se ao ponto em que as curvas de P e Q se tocam em um único ponto (solução única). A partir daí, não existe mais solução para a tensão.

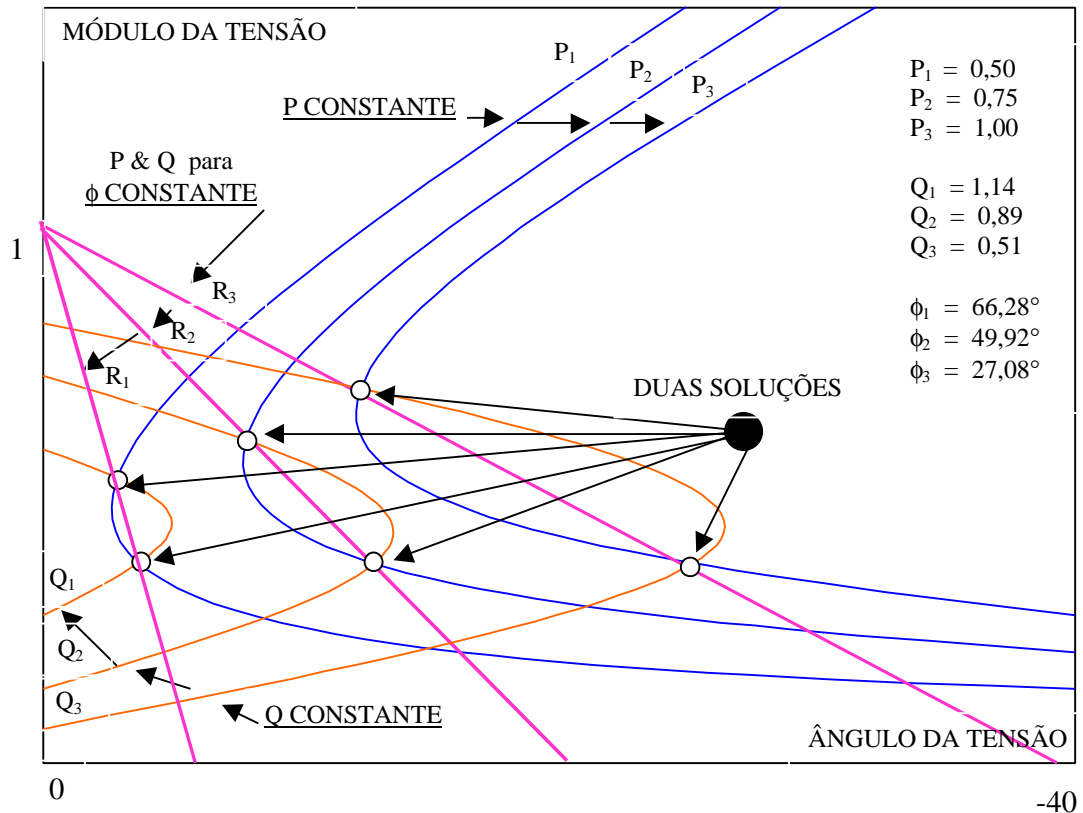


Figura 2.3

Gráfico $V \times \theta$ com o Lugar Geométrico da Tensão na Carga para P Constante, Q constante, P & Q para ϕ constante

O fluxo máximo que pode chegar à barra de carga é $P = 1,0$ pu para ângulo do fator de potência 41° indutivo. Foi visto que o limite de estabilidade para o circuito em questão, correspondia a um valor de $P = 3,65$, maior que o encontrado na Figura 2.3. Isto mostra que existe um limite máximo para cada fator de potência de carga.

Voltando à Figura 2.2, nota-se que as curvas para P cte têm sua derivada, em relação ao ângulo da tensão, com valor nulo sempre no mesmo valor de ângulo (-70°). Se então fosse traçada uma reta paralela ao eixo do módulo da tensão passando no ângulo -70° da tensão, uma fronteira entre os lugares geométricos onde o sistema é estaticamente estável (entre 20° e -70°) e estaticamente instável (-70° e -160°) seria determinada. A derivada de P em relação ao ângulo da tensão é positiva à esquerda da fronteira e negativa à direita.

Dois pontos podem ser ressaltados a partir do que se observa nos gráficos mostrados:

- 1) O limite de estabilidade estática angular é caracterizado por uma reta com ângulo de tensão constante. Neste máximo desfasamento angular de tensão, a carga ativa pode adquirir qualquer valor entre zero e um certo máximo.
- 2) Existe um fluxo máximo de potência ativa e reativa que pode chegar na barra de carga. Esse valor máximo é dependente do fator de potência e não haverá solução para tensão na barra de carga para fluxos maiores que aquele determinado como sendo o máximo.

2.2 - REGIÕES DE OPERAÇÃO & EFEITOS DE AÇÕES DE CONTROLE DE TENSÃO

A operação normal de sistemas elétricos de potência requer que a magnitude da tensão seja mantida em uma faixa de operação da ordem de $\pm 5\%$ em relação ao seu valor nominal. Para restaurar a tensão à faixa normal de operação, requer-se o uso de controles associados com potência reativa, tais como o controle da tensão nos terminais de geradores e compensadores, e o controle da tensão de barras do sistema através de transformadores de taps variáveis e através do chaveamento de capacitores em paralelo.

Considerando o ângulo do fator de potência ϕ da carga constante, obtêm-se:

$$V_i = \frac{V_k \cos(\theta_{ik} + \alpha_t) \tan \phi - \sin(\theta_{ik} + \alpha_t)}{\tan \phi \cos \alpha_t - \sin \alpha_t} \quad (2.4)$$

Fazendo ϕ constante e igual a 27° indutivos e variando-se o ângulo de tensão na barra i , obtêm-se vários valores para V_i resolvendo-se (2.4). Através da aplicação destes valores em (2.1) construiu-se a curva $P_{ik} \times V_i$ mostrada na Figura 2.4.

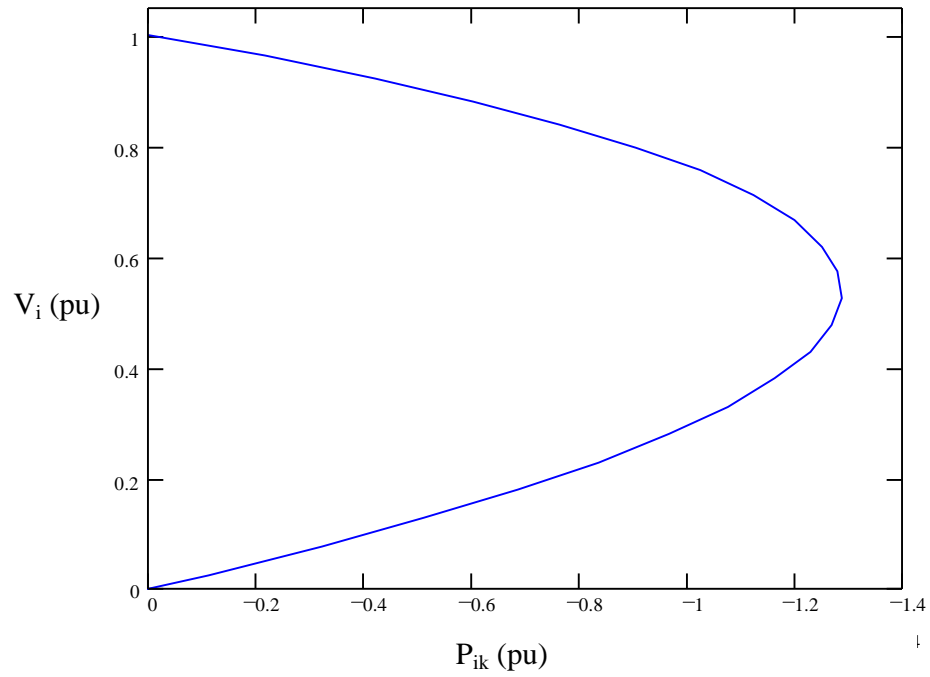


Figura 2.4
Curva P_{ik} x V_i Referente ao Sistema de Duas Barras da Figura 2.1

Verifica-se na Figura 2.4 a existência de duas soluções de tensão para cada valor de P_{ik} , sendo que no ponto de máxima potência transferida, existe apenas uma solução de tensão.

Para se observar o efeito de uma ação de controle sobre o sistema apresentado, será colocado um capacitor na barra de carga, de impedância Z_c igual a 4 pu, conforme mostrado na Figura 2.5.

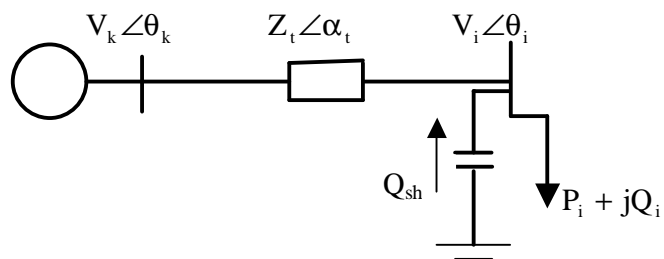


Figura 2.5
Sistema de Duas Barras com Capacitor na Barra de Carga

A potência ativa que flui da barra i para a barra k continua sendo dada por (2.1), enquanto que a potência reativa é expressa por:

$$Q_{ik} = V_i^2 \left(\frac{\sin \alpha_t}{Z_t} - \frac{1}{Z_c} \right) - \frac{V_i V_k}{Z_t} \sin(\theta_{ik} + \alpha_t) \quad (2.5)$$

Considerando o ângulo do fator de potência f da carga constante, obtêm-se:

$$V_i = \frac{V_k \cos(\theta_{ik} + \alpha_t) \tan \phi - \sin(\theta_{ik} + \alpha_t)}{\tan \phi \cos \alpha_t - \sin \alpha_t + \frac{Z_t}{Z_c}} \quad (2.6)$$

A Figura 2.6 mostra as curvas $P_{ik} \times V_i$ obtidas para o sistema de duas barras antes e depois da instalação do capacitor na barra de carga. Verifica-se que a instalação do capacitor possibilitou uma maior transferência de potência da barra i para a barra k .

A ação do capacitor, nos pontos de operação pertencentes à parte superior das curvas $P_{ik} \times V_i$, possibilitou a transferência de potência com valores maiores de tensão do que os observados antes da sua instalação. Na parte inferior das curvas, a ação do capacitor faz com que a potência seja transferida com valores de tensão menores do que os observados antes da sua instalação.

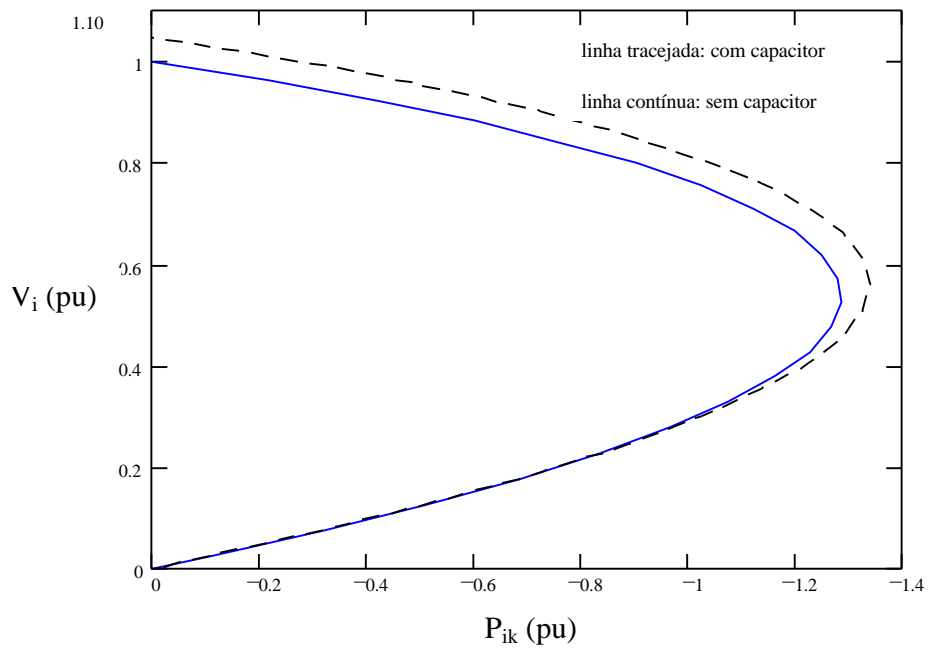


Figura 2.6

Curvas $P_{ik} \times V_i$ Antes e Depois da Instalação do Capacitor na Barra de Carga

Baseado na eficiência das ações de controle em corrigir tensões anormais, são definidas duas regiões de operação:

“Região A” – É a região normal de operação, onde as ações corretivas de tensão produzem o efeito esperado.

“Região B” – É a região anormal de operação, onde as ações corretivas de tensão funcionam de maneira inversa à esperada.

A Fronteira entre as Regiões A e B é a reunião dos pontos de máxima injeção de potência para diferentes fatores de potência [10], ou seja, corresponde à máxima potência ativa e reativa que pode ser transmitida.

2.3 - ANÁLISE NODAL

Nesta seção será mostrada uma ferramenta analítica de “Análise Nodal” [6]. Na Seção 2.3.1 os fundamentos do método serão mostrados através de um sistema de duas barras. Na Seção 2.3.2 a análise será estendida para um sistema multi-nó.

2.3.1 – Sistema de Duas Barras

Considerando-se ainda o sistema mostrado na Figura 2.1, construiu-se o gráfico $V_i \times \theta_i$ mostrado na Figura 2.7. Este gráfico permite representar em uma única figura as quatro variáveis associadas à barra de carga: carga ativa e reativa e o módulo e ângulo da tensão. Faz-se P_{ik} e Q_{ik} constantes. No caso, $P_{ik} = -0,8$ pu e ângulo do fator de potência $\phi = 27^\circ$ indutivos. A linha tracejada representa P_{ik} e a linha contínua Q_{ik} . As interseções entre as duas curvas correspondem às duas soluções possíveis de tensão para a carga proposta.

Aumentando-se a carga ativa constante, mais à direita será traçada a curva correspondente à P_{ik} , enquanto que aumentando-se a carga reativa, mais à esquerda será traçada a curva correspondente à Q_{ik} . Isto significa que quando a carga ativa/reativa cresce, por exemplo, mantendo o ângulo do fator de potência constante, as duas soluções possíveis de tensão vão se aproximando uma da outra até que elas coincidam: somente uma solução existe para aquela carga. Não há solução de tensão para qualquer outro aumento de carga. Desde que o gerador não tem restrição em gerar potência e a carga não tem restrição em absorver potência, a carga correspondente à solução única de tensão é igual ao máximo fluxo de potência ativa/reativa que a rede pode transmitir.

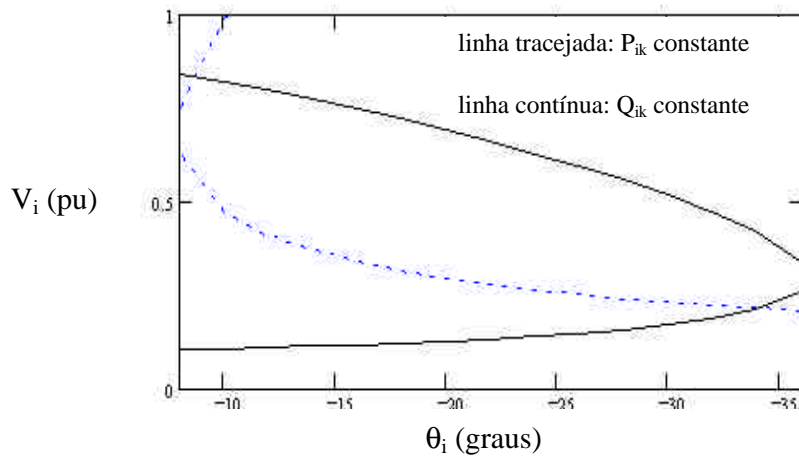


Figura 2.7

Curvas $V_i \times \theta_i$ para P_{ik} e Q_{ik} Constantes

Para o sistema proposto, a máxima potência transferida da barra i para a barra k , ou seja, $P_{ik \text{ min}}$, é igual a $-1,2866$ pu, com V_i igual a $0,5374$ pu e θ_i igual a $-21,5^\circ$. Este ponto de operação é ilustrado nas curvas $V_i \times \theta_i$ da Figura 2.8.

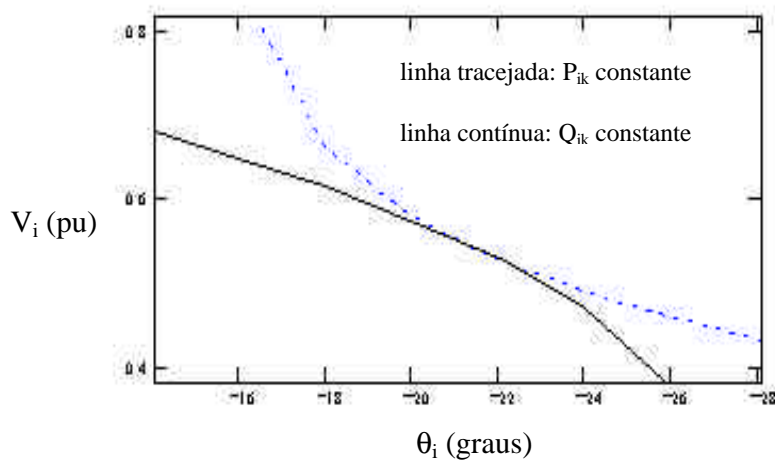


Figura 2.8

Curvas $V_i \times \theta_i$ para P_{ik} e Q_{ik} Constantes, Considerando a Máxima Potência Transferida da Barra i para a Barra k

2.3.1.1 - A Região da Fronteira

Para cada fator de potência da carga existe um lugar geométrico das tensões na barra de carga. Essas soluções pertencem à “Região A”, à “Região B”, ou à fronteira. Na Figura 2.9 esse lugar geométrico é a curva R traçada para demanda de potência ativa (ou reativa) variável com fator de potência constante. A solução de tensão na carga que pertence à fronteira é um único ponto que corresponde à máxima demanda de potência ativa (e reativa) para aquele certo fator de potência constante. Portanto, a fronteira é formada por um conjunto de pontos, cada um correspondendo à demanda máxima para cada fator de potência na carga. Na Figura 2.9 esse lugar geométrico é a curva F.

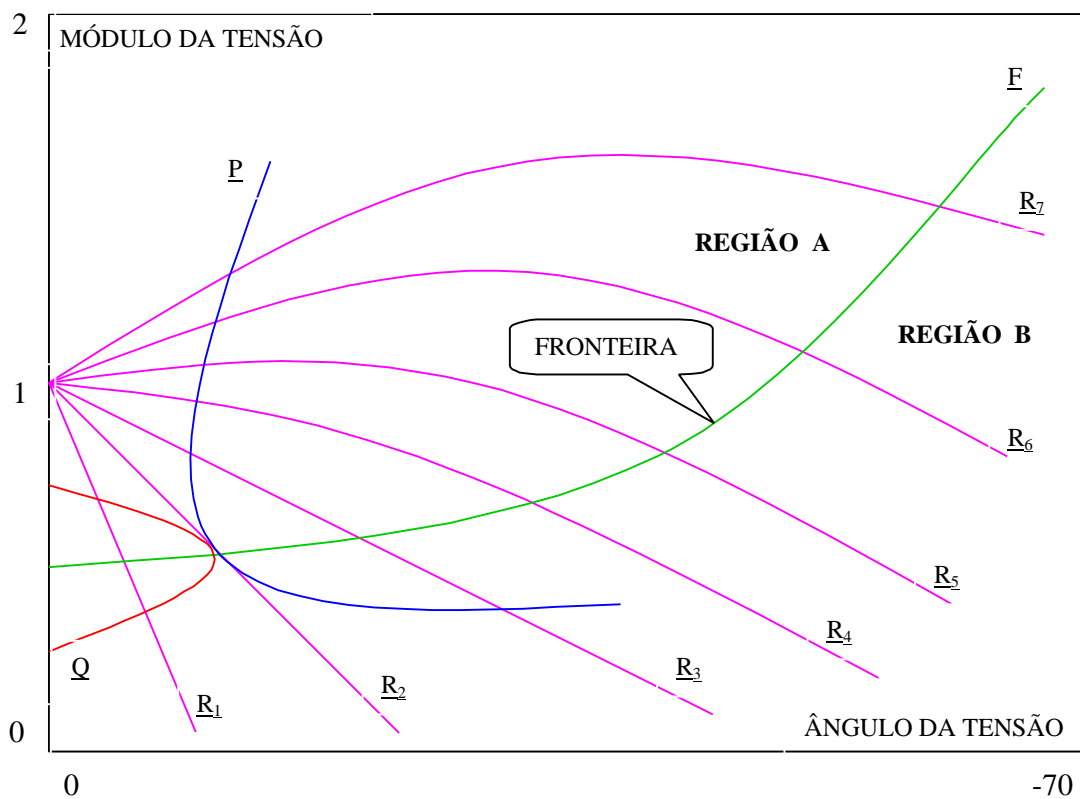


Figura 2.9

Fronteira F entre “Região A” e “Região B” Cruzando os Pontos de Carga Máxima nas Curvas R_i de Carga Variável e Fator de Potência Constante.

Para um certo fator de potência da carga, a interseção das curvas R e F corresponde então, ao máximo fluxo de potência ativa e reativa que pode chegar à barra de carga. Consequentemente o gráfico correspondente às curvas de potência ativa constante e potência reativa constante se tocam em um único ponto quando o fluxo é máximo. Isto pode ser observado na Figura 2.9.

Se os fluxos de potência ativa P e reativa Q são máximos para aquele fator de potência (curvas de P constante e Q constante tocam-se em um ponto somente), isto pode ser traduzido matematicamente: os vetores gradiente ∇P e ∇Q estão alinhados sob mesma direção. Então, a seguinte relação pode ser escrita:

$$\nabla P - \lambda \nabla Q = 0 \quad \text{onde } \lambda \text{ um escalar.} \quad (2.7)$$

Essa relação é reconhecida como uma das condições de otimalidade dos seguintes problemas:

- i) maximize $P(V_i, \theta_i)$ sujeito a $Q(V_i, \theta_i) = \text{cte}$;
- ii) maximize $Q(V_i, \theta_i)$ ou seja, maximize Q indutivo, sujeito a $P(V_i, \theta_i) = \text{cte}$;
- iii) minimize $Q(V_i, \theta_i)$,ou seja, maximize Q capacitivo, sujeito a $P(V_i, \theta_i) = \text{cte}$;
- iv) maximize $P(V_i, \theta_i)$ e $Q(V_i, \theta_i)$ sujeito a $\phi = \arctg (Q/P) = \text{cte}$.

onde:

P é o fluxo de potência ativa chegando na barra de carga

Q é o fluxo de potência reativa chegando na barra de carga

ϕ é o ângulo do fator de potência dos fluxos chegando na barra de carga

V_i é o módulo da tensão na barra de carga

θ_i é o ângulo da tensão na barra de carga

A condição de otimalidade $\nabla P - \lambda \nabla Q = 0$, pode ser rescrita:

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} - \lambda \frac{\partial Q}{\partial \theta} = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial P}{\partial V} - \lambda \frac{\partial Q}{\partial V} = 0 \quad (2.9)$$

Rearranjando (2.8) e (2.9) obtém-se:

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} \frac{\partial Q}{\partial V} - \frac{\partial P}{\partial V} \frac{\partial Q}{\partial \theta} = 0 \quad (2.10)$$

que é equivalente ao determinante da matriz Jacobiano das duas equações de fluxo de carga correspondentes à barra de carga ser igualado a zero.

A resolução das condições de otimalidade fornece os valores de módulo e ângulo de tensão para a região da fronteira (lugar geométrico onde as curvas P_{cte} e Q_{cte} se encontram em um único ponto) [6]. Esses valores são dados por:

$$V_i^c = V_k \cdot \frac{1}{2 \cdot \cos(\theta_i^c - \theta_k) + 2 \cdot \left(\frac{Z_t}{Z_s} \right) \cdot \cos(\theta_i^c - \theta_k + a_t - a_s)} \quad (2.11)$$

$$\theta_i^c = \frac{1}{2} \arctg \left[\frac{\sin(-f + a_t) + \left(\frac{Z_t}{Z_s} \right) \cdot \sin(-f + 2 \cdot a_t - a_s)}{-\cos(-f + a_t) - \left(\frac{Z_t}{Z_s} \right) \cdot \cos(-f + 2 \cdot a_t - a_s)} \right] + \theta_k \quad (2.12)$$

Se o valor encontrado em (2.12) não estiver na faixa de interesse do problema, uma outra solução para o ângulo θ crítico da carga é dada por:

$$\theta_1' = \theta_1 - \pi/2 \quad (2.13)$$

onde:

- V_i^c módulo da tensão na carga, na fronteira
- V_k módulo da tensão terminal do gerador
- θ_i ângulo da tensão na carga
- θ_k ângulo da tensão terminal do gerador
- Z_t módulo da impedância do ramo série de transmissão
- α_t ângulo da impedância do ramo série
- Z_s módulo da impedância do ramo paralelo de transmissão conectado à barra de carga
- α_s ângulo da impedância do ramo paralelo

Se este valor de tensão encontrado (módulo e ângulo) for substituído nas equações que descrevem as potências ativa e reativa na barra de carga, ter-se-á o valor destas potências da barra de carga, na fronteira.

2.3.2 – Sistemas Multi-Nó

O sistema linearizado das equações estáticas de fluxo de carga é:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Colocando-se as equações e variáveis relacionadas com a barra em análise para baixo, (2.14) fica:

$$\begin{bmatrix} \Delta P' \\ \Delta Q' \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta' \\ \Delta V' \\ \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

onde, as sub-matrizes A, B, C e D são partições da matriz Jacobiano $[J]$.

Assume-se uma variação de carga (ou geração) incremental ΔP_i e ΔQ_i somente para a barra i de um sistema multi-nó, isto é, $\Delta P' = \Delta Q' = 0$, e então o sistema (2.15) pode ser reduzido para dimensão (2x2):

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = [D'] \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\text{onde } [D'] = [D] - [C] * [A^{-1}] * [B] \quad (2.17)$$

Portanto, as relações de sensibilidade entre as injeções de potência ativa e reativa e a magnitude e o ângulo da tensão na barra i, levando em consideração o restante do sistema, podem ser avaliados por (2.16). Assim sendo, na Região A o $\det[D']$ é positivo, na Região B o $\det[D']$ é negativo e na Fronteira o $\det[D']$ é nulo.

2.4 - ÍNDICES PARA AVALIAÇÃO NODAL DO CARREGAMENTO DA REDE DE TRANSMISSÃO

O carregamento da rede de transmissão é representado por condições nodais associadas ao máximo fluxo de potência ativa e reativa que pode ser transmitida dos geradores para as cargas. Índices abrangentes e significativos de avaliação são deduzidos. O objetivo é identificar se a solução de tensão para uma carga conectada à barra i está na parte superior, na inferior e a distância à “ponta do nariz” da curva $V \times P, Q$. Da análise anterior, a parte superior é a região normal de operação onde as ações de controle de tensão tem o efeito esperado, a parte inferior é a região anormal de operação onde as ações de controle de tensão podem ter efeito contrário ao esperado se a carga se comporta como um modelo de potência constante. A “ponta do nariz” (tensão mínima para operação normal [11]) corresponde à máxima quantidade de potência ativa e reativa que pode ser transmitida para a carga (ou a partir de um gerador).

2.4.1 - O Programa ESTABTEN

O programa ESTABTEN, implementado acoplado ao programa ANAREDE do CEPEL, calcula índices nodais de estabilidade de tensão. Alguns destes índices são usados nesta tese e são descritos a seguir.

2.4.1.1 - Magnitude do Determinante da Matriz [D']

Em um sistema de duas barras o fluxo de potência que chega na barra i é igual à carga consumida. Com o intuito de conhecer o significado da magnitude do valor do determinante da matriz [D'], desenvolve-se a expressão que o calcula [7, 8].

$$\det[D'] = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} * \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} - \frac{\partial P_i}{\partial V_i} * \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \quad (2.18)$$

onde:

$$P_i = V_i^2 G_{ii} + V_i V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (2.19)$$

$$Q_i = -V_i^2 B_{ii} + V_i V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (2.20)$$

sendo k a barra de geração

Resolvendo (2.18) com (2.19) e (2.20), obtém-se:

$$\det[D'] = -V_i V_k^2 (G_{ik}^2 + B_{ik}^2) + 2V_i^2 B_{ii} (V_k G_{ik} \sin \theta_{ik} - V_k B_{ik} \cos \theta_{ik}) - 2V_i^2 G_{ii} (V_k G_{ik} \cos \theta_{ik} + V_k B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (2.21)$$

Fazendo $Y_{ik}^2 = (G_{ik}^2 + B_{ik}^2)$ e multiplicando ambos os lados por V_i :

$$\det[D'] * V_i = -[V_i V_k Y_{ik}]^2 + 2V_i^2 B_{ii} [V_i V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik})] - 2V_i^2 G_{ii} [V_i V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik})] \quad (2.22)$$

Por outro lado, a potência aparente injetada na barra i é dada por $S_i = P_i + j Q_i$. De (2.19) e (2.20), escreve-se:

$$S_i^2 = P_i^2 + Q_i^2 = V_i^4 (G_{ii}^2 + B_{ii}^2) + V_i^2 \cdot V_k^2 \cdot Y_{ik}^2 + 2V_i^2 G_{ii} V_i V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) - 2V_i^2 B_{ii} V_i V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (2.23)$$

Fazendo $S_{i0} = V_i^2 \cdot Y_{ii}$ e comparando (2.22) com (2.23), obtém-se finalmente :

$$\det[D'] * V_i = S_{i0}^2 - S_i^2 \quad (2.24)$$

Este resultado é muito importante para o estudo do carregamento da rede. O termo S_{i0}^2 é função do elemento diagonal da matriz admitância de barra e do módulo da tensão na barra i . Aumentando gradativamente o valor da potência aparente S_i , o máximo será alcançado quando S_i^2 for igual a S_{i0}^2 fazendo com que o produto $\det[D'] * V_i$ seja igual a zero.

Dessa forma pode-se dizer que, para um sistema de duas barras:

- S_i é a potência injetada na barra i (no ponto de operação em análise).

- S_{i0} é a potência aparente máxima que pode fluir para a barra i, para um certo módulo de tensão (dado por $S_{i0} = V_i^2 \cdot Y_{ii}$).
- $\det [D'] * V_i$ é igual a $S_{i0}^2 - S_i^2$.

O importante resultado obtido em (2.24) para um sistema de duas barras agora é estendido ao sistema multi-nó.

Seja [D] a matriz que relaciona linearmente as injeções de potência ativa e reativa com o ângulo e módulo da tensão na barra i ,

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & z \\ y & u \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$\text{Seja } [-C.A^{-1} \cdot B] = \begin{bmatrix} b_1 & b_3 \\ b_2 & b_4 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Como $[D'] = [D] - [C.A^{-1} \cdot B]$, usando (2.25) e (2.26) pode-se escrever:

$$\det[D'] = \det \left[\begin{pmatrix} x & z \\ y & u \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 & b_3 \\ b_2 & b_4 \end{pmatrix} \right] \quad (2.27)$$

$$\text{então: } \det [D'] = [x.u - y.z] + [x.b_4 - y.b_3] + [b_1.u - b_2.z] + [b_1.b_4 - b_2.b_3] \quad (2.28)$$

$$\text{Como: } \det [D] = [x.u - y.z] \quad (2.29)$$

$$\text{então: } \det [D'] = \det [D] + [x.b_4 - y.b_3] + [b_1.u - b_2.z] + [b_1.b_4 - b_2.b_3] \quad (2.30)$$

O resultado obtido em (2.24) para um sistema de duas barras $\det[D'] * V_i = S_{i0}^2 - S_i^2$, pode ser estendido. Pode-se escrever (2.30), multiplicando todos os termos por V_i , na forma:

$$\det[D'] * V_i = \det[D] * V_i - S_{is}^2 \quad (2.31)$$

onde:

$$S_{is}^2 = -V_i \{ [x.b_4 - y.b_3] + [b_1.u - b_2.z] + [b_1.b_4 - b_2.b_3] \} \quad (2.32)$$

As equações (2.24) e (2.31) podem ser re-escritas como:

$$\det[D'] * V_i = S_{i0}^2 - S_i^2 - S_{is}^2 \quad (2.33)$$

A expressão (2.33) é a generalização de (2.24) para um sistema multi-nó. O novo termo S_{is}^2 de 2.31, é :

$$S_{is}^2 = (\det[D] - \det[D']) * V_i \quad (2.34)$$

Dessa forma pode-se dizer que, para um sistema multi-nó:

- S_i é a potência injetada na barra i (no ponto de operação em análise).

- S_{i0} é a potência aparente máxima que pode fluir para a barra i, para um certo módulo de tensão (dado por $S_{i0} = V_i^2 \cdot Y_{ii}$).
- S_{is} está relacionada à potência injetada no restante do sistema que limita a injeção de potência na barra i (dado por $S_{is}^2 = (\det[D] - \det[D']) * V_i$).
- $S_{\max} = \sqrt{S_{i0}^2 - S_{is}^2}$ é a máxima potência aparente que poderia ser injetada na barra i.
- $\det [D'] * V_i$ é igual a $S_{\max}^2 - S_i^2$, como queria-se demonstrar.

2.4.1.2 - Sinal do Determinante da Matriz [D']

Usando-se um sistema de referência cartesiano, pode-se exprimir os vetores gradientes de potência ativa e reativa na barra i [7, 8]:

$$\nabla P = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \cdot i + \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \cdot j + 0 \cdot k \quad (2.35)$$

$$\nabla Q = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \cdot i + \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \cdot j + 0 \cdot k$$

Assim, o produto vetorial é:

$$\nabla P \times \nabla Q = \left[\left(\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} * \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \right) - \left(\frac{\partial P_i}{\partial V_i} * \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \right) \right] * k \quad (2.36)$$

$$\text{então, } \nabla P \times \nabla Q = \det [D'] \quad (2.37)$$

$$\text{Como } \nabla P \times \nabla Q = |\nabla P| * |\nabla Q| * \sin \beta \quad (2.38)$$

$$\text{Então: } \det[D'] = |\nabla P| * |\nabla Q| * \sin \beta \quad (2.39)$$

onde β é o ângulo entre ∇P e ∇Q .

Como o sinal do $\det[D']$ é função somente do seno de β , tem-se:

$$\det[D'] > 0, \quad \text{se } \sin \beta > 0 \text{ isto é: } 0^\circ < \beta < 180^\circ$$

$$\det[D'] < 0, \quad \text{se } \sin \beta < 0 \text{ isto é: } 0^\circ > \beta > -180^\circ$$

$$\det[D'] = 0, \quad \text{se } \sin \beta = 0 \text{ isto é: } \beta = \pm 180^\circ$$

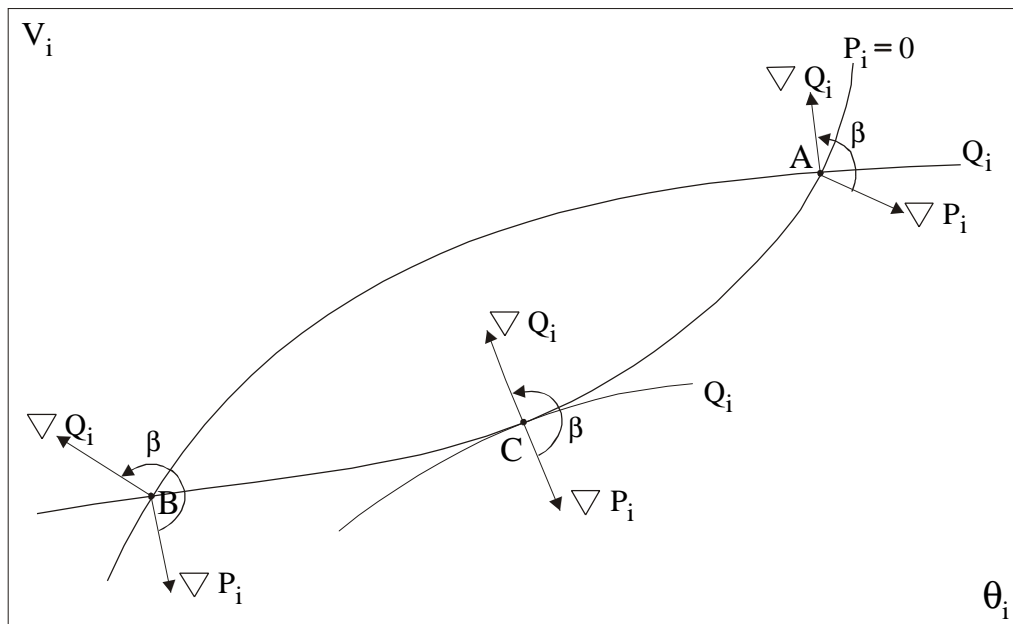


Figura 2.10

Posição dos Vetores Gradiente ∇P e ∇Q nas Regiões A e B e na Fronteira

A Figura 2.10 mostra a posição dos vetores gradiente ∇P e ∇Q nas Regiões A e B e na fronteira, sendo β o ângulo entre eles. Tomando ∇P_i como eixo de referência, na região normal

de operação sempre ocorre $0^\circ < \beta < 180^\circ$ e na região anormal sempre ocorre $0^\circ > \beta > -180^\circ$. No ponto máximo, os vetores gradientes ∇P_i e ∇Q_i estão alinhados, e então o ângulo β formado por esses dois vetores é 180° . Portanto, $\det[D'] > 0$ caracteriza a parte superior da curva $V \times P, Q$ e $\det[D'] < 0$ caracteriza a parte inferior da mesma curva, enquanto que obviamente, $\det[D'] = 0$ caracteriza a fronteira entre essas duas regiões, isto é, a “ponta do nariz”, como queria-se demonstrar.

2.4.2 - Índices Adicionais

Inclui-se dois novos índices que ajudarão na avaliação e reforço das condições de estabilidade de tensão.

2.4.2.1 - Margem de Potência

Como só é possível avaliar se a margem $S_{\max} - S_i$ é grande ou pequena quando comparada com S_i , pode-se definir uma margem em pu. Esta margem seria igual à unidade quando a injeção S_i é nula, e igual a zero quando a injeção é máxima ($S_i = S_{\max}$). Esta margem é definida como:

$$M_i = \left(1 - \frac{S_i}{S_{\max}} \right) \quad (2.40)$$

onde:

M_i potência aparente em pu de S_{\max} que ainda pode ser injetada na barra i ,

S_i potência aparente injetada na barra i , no ponto de operação em análise,

S_{\max} máxima potência aparente que pode ser injetada na barra i , calculada no ponto de operação em análise.

A Figura 2.11 mostra que a margem é positiva na Região A normal de operação, negativa na Região B anormal e nula no ponto de máximo.

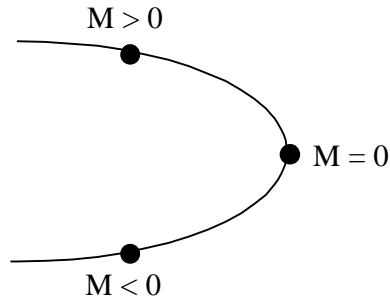


Figura 2.11
Sinal da Margem na Curva V x P, Q

2.4.2.2 - Índice de Influência

Um outro índice que pode ser útil relaciona as margens de potência entre dois pontos de operação, por exemplo, antes e depois de uma ação de controle. Ficaria caracterizada a eficácia ou não desta ação. Esse índice também pode ser usado para avaliar variações de carga, ou qualquer outro evento. É definido como:

$$\Pi_i = \left[\frac{M_{1_i}}{M_{0_i}} - 1 \right] \quad (2.41)$$

onde:

Π_i índice de influência da ação de controle sobre a margem da barra i ,

M_{0_i} margem de potência na barra i no ponto de operação de referência,

M_{1_i} margem de potência na barra i num outro ponto de operação.

A definição do índice também pode ser escrita como:

$$\Pi_i = \frac{M_{1_i}}{M_{0_i}} - 1 \quad \text{quando } M_{0_i} > 0 \quad (2.42)$$

$$\Pi_i = 1 - \frac{M_{1_i}}{M_{0_i}} \quad \text{quando } M_{0_i} < 0 \quad (2.43)$$

O movimento do ponto de operação descrito na curva $V \times P, Q$ da Figura 2.12 corresponde à deterioração do sistema e, conseqüentemente, do índice de influência. Obviamente o movimento contrário ao da Figura 2.12 corresponde à melhoria das condições do sistema.

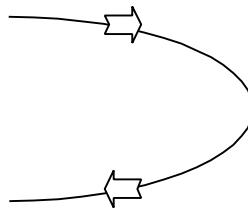


Figura 2.12

Movimento dos Pontos de Operação na Curva $V \times P, Q$

Se o ponto B da Figura 2.13 é o ponto de operação de referência, uma ação de controle eficaz faz com que o ponto se desloque na direção do ponto A; a margem M_1 é maior que a margem original M_0 e o índice Π é positivo. Se a ação deteriora o sistema, o ponto de operação se

aproxima do ponto C; a margem M_1 é menor que a margem original M_0 e o índice II é negativo ($II = -1$ em C).

Se o ponto D da Figura 2.13 é o ponto de operação de referência, uma ação de controle eficaz faz com que o ponto se desloque na direção do ponto C; a margem M_1 é maior (menos negativa) que a margem original M_0 e o índice II é positivo ($II = +1$ em C). Se a ação deteriora o sistema, o ponto de operação se aproxima do ponto E; a margem M_1 é menor (mais negativa) que a margem original M_0 e o índice II é negativo.

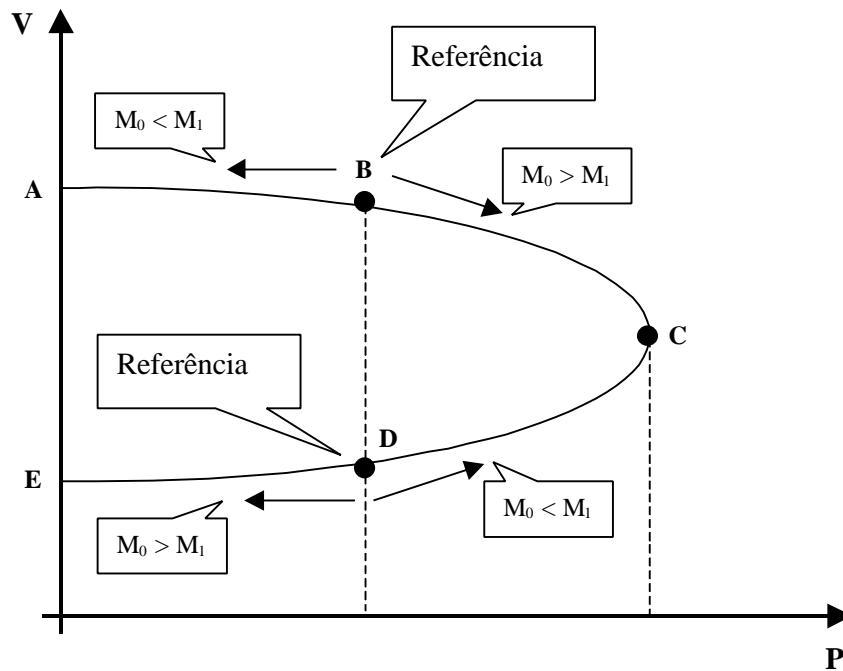


Figura 2.13

Curva V x P, Q para Análise do Índice de Influência

2.5 - AVALIAÇÃO DO SISTEMA DO SAGE E VISUALIZAÇÃO DOS ÍNDICES RESULTANTES

2.5.1 - Descrição do Sistema

O sistema ilustrado na Figura 2.14, baseado em um equivalente do sistema S/SE brasileiro, é usado para a demonstração de colapso de tensão no SAGE do CEPEL. Será aqui utilizado para a análise e avaliação de índices correspondentes às condições de estabilidade de tensão.

São analisados 13 casos fornecidos pelo CEPEL: a partir do caso-base (S35_B) até o caso 11 (S35_AO6) há aumento da carga na barra 29 (tomando a barra 34 como swing), enquanto que nos 2 últimos casos (S35_RO1 e S35_RO2) são consideradas ações de controle para o reforço do sistema.

Nos primeiros 5 casos (S35_B a S35_1050) não há violações de restrições operativas, já que, após o aumento de carga e cálculo do novo ponto de operação, o programa FLUPOT calcula as ações necessárias para eliminá-las.

Os 6 casos seguintes (S35_AO1 a S35_AO6) são fornecidos por um programa de Fluxo de Potência Continuado. Estão presentes violações dos limites de tensão. O caso S35_A06 é considerado o ponto de colapso.

Os últimos 2 casos (S35_RO1 e S34_RO2) consideram a readequação da operação do sistema através de ajustes otimizados calculados pelo FLUPOT [12].

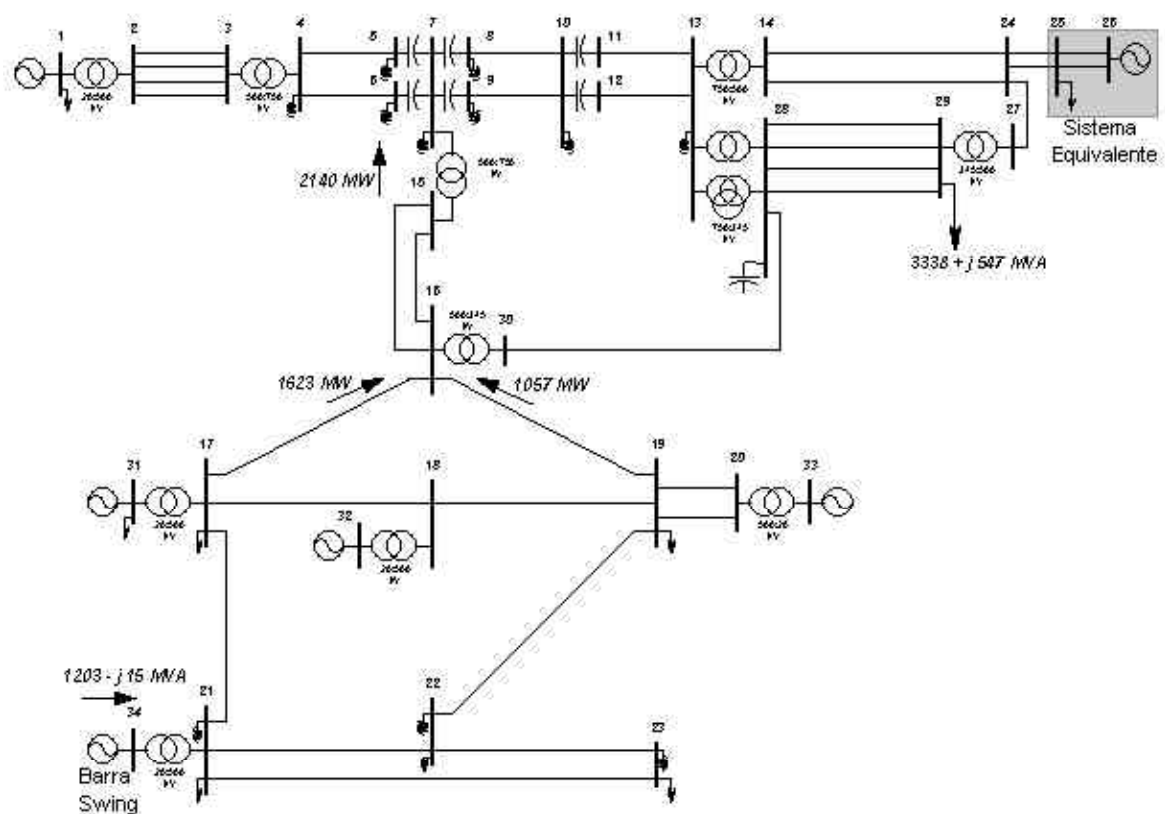


Tabela 2.1 - Variação de Carga e Ajuste de Controles no Sistema-Teste

CURVA PV DA BARRA 29					Swing = B34	
V _{base_29} = 345 KV					OBSERVAÇÃO	
Caso	V ₂₉ (pu)	V ₂₉ (KV)	Carga			
			MW	MVAr		
S35_B	0,996	343,62	2300,00	377,00	F	P ₂₉ = 2300 MW
S35_300	1,021	352,25	2578,00	422,60	L	P _{29_anterior} +278 MW
S35_600	0,997	343,97	2840,00	465,50	U	P _{29_anterior} +262 MW
S35_900	0,965	332,93	3090,00	506,60	P	P _{29_anterior} +250 MW
S35_1050	0,954	329,13	3201,00	524,70	O	P _{29_anterior} +111MW
					T	
S35_AO1	0,935	322,58	3300,00	540,90	F	P _{29_anterior} +99MW
S35_AO2	0,921	317,75	3350,00	549,10	P	P _{29_anterior} +50MW
S35_AO3	0,902	311,19	3400,00	557,30	C	P _{29_anterior} +50MW
S35_AO4	0,892	307,74	3415,00	559,70	O	P _{29_anterior} +15MW
S35_AO5	0,887	306,02	3420,00	560,50	N	P _{29_anterior} +5MW
S35_AO6	0,879	303,26	3425,00	561,40		P _{29_anterior} +5MW
S35_RO1	0,952	328,44	3425,00	561,40	F L U P O T	Mesmo anterior + V ₂₆ = 1,097 e V ₃₁ = 1,032
Diferentes tensões nas barras PV 26 e 31 e redespacho de potência ativa nas barras 26, 31, 32 e 33						P _{ger_26} = 4141 MW
						P _{ger_31} = 1094 MW
						P _{ger_32} = 1094 MW
						P _{ger_33} = 1094 MW
S35_RO2	0,960	331,20	3425,00	561,40		Mesmo anterior + Tap ₁₅₋₁₇ = 0,9239 Tap ₂₈₋₁₃ = 0,9925 Tap ₂₈₋₁₃ = 0,9925
Variação de taps						

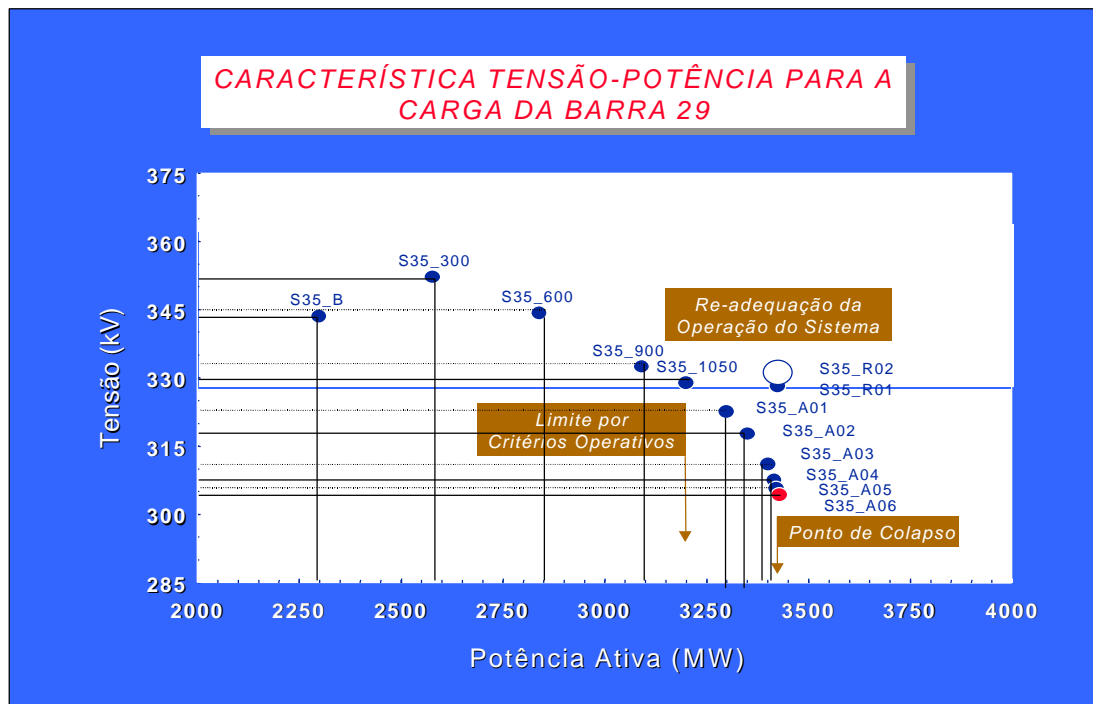


Figura 2.15

Caraterística Tensão x Potência para a Carga da Barra 29

2.5.2 - Avaliação do Sistema

A Tabela 2.2 mostra a variação do determinante da matriz $[D']$ multiplicado pela tensão para os diferentes pontos de operação. As barras 8, 9, 11 e 12 não devem ser analisadas por que são barras associadas aos capacitores série. A barra 26 também não por se tratar de uma barra fictícia. Pode ser observado na Tabela 2.2 que o determinante multiplicado pela tensão da barra 29 decresce com o aumento da carga como esperado. No ponto de colapso (caso S35_A06) seu valor é de 74 pu de MVA^2 . Observando-se que a injeção S_i é de $(34,250^2 \text{ pu de MW} + 5,614^2 \text{ pu de MVar})^{1/2} = 34,70 \text{ pu de MVA}$, e como S_{\max} é igual à raiz quadrada de $S_i^2 + \det[D'] \cdot V_i$, tem-se que a margem $S_{\max} - S_i$ é igual a 1,050 pu de MW. Portanto, comparando a injeção de 34,7 pu com a margem de 1,05 pu, conclui-se que, de fato, o ponto de operação encontra-se muito próximo do ponto de colapso.

Tabela 2.2 – Índices $\det[D'] \cdot V$ para Todas as Barras e Pontos de Operação do Sistema

ÍNDICE $\det[D'] \cdot V$											Swing = B34		
BARRA	S35_B	S35_300	S35_600	S35_900	S35_1050	S35_AO1	S35_AO2	S35_AO3	S35_AO4	S35_AO5	S35_AO6	S35_RO1	S35_RO2
1	231	196	68	-161	-397	-796	-1243	-2591	-4164	-5640	-11577	-343	-357
4	5279	5185	5031	4624	4175	3527	3022	2114	1540	1201	544	4233	4185
5	257804	193339	44771	17708	10570	5873	3810	1749	1018	705	260	11628	11237
6	303026	218173	46067	17942	10665	5910	3828	1755	1021	707	260	11742	11345
7	3859	3745	3473	2963	2476	1879	1475	879	579	426	173	2552	2506
10	2692	2621	2376	1975	1606	1174	895	508	326	237	94	1658	1622
13	2620	2615	2342	1923	1557	1132	860	485	310	225	89	1595	1561
17	8943	9183	9536	9435	9048	8481	8005	6979	6087	5394	3339	9179	9142
19	8092	7862	8395	8500	8465	7974	7564	6677	5896	5277	3371	8429	8396
21	12856	12351	13225	13688	14713	14322	14020	13422	12899	12447	10550	14474	14448
22	4753	4603	4943	5089	5329	5157	5025	4771	4555	4372	3628	5248	5235
23	1364	1322	1429	1480	1561	1518	1487	1433	1394	1362	1230	1544	1541
25	37470	40036	37742	33309	28900	23005	18677	11712	7917	5909	2454	29435	29007
29	1961	1987	1769	1447	1188	878	676	390	253	184	74	1197	1181
31	1185	1425	1458	1464	1211	1168	1121	974	788	593	-478	1343	1342
32	1377	1464	1594	1647	1708	1672	1636	1533	1409	1282	600	1689	1688
33	1267	1051	1280	1465	1545	1500	1453	1315	1147	975	83	1531	1530

Tabela 2.3 - Ângulo β para Todas as Barras e Pontos de Operação

ÂNGULO β											Swing = B34		
BARRA	S35_B	S35_300	S35_600	S35_900	S35_1050	S35_AO1	S35_AO2	S35_AO3	S35_AO4	S35_AO5	S35_AO6	S35_RO1	S35_RO2
1	38,20	39,60	22,30	-59,50	-76,40	-71,90	-61,30	-37,30	-24,10	-17,80	-8,60	-75,60	-75,80
4	85,00	89,50	95,20	103,50	110,50	120,20	128,00	141,50	149,60	154,40	165,00	109,90	110,30
5	178,20	178,10	174,00	170,30	169,30	169,20	169,80	172,00	173,90	175,10	177,70	169,70	169,70
6	178,50	178,30	174,10	170,30	169,30	169,30	169,80	171,90	173,80	175,10	177,70	169,70	169,70
7	109,40	114,50	120,20	127,20	133,00	139,80	144,80	153,70	159,70	163,40	171,70	132,40	132,80
10	120,80	125,10	130,70	137,60	143,50	150,40	155,40	163,70	168,50	171,20	176,10	142,60	143,10
13	134,30	137,60	143,00	149,30	154,80	160,80	164,90	170,90	174,00	175,60	178,20	153,90	154,50
17	82,00	86,10	90,20	94,60	97,40	101,70	105,50	114,10	121,60	127,10	141,40	101,60	101,70
19	86,90	90,90	94,00	97,70	100,20	104,30	108,00	116,70	124,50	130,30	146,10	103,40	103,60
21	89,90	93,30	96,30	99,30	100,50	102,50	103,90	106,60	109,20	111,40	120,90	104,30	104,40
22	90,40	93,30	95,90	98,50	99,80	101,70	103,20	106,40	109,50	112,30	124,00	103,00	103,10
23	104,40	105,80	106,50	107,60	108,00	109,00	109,80	111,30	112,90	114,30	120,80	109,50	109,50
25	136,80	139,60	145,80	153,00	158,60	164,70	168,50	173,60	175,90	177,10	178,80	157,60	158,00
29	133,40	136,20	142,10	149,30	154,80	161,10	165,30	171,40	174,40	175,90	178,40	154,20	154,50
31	66,90	71,30	73,60	75,80	74,90	76,90	78,70	83,50	88,80	93,00	-39,90	82,00	82,10
32	70,50	72,90	75,20	77,10	78,10	79,80	81,30	85,60	90,90	96,20	120,40	81,40	81,50
33	71,90	72,30	76,10	79,30	80,90	83,00	85,10	90,90	97,90	105,10	155,40	84,30	84,40

A Tabela 2.3 mostra os valores do ângulo β . Também como esperado, o valor do ângulo vai se aproximando de 180° à medida que a carga na barra 29 cresce. No caso S35_A06 o ângulo vale $178,4^\circ$ confirmando que este corresponde ao ponto de colapso.

2.5.2.1 - Visualização das Margens de Potência

A Figura 2.16 é a representação gráfica da margem de potência aparente para todas as barras de interesse e para todos os pontos de operação. Os valores numéricos correspondentes são mostrados na Tabela 2.4. As barras onde não existe injeção de potência foram excluídas da análise.

Analisa-se inicialmente os casos S35_B até S35-A06. As barras menos críticas são aquelas cujas margens não foram afetadas pelos sucessivos aumentos de carga. Na Figura 2.16 vê-se que entre estas, destacam-se as barras 17, 21, 22 e 23. Em seguida, pouco afetadas, aparecem as barras 4, 5, 6, 7, 13, 19, 32 e 33.

Ainda na Figura 2.16 nota-se que a barra 29, onde houve o aumento de carga, é bastante afetada pelo aumento de carga, como não poderia deixar de ser. Também afetadas aparecem as barras 10 e 25, assim como as barras 1 e 31 que apresentam operação na Região B. A barra 1 corresponde ao principal gerador do sistema. Sua margem vai se aproximando de zero (“ponta do nariz”) nos três primeiros casos e vai se tornando cada vez mais negativa (Região B de operação) nos casos subsequentes. A barra 31 também corresponde a um gerador e apresenta margem negativa (Região B de operação) em um único caso.

A inclusão das ações de controle nos casos S35_RO1 e S35_RO2, que teve como consequência a drástica redução das perdas na rede, também teve como consequência uma influência positiva nas margens de potência aparente nas mesmas barras que tinham sido afetadas pelos aumentos de carga. Em outras palavras, as ações de controle aumentaram as margens das barras 29, 1, 25 e 10 principalmente. Pode-se concluir que a diminuição das perdas do sistema tornou os

“caminhos” de transmissão entre a barra swing, onde houve o acréscimo de geração, e a barra 29, onde houve o aumento de carga, menos congestionados.

2.5.2.2 - Visualização dos Índices de Influência

As Figuras 2.17.a e 2.17.b mostram a representação gráfica dos índices de Influência com a variação de carga. O caso-referência é o S35_B e o último caso é aquele sem restrições violadas S35_1050. Portanto, considera-se quatro casos: aumentos de carga de 300, 600, 900 e 1050 MW em relação ao caso-base. As barras estão ordenadas da esquerda, afetadas positivamente, para a direita, afetadas negativamente. A Figura 2.17.a mostra a representação gráfica por barra do sistema nos quatro casos considerados. A barra do gráfico na cor azul (ou cinza se a cópia não for colorida) indica operação na Região A, enquanto que a cor vermelha (ou cinza mais escuro se a cópia não for colorida) indica operação na Região B. No fim da Figura 2.17.a está a representação gráfica por barra dos quatro casos considerados superpostos. Quando se superpõe vários casos não é possível, em geral, ordenar as barras, dado que cada caso pode ter uma ordem diferente. Na Figura 2.17.b é mostrada para barras selecionadas a representação gráfica por cada um dos quatro casos considerados.

As Figuras 2.18.a e 2.18.b mostram a representação gráfica dos índices de Influência com a variação de carga. O caso-referência é o S35_1050, o último caso sem restrições violadas. São analisados os casos subsequentes, em termos de aumento de carga, até o colapso S35_A06. As barras estão ordenadas da esquerda, afetadas positivamente, para a direita, afetadas negativamente. A Figura 2.18.a mostra a representação gráfica por barra do sistema nos seis casos considerados e a representação gráfica por barra desses seis casos superpostos. Na Figura 2.18.b é mostrado para barras selecionadas a representação gráfica por cada um dos seis casos considerados.

As Figuras 2.19.a e 2.19.b mostram os índices de Influência nos dois últimos casos S35_RO1 e S35_RO2, que inclui a influência das ações de reforço, tomando como base o caso S35_A06. A

Figura 2.19.a mostra a representação gráfica por barra do sistema nos dois casos considerados e a representação gráfica por barra desses dois casos superpostos. Na Figura 2.19.b é mostrado para barras selecionadas a representação gráfica por cada um dos dois casos considerados.

Como visto nas figuras, este índice permite representar graficamente o grau de melhoria ou deterioração das condições de operação do sistema com respeito a uma determinada ação de controle em um determinado ponto de operação, sendo fácil determinar as barras mais afetadas positiva ou negativamente.

2.6 – CONCLUSÕES

Foi mostrada uma formulação matemática para compreensão e caracterização do fenômeno da estabilidade de tensão.

Verificou-se que existe um fluxo máximo de potência ativa e reativa que pode chegar na barra de carga dependente do fator de potência. Foi mostrado também que para sistemas de transmissão compensados capacitivamente, os problemas de estabilidade de tensão podem ocorrer na faixa de operação.

Verificou-se a existência de duas regiões de operação denominadas respectivamente de Região A, onde as ações de controle têm o efeito esperado e Região B onde as ações de controle têm o efeito oposto ao esperado quando a carga se comporta como modelo de potência constante. A Fronteira corresponde às curvas de potência ativa constante e potência reativa constante se tocando em um único ponto, indicando que o fluxo máximo de potência ativa e reativa que pode chegar à barra de carga e sair da barra de geração foi atingido. Qualquer aumento na carga implica em ausência de estabilidade de tensão.

Fluxos de potência ativa e reativa transmitidos de geradores para cargas são avaliados. O conjunto de quatro índices propostos tem significado físico. Indicam, a região de operação na curva $V \times P, Q$ (sinal do $\det[D']$), uma medida de dificuldade de transmissão (β), a margem em pu para a máxima transmissão de potência e o Índice de Influência que traduz a melhoria ou deterioração das condições de operação, após a ação de controle, ou qualquer outro evento.

O sistema de 35 barras do SAGE foi analisado. Foram apresentados o índice $\det[D'] \cdot V$ e o índice β para cada barra do sistema e para cada ponto de operação considerado. Mais uma vez os índices funcionaram como esperado.

Como o estudo consistiu de uma sequência de casos relativos a aumentos de carga, e depois casos com ações de controle, definiu-se a margem de potência aparente que ainda poderia ser injetada em cada barra em pu da máxima potência aparente possível (calculada em cada ponto de operação). A visualização gráfica criada para essas margens tornou fácil verificar a deterioração das margens com o aumento de carga nas barras “próximas” ao evento, assim como a melhoria das margens com as ações de controle.

Para outro tipo de estudo onde não esteja disponível uma sequência de casos, como por exemplo, para verificar a eficácia de uma ação de controle sobre um ponto de operação, foi criado um índice de influência que traduz a melhoria ou deterioração da nova margem, após a ação de controle, em relação à margem do ponto de operação antes da ação. A visualização gráfica criada para este índice permite verificar as barras afetadas positiva e negativamente de forma ordenada.

Tabela 2.4 - Margem de Injeção de Potência Aparente no sistema - Teste de 35 Barras

MARGEM DE POTÊNCIA $M_i = (1 - S_i/S_{\max})$												Swing = B34	
BARRA	FLUPOT					FPCON						FLUPOT	
	S35_B	S35_300	S35_600	S35_900	S35_1050	S35_AO1	S35_AO2	S35_AO3	S35_AO4	S35_AO5	S35_AO6	S35_RO1	S35_RO2
1	0,093	0,080	0,031	-0,067	-0,144	-0,236	-0,311	-0,444	-0,530	-0,583	-0,692	-0,129	-0,133
4	0,909	0,909	0,907	0,903	0,899	0,891	0,884	0,863	0,841	0,821	0,739	0,900	0,899
5	0,997	0,996	0,993	0,988	0,985	0,981	0,976	0,966	0,956	0,948	0,915	0,986	0,986
6	0,997	0,997	0,993	0,988	0,985	0,981	0,976	0,966	0,956	0,948	0,915	0,986	0,986
7	0,945	0,944	0,942	0,937	0,933	0,925	0,916	0,894	0,871	0,851	0,772	0,933	0,933
10	0,870	0,867	0,861	0,849	0,836	0,814	0,792	0,735	0,680	0,633	0,475	0,838	0,837
13	0,937	0,936	0,932	0,926	0,919	0,907	0,896	0,865	0,834	0,808	0,706	0,920	0,920
17	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999	0,999	0,999	1,000	1,000
19	0,836	0,833	0,838	0,839	0,839	0,834	0,830	0,820	0,808	0,798	0,750	0,839	0,838
21	0,972	0,972	0,972	0,972	0,973	0,973	0,973	0,972	0,972	0,971	0,969	0,973	0,973
22	0,969	0,969	0,969	0,970	0,970	0,970	0,969	0,969	0,968	0,967	0,964	0,970	0,970
23	0,812	0,809	0,816	0,819	0,823	0,821	0,819	0,816	0,814	0,812	0,803	0,822	0,822
25	0,677	0,687	0,678	0,660	0,638	0,601	0,565	0,479	0,404	0,348	0,200	0,641	0,639
29	0,534	0,495	0,436	0,365	0,314	0,252	0,207	0,132	0,092	0,068	0,031	0,292	0,289
31	0,630	0,669	0,671	0,672	0,633	0,632	0,627	0,606	0,572	0,520	-0,482	0,705	0,705
32	0,692	0,701	0,712	0,716	0,717	0,712	0,707	0,695	0,682	0,668	0,540	0,741	0,740
33	0,681	0,641	0,681	0,700	0,702	0,695	0,688	0,670	0,647	0,620	0,183	0,726	0,726

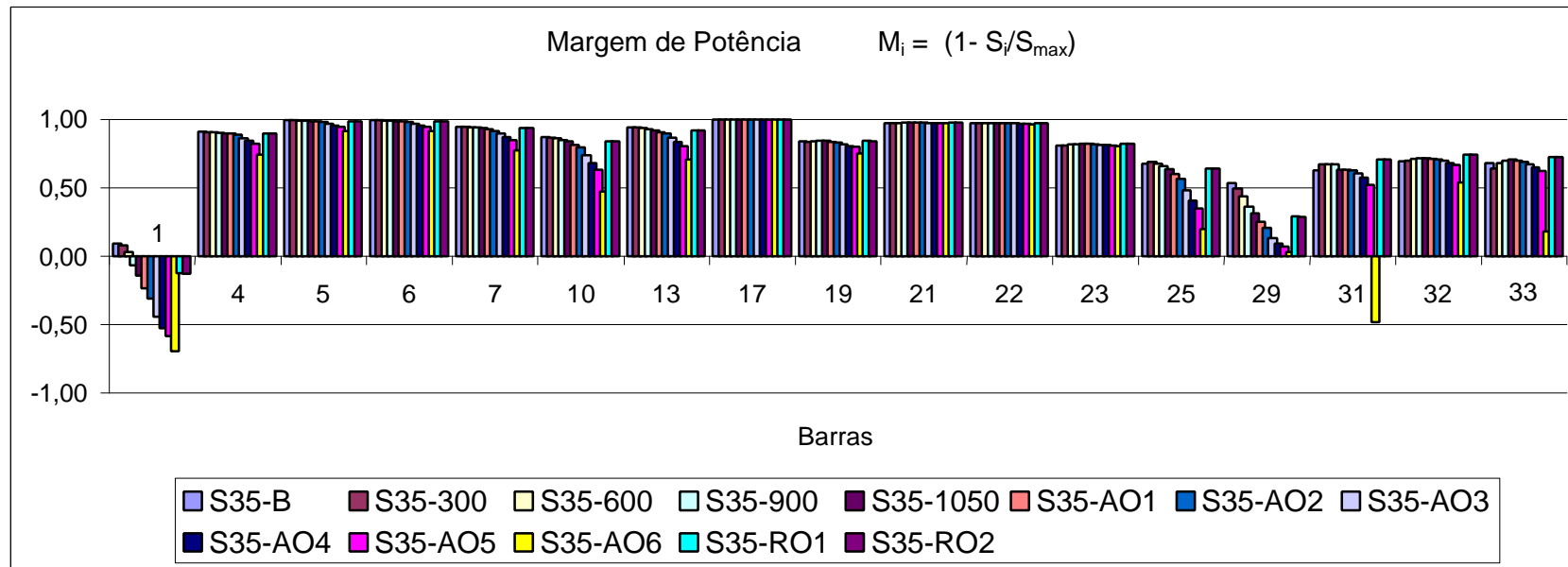


Figura 2.16

Margem de Potência Aparente em pu de S_{\max}

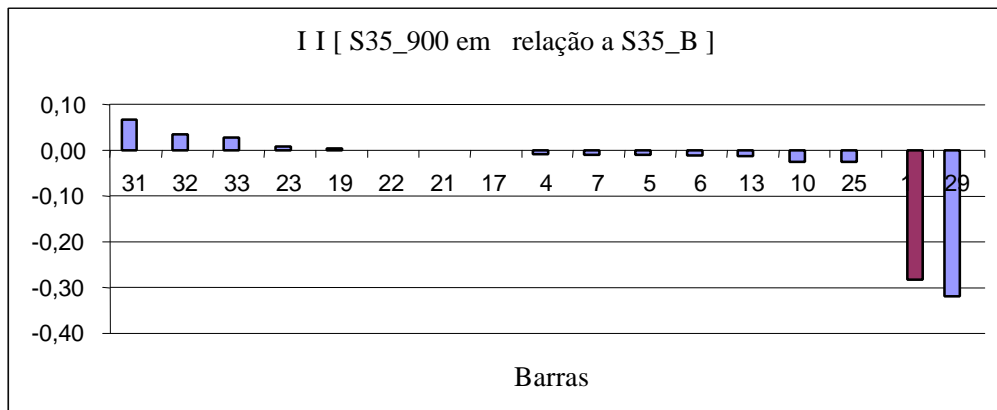
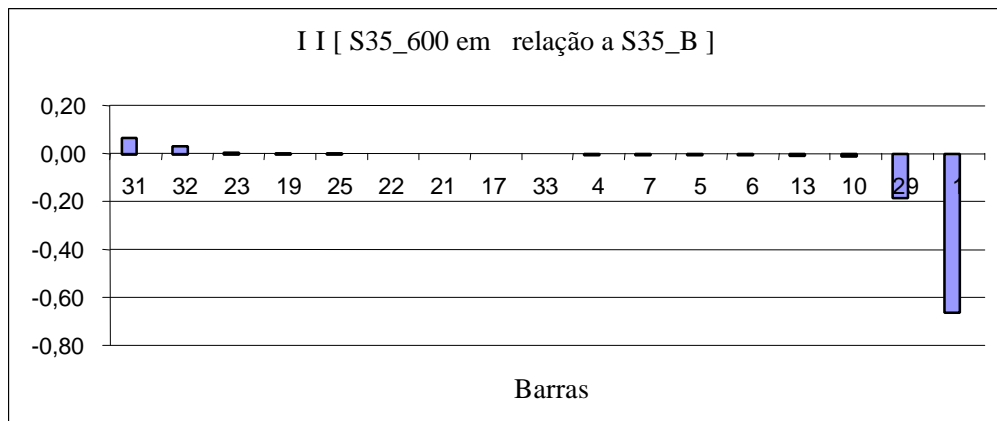
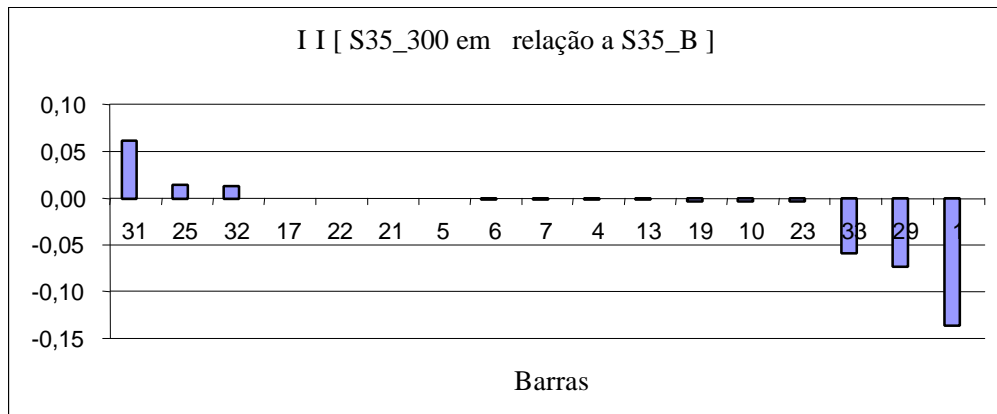


Figura 2.17.a

Representação Gráfica dos Índices de Influência
[de S35_B até S35_1050 em relação a S35_B]

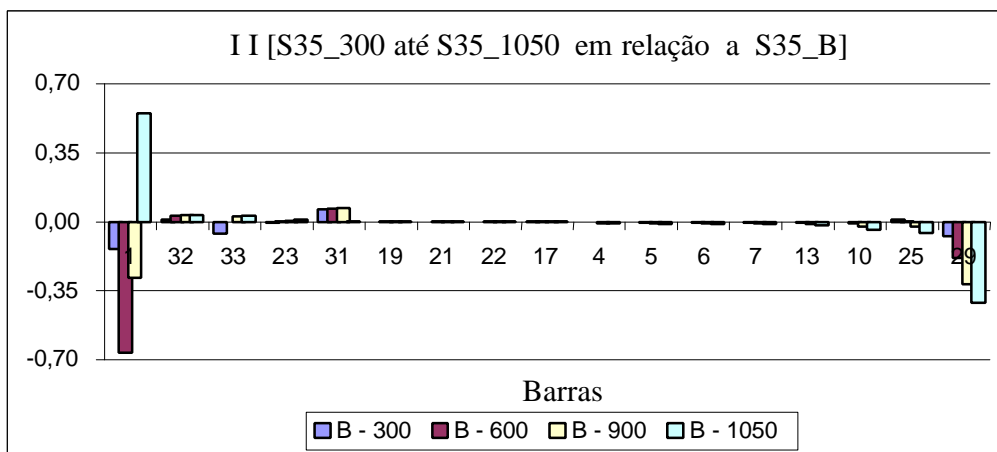
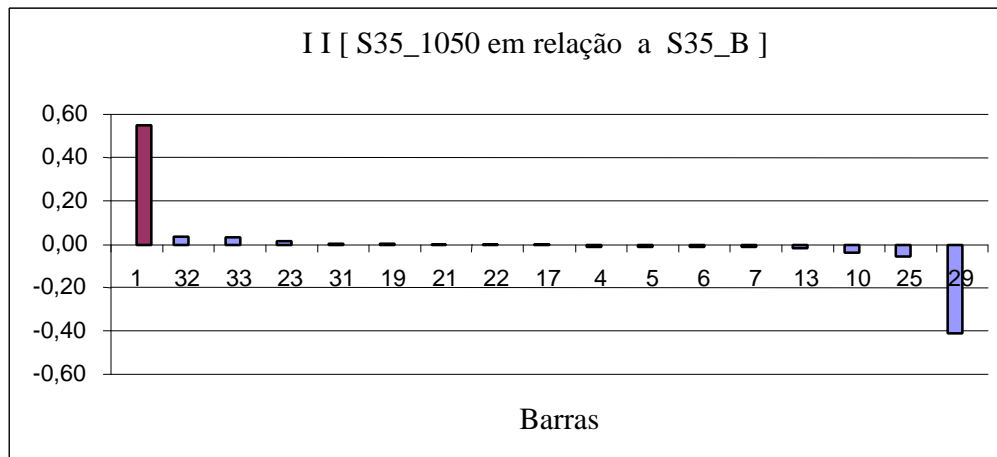


Figura 2.17.a (cont.)

Representação Gráfica dos Índices de Influência

[de S35_B até S35_1050 em relação a S35_B]

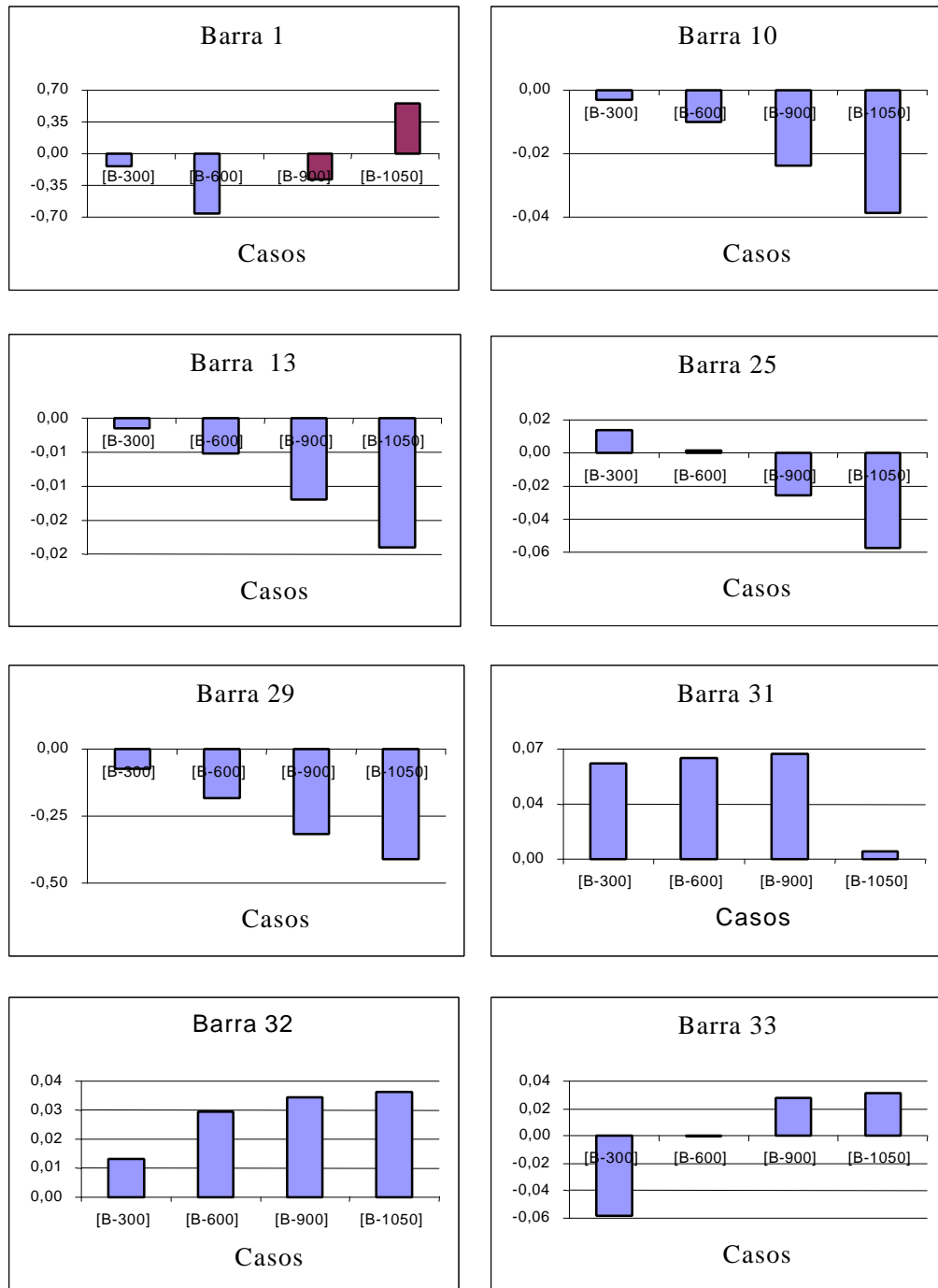


Figura 2.17.b

Representação Gráfica dos Índices de Influência por Barra

[de S35_B até S35_1050 em relação a S35_B]

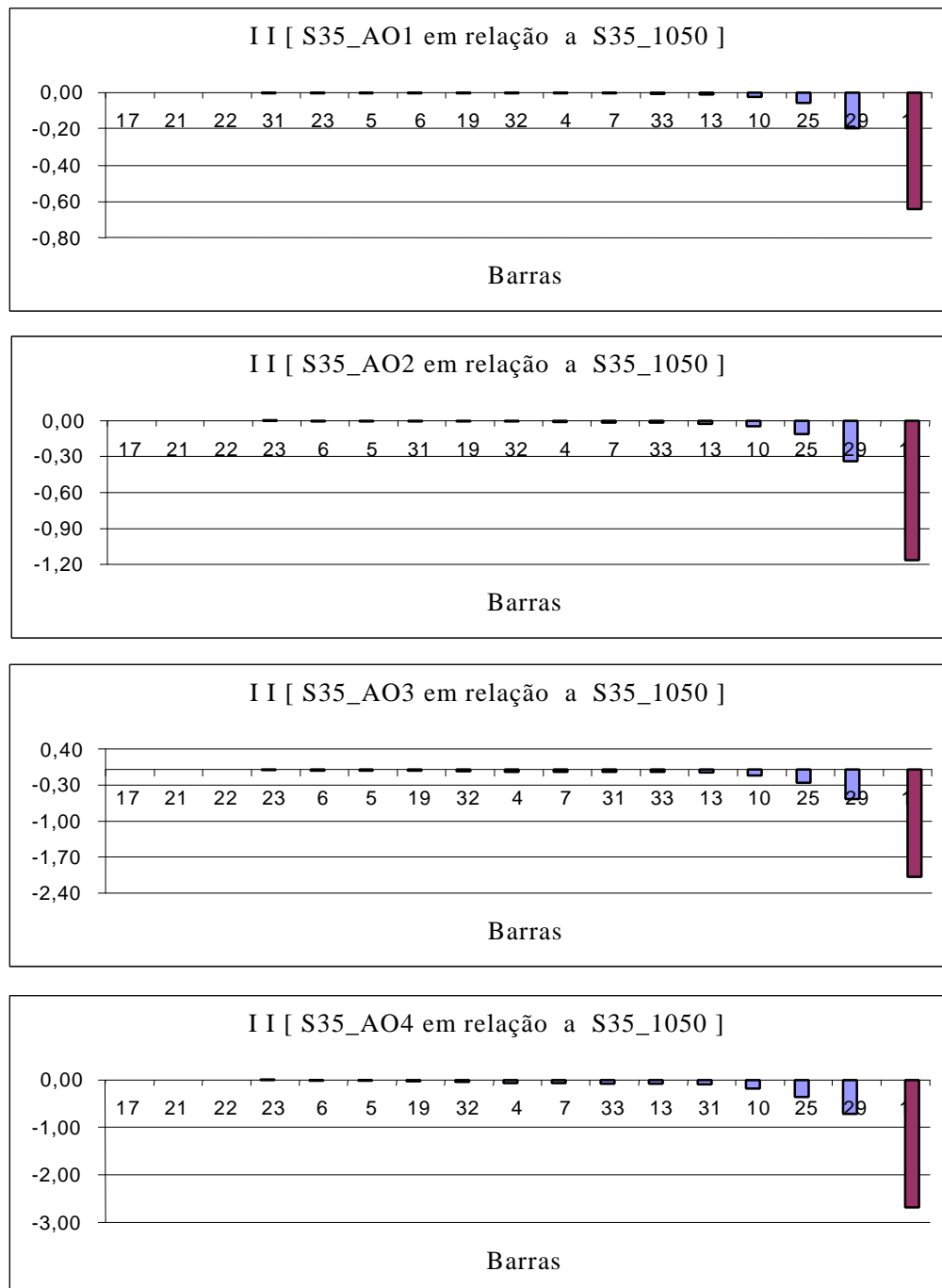


Figura 2.18.a

Representação Gráfica dos Índices de Influência

[de S35_AO1 até S35_AO6 em relação a S35_1050]

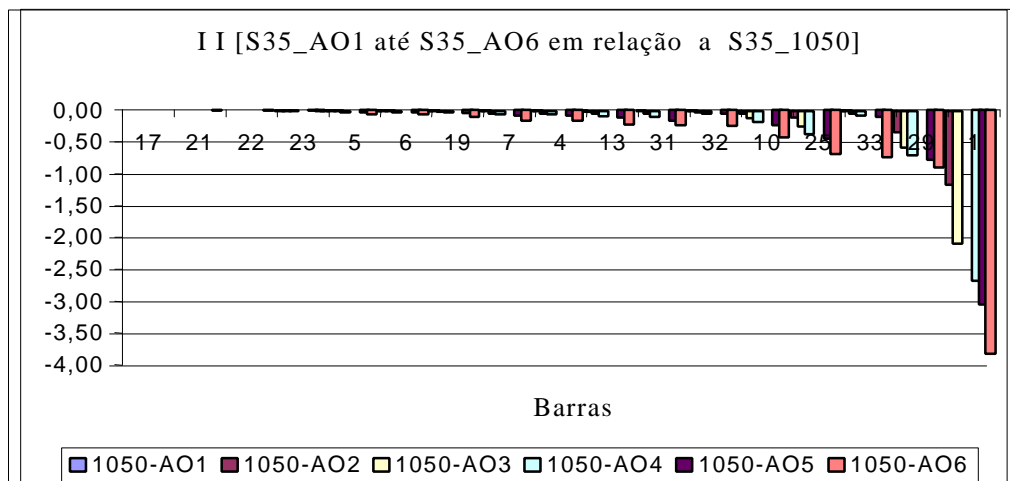
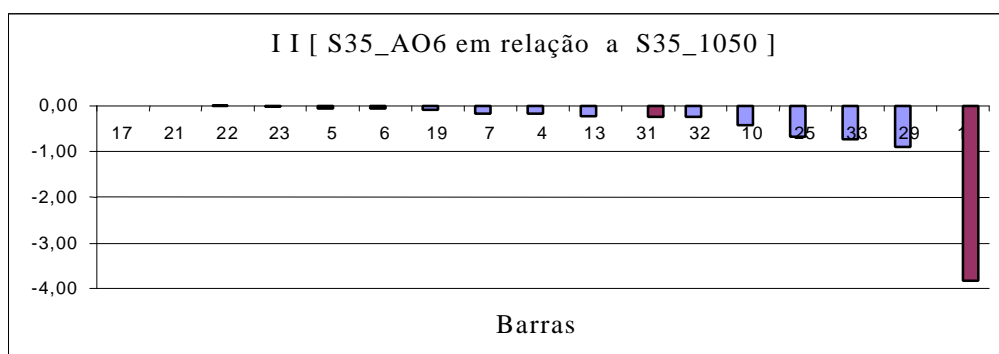
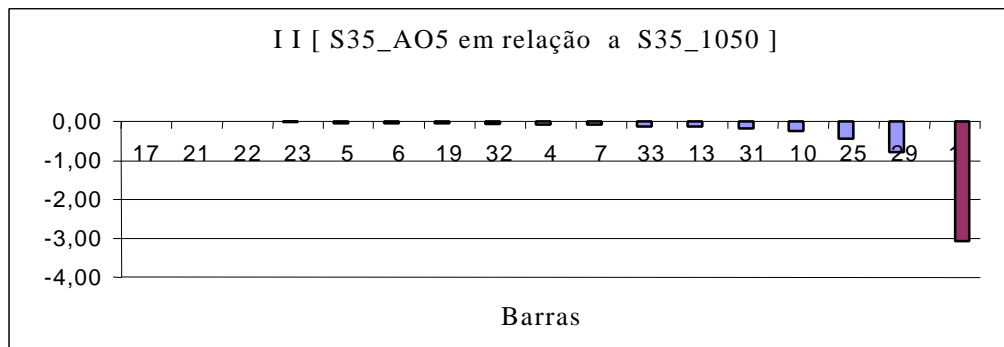


Figura 2.18.a (cont.)

Representação Gráfica dos Índices de Influência

[de S35_AO1 até S35_AO6 em relação a S35_1050]

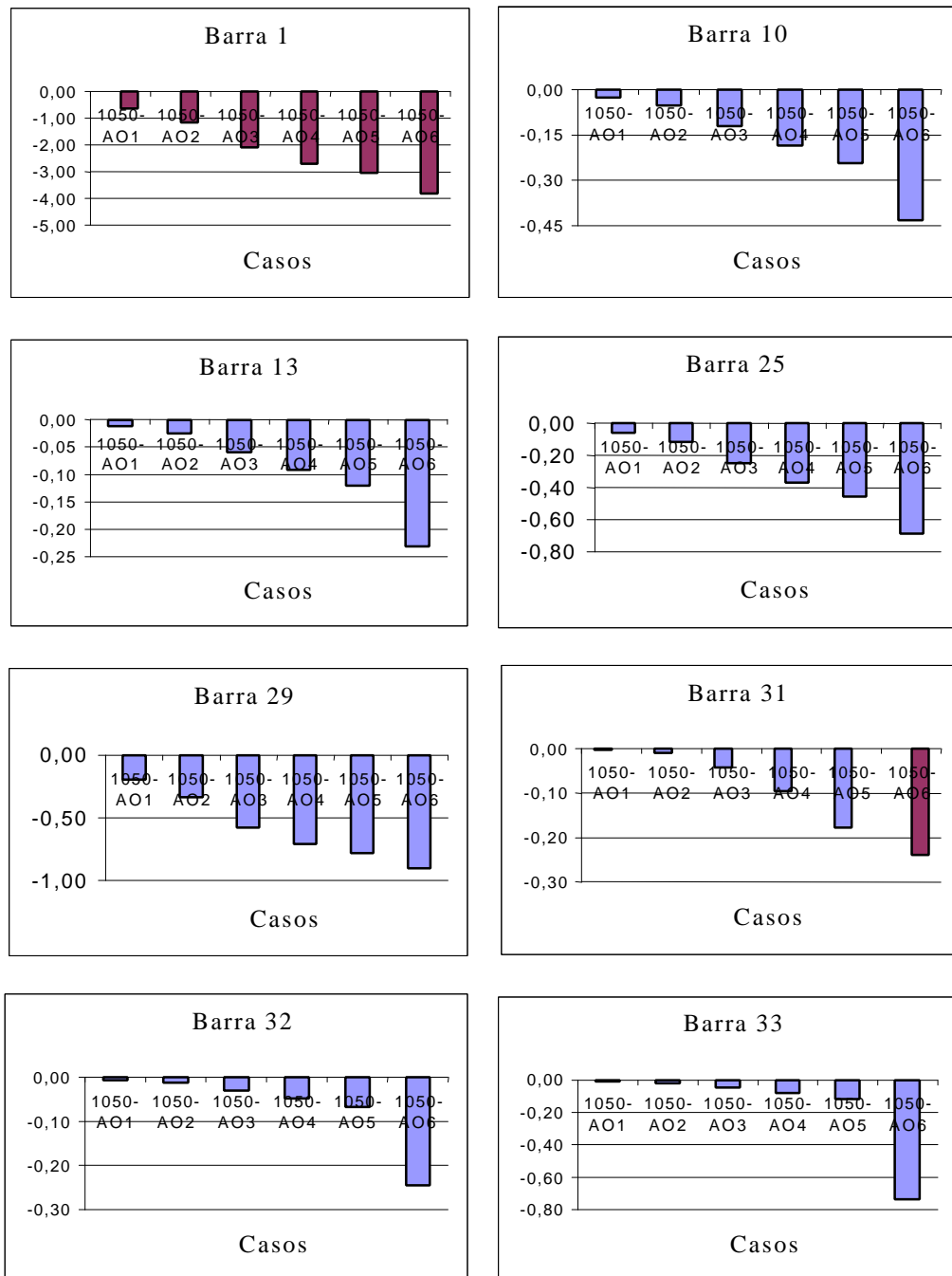


Figura 2.18.b

Representação Gráfica dos Índices de Influência por Barra

[de S35_AO1 até S35_AO6 em relação a S35_1050]

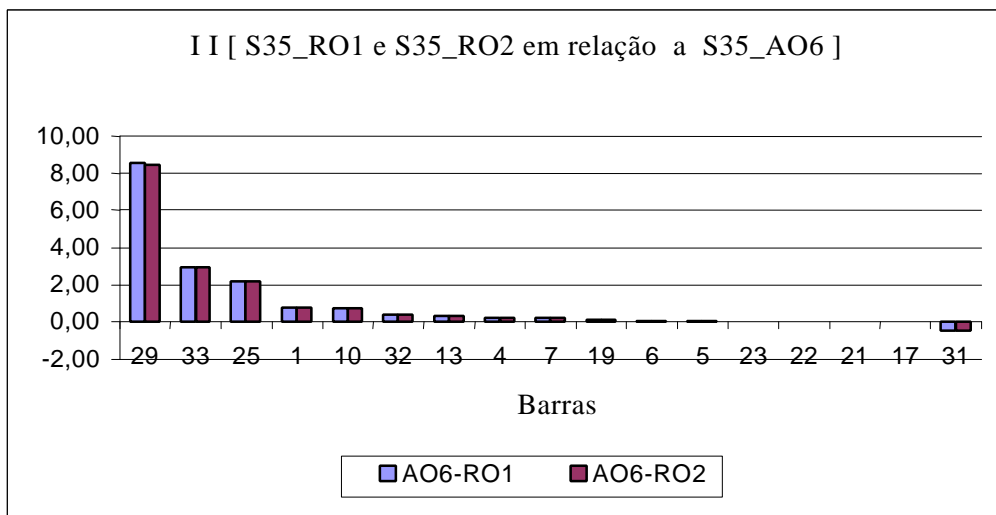
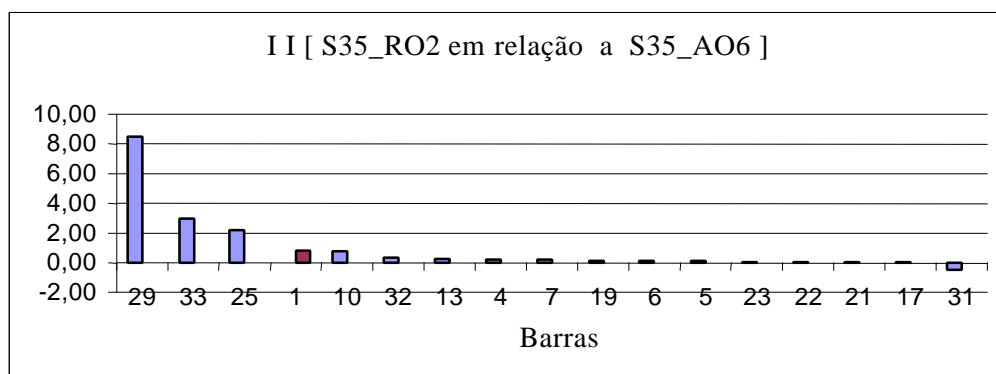
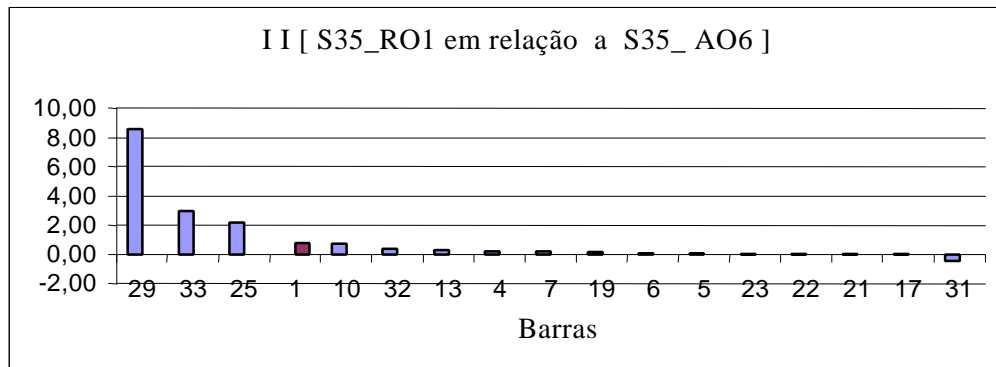


Figura 2.19.a

Representação Gráfica dos Índices de Influência após Ações de Controle
[S35_RO1 e S35_RO2 em relação a S35_AO6]

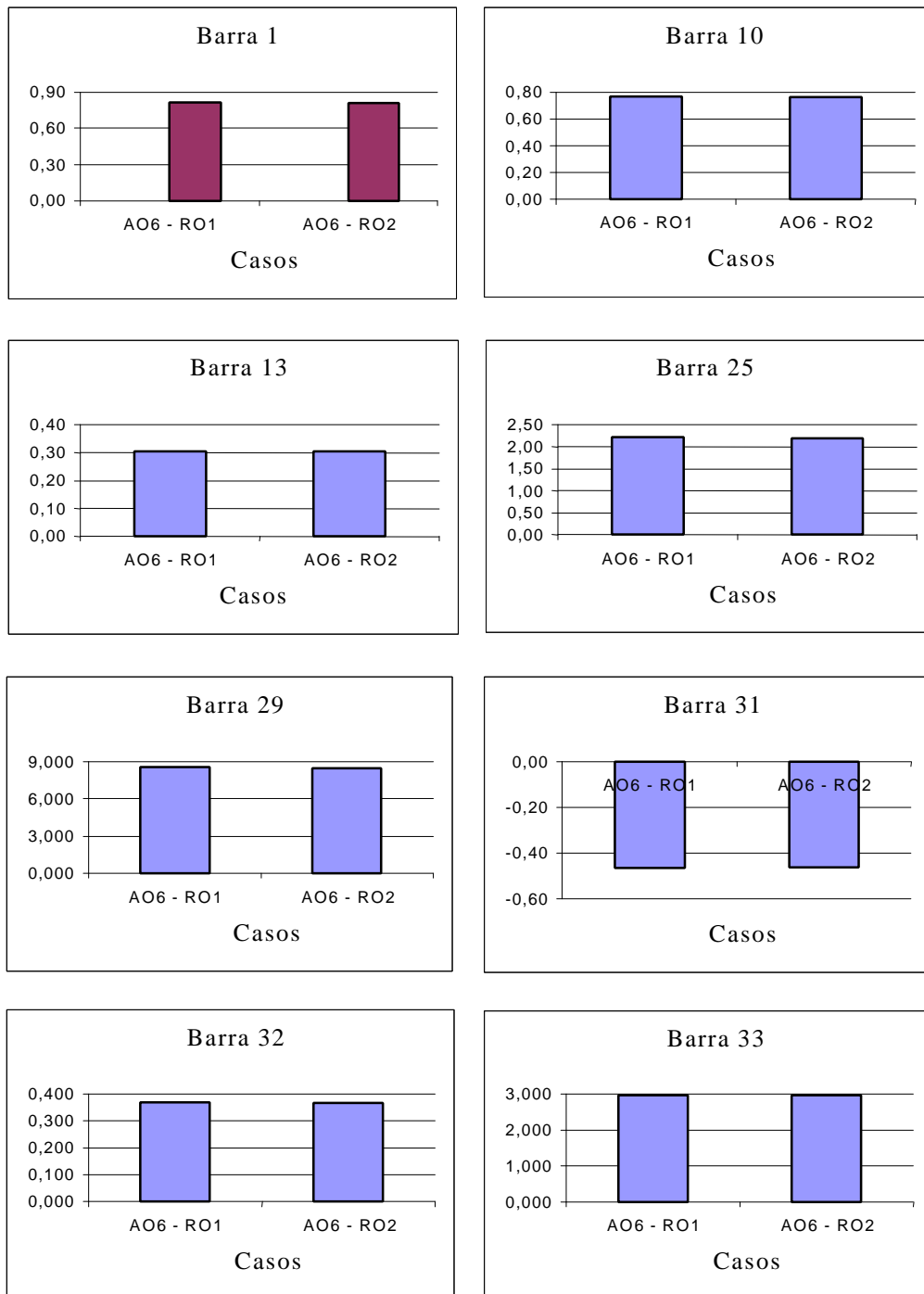


Figura 2.19.b

Representação Gráfica dos Índices de Influência por Barra após Ações de Controle
[S35_RO1 e S35_RO2 em relação a S35_AO6]

CAPÍTULO 3

CAMINHO DE TRANSMISSÃO CRÍTICO

3.1 - INTRODUÇÃO

Uma vez que a avaliação do carregamento da rede de transmissão detectou uma barra de carga crítica em um determinado ponto de operação, a função “reforço” consiste do cálculo de ações de controle para aumentar a distância entre o (novo) ponto de operação e o (novo) máximo permitido. Muitas vezes isso pode ser conseguido através da alteração do perfil de tensão, isto é, através do redespacho de potência reativa e ações de controle de tensão. Muitas outras vezes, por exemplo, no caso de linhas longas de transmissão transportando grandes blocos de potência, o redespacho de potência ativa torna-se necessário.

Uma barra de carga pode receber potência de mais de um caminho de transmissão. Suponha, por exemplo, dois geradores distintos conectados por duas linhas de transmissão distintas a uma única barra de carga. A medida que a carga cresce, toda a geração necessária vem de um único gerador carregando um único caminho de transmissão. A potência transmitida por esse caminho chega ao máximo. Obviamente que a carga pode continuar a crescer, desde que a potência passe a ser produzida no outro gerador e, conseqüentemente, a fluir pelo outro caminho de transmissão.

A idéia então é, uma vez detectada uma barra de carga crítica, verificar os diferentes caminhos de transmissão existentes, identificar um ou mais caminhos muito carregados, redirecionar o fluxo de potência destes para outros caminhos menos carregados. Pode-se optar por, inicialmente redirecionar os fluxos por redespacho de potência reativa e, depois, se necessário, por redespacho de potência ativa.

3.2 - TRANSFORMAÇÃO DO SISTEMA MULTI-NÓ

Nesta seção discute-se como identificar caminhos de transmissão críticos. O material que segue foi originalmente proposto em [13]. Nunca foi devidamente explorado e testado e, sequer apareceu no Relatório Final do projeto a que se refere aquela referência.

Selecione-se uma barra de carga que absorve potência ativa de todas as linhas de transmissão a ela conectadas, ou seja, não existe fluxo de potência ativa que deixe esta barra em direção a uma outra. Neste texto, a barra de carga será denominada "terminal" sempre que estiver nesta situação.

3.2.1 - Equivalente 1

O circuito de transmissão entre a barra terminal e as barras internas dos geradores deve ser identificado. A idéia mais simples incluiria os seguintes passos:

- i) transformar em admitâncias a carga de todas as outras barras de carga;
- ii) assumir as tensões internas de todos os geradores iguais e, conseqüentemente, unir todas as barras internas das máquinas;
- iii) eliminar todas as barras intermediárias entre a barra terminal e a barra interna (única) dos geradores e, conseqüentemente, calcular o circuito equivalente entre essas duas barras.

A Figura 3.1 ilustra, através de diagramas unifilares, a execução dos passos indicados, sobre um sistema originalmente de dois geradores, duas cargas e três linhas de transmissão. Das seis barras mostradas, duas correspondem aos nós internos das máquinas. Obtém-se ao final desses três passos um circuito composto de gerador, modelo π de transmissão e carga. Os resultados conhecidos para o circuito de duas barras [Capítulo 2] poderiam ser aplicados para identificar se esse caminho de transmissão está muito carregado. (Para um circuito de duas barras, é possível o cálculo da tensão, em módulo e ângulo, no ponto de máximo

carregamento. Compara-se então a tensão do ponto de operação em análise com a tensão crítica).

Os passos i) e iii) coincidem com a prática usual em estudos de estabilidade angular [14]. O passo ii), no entanto, pode ser uma simplificação inadequada. Esse passo implica na perda da individualidade de cada gerador e o caminho de transmissão até a carga. Considere o exemplo da seção 3.1, o caso simples de um circuito de três barras, com uma carga sendo alimentada por duas linhas de transmissão, cada uma conectada a um gerador. Suponha que uma linha está completamente carregada e outra não. Aumentos na carga seriam possíveis somente se a geração-extra necessária fosse de responsabilidade do gerador conectado à linha com reservas de transmissão. Entretanto, se o sistema fosse reduzido a duas barras, conforme mencionado, o circuito equivalente de transmissão exibiria capacidade disponível de transmissão, mascarando o fato que aumentos de carga não podem ser supridos sem uma distribuição de geração adequada. (Note que o conceito de barra swing é importante).

3.2.2 - Equivalente 2

A fim de evitar o inconveniente mencionado, poderia se desenvolver um outro procedimento:

- i) transformar em admitância a carga de todas as outras barras de carga;
- ii) eliminar todas as barras intermediárias entre a barra terminal e cada barra interna de gerador e, conseqüentemente, calcular o circuito equivalente entre a barra terminal e cada barra interna de gerador, assim como o circuito equivalente entre geradores.

A Figura 3.2 mostra o diagrama unifilar do sistema original e aqueles resultantes da execução dos passos indicados. Obtém-se ao final desses dois passos vários circuitos compostos de gerador, modelo π de transmissão, e a carga da barra terminal. Fica então mantida a individualidade de cada gerador em relação a sua contribuição para a carga. Os resultados conhecidos para o circuito de duas barras poderiam ser aplicados, ressaltando-se que a carga de cada um dos vários circuitos de duas barras, seria o fluxo de potência ativa e reativa que chega na barra terminal através do circuito de transmissão correspondente.

É possível vislumbrar no procedimento descrito um problema. É o caso da existência de dois ou mais caminhos de transmissão entre a barra terminal e um certo gerador. No passo ii), a eliminação das barras intermediárias em cada um dos caminhos de transmissão entre a barra terminal e aquele gerador, levaria a um único circuito equivalente de transmissão entre as duas barras.

Novamente, esbarra-se com o problema de ter-se um caminho de transmissão completamente carregado e outro não, fato que seria mascarado pelo circuito equivalente único.

3.2.3 - Equivalente 3

A solução para contornar o obstáculo mencionado é, obviamente, impedir que a individualidade dos caminhos de transmissão seja perdida. Assim, obtém-se ao final do procedimento vários circuitos compostos de gerador, modelo π de transmissão, e barra terminal, sendo que o mesmo gerador pode estar conectado à barra terminal por mais de um circuito π de transmissão. Fica então mantida a individualidade de cada gerador, assim como de cada caminho de transmissão. Mais uma vez, a carga de cada um dos vários circuitos de duas barras resultantes é o fluxo de potência ativa e reativa que chega na barra terminal através do caminho de transmissão correspondente.

A Figura 3.3 ilustra a idéia da manutenção da individualidade de geradores e caminhos de transmissão paralelos.

O procedimento para se buscar os circuitos de transmissão equivalentes entre a barra terminal e os geradores, seria procurar determinar na rede intacta, a porção da rede de transmissão realmente utilizada para transmitir potência ativa dos geradores até a barra terminal. Os seguintes passos estariam envolvidos para a execução dessa idéia:

- i) Como a barra de carga i terminal recebe potência ativa através de todos os ramos a ela conectados (por definição), todas as barras j conectadas à barra i através de um único ramo de transmissão, pertencem ao sub-sistema de transmissão procurado.

Para achar o sub-sistema basta verificar o sinal dos fluxos de potência ativa. Todas as barras j conectadas à barra i pertencem ao sub-sistema porque $P_{ij} < 0$. A barra k conectada a barra j , pertence ao sub-sistema se $P_{jk} < 0$. A barra ℓ conectada a barra k , pertence ao sub-sistema se $P_{k\ell} < 0$. A busca acaba em barras geradoras m de potência ativa, não recebendo potência ativa de outro gerador. O sub-sistema está determinado.

Para ilustrar esse procedimento, utilizou-se o sistema IEEE 24-barras, cujo diagrama unifilar e as direções dos fluxos de potência são mostrados na Figura 3.4. Como exemplo, tomou-se a barra terminal 14. A Figura 3.5 mostra o sub-sistema de transmissão de potência ativa encontrado, seguindo-se as regras desse passo.

Para isolar o sub-sistema do resto da rede é necessário transformar em admitâncias os fluxos de potência ativa que deixam o sub-sistema a partir dos nós intermediários, assim como os fluxos de potência reativa que deixam e que chegam ao sub-sistema. Deve-se notar que, por definição, não existem fluxos de potência ativa chegando ao sub-sistema.

Tem-se agora um sistema de dimensões reduzidas composto de uma barra de carga, ligada por uma rede de transmissão a um ou mais geradores.

Para a eliminação das barras intermediárias, quando se utiliza o conceito de sub-sistema responsável pela transmissão de potência ativa até a barra de carga terminal, determina-se todos os caminhos de transmissão radiais entre a barra terminal e cada gerador. A execução dessa idéia envolveria os seguintes passos:

Cada barra j conectada por um único ramo de transmissão à barra terminal i define um caminho de transmissão radial. Note-se que $P_{ij} < 0$. Se existem n_j barras j , são definidos n_j caminhos. Para cada barra j existem n_k barras k , com $P_{jk} < 0$, a ela conectadas, e são definidos $n_k - 1$ novos caminhos. Para cada barra k existem n_ℓ barras ℓ , com $P_{k\ell} < 0$, a ela conectadas, e são definidos $n_\ell - 1$ novos caminhos. Cada caminho termina em um gerador m de potência ativa.

São definidos então, vários caminhos radiais contendo a barra i, uma barra j, uma barra k, uma barra ℓ , ..., e uma barra geradora m. A Figura 3.6 mostra os vários caminhos radiais obtidos para a alimentação da barra 14 do sistema - teste IEEE 24-barras. Esses caminhos radiais não são necessariamente independentes, podendo o mesmo ramo de transmissão aparecer em vários caminhos diferentes.

Para isolar um caminho radial de transmissão do resto do sistema é necessário transformar em admitâncias todos os fluxos de potência ativa e reativa que entram e saem do caminho em suas barras intermediárias. Transformando-se as cargas das barras intermediárias em admitâncias e eliminando-se essas barras, tem-se um circuito equivalente de duas barras, como se queria obter.

A Figura 3.7 é um exemplo desse passo para a barra de carga 14 e a barra de geração 17. Nesta figura, Z_{23} , Z_{22} , G' e L' são calculados por:

$$Z_{23} = \frac{-V_{23}^2}{S_{23-17}^* + S_{23-22}^*}$$

$$Z_{22} = \frac{-V_{22}^2}{S_{22-23}^* + S_{22-14}^*}$$

$$G' = P_{17-23} + jQ_{17-23}$$

$$L' = -P_{14-22} - jQ_{14-22}$$

3.2.4 - Eliminação de Barras Intermediárias

No texto precedente foi mencionada a necessidade de eliminação de barras de carga intermediárias entre a barra terminal e o gerador. Normalmente, como em estudos de estabilidade angular, a eliminação de barras de carga intermediárias é realizada através do cálculo do circuito equivalente pela técnica conhecida como "redução da rede" [15]. Seja a lei dos nós de Kirchhoff, escrita na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 \\ Y_3 & Y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ V_1 \end{bmatrix} \quad \text{onde:}$$

- I é o vetor das correntes injetadas pelos geradores e consumida na barra terminal;
- 0 corresponde ao somatório nulo das correntes nas outras barras, sendo a carga modelada por impedância;
- V é o vetor das tensões nodais nos geradores e na barra terminal;
- V_1 é a tensão nodal nas outras barras.

A matriz formada pelas sub-matrizes Y_1 , Y_2 , Y_3 e Y_4 é a matriz de admitâncias de barras.

A redução da rede é feita com o seguinte cálculo:

$$I = [Y_{eq}] V \quad \text{com} \quad Y_{eq} = Y_1 - Y_2 Y_4^{-1} Y_3 \quad \text{onde:}$$

Y_{eq} é a matriz admitância de barras do circuito equivalente, e que já não inclui as barras intermediárias.

A rede reduzida depende das admitâncias da rede intacta, e também da tensão nodal das barras intermediárias, quando o modelo da carga é trocado de potência para impedância constante.

Essa rede reduzida é composta de linhas de transmissão equivalentes fictícias e consequentemente, os fluxos de potência transmitidos por essa rede são fictícios, diferindo daqueles fluxos na rede intacta. As únicas grandezas que mantêm o mesmo valor na rede intacta e na rede reduzida, são as tensões nodais em módulo e ângulo (para as mesmas gerações e cargas).

Como o interesse é observar o "esforço de transmissão" de fluxos de potência ativa e reativa em linhas de transmissão, o esforço (queda de tensão e defasagem angular) pode ser medido na rede reduzida, já que a tensão no gerador, a tensão na carga, os fluxos de potência ativa e reativa que deixam o gerador, e os fluxos de potência ativa e reativa que chegam na carga são iguais no sistema original e no sistema de duas barras.

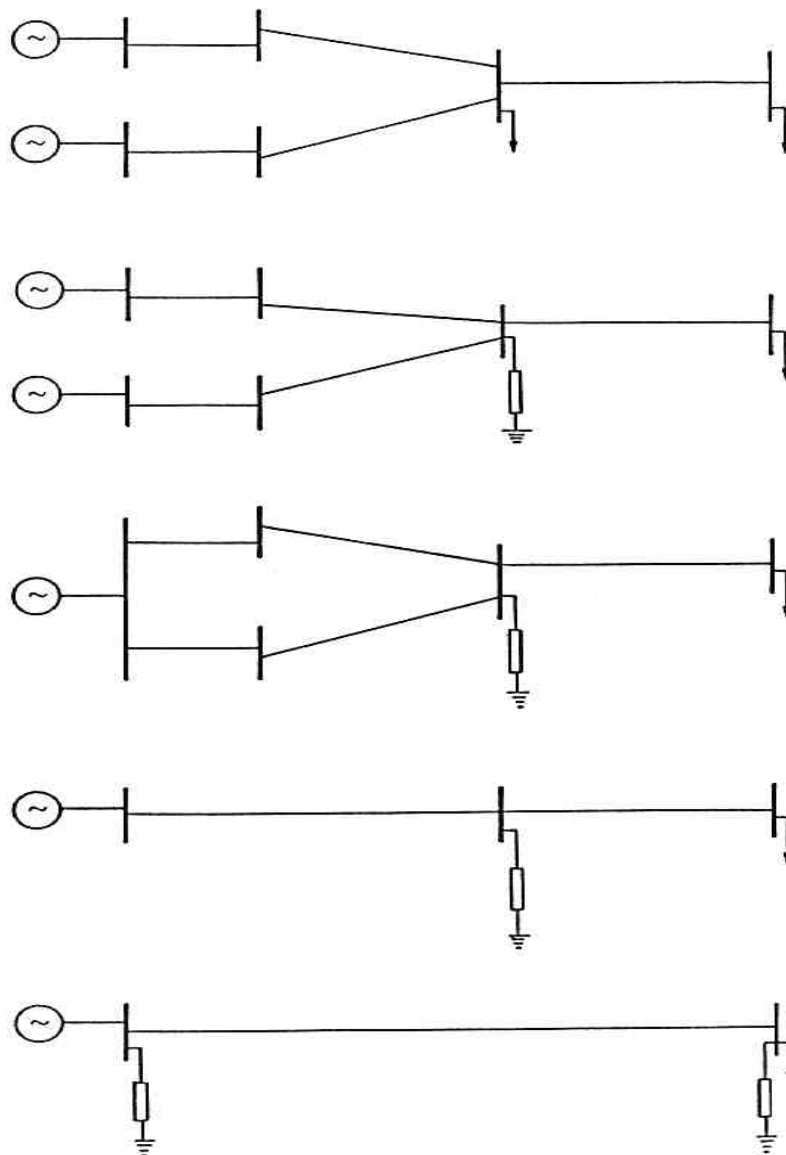


Figura 3.1

Equivalente de Duas Barras Assumindo Iguais as Tensões Internas dos Geradores

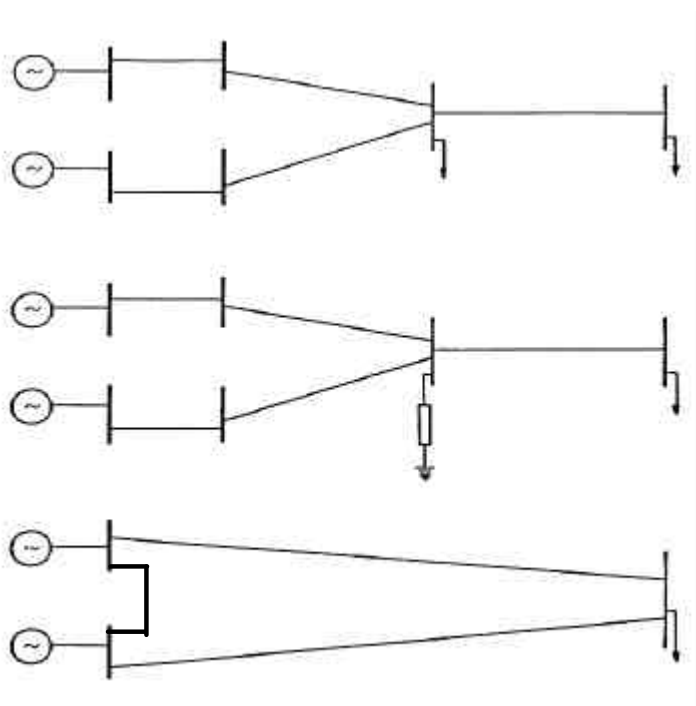


Figura 3.2

Equivalente de Duas Barras Mantendo a Individualidade dos Geradores

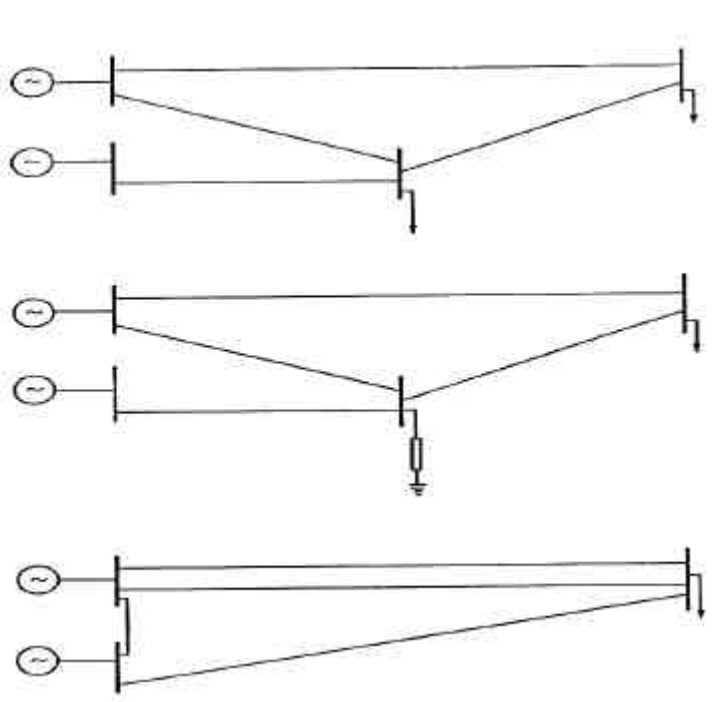


Figura 3.3

Equivalente de Duas Barras Mantendo a Individualidade dos Geradores e dos Caminhos de Transmissão

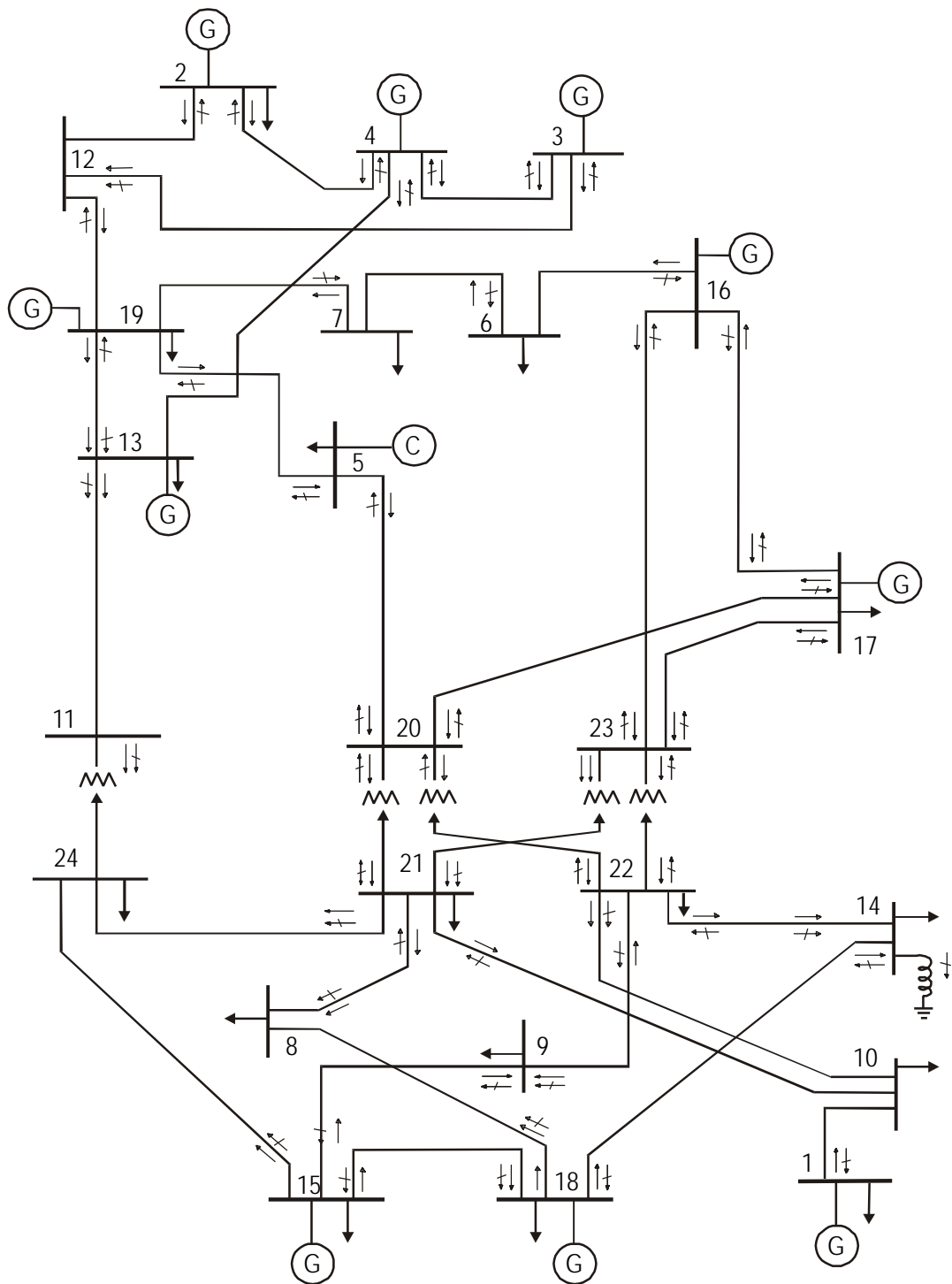


Figura 3.4

Sistema-Teste IEEE 24 Barras e a Direção dos Fluxos de Potência Ativa e Reativa

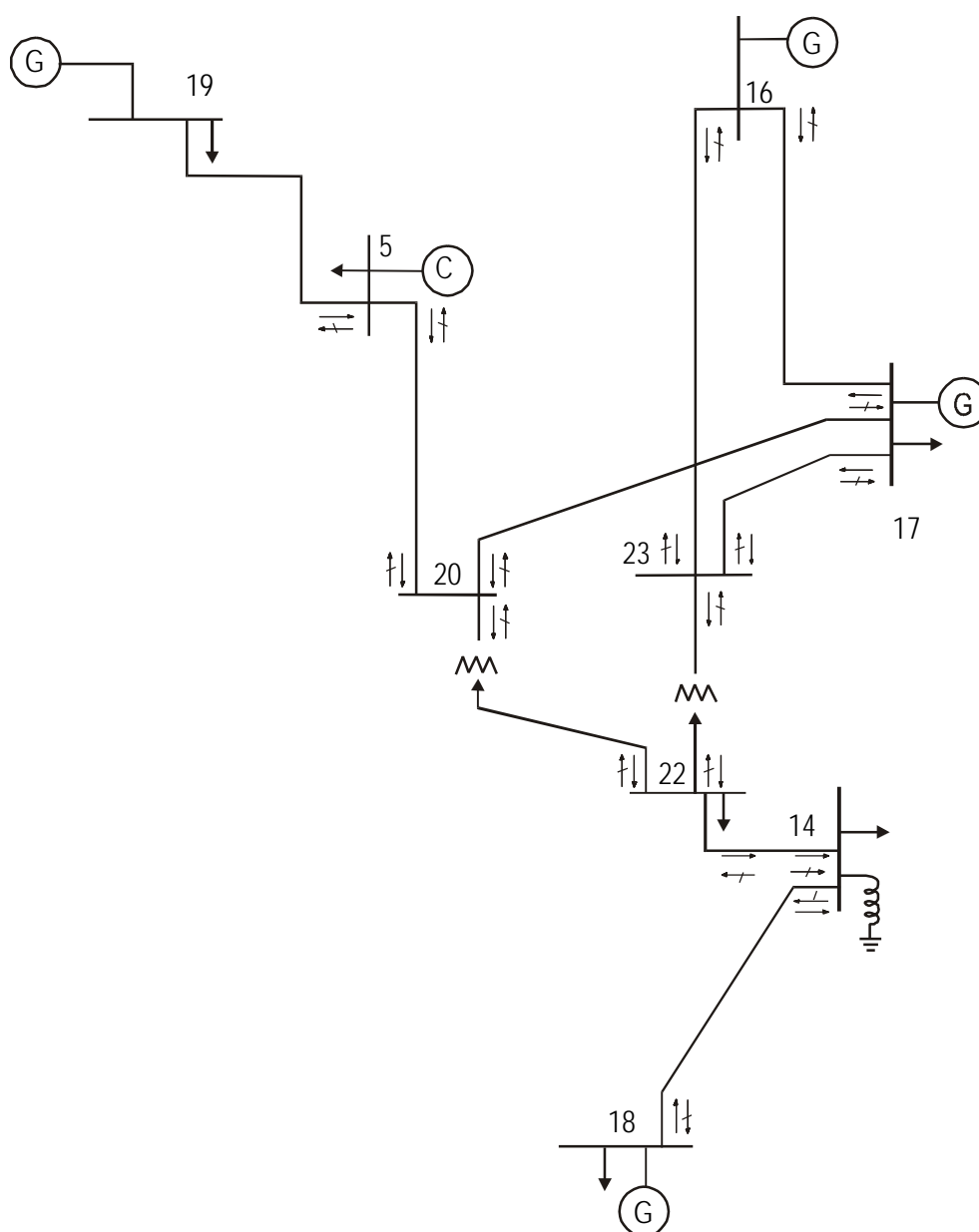


Figura 3.5

Subsistema de Transmissão de Potência Ativa para Alimentar a Barra 14

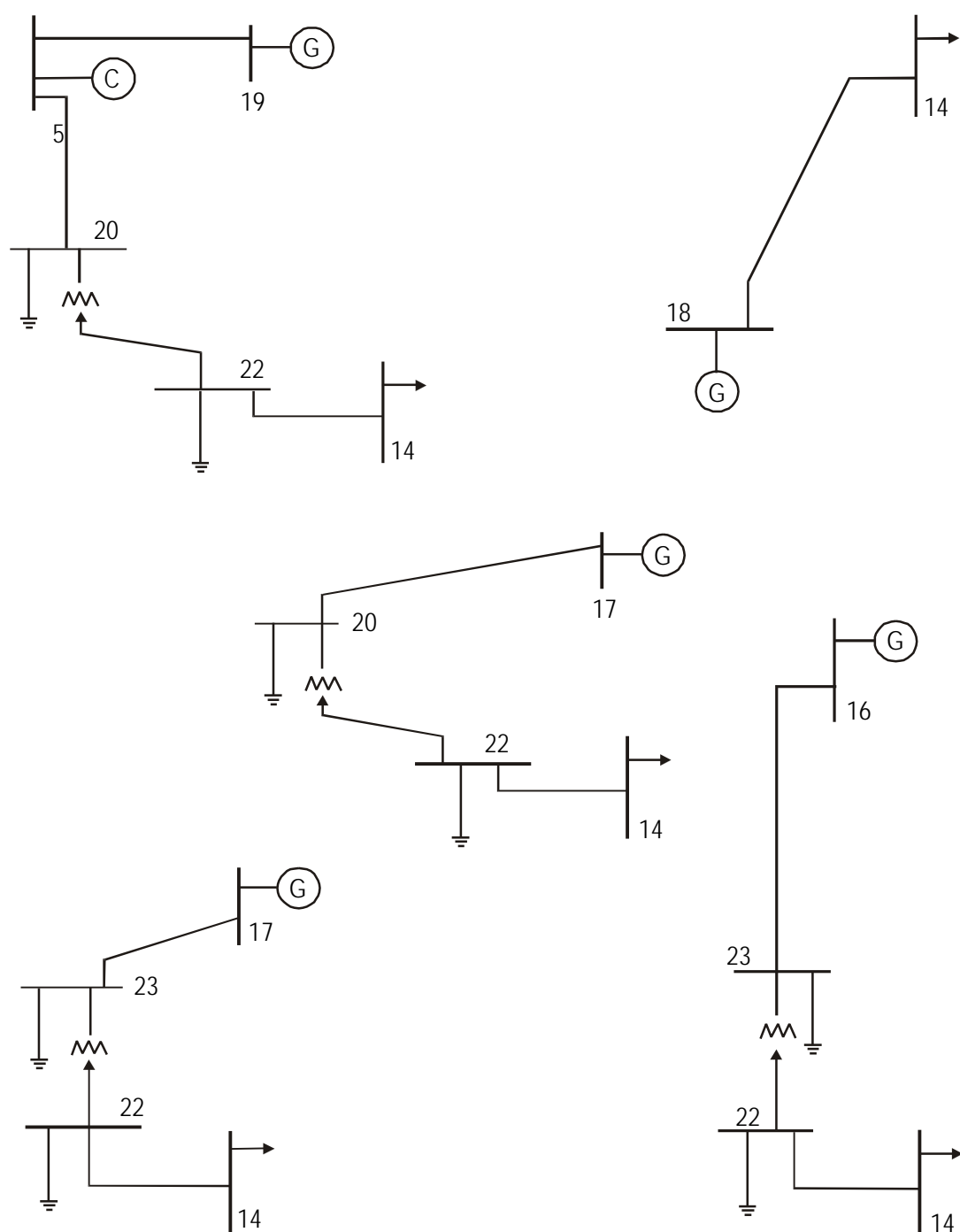


Figura 3.6

Caminhos de Transmissão de Potência Ativa para a Barra 14

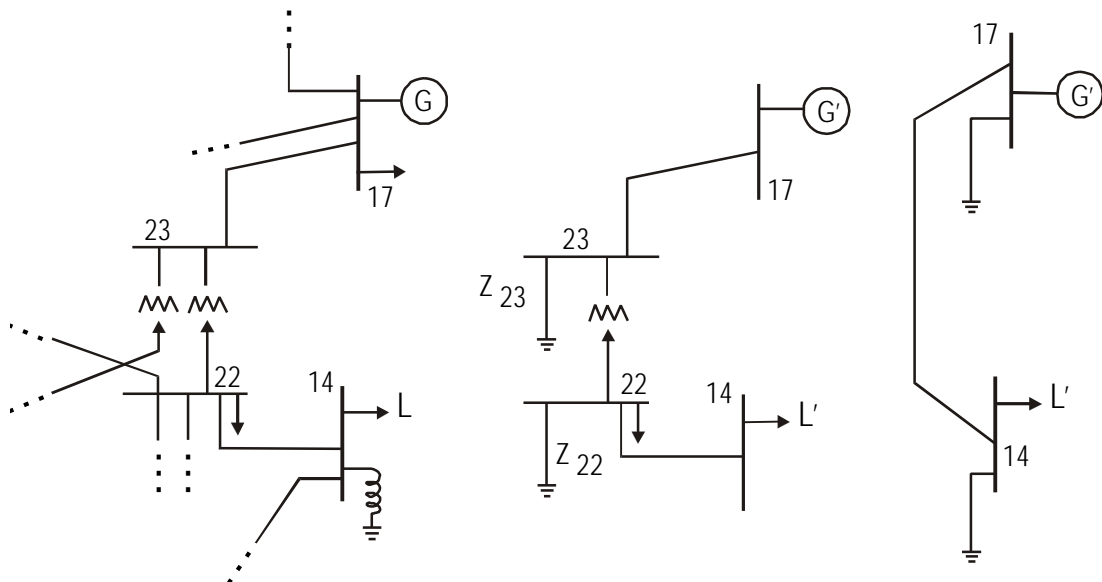


Figura 3.7

Redução de um Caminho de Transmissão a um Equivalente de Duas Barras

3.3 – APLICAÇÃO

O interesse é tentar identificar na rede de transmissão o caminho crítico de transmissão e tentar fazer o respectivo reforço nesse caminho para melhorar as condições de estabilidade de tensão do sistema.

Utiliza-se nos testes desta seção o sistema de 5 barras mostrado na Figura 3.8. Os dados de barra e os de linha do sistema são mostrados na Tabela 3.1.

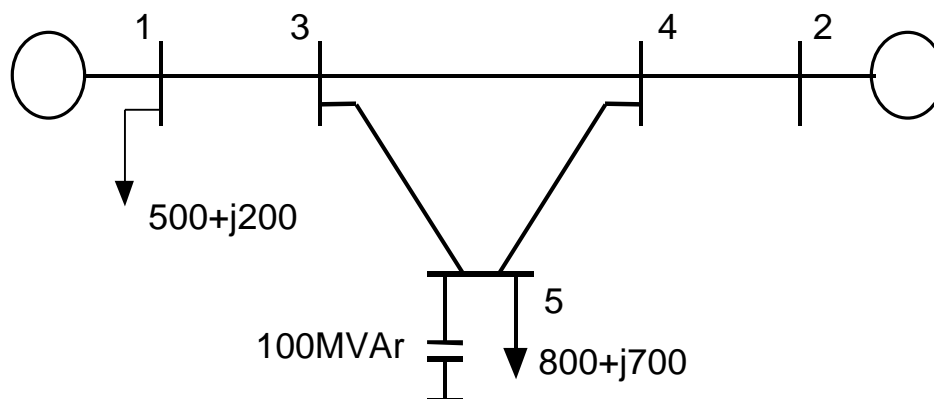


Figura 3.8

Sistema - Teste de 5 Barras

Tabela 3.1 - Dados de Barra e Linha do Sistema - Teste de 5 Barras

Barra		Tensão		Geração		Carga		Shunt
No.	Tipo	V (pu)	θ (graus)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)
1	V θ	1,05	0		-999 +999	500	200	-
2	PV	1,01	-	1	-999 +999	-	-	-
3	PQ	1,00	-	-	-	-	-	-
4	PQ	1,00	-	-	-	-	-	-
5	PQ	1,00	-	-	-	800	700	100
De	Para	Resistência (%)		Reatância (%)		Susceptância (%)		
1	3	0,00		2,00		0,00		
2	4	0,00		2,00		0,00		
3	4	0,00		4,00		0,00		
3	5	0,00		4,00		0,00		
4	5	0,00		4,00		0,00		

A Tabela 3.2 mostra os valores de geração e carga, enquanto que a Tabela 3.3 mostra os fluxos de potência ativa e reativa nos ramos de transmissão (não há perdas ativas).

Tabela 3.2 - Geração e Carga / Caso-Base

Caso	Barra	Tensão	Geração		Carga		Shunt
			P(Mw)	Q(Mvar)	P(Mw)	Q(Mvar)	Q(Mvar)
Base	1	1,05	1299,10	1185,00	500,00	200,00	-
	2	1,01	1,00	697,80	-	-	-
	3	0,88	-	-	-	-	-
	4	0,87	-	-	-	-	-
	5	0,62	-	-	800,00	700,00	38,44

Tabela 3.3 - Fluxos de Potência nas Linhas / Caso-Base

Caso	Fluxo em Linhas										
	F 1_3		F 2_4		F 3_4		F 3_5		F 4_5		Perdas
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	Q
Base	799,0	985,0	1,0	697,8	297,4	31,8	501,2	661,3	298,1	587,5	1020,9

A Tabela 3.4 mostra os resultados da avaliação das condições de estabilidade de tensão. Dos índices $\det[D'] \cdot V$, β e M (Margem de Potência), pode-se observar que a barra 2 se encontra na Região B de operação. Porém, o interesse neste exemplo é analisar a barra 5 de carga, cujos resultados mostram que esta barra praticamente encontra-se na “ponta do nariz”. A margem de potência aparente muito pequena impediria um eventual crescimento de carga nessa barra. Portanto, o próximo passo é determinar os caminhos críticos associados a esta barra.

Tabela 3.4 - Índices de Avaliação da Estabilidade / Caso-Base

Caso	Barra	Tensão	S_i	S_{\max}	Det $[D']^*V$	β	M
Base	1	1,05	12,68	12,70	0	180	0,001
	2	1,01	6,98	21,80	-428	-62	-0,680
	3	0,88	0,00	28,40	809	121	1,000
	4	0,87	0,00	17,00	288	137	1,000
	5	0,62	11,05	12,00	23	168	0,079

3.3.1 - Aplicação da Ferramenta Computacional CaTrans

Quando se estuda o sistema equivalente de duas barras para determinar os caminhos associados a determinada barra, o interesse é comparar o valor atual da tensão na carga, em módulo e ângulo, com valores críticos calculados por (2.11) e (2.12). Portanto, a queda em módulo e a defasagem angular entre a tensão do gerador e a tensão da carga podem ser considerados como o “esforço” da transmissão de potência ativa e reativa entre as duas barras. A responsável pelo esforço é a impedância existente entre a fonte e o sumidouro de potência. A Tabela 3.5 mostra os caminhos associados à barra crítica, calculados pelo programa CaTrans, cuja lógica foi descrita na Seção 3.2.

Tabela 3.5 - Caminhos Associados à Barra de Carga / Caso-Base

Caso Base		Tensão no Gerador		Tensão na Carga		Tensão Crítica na Carga	
		Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo
Caminhos	C_5-3-1	1,05	0,00	0,62	-31,75	0,63	-33,20
	C_5-4-2	1,01	-18,96	0,62	-31,75	0,57	-35,06
	C_5-4-3-1	1,05	0,00	0,62	-31,75	0,99	-26,71

Observando a Tabela 3.5, verifica-se que o caminho crítico é aquele que envolve as barras 5, 4, 3 e 1 (C_5-4-3-1) por estar mais afastado do valor do módulo da tensão crítica na carga. Portanto, é preciso reforçar este caminho por ser o mais carregado e/ou desviar os fluxos para outro caminho.

3.3.2 - Aplicação da Ferramenta Computacional FLUPOT [12]

O FLUPOT é um programa que tem por objetivo calcular um estado de uma rede CA em regime permanente otimizando uma função objetivo e satisfazendo uma série de restrições físicas operacionais. É baseado no método de pontos interiores direto com utilização do algoritmo primal-dual de barreira logarítmica.

Das diversas funções objetivo disponíveis no programa, foi usada neste trabalho a função objetivo “Mínima Transferência de Potência”. Aplica-se esta função objetivo nos ramos do caminho crítico determinado pelo programa CaTrans.

O redespacho de potência ativa foi proibido através da fixação da geração de potência ativa na barra 2. Por consequência, o reforço das condições de carregamento só é possível através da alteração do perfil de tensão.

Tabela 3.6 - Geração e Carga / Caso “Mínima Transferência de Potência” (MTP)

Caso	Barra	Geração		Carga		Shunt
		P(Mw)	Q(Mvar)	P(Mw)	Q(Mvar)	Q(Mvar)
MTP	1	1299,10	993,00	500,00	200,00	-
	2	1,00	311,60	-	-	-
	3	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-
	5	-	-	800,00	700,00	82,81

Analisando-se a rede de transmissão e os fluxos de potência, escolheu-se minimizar o fluxo de potência ativa da barra 3 para a barra 4. As Tabelas 3.6 e 3.7 mostram os resultados da geração, carga e fluxo nas linhas após a ação de controle. Observa-se uma diminuição na geração de potência reativa, e portanto, uma considerável diminuição das perdas reativas na rede, assim como um melhor uso (82,81%) da fonte de potência reativa instalada na barra 5.

Tabela 3.7 - Fluxo em Linhas / Caso “Mínima Transferência de Potência”

Caso	Fluxo em Linhas										
	F 1_3		F 2_4		F 3_4		F 3_5		F 4_5		Perdas
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	Q
MTP	799,0	793,0	1,0	311,6	276,0	104,4	523,0	512,5	277,0	369,7	486,6

A Tabela 3.8 mostra o resultado da avaliação das condições de operação do sistema, após a alteração do perfil de tensão. A forma de se avaliar se essa ação foi bem sucedida ou não, é analisando-se o “Índice de Influência”. No caso, a ação foi bem sucedida especialmente para a barra 5 que praticamente quintuplicou sua margem de potência, como mostrado pelo Índice de Influência na Tabela 3.8, e cujo gráfico é representada na Figura 3.9.

Note-se também que a barra 2 passou a operar na região A com a elevação do perfil de tensão.

Tabela 3.8 - Índices de Avaliação da Estabilidade / Caso “Mínima Transferência de Potência”

Caso	Barra	Tensão	S_i	S_{max}	Det $[D'] \cdot V$	β	M	Π
MTP	1	1,20	11,26	11,30	0	180	0,004	1,950
	2	1,10	3,12	15,80	240	111	0,803	2,181
	3	1,08	0,00	66,60	4437	104	1,000	0,000
	4	1,04	0,00	40,00	1597	105	1,000	0,000
	5	0,91	11,25	22,80	394	126	0,507	5,380

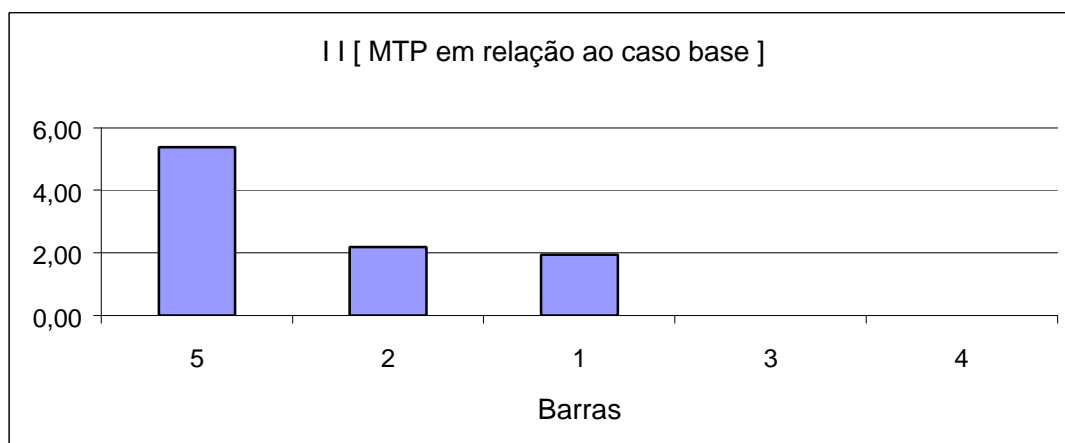


Figura 3.9

Representação Gráfica dos Índices de Influência por Barra

Para conferir a melhoria das condições de operação analisa-se a situação dos caminhos associados à barra de carga após a ação de controle. Pode-se observar na Tabela 3.9 a tensão na barra 5 tem seu módulo superior aos respectivos valores críticos, assim como seu ângulo é menor que os respectivos ângulos críticos.

Tabela 3.9 - Caminhos Associados à Barra de Carga

Caso MTP		Tensão no Gerador		Tensão na Carga		Tensão Crítica na Carga	
		Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo
Caminhos	C_5-3-1	1,20	0,00	0,91	-19,53	0,71	-31,27
	C_5-4-2	1,10	-12,77	0,91	-19,53	0,64	-32,07
	C_5-4-3-1	1,20	0,00	0,91	-19,53	0,79	-26,31

3.4 - CONCLUSÕES

As idéias aqui apresentadas servirão de base para a generalização ao sistema multi-nó dos resultados analíticos derivados para um sistema de duas barras.

Uma vez detectada uma barra de carga crítica, foi mostrada uma metodologia implementada na ferramenta computacional CaTrans para verificar os diferentes caminhos de transmissão radiais entre a barra de carga crítica e cada gerador, identificando-se um ou mais caminhos muito carregados.

O sistema IEEE24-barras foi utilizado para mostrar a metodologia. A eliminação das barras intermediárias dos caminhos de transmissão, são realizadas através do cálculo do circuito equivalente pela técnica conhecida como "redução da rede" utilizada em estudos de estabilidade angular.

Com um sistema simples de 5 barras partiu-se de um ponto de operação onde a carga da barra 5 apresentava-se perto do máximo. Foram identificados três caminhos de transmissão de potência ativa para a barra de carga 5. Um deles era o mais carregado. O programa FLUPOT foi usado para diminuir o fluxo de potência ativa nesse caminho. Como o redespacho de potência ativa não foi permitido, o programa minimizou o fluxo através da alteração do perfil de tensão. O resultado obtido foi excelente: a distância entre o novo ponto de operação e o novo máximo aumentou consideravelmente. Portanto, a carga da barra 5 pode continuar aumentando.

O resultado promissor deste teste numérico incentivou a aplicação da ferramenta CaTrans em sistemas de grande porte. Neste capítulo, o ramo a ter seu fluxo de potência reduzido foi escolhido com base na "experiência com o sistema". No Capítulo 4 esse ramo será determinado analiticamente.

CAPÍTULO 4

REFORÇO DAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE DE TENSÃO EM BARRAS DE CARGA

A metodologia para reforçar as condições de barras de carga ilustrada no Capítulo 3, é aplicada no sistema S35, utilizado no SAGE do CEPEL e posteriormente aplicada no sistema IEEE 24.

4.1 - APLICAÇÃO NO SISTEMA S35 DO SAGE

Apresenta-se uma metodologia para reforçar as condições de estabilidade de barras de carga do sistema S35, utilizado no SAGE do CEPEL para fins de testes e demonstração e mostrado na Figura 2.14. O objetivo é aumentar a margem de potência da barra de carga partindo do ponto de colapso S35_A06 ilustrado na Figura 2.15 e mostrado no Capítulo 2.

Essa tarefa envolve a utilização dos programas ESTABTEN que faz a avaliação das condições nodais de carregamento, CaTrans que determina os caminhos de transmissão críticos, e FLUPOT que minimiza o fluxo de potência em ramos de transmissão através do redespacho de potência reativa e/ou ativa.

Os resultados da avaliação das condições de estabilidade de tensão pelo programa ESTABTEN no ponto de operação S35_A06 são mostrados na Tabela 4.1. A barra 29 é a pior do ponto de vista de margem de potência: tem uma carga de 34,7 MVA e o programa indica uma máxima carga de 35,7 MVA. O ângulo β vale 178,5° para um máximo de 180°.

A barra 29 provavelmente seria a barra crítica por que a curva da Figura 2.15 corresponde a sucessivos aumentos de carga somente nesta barra. Portanto, a barra 29 é a que terá sua margem aumentada.

Tabela 4.1 - Relatório de Estabilidade de Tensão do Caso-Base S35_A06

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLM CREM; ESTABTEN: EXET

Barra	Numero-Nome	Tensão	Equip	Tipo	Si	Smax	detD`*v	β
1	BUS--001--20	1,030	GL	1	34,815	115,9	-12224,2	-8,1
2	BUS--002-500	1,012	P	0	0,000	31,6	995,4	166,1
3	BUS--003-500	1,010	P	0	0,000	30,7	939,5	166,0
4	BUS--004-750	0,951	R	0	6,279	23,3	503,1	165,8
5	BUS--005-750	0,916	R	0	1,374	15,5	237,4	177,9
6	BUS--006-750	0,915	R	0	1,373	15,5	238,0	177,9
7	BUS--007-750	0,932	R	0	3,076	13,0	159,3	172,3
8	BUS--008-750	0,986	R	0	3,255	36,5	1323,0	172,6
9	BUS--009-750	0,987	R	0	3,257	36,5	1323,9	172,6
10	BUS--010-750	0,906	R	0	5,983	11,0	86,1	176,4
11	BUS--011-750	0,921	P	0	0,000	18,8	351,6	175,0
12	BUS--012-750	0,922	P	0	0,000	18,7	351,4	175,0
13	BUS--013-750	0,882	R	0	2,911	9,5	81,6	178,3
14	BUS--014-500	0,966	P	0	0,000	10,7	115,1	178,5
15	BUS--015-500	0,876	P	0	0,000	14,4	208,0	169,7
16	BUS--016-500	0,879	P	0	0,000	14,7	215,0	169,4
17	BUS--017-500	0,999	L	0	0,044	56,2	3163,4	142,5
18	BUS--018-500	1,037	P	0	0,000	66,1	4364,8	142,2
19	BUS--019-500	1,050	L	0	14,998	58,5	3202,2	147,3
20	BUS--020-500	1,052	P	0	0,000	57,5	3305,3	146,3
21	BUS--021-500	1,074	LR	0	3,223	101,7	10324,1	122,0
22	BUS--022-500	1,075	LR	0	2,151	59,6	3541,7	125,3
23	BUS--023-500	1,066	LR	0	7,069	35,6	1214,1	121,7
24	BUS--024-500	1,037	P	0	0,000	19,6	383,4	178,9
25	BUS--025-500	1,093	L	0	66,017	81,4	2259,6	178,9
26	BUS--026-500	1,100	G	1	41,143	62,3	-2182,4	-77,1
27	BUS--027-500	0,991	P	0	0,000	12,7	161,9	178,5
28	BUS--028-345	0,869	P	0	0,000	8,2	67,8	178,4
29	BUS--029-345	0,878	L	0	34,707	35,7	67,7	178,5
30	BUS--030-345	0,929	P	0	0,000	10,5	110,8	168,1
31	BUS--031--20	1,007	GL	1	13,259	28,5	-634,5	-39,1
32	BUS--032--20	1,058	G	1	12,690	25,8	502,8	122,9
33	BUS--033--20	1,059	G	1	12,918	14,4	-40,8	-155,2
34	BUS--034--20	1,049	G	2	14,973	15,0	0,0	180,0

Com os aumentos de carga na barra 29 e os acréscimos nas perdas de transmissão foram atendidos pelo gerador swing da barra 34, provavelmente os caminhos críticos de transmissão devem conectar a barra de carga 29 ao gerador swing 34.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados do programa CaTrans com a determinação dos caminhos críticos de transmissão de potência para a barra crítica 29. Somente os seis piores são mostrados; o número em negrito mais à direita ordena os caminhos, a partir do pior. Essa condição é definida pela distância em termos de módulo e ângulo da tensão na barra 29 do ponto de operação em análise ao ponto de máxima transmissão. Na Tabela 4.2 observa-se que a tensão na barra 29 encontra-se na Região B para todos os caminhos críticos mostrados. Essa condição é indicada pelo sinal negativo no valor da distância.

Tabela 4.2 - Determinação dos Caminhos Críticos de Transmissão para o Caso-Base S35_A06

***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	29	28	30	16	17	18	32		
				MÓDULO		ÂNGULO				
	TENSÃO NO GERADOR			1,0580		16,7149				
	TENSÃO NA CARGA			,8829		-62,7739				
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA			2,0315		-1,7075				
				DELTA V		DELTA THETA		DISTÂNCIA		
	DIST, CRÍTICA			-1,1485		-1,0658		-1,5669		4
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	29	28	30	16	17	31			
				MÓDULO		ÂNGULO				
	TENSÃO NO GERADOR			1,0070		18,1189				
	TENSÃO NA CARGA			,8829		-62,7739				
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA			1,8863		-4,1377				
				DELTA V		DELTA THETA		DISTÂNCIA		
	DIST, CRÍTICA			-1,0034		-1,0234		-1,4332		6
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	29	28	30	16	17	21	34		
				MÓDULO		ÂNGULO				
	TENSÃO NO GERADOR			1,0490		22,3000				
	TENSÃO NA CARGA			,8829		-62,7739				
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA			2,3885		5,2298				
				DELTA V		DELTA THETA		DISTÂNCIA		
	DIST, CRÍTICA			-1,5056		-1,1869		-1,9171		2
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	29	28	30	16	19	18	32		
				MÓDULO		ÂNGULO				
	TENSÃO NO GERADOR			1,0580		16,7149				
	TENSÃO NA CARGA			,8829		-62,7739				
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA			2,0906		-,7200				
				DELTA V		DELTA THETA		DISTÂNCIA		
	DIST, CRÍTICA			-1,2077		-1,0830		-1,6222		3
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	29	28	30	16	19	22	21	34	
				MÓDULO		ÂNGULO				
	TENSÃO NO GERADOR			1,0490		22,3000				
	TENSÃO NA CARGA			,8829		-62,7739				
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA			2,4792		9,3164				
				DELTA V		DELTA THETA		DISTÂNCIA		
	DIST, CRÍTICA			-1,5963		-1,2582		-2,0325	Pior	1
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	29	28	30	16	19	20	33		
				MÓDULO		ÂNGULO				
	TENSÃO NO GERADOR			1,0590		12,7291				
	TENSÃO NA CARGA			,8829		-62,7739				
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA			1,9102		-3,5530				
				DELTA V		DELTA THETA		DISTÂNCIA		
	DIST, CRÍTICA			-1,0273		-1,0336		-1,4573		5

4.1.1 - Aumento da Margem de Potência da Barra de Carga

O primeiro teste analisa três possibilidades de reforço das condições de estabilidade de tensão do sistema:

1. Minimizando o fluxo de potência ativa em um ramo pertencente somente ao pior caminho de transmissão. Por consequência, o ramo escolhido fica afastado da barra de carga em análise.
2. Minimizando o fluxo de potência ativa simultaneamente em seis ramos, cada um pertencendo aos seis piores caminhos. Por consequência, os ramos escolhidos ficam afastados da barra de carga em análise. O número seis é uma restrição do programa FLUPOT.
3. Minimizando o fluxo de potência ativa em um ramo comum aos piores caminhos. Por consequência, o ramo escolhido é próximo à barra de carga em análise.

4.1.1.1 - Minimização do Fluxo de Potência Ativa em um Ramo Pertencente Somente ao Pior Caminho de Transmissão

A Tabela 4.2 indica que o caminho crítico é aquele que envolve as barras 34, 21, 22, 19, 16, 30, 28, 29 por apresentar distância negativa e de maior módulo. Portanto, é preciso desviar os fluxos de potência para outros caminhos. Analisando-se o diagrama unifilar do sistema da Figura 2.14, e usando a política de selecionar um ramo pertencente somente ao pior caminho de transmissão, percebe-se que minimizando o fluxo de potência ativa da barra 21 para a barra 22 o objetivo pode ser alcançado.

Pode-se minimizar o fluxo através do redespacho de potência reativa e/ou ativa. No caso do redespacho de potência ativa deve-se limitar as possíveis variações de geração ativa para evitar que o fluxo de potência no ramo seja "totalmente minimizado" chegando até a inverter o sentido. Nesse caso, provavelmente, um outro ramo ficaria muito carregado. Essa limitação

nas variações é conseguida através da imposição de limites de geração fictícios ao redor do valor gerado no ponto de operação analisado, mostrado na Tabela 4.3.

A partir do Caso-Base S35_A06 são analisados 5 casos de variação na geração de potência ativa:

- Caso 1: 0 % de variação na geração de potência ativa nas barras PV
- Caso 2: ± 5 % de variação na geração de potência ativa nas barras PV
- Caso 3: ± 10 % de variação na geração de potência ativa nas barras PV
- Caso 4: ± 15 % de variação na geração de potência ativa nas barras PV
- Caso 5: ± 20 % de variação na geração de potência ativa nas barras PV

Obviamente, o Caso 1 corresponde ao redespacho de potência reativa somente.

Tabela 4.3 - Gerações Ativa e Reativa

Caso-Base	Barra	P (MW)	Q (MVar)
Geração	01	3300,0	1133,0
	26	3879,0	1371,5
	31	1320,0	-149,9
	32	1200,0	412,9
	33	1200,0	478,3
	34	1445,4	391,0
Carga	29	3425,0	561,4

A Tabela 4.4 mostra o resultado das condições da barra de carga 29 avaliadas pelo programa ESTABTEN após a atuação do programa FLUPOT, para os 5 casos mencionados. O redespacho de potência reativa somente, Caso 1, causou um aumento substancial na margem, por que S_{\max} aumentou de 35,7 para 63,1 MVA. O redespacho de potência ativa causou pequenos aumentos, de 63,1 para 65,2 MVA no Caso 2, e de 63,1 para 65,7 MVA no Caso 3.

Quando foi permitida uma variação de 15 e 20% nas potências ativas geradas, a margem diminuiu, por que S_{\max} diminuiu de 63,1 para 50,6 MVA no Caso 4 e de 63,1 para 48,0 MVA no Caso 5.

Tabela 4.4 - Avaliação da Margem de Potência da Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 21-22 *

Caso	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det [D'] \cdot V$	β
S35_A06	0,878	34,707	35,7	68	179
Caso 1.... 0%	1,108	34,707	63,1	2777	132
Caso 2.... $\pm 5\%$	1,113	34,707	65,2	3044	129
Caso 3.... $\pm 10\%$	1,112	34,707	65,7	3112	126
Caso 4.... $\pm 15\%$	0,973	34,707	50,6	1360	145
Caso 5.... $\pm 20\%$	0,942	34,707	48,0	1098	151

* para alcançar o objetivo de minimizar o fluxo da barra 21 para a barra 22, utiliza-se a função objetivo “Máxima Transferência de Potência” aplicada ao ramo 22-21.

4.1.1.2 - Minimização do Fluxo de Potência Ativa Simultaneamente em Seis Ramos

A Tabela 4.2 indica seis caminhos críticos. Analisando-se o diagrama unifilar do sistema da Figura 2.14, e usando a política de selecionar seis ramos pertencentes cada um a um caminho de transmissão, escolheu-se minimizar o fluxo de potência ativa nos seguintes ramos: 18-17, 18-19, 20-19 (1), 20-19 (2), 21-17 e 21-22.

A partir do ponto de operação do Caso-Base S35_A06, o programa FLUPOT é usado com 8 diferentes limites de geração de potência ativa em torno do valor gerado mostrado na Tabela 4.3: 0 %, ± 5 %, ± 10 %, ± 15 %, ± 20 %, ± 25 %, ± 30 %, ± 50 %.

A Tabela 4.5 mostra as margens da barra 29 avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar os fluxos nos 6 ramos para os 8 limites de geração.

O redespacho de potência reativa somente, Caso 1, causou um aumento substancial na margem, por que S_{\max} aumentou de 35,7 para 66,3 MVA. O redespacho de potência ativa causou pequenos aumentos, de 66,3 para 67,3 MVA no Caso 2, de 66,3 para 67,8 MVA no Caso 3, e de 66,3 para 68,3 no Caso 4. Quando foi permitida uma variação de 20, 25, 30 e 50% nas potências ativas geradas, a margem sempre diminuiu (S_{\max} sempre diminuiu).

Tabela 4.5 - Avaliação da Margem de Potência da Barra 29 após Minimização do Fluxo dos Ramos 18-17, 18-19, 20-19 (1), 20-19 (2), 21-17 e 21-22

Caso	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det [D'] \cdot V$	β
S35_A06	0,878	34,707	35,7	68	179
Caso 1.... 0%	1,110	34,707	66,3	3191	131
Caso 2.... $\pm 5\%$	1,111	34,707	67,3	3320	129
Caso 3.... $\pm 10\%$	1,109	34,707	67,8	3386	126
Caso 4.... $\pm 15\%$	1,112	34,707	68,3	3455	123
Caso 5.... $\pm 20\%$	0,963	34,707	51,4	1442	145
Caso 6.... $\pm 25\%$	0,930	34,707	47,7	1074	152
Caso 7.... $\pm 30\%$	0,924	34,707	47,8	1083	151
Caso 8.... $\pm 50\%$	0,915	34,707	48,8	1173	146

4.1.1.3 - Minimização do Fluxo de Potência Ativa em um Ramo Comum aos Piores Caminhos

A Tabela 4.2 indica seis caminhos críticos. Analisando-se o diagrama unifilar do sistema da Figura 2.14, e usando a política de selecionar um ramo pertencente a todos os seis caminhos críticos de transmissão, escolheu-se minimizar o fluxo de potência ativa no ramo 30-28.

A partir do ponto de operação do Caso-Base S35_A06, o programa FLUPOT é usado com 8 diferentes limites de geração de potência ativa em torno do valor gerado mostrado na Tabela 4.3: 0 %, ± 5 %, ± 10 %, ± 15 %, ± 20 %, ± 25 %, ± 30 %, ± 50 %.

A Tabela 4.6 mostra as margens da barra 29 avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo no ramo 30-28 para os 8 limites de geração.

O redespacho de potência reativa somente, Caso 1, causou um aumento substancial na margem, por que S_{\max} aumentou de 35,7 para 50,5 MVA. O redespacho de potência ativa causou um aumento máximo de 50,5 para 61,4 MVA no Caso 7 quando foi permitida uma variação de 30% nas potências ativas geradas.

Tabela 4.6 - Avaliação da Margem de Potência da Barra 29 após Minimização do Fluxo no Ramo 30-28

Caso	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det [D'] \cdot V$	β
S35_A06	0,878	34,707	35,7	68	179
Caso 1.... 0%	1,055	34,707	50,5	1343	148
Caso 2.... $\pm 5\%$	1,063	34,707	52,1	1512	143
Caso 3.... $\pm 10\%$	1,077	34,707	55,4	1860	135
Caso 4.... $\pm 15\%$	1,087	34,707	57,3	2078	130
Caso 5.... $\pm 20\%$	1,096	34,707	58,9	2262	125
Caso 6.... $\pm 25\%$	1,103	34,707	60,4	2444	121
Caso 7.... $\pm 30\%$	1,108	34,707	61,4	2579	118
Caso 8.... $\pm 50\%$	1,091	34,707	60,9	2499	113

4.1.1.4 - Comparação e Conclusão

Partiu-se do ponto de operação do Caso-Base S35_A06. O programa computacional ESTABTEN é aplicado para avaliar-se as condições de estabilidade do sistema. Os resultados indicam que a carga da barra 29 encontra-se praticamente no máximo. Usando-se o programa CaTrans, foram identificados os caminhos críticos associados à barra 29. O programa FLUPOT foi usado para diminuir o fluxo de potência ativa em ramos destes caminhos.

Na Seção 4.1.1.1, considerando-se o reforço em ramo pertencente exclusivamente ao pior caminho (ramo afastado da barra de carga em análise), obteve-se um incremento na máxima injeção de potência aparente na barra 29 de 84% em relação ao Caso-Base S35_A06 (Tabela 4.4). Somente com o redespacho de potência reativa o ganho foi de 77%.

Na Seção 4.1.1.2, considerando-se o reforço em seis ramos pertencentes a seis caminhos críticos diferentes (ramos afastados da barra 29), obteve-se um incremento na máxima injeção de potência aparente na barra 29 de 91% em relação ao Caso-Base S35_A06 (Tabela 4.5). Somente com o redespacho de potência reativa o ganho foi de 86%.

Na Seção 4.1.1.3, considerando-se o reforço num único ramo comum aos piores caminhos (ramo próximo à barra 29), obteve-se um incremento na máxima injeção de potência aparente S_{\max} na barra 29 de 72% em relação ao Caso-Base S35_A06 (Tabela 4.6). Somente com o redespacho de potência reativa o ganho foi de 42%.

Os valores obtidos parecem estar de acordo com o esperado: i) minimizar o fluxo de potência ativa em um único ramo comum a caminhos diferentes, e portanto perto da carga, somente com redespacho de potência reativa implicou no menor incremento de S_{\max} (42%), ii) minimizar o fluxo de potência ativa em seis ramos pertencentes a seis caminhos críticos diferentes, e portanto afastados da carga, através do despacho de potência ativa e reativa implicou no maior ganho (91%).

Qualquer que tenha sido a estratégia, tanto da escolha dos ramos, quanto do redespacho usado, pode-se considerar que conseguiu-se um aumento importante na margem de carga na barra crítica.

Uma outra forma de analisar o resultado das ações de reforço seria examinar os Índices de Influência que traduzem a margem pós-ação em relação à margem original do Caso-Base S35_A06 em pu. A Tabela 4.7 mostra a margem no ponto de operação S35_A06 antes das ações de controle e as margens após essas ações para as três escolhas de ramos e para as duas possibilidades de redespacho. Com essas duas margens, antes e pós-controle, calcula-se o Índice de Influência. Os valores variam de 10,24 até 16,68. São valores muito elevados por

que a margem no ponto de operação pré-controle é muito pequena (0,03). A Figura 4.1 ilustra graficamente os Índices de Influência obtidos com as seis possibilidades de controle.

Tabela 4.7 - Margens e Índices de Influência para as Estratégias Consideradas

Caso		Det [D']*V	S_i	S_{\max}	M	II
S35_A06		68	34,707	35,7	0,03	---
Seção 4.1.1.1 Ramo único de um caminho	0%	2777	34,707	63,1	0,45	15,18
	$\pm 10\%$	3112	34,707	65,7	0,47	15,96
Seção 4.1.1.2 6 ramos de caminhos distintos	0%	3191	34,707	66,3	0,48	16,13
	$\pm 15\%$	3455	34,707	68,3	0,49	16,68
Seção 4.1.1.3 Ramo único comum	0%	1343	34,707	50,5	0,31	10,24
	$\pm 30\%$	2579	34,707	61,4	0,43	14,63

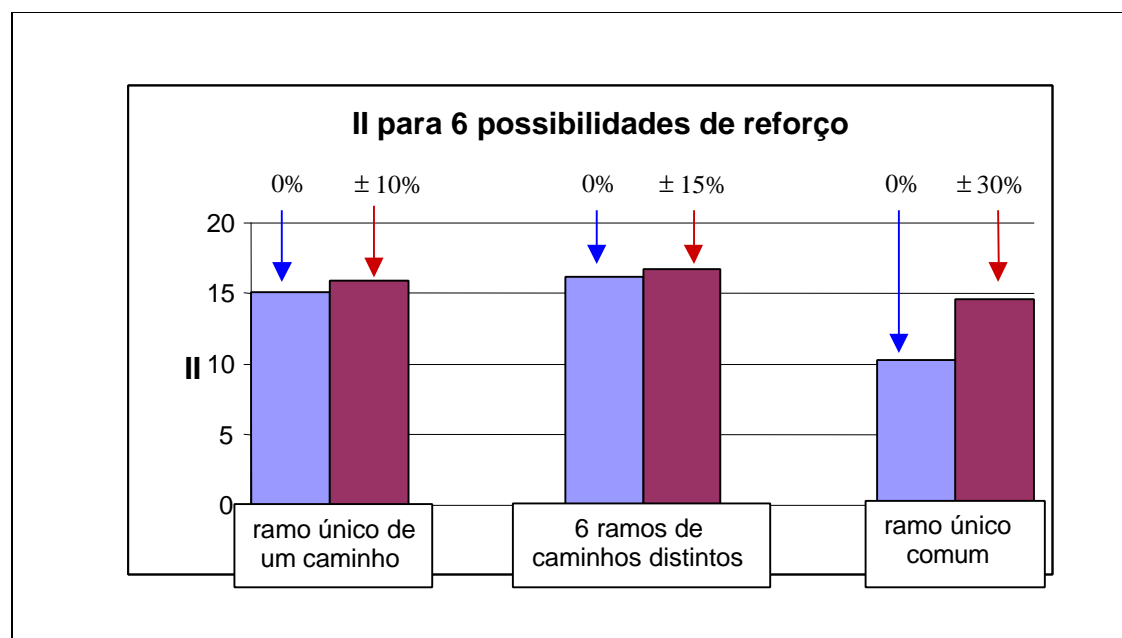


Figura 4.1

Representação Gráfica dos Índices de Influência para as Estratégias de Reforço Consideradas

4.1.2 - Estudo do Máximo Carregamento da Barra

Partindo do Caso-Base S35_A06, o objetivo é comparar o resultado do máximo carregamento na barra 29 calculado de duas maneiras:

- i) usando diretamente a função objetivo “Máximo Carregamento” [CMXC] do programa FLUPOT,
- ii) aplicando primeiramente a função objetivo “Mínima Transferência de Potência Ativa” [MTP] do FLUPOT em um ramo do caminho crítico determinado pelo programa CaTrans, para depois encontrar o máximo carregamento através de sucessivos aumentos de carga usando a ferramenta computacional ANAREDE.

A Tabela 4.3 mostra os valores de geração e de carga da barra 29 no Caso-Base, enquanto que a Tabela 4.8 mostra os índices de avaliação da estabilidade de tensão na barra 29

Tabela 4.8 - Índices de Avaliação da Estabilidade da Barra 29 / Caso-Base

Barra	V	S_i	S_{\max}	$\det [D'] \cdot V$	β
29	0,878	34,707	35,7	67,7	178

4.1.2.1 - Máximo Carregamento Considerando Somente Redespacho de Potência Reativa

Neste teste os limites mínimo e máximo de geração de potência ativa são iguais aos valores gerados para impedir o redespacho ativo. Só é permitida a alteração do perfil de tensão e o redespacho de potência reativa nas barras de geração.

A Tabela 4.9 mostra os valores de geração e da carga após a maximização do carregamento na barra 29 pelo programa FLUPOT. A carga ativa passou de 3425,0 para 3662,6 MW, o que

equiivale a 6,94% de incremento. Deve-se notar que nos dois casos, pré- e pós-otimização, os valores de geração ativa são idênticos e, portanto, o aumento da carga foi devido exclusivamente à diminuição das perdas ativas na rede (237,6 MW), esta por sua vez, obtida pelo redespacho reativo.

A Tabela 4.10 fornece resultados da avaliação das condições de estabilidade de tensão para a condição de máximo carregamento da barra 29.

Tabela 4.9 - Geração e Carga no Máximo Carregamento da Barra 29 realizado diretamente pelo programa FLUPOT

Redespacho Reativo	Barra	P (MW)	Q (MVar)
Geração	01	3300,0	-297,0
	26	3879,0	-968,0
	31	1320,0	1,0
	32	1200,0	1,0
	33	1200,0	-292,0
	34	1445,6	-100,0
Carga	29	3662,6	600,4

Tabela 4.10 - Índices de Avaliação na Barra 29 / Carga da Tabela 4.9

Barra	V	S_i	S_{\max}	$\det [D'] \cdot V$	β
29	1,098	37,119	64,6	2800	136

A Tabela 4.11 mostra os valores de geração e carga após a minimização da transferência de potência no ramo 21-22 (o mesmo da Seção 4.1.1.1) através do redespacho de potência reativa e alteração do perfil de tensão. A Tabela 4.12 fornece os resultados da avaliação das

condições de estabilidade de tensão da barra 29 no ponto de operação resultante. Os resultados obtidos indicam que a distância entre o novo ponto de operação e o novo máximo aumentou. Como a carga permaneceu constante e a geração da barra swing 34 caiu de 1445,6 para 1178,8 MW, o aumento da margem de potência na barra 29 implicou em uma diminuição das perdas ativas na rede de 266,8 MW.

Tabela 4.11 - Geração e Carga Após a Minimização do Fluxo no Ramo 22-21

Redespacho Reativo	Barra	P (MW)	Q (MVar)
Geração	01	3300,0	-236,8
	26	3879,0	-1093,4
	31	1320,0	384,3
	32	1200,0	582,4
	33	1200,0	-966,7
	34	1178,8	-416,4
Carga	29	3425,0	561,4

Tabela 4.12 - Índices de Avaliação na Barra 29

Barra	V	S_i	S_{\max}	$\det [D'] \cdot V$	β
29	1,108	34,707	63,1	2777	132

A Tabela 4.13 mostra os valores de geração e carga do ponto de operação correspondente ao máximo carregamento na barra 29 obtido usando-se o programa de fluxo de carga do ANAREDE com sucessivos aumentos de carga. Conseguiu-se um carregamento máximo de 3644 MW, o que equivale a 6,41% de incremento. A Tabela 4.14 fornece resultados da avaliação das condições de estabilidade de tensão para a condição de máximo carregamento da barra 29.

Tabela 4.13 - Geração e Carga no Máximo Carregamento da Barra 29 após Sucessivos Aumentos de Carga (o fluxo de carga diverge para cargas maiores)

Redespacho Reativo	Barra	P (MW)	Q (MVar)
Geração	01	3300,0	-9,4
	26	3879,0	-725,4
	31	1320,0	412,0
	32	1200,0	656,0
	33	1200,0	-888,9
	34	1445,0	-302,2
Carga	29	3644,0	596,8

Tabela 4.14 - Índices de Avaliação da Barra 29 / Carga da Tabela 4.13

Barra	V	S_i	S_{max}	$\det [D'] \cdot V$	β
29	1,089	36,925	58,9	2105	143

4.1.2.2 - Máximo Carregamento Considerando Redespacho de Potência Ativa e Reativa

Neste teste permite-se a alteração do perfil de tensão e o redespacho de potência ativa e reativa nas barras de geração, (exceto na geração ativa da barra fictícia 26). A Tabela 4.15 mostra os valores de geração e carga após a maximização do carregamento na barra 29. Conseguiu-se um carregamento máximo de 4787,1 MW, o que equivale a 39,77% de incremento. A Tabela 4.16 fornece resultados da avaliação das condições de estabilidade de tensão para a condição de máximo carregamento da barra 29.

Tabela 4.15 - Geração e Carga no Máximo Carregamento da Barra 29 realizado diretamente pelo programa FLUPOT

Redespacho Ativo e Reativo	Barra	P (MW)	Q (MVar)
Geração	01	4263,4	1148,9
	26	3879,0	1000,9
	31	1413,8	55,5
	32	1254,3	324,4
	33	1414,8	389,0
	34	1494,3	-179,2
Carga	29	4787,1	784,7

Tabela 4.16 - Índices de Avaliação da Barra 29 / Carga da Tabela 4.15

Barra	V	S_i	S_{\max}	$\det [D'] \cdot V$	β
29	1,002	48,509	57,4	937	165

O ponto de operação de partida para o processo seqüencial é aquele do Caso 3 da Tabela 4.4 da Seção 4.1.1.1, que é o ponto de operação do Caso-Base S35_A06 após minimização do fluxo de potência entre as barras 21 e 22 com variações de geração ativa na faixa de $\pm 10\%$.

A Tabela 4.17 mostra sucessivos aumentos de carga na barra 29, com ângulo do fator de potência mantida em $9,3^\circ$, até a não-convergência do algoritmo de fluxo de potência. A Tabela 4.18 mostra os índices de estabilidade de tensão.

Nesta etapa foi possível um ganho no carregamento de potência aparente na barra 29 de 18,12%. Observa-se na Tabela 4.18 que o último ponto para o qual o algoritmo de fluxo de carga convergiu ainda está a uma certa distância do ponto de margem nula ($S_i = 41,0$ e $S_{\max} = 58,8$ pu).

Tabela 4.17 - Carga da Barra 29 até a Não-Convergência do Fluxo de Carga

Caso	Carga na Barra 29		
	MVA	MW	MVAr
S35_A06.... $\pm 10\%$	3471	3425	561,1
S35_B01	3700	3651	597,9
S35_B02	4000	3947	646,4
S35_B03	4100	4046	663,3
S35_B04 Não Convergente	4115	4061	665,0

Tabela 4.18 - Índices de Avaliação na Barra 29 / Cargas da Tabela 4.17

Caso	Tensão	S_i	S_{\max}	Det [D']*V	β
S35_A06.... $\pm 10\%$	1,112	34,707	65,7	3112	125
S35_B01	1,111	36,996	64,1	2741	132
S35_B02	1,108	39,996	61,1	2135	141
S35_B03	1,106	41,000	58,8	1780	147

O processo de reforço da estabilidade de tensão com aumento da margem, seguido de aumento da carga, pode ser repetido. O ponto de operação é o último obtido: S35-B03.

Supõe-se que a carga da barra 29 está perto do máximo e determina-se o caminho crítico usando o programa CaTrans. O resultado é mostrado na Tabela 4.19. Dos resultados da tabela e seguindo a diretriz da Seção 4.1.1.1, escolhe-se minimizar o fluxo de potência ativa da barra 21 para a barra 17.

São analisados 5 casos de variação fictícia dos limites de geração ativa ao redor da geração do caso S35_B03: 0 %, ± 5 %, ± 10 %, ± 15 %, ± 20 %. A Tabela 4.20 mostra os índices de

estabilidade de tensão nos cinco pontos de operação resultantes da minimização do fluxo entre as barras 21 e 17, um para cada limite de geração.

Tabela 4.19 - Caminhos Críticos de Transmissão no Ponto de Operação S35_B03

***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	29	28	30	16	17	18	32	
					MÓDULO		ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR				1,0890		23,9499		
	TENSÃO NA CARGA				1,1056		-37,7428		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA				2,6727		23,6268		
					DELTA V		DELTA THETA		DISTÂNCIA
	DIST, CRÍTICA				-1,5671		-1,0711		-1,8982
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	29	28	30	16	17	31		
					MÓDULO		ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR				1,0600		24,6251		
	TENSÃO NA CARGA				1,1056		-37,7428		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA				2,4542		20,7495		
					DELTA V		DELTA THETA		DISTÂNCIA
	DIST, CRÍTICA				-1,3485		-1,0209		-1,6914
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	29	28	30	16	17	21	34	
					MÓDULO		ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR				,9540		22,3000		
	TENSÃO NA CARGA				1,1056		-37,7428		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA				3,2220		31,3137		
					DELTA V		DELTA THETA		DISTÂNCIA
	DIST, CRÍTICA				-2,1164		-1,2053		-2,4355
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	29	28	30	16	19	18	32	
					MÓDULO		ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR				1,0890		23,9499		
	TENSÃO NA CARGA				1,1056		-37,7428		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA				2,7311		24,4847		
					DELTA V		DELTA THETA		DISTÂNCIA
	DIST, CRÍTICA				-1,6255		-1,0861		-1,9549
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	29	28	30	16	19	22	21	34
					MÓDULO		ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR				,9540		22,3000		
	TENSÃO NA CARGA				1,1056		-37,7428		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA				3,1773		34,2407		
					DELTA V		DELTA THETA		DISTÂNCIA
	DIST, CRÍTICA				-2,0717		-1,2564		-2,4229
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	29	28	30	16	19	20	33	
					MÓDULO		ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR				1,0200		20,9401		
	TENSÃO NA CARGA				1,1056		-37,7428		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA				2,4927		21,5668		
					DELTA V		DELTA THETA		DISTÂNCIA
	DIST, CRÍTICA				-1,3870		-1,0351		-1,7307

Da Tabela 4.20, o melhor ponto de operação seria o do Caso 2, onde obteve-se a maior margem ($S_{\max} = 64,2$ pu). A partir deste ponto de operação aumenta-se a carga na barra 29, conforme mostrado na Tabela 4.21.

Tabela 4.20 - Avaliação da Margem de Potência da Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 21-17 através do Redespacho Ativo e Reativo

Caso	Tensão	S_i	S_{\max}	Det [D']*V	β
S35_B03	1,106	41,000	58,8	1780	147
Caso 1.... 0%	1,127	41,000	62,6	2241	143
Caso 2.... $\pm 5\%$	1,133	41,000	64,2	2441	139
Caso 3.... $\pm 10\%$	1,090	41,000	59,0	1801	146
Caso 4.... $\pm 15\%$	1,070	41,000	57,8	1658	147
Caso 5.... $\pm 20\%$	1,056	41,000	57,5	1629	146

Tabela 4.21 - Carga na Barra 29 até a Não-Convergência do Fluxo de Carga

Caso	Carga na Barra 29		
	MVA	MW	MVAr
S35_B03.... $\pm 5\%$	4100	4061	665,0
S35_C01	4130	4076	667,4
S35_C02	4155	4100	671,5
S35_C03	4160	4105	672,3
S35_C04	4165	4110	673,1
Não Convergente			

A Tabela 4.22 mostra os resultados das condições de estabilidade de tensão da barra 29 para as cargas considerados na Tabela 4.21.

Nesta segunda etapa foi possível um ganho no carregamento de potência aparente na barra 29 de somente 1,46%.

Tabela 4.22 - Índices de Avaliação na Barra 29 / Cargas da Tabela 4.21

Caso	Tensão	S_i	S_{\max}	Det [D']*V	β
S35_B03.... $\pm 5\%$	1,133	41,000	64,2	2441	139
S35_C01	1,131	41,303	63,8	2361	140
S35_C02	1,129	41,546	63,3	2287	141
S35_C03	1,129	41,597	63,2	2268	142

O procedimento descrito na seção anterior foi repetido outras 10 vezes. A Tabela 4.23 mostra os valores de geração e carga do ponto de operação correspondente ao máximo carregamento na barra 29 obtido usando-se o programa de fluxo de carga do ANAREDE com sucessivos aumentos de carga. Conseguiu-se um carregamento máximo de 4556 MW, o que equivale a 33% de incremento. A Tabela 4.24 fornece resultados da avaliação das condições de estabilidade de tensão para a condição de máximo carregamento da barra 29.

Tabela 4.23 - Geração e Carga no Máximo Carregamento da Barra 29 após Sucessivos Aumentos de Carga

Redespacho Ativo e Reativo	Barra	P (MW)	Q (MVar)
Geração	01	3500	1071
	26	3879	275
	31	1111	409
	32	1010	-764
	33	1846	-952
	34	1369	408
Carga	29	4556	747

Tabela 4.24 - Índices de Avaliação da Barra 29 / Carga da Tabela 4.23

Barra	V	S_i	S_{\max}	$\det [D'] \cdot V$	β
29	1,107	46,197	66,9	1105	135

4.1.2.3 - Comparações e Conclusões

No teste da Seção 4.1.2.1 foram mostradas duas maneiras de aumentar o carregamento da barra 29 considerando somente o redespacho de potência reativa nas barras de geração :

- i) aplicando-se diretamente a função objetivo de “Máximo Carregamento” do FLUPOT, foi possível um incremento de carga na barra 29 de 6,94%.
- ii) calculando inicialmente a “Mínima Transferência de Potência” no ramo 21-22 para depois aumentar o carregamento da barra 29, foi possível um incremento de carga na barra 29 de 6,41%.

Portanto, nesse exemplo numérico, ambos os procedimentos tem a mesma eficácia no que diz respeito a aumentar a carga.

No teste da Seção 4.1.2.2 as mesmas duas maneiras de aumentar o carregamento da barra 29 foram consideradas, porém através do redespacho de potência ativa e reativa:

- i) aplicando-se diretamente a função objetivo de “Máximo Carregamento” do FLUPOT, foi possível um incremento de carga na barra 29 de 39,77%.
- ii) calculando inicialmente a “Mínima Transferência de Potência” no ramo 21-22 para depois aumentar o carregamento da barra 29 várias vezes em seqüência, foi possível um incremento de carga na barra 29 de 33%, que é um valor próximo de 39,77% obtido com o procedimento i).

4.1.3 - Aumento da Margem de Potência da Barra de Carga com Reforço no Ramo Crítico

Tem-se dois objetivos: i) determinar analiticamente o ramo crítico do caminho crítico, i.e. o ramo que terá seu fluxo de potência ativa minimizado, ii) determinar uma metodologia sequencial usando os programas ESTABTEN, CaTrans e FLUPOT para se aumentar a margem de potência gradativamente até se atingir um valor julgado adequado.

Este estudo analisa duas possibilidades de reforço das condições de estabilidade de tensão do sistema:

1. Minimizando o fluxo de potência no ramo crítico pertencente ao pior caminho de transmissão.
2. Minimizando o fluxo de potência por etapas no ramo crítico pertencente ao pior caminho de transmissão correspondente.

Os resultados da avaliação das condições de estabilidade de tensão pelo programa ESTABTEN no ponto de operação S35_A06 são mostrados na Tabela 4.1. A barra 29 é a pior do ponto de vista de margem de potência: tem uma carga de 34,7 MVA e o programa indica uma máxima carga de 35,7 MVA. O ângulo β vale 178,5° para um máximo de 180°. Portanto, a barra 29 é a que terá sua margem aumentada.

Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados do programa CaTrans com a determinação dos seis piores caminhos de transmissão de potência para a barra crítica 29. Como os aumentos de carga na barra 29 e os acréscimos nas perdas de transmissão foram atendidas pelo gerador swing da barra 34, os dois caminhos mais críticos de transmissão conectam a barra de carga 29 ao gerador swing 34. Os dois caminhos seguintes conectam a barra de carga 29 ao gerador 32; o seguinte conecta a barra de carga 29 ao gerador 33; e o sexto e último caminho conecta a barra de carga 29 ao gerador 31. Para todos os seis caminhos a tensão na barra 29 encontra-se na Região B.

A Tabela 4.25 apresenta as condições do pior caminho e sub-caminhos de transmissão de potência para a barra crítica 29. A idéia é analisar os sub-caminhos que começam no gerador 34 incluindo um novo ramo de cada vez. Portanto, o 1º sub-caminho a ser analisado vai da barra 34 para a barra 21. Uma inspeção dos resultados demonstra que a tensão na barra 21 encontra-se "folgadamente" na Região A de operação. A seguir, inclui-se novo ramo e, conseqüentemente, o 2º sub-caminho a ser analisado vai da barra 34 para a barra 21 para a barra 22. Mais uma vez, os resultados demonstram que a tensão na barra 22 encontra-se na Região A de operação. Sequencialmente, vai-se incluindo novos ramos até que o 7º e último sub-caminho inclui a barra 29 que é a barra em análise.

Na Tabela 4.25 o número em negrito mais à direita ordena os ramos, a partir do pior. Essa condição é definida pela distância, em termos de módulo e ângulo da tensão na barra terminal do sub-caminho, do ponto de operação em análise ao ponto de máxima transmissão. Na Tabela 4.25 observa-se que a tensão na barra terminal encontra-se na Região B só para o caminho completo, quando a barra terminal é a barra 29. Essa condição é indicada pelo sinal negativo no valor da distância (DELTA V FASOR). Portanto, afirma-se que o ramo crítico é aquele entre as barras 28 e 29.

Tabela 4.25 - Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão para o Caso-Base S35_A06

***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		34	21				
				MÓDULO	ÂNGULO			
	TENSÃO NO GERADOR			1,0490	22,3000			
	TENSÃO NA CARGA			1,0752	13,5456			
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA			0,7004	-19,2129			
		DELTA MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR				
	DISTÂNCIA	0,3748	0,5717	0,6836			6	
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		34	21	22			
				MÓDULO	ÂNGULO			
	TENSÃO NO GERADOR			1,0490	22,3000			
	TENSÃO NA CARGA			1,0765	9,3915			
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA			0,6817	-24,4801			
		DELTA MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR				
	DISTÂNCIA	0,3947	0,5912	0,7108			7	

***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	34	21	22	19		
			MÓDULO		ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR		1,0490		22,3000		
	TENSÃO NA CARGA		1,0510		5,4450		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,5319		-11,6224		
		DELTA MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR			
	DISTÂNCIA	0,5191	0,2979	0,5985		5	
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	34	21	22	19	16	
			MÓDULO		ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR		1,0490		22,3000		
	TENSÃO NA CARGA		0,8834		-11,9938		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,8313		-1,3051		
		DELTA MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR			
	DISTÂNCIA	0,0521	-0,1866	0,1937		2	
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	34	21	22	19	16	30
			MÓDULO		ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR		1,0490		22,3000		
	TENSÃO NA CARGA		0,9341		-16,2072		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,4395		-22,2800		
		DELTA MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR			
	DISTÂNCIA	0,4946	0,1060	0,5058		4	
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	34	21	22	19	16	30 28
			MÓDULO		ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR		1,0490		22,3000		
	TENSÃO NA CARGA		0,8739		-57,7082		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,8527		-37,4442		
		DELTA MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR			
	DISTÂNCIA	0,0213	-0,3537	0,3543		3	
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	34	21	22	19	16	30 28 29
			MÓDULO		ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR		1,0490		22,3000		
	TENSÃO NA CARGA		0,8829		-62,7518		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		2,4763		9,3134		
		DELTA MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR			
	DISTÂNCIA	-1,5934	-1,2578	-2,0300		1	

4.1.3.1 - Reforço em Uma Única Etapa

A Tabela 4.25 indica que o ramo crítico é aquele que envolve as barras 28 e 29, por apresentar distância negativa e de maior módulo. Portanto, minimizando-se o fluxo de potência ativa da barra 28 para a barra 29 o objetivo pode ser alcançado.

Pode-se minimizar o fluxo através do redespacho de potência reativa e/ou ativa. No caso do redespacho de potência ativa deve-se limitar as possíveis variações de geração ativa para evitar que o fluxo de potência no ramo seja "totalmente minimizado" chegando até a inverter o sentido. Nesse caso, provavelmente, um outro ramo ficaria muito carregado. Essa limitação nas variações é conseguida através da imposição de limites de geração fictícios ao redor do valor gerado no ponto de operação analisado mostrado na Tabela 4.3, que corresponde ao ponto de colapso, o Caso-Base S35_A06.

A partir do Caso-Base S35_A06 são analisados 7 casos de variação na geração de potência ativa:

Caso 1:	0 %
Caso 2:	± 10 %
Caso 3:	± 20 %
Caso 4:	± 30 %
Caso 5:	± 40 %
Caso 6:	± 50 %
Caso 7:	± 60 %

Obviamente, o Caso 1 corresponde ao redespacho de potência reativa somente.

A Tabela 4.26 mostra o resultado do redespacho ativo nas barras de geração e nas perdas ativas no sistema. Observa-se que as perdas ativas no sistema diminuem constantemente à medida que a geração ativa na barra swing 34 decresce e na barra 26 aumenta. Neste teste, e em todos os outros desta seção, os módulos de tensão são limitados entre 0,9 e 1,1 pu.

A Tabela 4.27 mostra as condições da barra de carga 29 avaliadas pelo programa ESTABTEN após a atuação do programa FLUPOT, para os 7 casos mencionados. O redespacho de potência reativa e ativa causou aumento substancial na margem $M=(1- S_i / S_{max})$ de 0,028 para 0,390, o que corresponde a um aumento de 1293%, por que S_{max} aumentou de 35,7

para 56,8 MVA o que significa um reforço de 59% no Caso $\pm 60\%$. O Índice de Influência da ação de reforço também traduz o benefício: $II = (M_i / M_o - 1) = 12,93$.

Tabela 4.26 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema

Geração (MW)	0%	$\pm 10\%$	$\pm 20\%$	$\pm 30\%$	$\pm 40\%$	$\pm 50\%$	$\pm 60\%$
G1	3300	3619	3949	4277	4348	4297	4260
G26	3879	4267	4655	5043	5431	5819	6206
G31	1320	1307	1189	965	800	666	534
G32	1200	1192	1087	878	727	606	485
G33	1200	1196	1088	877	727	606	485
G34	1385	635	173	40	7	6	5
Perdas (MW)	601	481	406	346	305	266	241

Tabela 4.27 - Avaliação da Máxima Carga na Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 28-29

Caso	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D'] \cdot V$	β	Fluxo 24-27	Fluxo 28-29
S35_A06	0,878	34,707	35,7	68	179	129	4 x 833
0%	0,908	34,707	40,4	430	170	115	4 x 836*
$\pm 10\%$	0,907	34,707	43,5	684	165	248	4 x 802
$\pm 20\%$	0,906	34,707	46,7	977	156	377	4 x 769
$\pm 30\%$	0,943	34,707	50,7	1365	143	507	4 x 736
$\pm 40\%$	0,941	34,707	52,0	1495	136	638	4 x 702
$\pm 50\%$	0,972	34,707	52,2	1842	126	768	4 x 669
$\pm 60\%$	0,984	34,707	56,8	2027	119	899	4 x 636

* esse valor é maior do que o do Caso-Base, o que parece uma contradição. Na verdade, o FLUPOT maximizou, com sucesso, o fluxo da barra 29 para a barra 28.

Quando foi permitida uma variação superior a $\pm 60\%$ nas potências ativas geradas, a margem diminuiu. Isto, provavelmente, por que a tendência de decréscimo de geração na barra 34 foi interrompida, dado que ela chegou ao limite mínimo.

Se a máxima carga de 56,8 MVA (margem de 39%) for considerada aceitável, o problema está resolvido. Em adição, ou alternativamente, questão essa a ser mais estudada, pode-se investigar um segundo critério: a existência ou não de barras terminais de sub-caminhos do caminho crítico de transmissão na Região B.

O ponto de operação correspondente ao Caso S35_A06 $\pm 60\%$ foi analisado pelo programa ESTABTEN e a barra 29 continuou sendo a mais crítica. O programa CaTrans calculou os caminhos críticos para a barra 29. Agora, o pior caminho envolve as barras 1, 2, 3, 4, 5, 7, 15, 16, 30, 28, 29. As tensões das barras terminais dos sub-caminhos estão todas na Região A. O problema foi considerado resolvido. Nada impede, entretanto, que se passe a minimizar o fluxo de potência ativa no ramo mais crítico do caminho crítico (por mais leve que esteja a carga, sempre há uma barra, um caminho e um ramo crítico).

4.1.3.2 - Reforço em Duas Etapas

Considera-se para este estudo que não foi possível permitir uma variação de $\pm 60\%$ nas potências geradas, por exemplo devido aos limites reais dos geradores. Supõe-se que o redespacho de potência ativa e reativa chegou ao Caso S35_A06 $\pm 50\%$, quando S_{\max} vale 52,2 MVA, o que significa um reforço de 46,22%.

O ponto de operação do Caso S35_A06 $\pm 50\%$ foi analisado pelo programa ESTABTEN e a barra 29 continuou sendo a mais crítica. O programa CaTrans determinou que o caminho mais crítico é aquele que envolve as barras 31, 17, 16, 30, 28, 29. Note-se que o gerador é o da barra 31 e não da barra 34, como antes.

A Tabela 4.28 mostra cada um dos sub-caminhos do caminho crítico. A barra terminal do pior sub-caminho na Região B passou a ser o ramo 31-17. Então, continua-se a minimizar o fluxo neste ramo.

Tabela 4.28 - Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão para o Caso S35_A06 \pm 50%

***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		31	17				
			MÓDULO		ÂNGULO			
	TENSÃO NO GERADOR		0,9040		34,0438			
	TENSÃO NA CARGA		0,9258		28,9919			
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,9801		-28,4931			
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR				
	DISTÂNCIA	-0,0543	1,0033	-1,0048	1			
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		31	17	16			
			MÓDULO		ÂNGULO			
	TENSÃO NO GERADOR		0,9040		34,0438			
	TENSÃO NA CARGA		0,9184		28,9077			
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,4651		29,5867			
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR				
	DISTÂNCIA	0,4534	-0,0119	0,4535	4			
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		31	17	16	30		
			MÓDULO		ÂNGULO			
	TENSÃO NO GERADOR		0,9040		34,0438			
	TENSÃO NA CARGA		0,9914		26,7050			
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,6468		-19,2851			
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR				
	DISTÂNCIA	0,3446	0,8027	0,8735	5			
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		31	17	16	30	28	
			MÓDULO		ÂNGULO			
	TENSÃO NO GERADOR		0,9040		34,0438			
	TENSÃO NA CARGA		0,9707		6,9480			
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,6470		-2,1967			
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR				
	DISTÂNCIA	0,3237	0,1596	0,3609	3			
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		31	17	16	30	28	29
			MÓDULO		ÂNGULO			
	TENSÃO NO GERADOR		0,9040		34,0438			
	TENSÃO NA CARGA		0,9724		3,6628			
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		1,1480		29,2902			
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR				
	DISTÂNCIA	-0,1756	-0,4473	-0,4805	2			

A partir do ponto de operação do Caso S35_A06 \pm 50%, o programa FLUPOT é usado com 2 diferentes limites de geração de potência ativa em torno do valor de geração: 0%, \pm 10%. A Tabela 4.29 mostra o resultado do redespacho ativo nas barras de geração e nas perdas ativas no sistema.

Tabela 4.29 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema

Geração (MW)	S35_A06 $\pm 50\%$	$\pm 0\%$	$\pm 10\%$
G1	4297	4297	4188
G26	5819	5819	5505
G31	666	666	599
G32	606	606	604
G33	606	606	604
G34	6	3	494
Perdas (MW)	266	263	260

A Tabela 4.30 mostra as margens da barra 29 avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo no ramo 31-17 para os dois limites de geração.

O redespacho de potência reativa e ativa ($\pm 10\%$), causou um aumento na máxima carga, por que S_{\max} aumentou de 52,2 para 54,8 MVA, o que corresponde a 5% de incremento. Quando foi permitida uma variação maior que $\pm 10\%$ nas potências ativas geradas, a máxima carga sempre diminuiu (S_{\max} sempre diminuiu).

O melhor ponto de operação correspondente ao Caso S35_A06 $\pm 50\% \pm 10\%$ foi analisado pelo programa ESTABTEN e a barra 29 continuou sendo a mais crítica. O programa CaTrans calculou os caminhos críticos para a barra 29. O pior caminho envolve as barras 31, 17, 16, 30, 28, 29. A tensão da barra 29 no pior caminho ainda está na Região B, mas $\det[D'] > 0$ nesta barra quando se considera todo o sistema. O problema pode ser considerado resolvido. A margem agora é de 37% e, portanto, o Índice de Influência das ações de controle é de 12,21 (a margem aumentou 1221%).

Tabela 4.30 - Avaliação da Máxima Carga na Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 31-17

Caso	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D'] \cdot V$	β	Fluxo 24-27	Fluxo 28-29
S35_A06 $\pm 50\%$	0,972	34,707	52,2	1842	126	768	4 x 669
0%	0,926	34,707	54,4	1754	129	756	4 x 672
$\pm 10\%$	0,942	34,707	54,8	1799	131	643	4 x 701

4.1.3.3 - Reforço em Três Etapas

Considera-se para este estudo que não foi possível permitir uma variação de $\pm 60\%$ nas potências geradas, como na Seção 4.1.3.1, por exemplo devido aos limites reais dos geradores. Supõe-se que o redespacho de potência ativa e reativa chegou ao Caso S35_A06 $\pm 30\%$, quando S_{\max} vale 50,7 MVA, o que corresponde a 42% de aumento.

O ponto de operação do Caso S35_A06 $\pm 30\%$ foi analisado pelo programa ESTABTEN e a barra 29 continuou sendo a mais crítica. O programa CaTrans determinou que o caminho mais crítico é aquele que envolve as barras 31, 17, 18, 19, 16, 30, 28, 29. Note-se que o gerador é o da barra 31 e não o da barra 34, como no Caso-Base.

A Tabela 4.31 mostra cada um dos sub-caminhos do caminho crítico. A barra terminal do pior sub-caminho passou para a Região B no 2º sub-caminho, quando da inclusão do ramo entre as barras 17 e 18. Então, continua-se a minimizar o fluxo neste ramo crítico.

Tabela 4.31 - Determinação do Caminho Crítico e sub-caminhos de Transmissão
para o Caso S35_A06 \pm 30% de Redespacho de Potência Ativa

***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	31	17						
			MÓDULO		ÂNGULO				
	TENSÃO NO GERADOR		0,9270		35,3308				
	TENSÃO NA CARGA		0,9365		28,2947				
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,8364		-21,0141				
				DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR			
	DISTÂNCIA			0,1002	0,8606	0,8664			7
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	31	17	18					
			MÓDULO		ÂNGULO				
	TENSÃO NO GERADOR		0,9270		35,3308				
	TENSÃO NA CARGA		0,9465		28,1105				
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		2,2941		-49,7773				
				DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR			
	DISTÂNCIA			-1,3476	1,3594	-1,9142			1
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	31	17	18	19				
			MÓDULO		ÂNGULO				
	TENSÃO NO GERADOR		0,9270		35,3308				
	TENSÃO NA CARGA		0,9642		23,5326				
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,7738		-15,5579				
				DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR			
	DISTÂNCIA			0,1904	0,6823	0,7083			5
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	31	17	18	19	16			
			MÓDULO		ÂNGULO				
	TENSÃO NO GERADOR		0,9270		35,3308				
	TENSÃO NA CARGA		0,9026		22,1245				
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,5224		20,3533				
				DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR			
	DISTÂNCIA			0,3803	0,0309	0,3815			4
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	31	17	18	19	16	30		
			MÓDULO		ÂNGULO				
	TENSÃO NO GERADOR		0,9270		35,3308				
	TENSÃO NA CARGA		0,9696		19,2107				
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,5394		-14,7336				
				DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR			
	DISTÂNCIA			0,4303	0,5924	0,7322			6
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	31	17	18	19	16	30	28	
			MÓDULO		ÂNGULO				
	TENSÃO NO GERADOR		0,9270		35,3308				
	TENSÃO NA CARGA		0,9384		-7,4615				
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,7274		-6,5407				
				DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR			
	DISTÂNCIA			0,2110	-0,0161	0,2116			3

```

*** CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 31 17 18 19 16 30 28 29
                                MÓDULO    ÂNGULO
                                TENSÃO NO GERADOR    0,9270    35,3308
                                TENSÃO NA CARGA    0,9426    -11,3282
                                TENSÃO CRÍTICA NA CARGA    1,3342    29,1174

                                DELTA V MOD    DELTA TETA    DELTA V FASOR
                                DISTÂNCIA    -0,3916    -0,7059    -0,8073    2

```

A partir do ponto de operação do Caso S35_A06 $\pm 30\%$, o programa FLUPOT é usado com 2 diferentes limites de geração de potência ativa em torno do valor de geração: 0 %, ± 10 %.

A Tabela 4.32 mostra o resultado do redespacho ativo nas barras de geração e nas perdas ativas no sistema. Observa-se que as perdas ativas no sistema continuam diminuindo a medida que a geração ativa nas barras 1, 31, 34 decresce e a das barras 26, 32, 33 cresce.

Tabela 4.32 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema

Geração (MW)	S35_A06 $\pm 30\%$	0%	$\pm 10\%$
G1	4277	4277	4126
G26	5043	5043	5074
G31	965	965	869
G32	878	878	966
G33	877	877	965
G34	40	0,3	2,5
Perdas (MW)	346	306	268

A Tabela 4.33 mostra as margens da barra 29 avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo no ramo 17-18 para os 2 limites de geração.

Tabela 4.33 - Avaliação da Máxima Carga na Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 17-18

Caso	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D'] \cdot V$	β	Fluxo 24-27	Fluxo 28-29
S35_A06 \pm 30%	0,943	34,707	50,7	1365	143	507	4 x 736
0%	0.960	34.707	55.7	1893	136	486	4 x 740
$\pm 10\%$	0.984	34.707	58.6	2232	130	483	4 x 741

O redespacho de potência reativa e ativa causou um aumento substancial na máxima carga, por que S_{\max} aumentou de 50,7 para 58,6 MVA, o que corresponde a 15,58% no melhor caso ($\pm 10\%$). Quando foi permitida uma variação superior a $\pm 10\%$ nas potências ativas geradas, a máxima carga sempre diminuiu (S_{\max} sempre diminuiu).

Considera-se como novo ponto de partida o Caso S35_A06 $\pm 30\% \pm 10\%$. O programa ESTABTEN continua apontando para a barra 29 como a barra crítica. O programa CaTrans indica que o caminho crítico é aquele que envolve as barras 32, 18, 19, 16, 30, 28, 29. A Tabela 4.34 mostra que dois sub-caminhos apresentam tensão terminal na Região B, e que o pior ramo é aquele entre as barras 32 e 18. É interessante notar que, desta vez, o ramo crítico é "longe" da barra de carga 29, a barra crítica.

Tabela 4.34 - Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão para o Caso S35_A06 $\pm 30\% \pm 10\%$

***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 32 18			
		MÓDULO	ÂNGULO	
	TENSÃO NO GERADOR	0,9010	34,7468	
	TENSÃO NA CARGA	1,0016	28,2097	
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA	1,1159	-31,4434	
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR
	DISTÂNCIA	-0,1143	1,0411	-1,0474 1

***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	32	18	19				
			MÓDULO		ÂNGULO			
	TENSÃO NO GERADOR		0,9010		34,7468			
	TENSÃO NA CARGA		1,0145		24,3127			
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,7804		-16,8317			
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR				
	DISTÂNCIA	0,2340	0,7181	0,7553		5		
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	32	18	19	16			
			MÓDULO		ÂNGULO			
	TENSÃO NO GERADOR		0,9010		34,7468			
	TENSÃO NA CARGA		1,0085		22,5227			
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,5323		9,6666			
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR				
	DISTÂNCIA	0,4763	0,2244	0,5265		4		
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	32	18	19	16	30		
			MÓDULO		ÂNGULO			
	TENSÃO NO GERADOR		0,9010		34,7468			
	TENSÃO NA CARGA		1,0799		20,1727			
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,5901		-15,1741			
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR				
	DISTÂNCIA	0,4898	0,6169	0,7877		6		
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	32	18	19	16	30	28	
			MÓDULO		ÂNGULO			
	TENSÃO NO GERADOR		0,9010		34,7468			
	TENSÃO NA CARGA		0,9877		-1,9125			
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,7372		-2,6802			
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR				
	DISTÂNCIA	0,2504	0,0134	0,2508		3		
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	32	18	19	16	30	28	29
			MÓDULO		ÂNGULO			
	TENSÃO NO GERADOR		0,9010		34,7468			
	TENSÃO NA CARGA		0,9838		-5,4104			
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		1,3703		32,9544			
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR				
	DISTÂNCIA	-0,3866	-0,6696	-0,7732		2		

A partir do ponto de operação do Caso S35_A06 $\pm 30\% \pm 10\%$, o programa FLUPOT minimiza o fluxo no ramo 32-18. Entretanto, não é possível conseguir reforço algum, isto é, S_{\max} sempre diminuiu nas tentativas de redespacho reativo e ativo).

O programa CaTrans calculou o caminho crítico para a barra 29 mostrado na Tabela 4.34. Em outros três caminhos críticos a tensão da barra 29 também está na Região B, mas $\det[D'] > 0$ nesta barra quando da análise do sistema completo. A margem neste caso é de 41% e,

portanto, o Índice de Influência das ações de controle é de 13,64 (a margem aumentou 1364%).

4.1.3.4 - Conclusões

Na Seção 4.1.3.1, o reforço no pior ramo pertencente ao pior caminho foi feito em uma única etapa. Considerando-se variações na geração ativa em até $\pm 60\%$ em torno dos valores do Caso-Base, obteve-se um incremento na máxima injeção de potência aparente na barra 29 de 59% em relação ao Caso-Base S35_A06 (Tabela 4.27). No novo ponto de operação, a barra terminal do caminho crítico está na Região A de operação. Supõe-se que a margem de 39% esteja adequada.

Na Seção 4.1.3.2, o reforço foi feito em duas etapas. Limitando-se as variações na geração ativa em até $\pm 50\%$ em torno dos valores do Caso-Base, obteve-se um incremento na máxima injeção de potência aparente na barra 29 de 46,22% em relação ao Caso-Base S35_A06 (Tabela 4.27). Avaliando-se o novo ponto de operação, decidiu-se por mais uma etapa de reforço, por que considera-se a margem ainda insuficiente. Obteve-se um incremento na máxima injeção de potência aparente na barra 29 de 5% em relação ao Caso S35_A06 $\pm 50\%$ (Tabela 4.30), o que corresponde a 54% em relação ao Caso-Base S35_A06. No novo ponto de operação, ainda existem 3 caminhos críticos onde as barras terminais estão na Região B de operação. Supõe-se que a margem de 37% esteja adequada.

Na Seção 4.1.3.3, o reforço foi feito em três etapas. Limitando-se as variações na geração ativa em até $\pm 30\%$ em torno dos valores do Caso-Base, obteve-se um incremento na máxima injeção de potência aparente na barra 29 de 42% em relação ao Caso-Base S35_A06 (Tabela 4.27). Avaliando-se o novo ponto de operação, decidiu-se por mais uma etapa de reforço, por que considera-se a margem ainda insuficiente. Obteve-se um incremento na máxima injeção de potência aparente na barra 29 de 15,58% em relação ao Caso S35_A06 $\pm 30\%$ (Tabela 4.33). Avaliando-se o novo ponto de operação, decidiu-se por mais uma etapa de reforço, por que considera-se a margem ainda insuficiente. Minimizando o fluxo no ramo 32-18, não foi possível conseguir reforço algum.

No novo ponto de operação $S35_A06 \pm 30\% \pm 10\%$, obteve-se um incremento na máxima injeção de potência aparente na barra 29 de 64% em relação ao Caso-Base $S35_A06$ (Tabela 4.33). Supõe-se que a margem de 41% esteja adequada. Entretanto, ainda existem 4 caminhos críticos onde as barras terminais dos sub-caminhos estão na Região B de operação, mas $\det[D'] > 0$ para a barra 29 quando da análise do sistema completo.

Também foi analisado um outro teste idêntico, exceto que as tensões de todas as barras podiam variar entre 0,8 e 1,2 pu, que são os valores default do FLUPOT. A Tabela 4.35 mostra a comparação entre as margens para o reforço em uma, duas e três etapas para as duas faixas de variação da tensão.

Tabela 4.35 - Valores das Margens após as Ações de Reforço

	$0,8 < V < 1,2$	$0,9 < V < 1,1$
Uma Etapa	36%	39%
Duas Etapas	42%	37%
Três Etapas	49%	41%

4.1.4 - Aumento Sequencial da Margem de Potência da Barra de Carga com Reforço no Ramo Crítico

Observando-se a Tabela 4.35, e também com base na experiência adquirida com outros testes não mostrados neste trabalho, verifica-se que melhores resultados, em termos de aumento da margem, podem ser obtidos diminuindo-se o grau de liberdade do redespacho ativo. Isso significa usar limites fictícios de geração ativa ao redor do valor da potência gerada, como já feito no teste anterior. Nessa seção, as variações dos limites de geração mostrados na Tabela 4.27, entre todas as outras, são sempre percentuais em torno dos valores de geração do Caso-Base $S35_A06$. Nesta seção a idéia é limitar ainda mais as variações possíveis de geração ativa em cada etapa de reforço. Será de $\pm 10\%$ a variação possível ao redor do valor de geração, porém usando o ponto de operação de cada etapa de reforço para calcular os novos limites fictícios para a etapa seguinte.

4.1.4.1 - Etapa 1 de Reforço

A Tabela 4.25 indica que o ramo crítico é aquele que envolve as barras 28 e 29, por apresentar distância negativa e de maior módulo. Portanto, minimizando-se o fluxo de potência ativa da barra 28 para a barra 29 o objetivo pode ser alcançado.

A partir do Caso-Base S35_A06 analisa-se a possibilidade de reforço considerando redespacho de potência reativa somente, ou seja, com 0 % de variação na geração de potência ativa, exceto na barra swing.

A Tabela 4.36 mostra o resultado do redespacho reativo nas barras de geração e nas perdas ativas no sistema. Observa-se que as perdas ativas no sistema diminuem e a geração ativa na barra swing 34 decresce. Neste teste, e em todos os outros desta seção, os módulos de tensão foram limitados entre 0,9 e 1,1 pu.

Tabela 4.36 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema

Etapa	Geração (MW)						Perdas no Sistema (MW)
	G1	G26	G31	G32	G33	G34	
S35_A06	3300	3879	1320	1200	1200	1434	604
1 Min 28-29 0%	3300	3879	1320	1200	1200	1385	550

A Tabela 4.37 mostra as condições da barra de carga 29 avaliadas pelo programa ESTABTEN após a atuação do programa FLUPOT. O redespacho de potência reativa causou aumento substancial na margem $M = (1 - S_i / S_{\max})$ de 0,028 para 0,141, o que corresponde a um aumento de 404%, por que S_{\max} aumentou de 35,7 para 40,4 MVA o que significa um reforço de 13%. O Índice de Influência da ação de reforço também traduz o benefício: $\Pi = (M_i / M_o - 1) = 4,04$.

Tabela 4.37 - Avaliação da Máxima Carga na Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 28-29

Etapa	Tensão	S_i	S_{max}	$\det[D'] \cdot V$	β
S35_A06	0,878	34,707	35,7	68	179
1.....0%	0,908	34,707	40,4	430	170

O ponto de operação resultante da Etapa 1 de reforço foi analisado pelo programa ESTABTEN e a barra 29 continuou sendo a mais crítica. O programa CaTrans determinou que o caminho mais crítico novamente é aquele que envolve as barras 34, 21, 22, 19, 16, 30, 28, 29 (Tabela 4.38).

Tabela 4.38 - Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão após a Etapa 1 de Reforço

***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 34 21							
			MÓDULO	ÂNGULO				
		TENSÃO NO GERADOR	0,9700	22,3000				
		TENSÃO NA CARGA	1,0173	12,6285				
		TENSÃO CRÍTICA NA CARGA	0,6993	-23,7889				
			DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR			
		DISTÂNCIA	0,3180	0,6356	0,7107	6		
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 34 21 22							
			MÓDULO	ÂNGULO				
		TENSÃO NO GERADOR	0,9700	22,3000				
		TENSÃO NA CARGA	1,0239	8,1705				
		TENSÃO CRÍTICA NA CARGA	0,6657	-27,1331				
			DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR			
		DISTÂNCIA	0,3582	0,6162	0,7127	7		
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 34 21 22 19							
			MÓDULO	ÂNGULO				
		TENSÃO NO GERADOR	0,9700	22,3000				
		TENSÃO NA CARGA	1,0144	4,1652				
		TENSÃO CRÍTICA NA CARGA	0,5197	-16,9384				
			DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR			
		DISTÂNCIA	0,4947	0,3683	0,6168	5		

***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	34	21	22	19	16			
					MÓDULO	ÂNGULO			
	TENSÃO NO GERADOR				0,9700	22,3000			
	TENSÃO NA CARGA				0,9030	-13,1606			
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA				0,7639	-5,6349			
					DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR		
	DISTÂNCIA				0,1392	-0,1313	0,1914	2	
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	34	21	22	19	16	30		
					MÓDULO	ÂNGULO			
	TENSÃO NO GERADOR				0,9700	22,3000			
	TENSÃO NA CARGA				0,9582	-17,1286			
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA				0,4406	-23,0427			
					DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR		
	DISTÂNCIA				0,5176	0,1032	0,5278	4	
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	34	21	22	19	16	30	28	
					MÓDULO	ÂNGULO			
	TENSÃO NO GERADOR				0,9700	22,3000			
	TENSÃO NA CARGA				0,9007	-55,6086			
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA				0,8578	-35,6915			
					DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR		
	DISTÂNCIA				0,0429	-0,3476	0,3503	3	
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	34	21	22	19	16	30	28	29
					MÓDULO	ÂNGULO			
	TENSÃO NO GERADOR				0,9700	22,3000			
	TENSÃO NA CARGA				0,9076	-60,3743			
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA				2,4479	11,0833			
					DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR		
	DISTÂNCIA				-1,5403	-1,2472	-1,9819	1	

4.1.4.2 - Etapa 2 de Reforço

A Tabela 4.38 mostra cada um dos sub-caminhos do caminho crítico do Caso 1. A barra terminal do pior sub-caminho na Região B continua sendo quando da inclusão do ramo 28-29. Então, continua-se a minimizar o fluxo neste ramo.

A partir do ponto de operação resultante da Etapa 1, o programa FLUPOT é usado com limites de geração de potência ativa em torno do valor de geração de $\pm 10\%$.

A Tabela 4.39 mostra o resultado do redespacho ativo nas barras de geração e nas perdas ativas no sistema. Observa-se que a geração da barra swing 34 e as perdas ativas no sistema continuam diminuindo.

Tabela 4.39 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema

Etapa	Geração (MW)						Perdas no Sistema (MW)
	G1	G26	G31	G32	G33	G34	
S35_A06	3300	3879	1320	1200	1200	1434	604
1 Min 28-29 0%	3300	3879	1320	1200	1200	1385	550
2 Min 28-29 $\pm 10\%$	3618	4267	1307	1192	1196	634	481

A Tabela 4.40 mostra as margens da barra 29 avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo no ramo 28-29 para $\pm 10\%$ de limites de geração.

O redespacho de potência ativa causou um aumento em S_{\max} de 40,4 para 43,4 MVA, o que corresponde a 7,43% de incremento.

Tabela 4.40 - Avaliação da Máxima Carga na Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 28-29

Caso	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D'] \cdot V$	β
S35_A06	0,878	34,707	35,7	68	179
10%	0,908	34,707	40,4	430	170
2.... $\pm 10\%$	0,906	34,707	43,4	677	165

O ponto de operação resultante da Etapa 2 foi analisado pelo programa ESTABTEN e a barra 29 continuou sendo a mais crítica. O programa CaTrans determinou que o caminho mais

crítico envolve as barras 31, 17, 21, 22, 19, 16, 30, 28, 29 (Tabela 4.41). O gerador é o da barra 31 e não o da 34, como antes.

Tabela 4.41 - Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão após a Etapa 2 de Reforço

***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		31	17	
			MÓDULO	ÂNGULO	
	TENSÃO NO GERADOR		1,0750	26,7148	
	TENSÃO NA CARGA		1,0321	19,2940	
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,7609	-18,3411	
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR	
	DISTÂNCIA	0,2713	0,6569	0,7107	6
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		31	17	21
			MÓDULO	ÂNGULO	
	TENSÃO NO GERADOR		1,0750	26,7148	
	TENSÃO NA CARGA		1,0584	18,0890	
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,6534	-18,7343	
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR	
	DISTÂNCIA	0,4050	0,6427	0,7597	7
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		31	17	21 22
			MÓDULO	ÂNGULO	
	TENSÃO NO GERADOR		1,0750	26,7148	
	TENSÃO NA CARGA		1,0712	15,7002	
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,6471	-23,8327	
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR	
	DISTÂNCIA	0,4241	0,6900	0,8099	8
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		31	17	21 22 19
			MÓDULO	ÂNGULO	
	TENSÃO NO GERADOR		1,0750	26,7148	
	TENSÃO NA CARGA		1,0635	15,3127	
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,3896	15,7869	
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR	
	DISTÂNCIA	0,6739	-0,0083	0,6740	5
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		31	17	21 22 19 16
			MÓDULO	ÂNGULO	
	TENSÃO NO GERADOR		1,0750	26,7148	
	TENSÃO NA CARGA		0,9024	4,0019	
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,6755	13,2002	
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR	
	DISTÂNCIA	0,2268	-0,1605	0,2779	2

****	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:									
		31	17	21	22	19	16	30		
					MÓDULO			ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR				1,0750			26,7148		
	TENSÃO NA CARGA				0,9594			0,2675		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA				0,3551			-12,7002		
					DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR			
	DISTÂNCIA				0,6043	0,2263	0,6453	4		
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:									
		31	17	21	22	19	16	30	28	
					MÓDULO			ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR				1,0750			26,7148		
	TENSÃO NA CARGA				0,8989			-35,7160		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA				0,6787			-15,4540		
					DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR			
	DISTÂNCIA				0,2203	-0,3536	0,4166	3		
**	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:									
		31	17	21	22	19	16	30	28	29
					MÓDULO			ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR				1,0750			26,7148		
	TENSÃO NA CARGA				0,9061			-40,3076		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA				1,5304			24,6055		
					DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR			
	DISTÂNCIA				-0,6243	-1,1330	-1,2935	1		

4.1.4.3 - Etapa 3 de Reforço

A Tabela 4.41 mostra cada um dos sub-caminhos do caminho crítico para o ponto de operação após a Etapa 2. A barra terminal do pior sub-caminho na Região B continua sendo quando da inclusão do ramo 28-29. Então, continua-se a minimizar o fluxo neste ramo.

A partir do ponto de operação após a Etapa 2, o programa FLUPOT é usado com limites de geração de potência ativa em torno do valor de geração de $\pm 10\%$.

A Tabela 4.42 mostra o resultado do redespacho ativo nas barras de geração e nas perdas ativas no sistema. Observa-se que a geração da barra swing 34 e as perdas ativas no sistema continuam diminuindo.

A Tabela 4.43 mostra as margens da barra 29 avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo no ramo 28-29 para $\pm 10\%$ de limites de geração.

O redespacho de potência ativa causou um aumento em S_{\max} de 43,4 para 47,0 MVA, o que corresponde a 8,30% de incremento.

Tabela 4.42 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema

Etapa	Geração (MW)						Perdas no Sistema (MW)
	G1	G26	G31	G32	G33	G34	
S35_A06	3300	3879	1320	1200	1200	1434	604
1 Min 28-29 0%	3300	3879	1320	1200	1200	1385	550
2 Min 28-29 $\pm 10\%$	3618	4267	1307	1192	1196	634	481
3 Min 28-29 $\pm 10\%$	3967	4694	1212	1108	1111	41	400

Tabela 4.43 - Avaliação da Máxima Carga na Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 28-29

Etapa	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D'] \cdot V$	β
S35_A06	0,878	34,707	35,7	68	179
1.....0%	0,908	34,707	40,4	430	170
2..... $\pm 10\%$	0,906	34,707	43,4	677	165
3..... $\pm 10\%$	0,907	34,707	47,0	1007	155

O ponto de operação após a Etapa 3 foi analisado pelo programa ESTABTEN e a barra 29 continuou sendo a mais crítica. O programa CaTrans determinou que o caminho mais crítico envolve as barras 32, 18, 19, 16, 30, 28, 29 (Tabela 4.44). Note-se que o gerador é o da barra 32 e não o da barra 31, como antes.

Tabela 4.44 - Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão após a Etapa 3 de Reforço

***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		32	18		
			MÓDULO		ÂNGULO	
	TENSÃO NO GERADOR		0,9840		34,7843	
	TENSÃO NA CARGA		1,0031		27,9266	
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,7383		-13,4267	
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR		
	DISTÂNCIA	0,2648	0,7218	0,7688	6	
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		32	18	19	
			MÓDULO		ÂNGULO	
	TENSÃO NO GERADOR		0,9840		34,7843	
	TENSÃO NA CARGA		1,0160		23,3951	
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,7774		-16,3488	
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR		
	DISTÂNCIA	0,2386	0,6937	0,7336	5	
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		32	18	19	16
			MÓDULO		ÂNGULO	
	TENSÃO NO GERADOR		0,9840		34,7843	
	TENSÃO NA CARGA		0,9030		17,2820	
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,5915		9,7410	
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR		
	DISTÂNCIA	0,3114	0,1316	0,3381	3	
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		32	18	19	16 30
			MÓDULO		ÂNGULO	
	TENSÃO NO GERADOR		0,9840		34,7843	
	TENSÃO NA CARGA		0,9636		13,9717	
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,5329		-14,0072	
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR		
	DISTÂNCIA	0,4307	0,4883	0,6511	4	
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		32	18	19	16 30 28
			MÓDULO		ÂNGULO	
	TENSÃO NO GERADOR		0,9840		34,7843	
	TENSÃO NA CARGA		0,9024		-17,4682	
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,7588		-13,4133	
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR		
	DISTÂNCIA	0,1436	-0,0708	0,1601	2	
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		32	18	19	16 30 28 29
			MÓDULO		ÂNGULO	
	TENSÃO NO GERADOR		0,9840		34,7843	
	TENSÃO NA CARGA		0,9067		-21,8187	
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		1,4643		25,6145	
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR		
	DISTÂNCIA	-0,5575	-0,8279	-0,9981	1	

4.1.4.4 - Etapa 4 de Reforço

A Tabela 4.44 mostra cada um dos sub-caminhos do caminho crítico para o ponto de operação após a Etapa 3. A barra terminal do pior sub-caminho na Região B continua sendo quando da inclusão do ramo 28-29. Então, continua-se a minimizar o fluxo neste ramo.

A partir do ponto de operação após a Etapa 3, o programa FLUPOT é usado com limites de geração de potência ativa em torno do valor de geração de $\pm 10\%$.

A Tabela 4.45 mostra o resultado do redespacho ativo nas barras de geração e nas perdas ativas no sistema. Observa-se que a geração da barra swing 34 e as perdas ativas no sistema continuam diminuindo.

Tabela 4.45 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema

Etapa	Geração (MW)						Perdas no Sistema (MW)
	G1	G26	G31	G32	G33	G34	
S35_A06	3300	3879	1320	1200	1200	1434	604
1 Min 28-29 0%	3300	3879	1320	1200	1200	1385	550
2 Min 28-29 $\pm 10\%$	3618	4267	1307	1192	1196	634	481
3 Min 28-29 $\pm 10\%$	3967	4694	1212	1108	1111	41	400
4 Min 28-29 $\pm 10\%$	3765	5163	1101	1007	1009	9	320

A Tabela 4.46 mostra as margens da barra 29 avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo no ramo 28-29 para $\pm 10\%$ de limites de geração.

O redespacho de potência ativa causou um aumento em S_{\max} de 47,0 para 51,2 MVA, o que corresponde a 8,94% de incremento.

Tabela 4.46 - Avaliação da Máxima Carga na Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 28-29

Etapa	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D'] \cdot V$	β
S35_A06	0,878	34,707	35,7	68	179
1.....0%	0,908	34,707	40,4	430	170
2.....±10%	0,906	34,707	43,4	677	165
3.....±10%	0,907	34,707	47,0	1007	155
4.....±10%	0,948	34,707	51,2	1415	141

O ponto de operação após a Etapa 4 foi analisado pelo programa ESTABTEN e a barra 29 continuou sendo a mais crítica. O programa CaTrans determinou que o caminho mais crítico novamente envolve as barras 32, 18, 19, 16, 30, 28, 29 (Tabela 4.47).

Tabela 4.47 - Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão após a Etapa 4 de Reforço

***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 32 18		MÓDULO	ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR		0,9090	36,3178		
	TENSÃO NA CARGA		0,9346	29,0750		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,7094	-13,8427		
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR		
	DISTÂNCIA	0,2252	0,7491	0,7822	6	
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 32 18 17		MÓDULO	ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR		0,9090	36,3178		
	TENSÃO NA CARGA		0,9230	28,9182		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,4778	25,4202		
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR		
	DISTÂNCIA	0,4452	0,0611	0,4493	3	
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 32 18 17 16		MÓDULO	ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR		0,9090	36,3178		
	TENSÃO NA CARGA		0,9019	19,9453		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,6226	-3,4538		
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR		
	DISTÂNCIA	0,2792	0,4084	0,4947	4	

***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	32	18	17	16	30	
					MÓDULO	ÂNGULO	
	TENSÃO NO GERADOR				0,9090	36,3178	
	TENSÃO NA CARGA				0,9696	17,0498	
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA				0,5537	-15,3494	
					DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR
	DISTÂNCIA				0,4159	0,5655	0,7020
							5
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	32	18	17	16	30	28
					MÓDULO	ÂNGULO	
	TENSÃO NO GERADOR				0,9090	36,3178	
	TENSÃO NA CARGA				0,9439	-9,3275	
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA				0,7139	-10,8854	
					DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR
	DISTÂNCIA				0,2300	0,0272	0,2316
							2
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	32	18	17	16	30	28 29
					MÓDULO	ÂNGULO	
	TENSÃO NO GERADOR				0,9090	36,3178	
	TENSÃO NA CARGA				0,9476	-13,0974	
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA				1,3387	26,6440	
					DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR
	DISTÂNCIA				-0,3911	-0,6936	-0,7963
							1

4.1.4.5 - Etapa 5 de Reforço

A Tabela 4.47 mostra cada um dos sub-caminhos do caminho crítico para o ponto de operação após a Etapa 4. A barra terminal do pior sub-caminho na Região B continua sendo quando da inclusão do ramo 28-29. Então, continua-se a minimizar o fluxo neste ramo.

A partir do ponto de operação após a Etapa 4, o programa FLUPOT é usado com limites de geração de potência ativa em torno do valor de geração de $\pm 10\%$.

A Tabela 4.48 mostra o resultado do redespacho ativo nas barras de geração e nas perdas ativas no sistema. Observa-se que a geração da barra swing 34 e as perdas ativas no sistema continuam diminuindo.

A Tabela 4.49 mostra as margens da barra 29 avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo no ramo 28-29 para $\pm 10\%$ de limites de geração. O

redespacho de potência ativa causou um aumento em S_{\max} de 51,2 para 54,1 MVA, o que corresponde a 5,66% de incremento.

Tabela 4.48 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema

Etapa	Geração (MW)						Perdas no Sistema (MW)
	G1	G26	G31	G32	G33	G34	
S35_A06	3300	3879	1320	1200	1200	1434	604
1 Min 28-29 0%	3300	3879	1320	1200	1200	1385	550
2 Min 28-29 $\pm 10\%$	3618	4267	1307	1192	1196	634	481
3 Min 28-29 $\pm 10\%$	3967	4694	1212	1108	1111	41	400
4 Min 28-29 $\pm 10\%$	3765	5163	1101	1007	1009	9	320
5 Min 28-29 $\pm 10\%$	3473	5679	999	914	915	7	253

Tabela 4.49 - Avaliação da Máxima Carga na Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 28-29

Etapa	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D'] \cdot V$	β
S35_A06	0,878	34,707	35,7	68	179
1.....0%	0,908	34,707	40,4	430	170
2..... $\pm 10\%$	0,906	34,707	43,4	677	165
3..... $\pm 10\%$	0,907	34,707	47,0	1007	155
4..... $\pm 10\%$	0,948	34,707	51,2	1415	141
5..... $\pm 10\%$	0,964	34,707	54,1	1726	131

O ponto de operação após a Etapa 5 foi analisado pelo programa ESTABTEN e a barra 29 continuou sendo a mais crítica. O programa CaTrans determinou que o caminho mais crítico

envolve as barras 31, 17, 18, 19, 16, 30, 28, 29 (Tabela 4.50). Note-se que o gerador é o da barra 31 e não o da barra 32, como antes.

Tabela 4.50 - Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão após a Etapa 5 de Reforço

***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		31	17				
			MÓDULO	ÂNGULO				
	TENSÃO NO GERADOR		0,9020	36,5586				
	TENSÃO NA CARGA		0,9223	28,9447				
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,8529	-21,5193				
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR				
	DISTÂNCIA	0,0693	0,8808	0,8835	7			
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		31	17	18			
			MÓDULO	ÂNGULO				
	TENSÃO NO GERADOR		0,9020	36,5586				
	TENSÃO NA CARGA		0,9324	28,8674				
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		-5,1347	124,1979				
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR				
	DISTÂNCIA	6,0671	-1,6638	6,2911	4			
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		31	17	18	19		
			MÓDULO	ÂNGULO				
	TENSÃO NO GERADOR		0,9020	36,5586				
	TENSÃO NA CARGA		0,9524	24,0967				
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,7732	-15,1401				
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR				
	DISTÂNCIA	0,1792	0,6848	0,7079	5			
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		31	17	18	19	16	
			MÓDULO	ÂNGULO				
	TENSÃO NO GERADOR		0,9020	36,5586				
	TENSÃO NA CARGA		0,9169	22,0610				
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,5084	15,7280				
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR				
	DISTÂNCIA	0,4085	0,1105	0,4231	3			
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:		31	17	18	19	16	30
			MÓDULO	ÂNGULO				
	TENSÃO NO GERADOR		0,9020	36,5586				
	TENSÃO NA CARGA		0,9881	19,5981				
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,5579	-17,5208				
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR				
	DISTÂNCIA	0,4301	0,6478	0,7776	6			

***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO:							
	31	17	18	19	16	30	28	
				MÓDULO		ÂNGULO		
				TENSÃO NO GERADOR		0,9020 36,5586		
				TENSÃO NA CARGA		0,9623 -2,6514		
				TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,6932 -5,1403		
				DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR		
				DISTÂNCIA	0,2691	0,0434	0,2726	2
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:							
	31	17	18	19	16	30	28	29
				MÓDULO		ÂNGULO		
				TENSÃO NO GERADOR		0,9020 36,5586		
				TENSÃO NA CARGA		0,9637 -6,0601		
				TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		1,2784 29,6895		
				DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR		
				DISTÂNCIA	-0,3147	-0,6239	-0,6988	1

4.1.4.6 - Etapa 6 de Reforço

A Tabela 4.50 mostra cada um dos sub-caminhos do caminho crítico para o ponto de operação após a Etapa 5. A barra terminal do pior sub-caminho na Região B continua sendo quando da inclusão do ramo 28-29. Então, continua-se a minimizar o fluxo neste ramo.

A partir do ponto de operação após a Etapa 5, o programa FLUPOT é usado com limites de geração de potência ativa em torno do valor de geração de $\pm 10\%$.

A Tabela 4.51 mostra o resultado do redespacho ativo nas barras de geração e nas perdas ativas no sistema. Observa-se que a geração da barra swing 34 e as perdas ativas no sistema continuam diminuindo.

A Tabela 4.52 mostra as margens da barra 29 avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo no ramo 28-29 para $\pm 10\%$ de limites de geração.

O redespacho de potência ativa causou um aumento em S_{\max} de 54,1 para 57,9 MVA, o que corresponde a 7,02% de incremento.

Tabela 4.51 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema

Etapa	Geração (MW)						Perdas no Sistema (MW)
	G1	G26	G31	G32	G33	G34	
S35_A06	3300	3879	1320	1200	1200	1434	604
1 Min 28-29 0%	3300	3879	1320	1200	1200	1385	550
2 Min 28-29 $\pm 10\%$	3618	4267	1307	1192	1196	634	481
3 Min 28-29 $\pm 10\%$	3967	4694	1212	1108	1111	41	400
4 Min 28-29 $\pm 10\%$	3765	5163	1101	1007	1009	9	320
5 Min 28-29 $\pm 10\%$	3473	5679	999	914	915	7	253
6 Min 28-29 $\pm 10\%$	3128	6247	900	824	825	1	192

Tabela 4.52 - Avaliação da Máxima Carga na Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 28-29

Etapa	Tensão	S_i	S_{max}	$\det[D'] \cdot V$	β
S35_A06	0,878	34,707	35,7	68	179
1.....0%	0,908	34,707	40,4	430	170
2..... $\pm 10\%$	0,906	34,707	43,4	677	165
3..... $\pm 10\%$	0,907	34,707	47,0	1007	155
4..... $\pm 10\%$	0,948	34,707	51,2	1415	141
5..... $\pm 10\%$	0,964	34,707	54,1	1726	131
6..... $\pm 10\%$	0,996	34,707	57,9	2146	119

O ponto de operação após a Etapa 6 foi analisado pelo programa ESTABTEN e a barra 29 continuou sendo a mais crítica. O programa CaTrans determinou que o caminho mais crítico novamente envolve as barras 31, 17, 18, 19, 16, 30, 28, 29 (Tabela 4.53).

Tabela 4.53 - Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão após a Etapa 6 de Reforço

***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 31 17				MÓDULO	ÂNGULO		
					TENSÃO NO GERADOR	0,9070	35,6652	
					TENSÃO NA CARGA	0,9325	28,9130	
					TENSÃO CRÍTICA NA CARGA	0,9130	-24,5521	
					DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR	
					DISTÂNCIA	0,0195	0,9331	0,9333 7
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 31 17 18				MÓDULO	ÂNGULO		
					TENSÃO NO GERADOR	0,9070	35,6652	
					TENSÃO NA CARGA	0,9393	28,6330	
					TENSÃO CRÍTICA NA CARGA	1,1172	-36,2301	
					DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR	
					DISTÂNCIA	-0,1778	1,1321	-1,1460 1
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 31 17 18 19				MÓDULO	ÂNGULO		
					TENSÃO NO GERADOR	0,9070	35,6652	
					TENSÃO NA CARGA	0,9608	24,1389	
					TENSÃO CRÍTICA NA CARGA	0,7884	-16,6368	
					DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR	
					DISTÂNCIA	0,1724	0,7117	0,7323 5
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 31 17 18 19 16				MÓDULO	ÂNGULO		
					TENSÃO NO GERADOR	0,9070	35,6652	
					TENSÃO NA CARGA	0,9466	24,1225	
					TENSÃO CRÍTICA NA CARGA	0,4896	27,9629	
					DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR	
					DISTÂNCIA	0,4570	-0,0670	0,4619 4
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 31 17 18 19 16 30				MÓDULO	ÂNGULO		
					TENSÃO NO GERADOR	0,9070	35,6652	
					TENSÃO NA CARGA	1,0221	22,1520	
					TENSÃO CRÍTICA NA CARGA	0,6069	-21,3637	
					DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR	
					DISTÂNCIA	0,4152	0,7595	0,8656 6
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 31 17 18 19 16 30 28				MÓDULO	ÂNGULO		
					TENSÃO NO GERADOR	0,9070	35,6652	
					TENSÃO NA CARGA	0,9966	4,4851	
					TENSÃO CRÍTICA NA CARGA	0,6613	-1,4940	
					DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR	
					DISTÂNCIA	0,3353	0,1044	0,3512 3

```

*** CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 31 17 18 19 16 30 28 29
                                MÓDULO  ÂNGULO
                                TENSÃO NO GERADOR 0,9070 35,6652
                                TENSÃO NA CARGA 0,9959 1,5331
                                TENSÃO CRÍTICA NA CARGA 1,2118 30,0280

                                DELTA V MOD DELTA TETA DELTA V FASOR
                                DISTÂNCIA -0,2159 -0,4973 -0,5422 2

```

4.1.4.7 - Etapa 7 de Reforço

A Tabela 4.53 mostra cada um dos sub-caminhos do caminho crítico para o ponto de operação após a Etapa 6. A barra terminal do pior sub-caminho na Região B é quando da inclusão do ramo 17-18 (e não do ramo 28-29, como nos casos anteriores). Então, passa-se a minimizar o fluxo neste ramo.

A partir do ponto de operação após a Etapa 6, o programa FLUPOT é usado com limites de geração de potência ativa em torno do valor de geração de $\pm 10\%$.

Tabela 4.54 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema

Etapa	Geração (MW)						Perdas no Sistema (MW)
	G1	G26	G31	G32	G33	G34	
S35_A06	3300	3879	1320	1200	1200	1434	604
1 Min 28-29 0%	3300	3879	1320	1200	1200	1385	550
2 Min 28-29 $\pm 10\%$	3618	4267	1307	1192	1196	634	481
3 Min 28-29 $\pm 10\%$	3967	4694	1212	1108	1111	41	400
4 Min 28-29 $\pm 10\%$	3765	5163	1101	1007	1009	9	320
5 Min 28-29 $\pm 10\%$	3473	5679	999	914	915	7	253
6 Min 28-29 $\pm 10\%$	3128	6247	900	824	825	1	192
7 Min 17-18 $\pm 10\%$	3390	5921	810	906	908	3	204

A Tabela 4.54 mostra o resultado do redespacho ativo nas barras de geração e nas perdas ativas no sistema. Observa-se que a geração da barra swing 34 e as perdas ativas no sistema começam a aumentar, invertendo a tendência dos casos anteriores.

A Tabela 4.55 mostra as margens da barra 29 avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo no ramo 17-18 para $\pm 10\%$ de limites de geração.

O redespacho de potência ativa causou um aumento em S_{\max} de 57,9 para 61,1 MVA, o que corresponde a 5,53% de incremento.

Tabela 4.55 - Avaliação da Máxima Carga na Barra 29 após Minimização do Fluxo do Ramo 17-18

Etapa	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D'] \cdot V$	β
S35_A06	0,878	34,707	35,7	68	179
1.....0%	0,908	34,707	40,4	430	170
2..... $\pm 10\%$	0,906	34,707	43,4	677	165
3..... $\pm 10\%$	0,907	34,707	47,0	1007	155
4..... $\pm 10\%$	0,948	34,707	51,2	1415	141
5..... $\pm 10\%$	0,964	34,707	54,1	1726	131
6..... $\pm 10\%$	0,996	34,707	57,9	2146	119
7..... $\pm 10\%$	0,997	34,707	61,1	2524	121

O ponto de operação após a Etapa 7, foi analisado pelo programa ESTABTEN e a barra 29 continuou sendo a mais crítica. O programa CaTrans determinou 4 caminhos críticos onde a tensão da barra 29 está na Região B, embora o programa ESTABTEN mostre que $\det[D'] > 0$ para esta barra 29 quando o sistema é analisado como um todo. Ao se aplicar o programa FLUPOT, não foi possível conseguir mais reforço no sistema. Em todas as tentativas, S_{\max} sempre diminuiu. O ponto de operação obtido após 7 etapas de reforço é considerado o melhor possível.

O ponto de operação resultante das 7 etapas de reforço com respeito ao Caso-Base S35_A06, tem um aumento substancial na margem $M=(1- S_i / S_{\max})$ de 0,028 para 0,432, o que corresponde a um aumento de 1443%, por que S_{\max} aumentou de 35,7 para 61,1 MVA, que significa reforço de 71%. O Índice de Influência da ação de reforço também traduz o benefício: $II=(M_i / M_o - 1) = 14,43$.

4.1.4.8 - Conclusões

Partiu-se do ponto de operação do Caso-Base S35_A06. O programa computacional ESTABTEN é aplicado para avaliar-se as condições de estabilidade do sistema. Os resultados indicam que a carga da barra 29 encontra-se praticamente no máximo. Usando-se o programa CaTrans, foram identificados os caminhos críticos e sub-caminhos associados à barra 29. O programa FLUPOT foi usado para diminuir o fluxo de potência ativa em ramos destes caminhos.

Quando foi permitido o redespacho de potência reativa somente, obteve-se um incremento na máxima injeção de potência aparente na barra 29 de 13% em relação ao Caso-Base S35_A06 (Tabela 4.37).

Quando foi permitido o redespacho de potência ativa, o reforço foi feito limitando-se as variações na geração ativa em $\pm 10\%$ em torno dos valores do ponto de operação resultante da etapa de reforço anterior. Após 7 etapas de reforço, obteve-se um incremento na máxima injeção de potência aparente na barra 29 de 71% em relação ao Caso-Base S35_A06 (Tabela 4.55). A margem ficou em 43,2%.

Outras tentativas de reforço após a sétima etapa não surtiram efeito, e a margem sempre diminuiu. Isto, provavelmente, por que a tendência de decréscimo de geração na barra 34 foi interrompida, dado que ela chegou ao limite mínimo.

A Tabela 4.56 resume o resultado da comparação entre as margens para o reforço em uma, duas, três etapas e sete etapas.

A metodologia iterativa usada funcionou muito bem. A determinação analítica do ramo a ter seu fluxo de potência minimizado também funcionou perfeitamente.

Os resultados encontrados são considerados excelentes e portanto, inúmeros novos testes foram feitos, inclusive com novos sistemas.

Tabela 4.56 - Valores das Margens após as Ações de Reforço

Etapas de Reforço	$0,9 < V < 1,1$
Uma	39%
Duas	37%
Três	41%
Sete	43%

4.2 - APLICAÇÃO NO SISTEMA IEEE 24 BARRAS

Como no estudo do sistema S35, utilizado no SAGE do CEPEL, aplica-se a metodologia para reforçar as condições de estabilidade de barras de carga no sistema IEEE 24 barras. O objetivo é aumentar a margem de potência de barras de carga partindo de um ponto de colapso.

Essa tarefa envolve a utilização dos programas ESTABTEN que faz a avaliação das condições nodais de carregamento, CaTrans que determina os caminhos e ramos de transmissão críticos, e FLUPOT que minimiza o fluxo de potência em ramos de transmissão críticos através do redespacho reativo e/ou ativo.

Este estudo analisa a possibilidade de reforço, em etapas sucessivas, das condições de estabilidade de tensão do sistema, minimizando o fluxo de potência ativa no ramo crítico pertencente ao pior caminho de transmissão.

Na Tabela 4.57 são mostrados os resultados da avaliação das condições de estabilidade de tensão pelo programa ESTABTEN para o Caso-Base do sistema IEEE 24 barras, cujo diagrama unifilar é mostrado na Figura 4.2.

Para carregar o sistema de transmissão e tornar necessárias ações de reforço, duas condições de carregamento do sistema são aplicadas:

Caso 1: aumento do carregamento somente na barra 8

Caso 2: aumento do carregamento nas barras de 138 kV (barras 4, 5, 6 e 8)

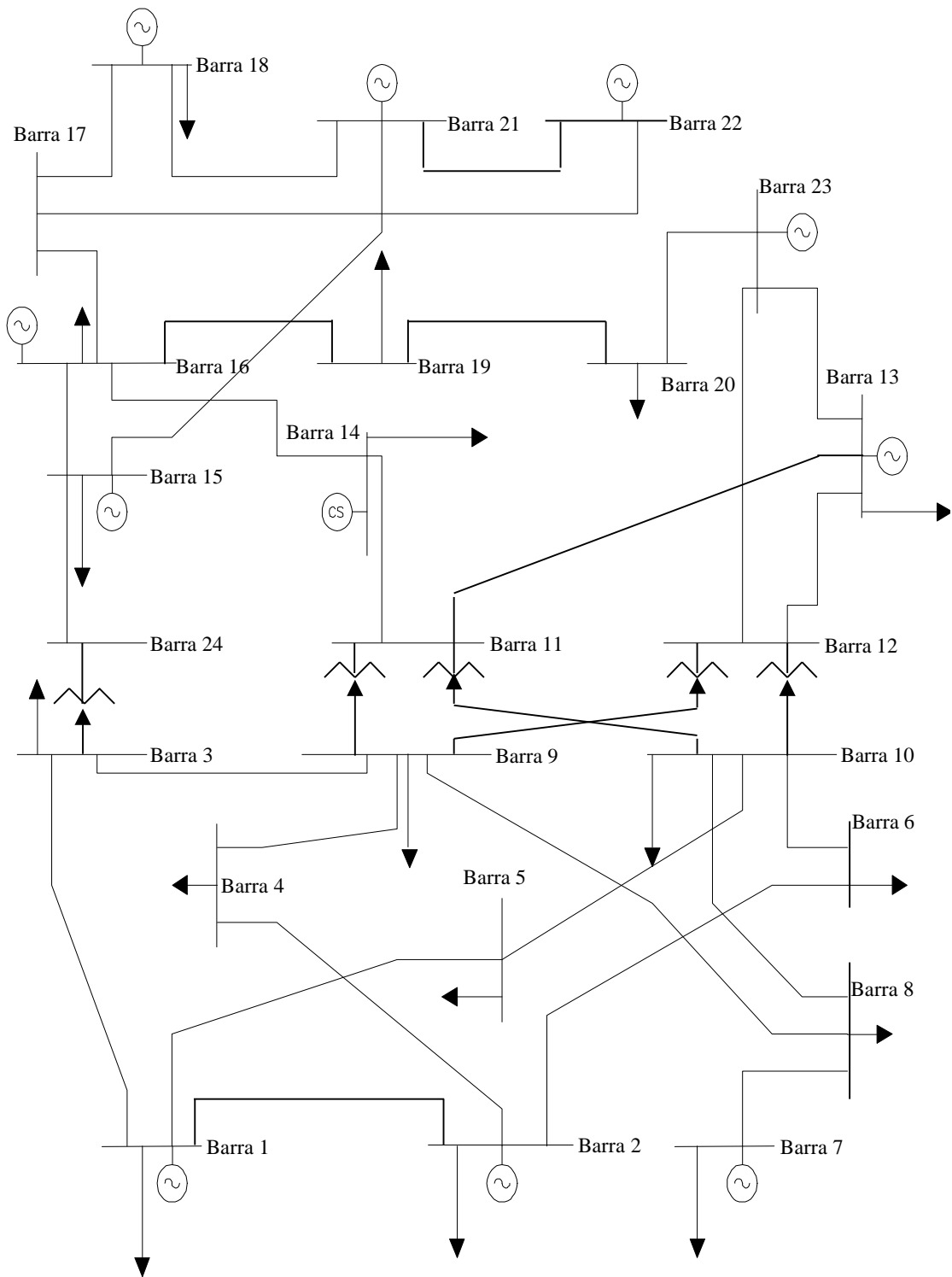


Figura 4.2

Sistema-Teste IEEE 24 Barras

Tabela 4.57 - Relatório de Estabilidade de Tensão do Caso-Base

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Barra	Número-Nome	Tensão	Equip	Tipo	Si	Smax	det[D`]*V	β
1	ANGRA---01MQ	1,000	GL	1	0,621	27,6	761,1	81,7
2	ANGRA---01MQ	1,000	GL	1	0,730	27,3	743,1	80,8
3	ANGRA---01MQ	0,950	L	0	1,838	12,7	157,3	99,0
4	ANGRA---01MQ	0,960	L	0	0,755	10,5	109,5	93,1
5	ANGRA---01MQ	0,982	L	0	0,724	12,9	167,1	91,0
6	ANGRA---01MQ	0,974	LR	0	1,527	11,4	128,3	100,4
7	ANGRA---01MQ	1,000	GL	1	1,485	5,6	29,5	77,9
8	ANGRA---01MQ	0,960	L	0	1,745	13,1	169,0	88,3
9	ANGRA---01MQ	0,962	L	0	1,787	22,8	517,5	101,0
10	ANGRA---01MQ	0,992	L	0	1,991	22,7	510,1	103,5
11	ANGRA---01MQ	0,986	P	0	0,000	42,3	1789,4	92,4
12	ANGRA---01MQ	0,978	P	0	0,000	37,5	1406,0	93,0
13	ANGRA---01MQ	1,000	GL	2	2,625	2,6	0,0	180,0
14	ANGRA---01MQ	1,000	LQ	1	2,036	27,6	758,9	89,6
15	ANGRA---01MQ	0,998	GL	-1	1,398	40,2	1610,2	81,2
16	ANGRA---01MQ	1,000	GL	1	0,584	42,2	1780,8	82,0
17	ANGRA---01MQ	1,001	P	0	0,000	40,8	1667,9	82,2
18	ANGRA---01MQ	1,000	GL	1	0,215	37,7	1423,7	82,4
19	ANGRA---01MQ	0,991	L	0	1,847	37,6	1407,0	87,8
20	ANGRA---01MQ	0,994	L	0	1,306	49,5	2449,0	84,5
21	ANGRA---01MQ	1,000	G	1	2,976	40,0	1592,9	79,2
22	ANGRA---01MQ	1,000	G	1	1,388	14,6	211,1	81,1
23	ANGRA---01MQ	1,000	G	1	6,550	30,6	890,9	75,2
24	ANGRA---01MQ	0,970	P	0	0,000	14,8	219,2	87,0

4.2.1 - Caso 1: Aumento da Margem de Potência na Barra 8

A fim de forçar o aparecimento de problemas de tensão, a carga na barra 8 é aumentada gradualmente, mantendo o mesmo fator de potência, até o ponto de colapso.

Os resultados da avaliação das condições de estabilidade de tensão pelo programa ESTABTEN no ponto de colapso são mostrados na Tabela 4.58. A barra 8 é a pior do ponto de vista de margem de potência dentre as barras de carga: tem uma carga de 4,87 MVA e o programa indica uma máxima carga de 5,0 MVA. O ângulo β vale 178° para um máximo de 180° . Portanto, a barra 8 é a que terá sua margem aumentada.

A Tabela 4.58 indica também que 6 das 11 fontes de geração reativa atingiram seus limites, com a conseqüente perda do controle de tensão. Isso é indicado pelo sinal negativo na coluna Tipo.

Tabela 4.58 - Relatório de Estabilidade de Tensão do Ponto de Colapso - Caso 1

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Barra	Número-Nome	Tensão	Equip	Tipo	Si	Smax	det[D`]*V	β	M
1	ANGRA---01MQ	0,996	GL	-1	0,849	3,8	13,4	164,8	
2	ANGRA---01MQ	0,996	GL	-1	0,945	3,7	13,0	164,8	
3	ANGRA---01MQ	0,915	L	0	1,838	5,1	22,3	161,7	0,640
4	ANGRA---01MQ	0,917	L	0	0,755	3,1	8,7	166,2	0,756
5	ANGRA---01MQ	0,943	L	0	0,724	3,2	9,6	167,9	0,774
6	ANGRA---01MQ	0,915	LR	0	1,501	3,2	8,0	170,9	0,531
7	ANGRA---01MQ	0,879	GL	-1	2,122	2,3	1,0	174,5	
8	ANGRA---01MQ	0,748	L	0	4,871	5,0	1,0	178,0	0,026
9	ANGRA---01MQ	0,890	L	0	1,787	5,1	22,6	171,6	0,650
10	ANGRA---01MQ	0,918	L	0	1,991	4,7	18,1	173,4	0,576
11	ANGRA---01MQ	0,948	P	0	0,000	12,2	147,8	159,0	
12	ANGRA---01MQ	0,930	P	0	0,000	9,8	96,5	158,8	
13	ANGRA---01MQ	0,995	GL	-2	6,640	6,6	0,0	180,0	
14	ANGRA---01MQ	1,000	LQ	1	2,494	31,0	-957,4	-41,7	0,920
15	ANGRA---01MQ	0,993	GL	-1	1,398	29,1	842,4	120,1	
16	ANGRA---01MQ	0,998	GL	-1	0,671	37,8	1425,2	107,8	
17	ANGRA---01MQ	1,000	P	0	0,000	35,8	1280,5	90,3	
18	ANGRA---01MQ	1,000	GL	1	0,197	34,4	1185,9	87,7	
19	ANGRA---01MQ	0,989	L	0	1,847	31,9	1013,4	96,0	0,942
20	ANGRA---01MQ	0,993	L	0	1,306	47,7	2275,4	89,0	0,973
21	ANGRA---01MQ	1,000	G	1	2,957	35,9	1277,0	102,7	
22	ANGRA---01MQ	1,000	G	1	1,387	13,9	192,6	81,7	
23	ANGRA---01MQ	1,000	G	1	6,581	41,6	-1691,4	-39,6	
24	ANGRA---01MQ	0,950	P	0	0,000	8,8	77,5	132,6	

Os resultados fornecidos pelo programa CaTrans indicam a existência de 7 caminhos críticos de transmissão de potência: 4 caminhos para a barra 5 e 3 caminhos para a barra 8. Os aumentos de carga na barra 8 e os acréscimos nas perdas de transmissão foram atendidas pelo gerador swing da barra 13. Como o objetivo é reforçar a barra de carga 8, que é a barra crítica, o pior caminho de transmissão envolve as barras 15, 24, 3, 9, 8. Para os 7 caminhos, a tensão na barra terminal encontra-se na Região B.

A Tabela 4.59 apresenta as condições do pior caminho e sub-caminhos de transmissão de potência para a barra crítica 8. A idéia é analisar os sub-caminhos que começam no gerador 15 incluindo um novo ramo de cada vez. Portanto, o 1º sub-caminho a ser analisado vai da barra 15 para a barra 24. Uma inspeção dos resultados demonstra que a tensão na barra 24 encontra-se "folgadamente" na Região A de operação. Sequencialmente, vai-se incluindo novos ramos até que o 4º e último sub-caminho inclui a barra 8 que é a barra em análise.

Na Tabela 4.59 o número em negrito mais à direita ordena os ramos, a partir do pior. Essa condição é definida pela distância, em termos de módulo e ângulo da tensão na barra terminal

do sub-caminho, do ponto de operação em análise ao ponto de máxima transmissão. Na Tabela 4.59 observa-se que a tensão na barra terminal encontra-se na Região B só para o caminho completo, quando a barra terminal é a barra 8. Essa condição é indicada pelo sinal negativo no valor da distância DELTA V FASOR. Portanto, afirma-se que o ramo crítico é aquele entre as barras 9 e 8. Portanto, minimizando-se o fluxo de potência ativa da barra 9 para a barra 8, o objetivo pode ser alcançado.

Tabela 4.59 - Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão para o Ponto de Colapso do Caso 1

***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 15 24				
		MÓDULO	ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR	0,9937	-4,8706		
	TENSÃO NA CARGA	0,9512	-10,6830		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA	0,6001	-38,9824		
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR	
	DISTÂNCIA	0,3511	0,4939	0,6060	4
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 15 24 3				
		MÓDULO	ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR	0,9937	-4,8706		
	TENSÃO NA CARGA	0,9187	-21,1242		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA	0,6612	-45,9935		
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR	
	DISTÂNCIA	0,2574	0,4341	0,5047	3
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 15 24 3 9				
		MÓDULO	ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR	0,9937	-4,8706		
	TENSÃO NA CARGA	0,8954	-21,1935		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA	0,4713	-21,2076		
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR	
	DISTÂNCIA	0,4241	0,0002	0,4241	2
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 15 24 3 9 8				
		MÓDULO	ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR	0,9937	-4,8706		
	TENSÃO NA CARGA	0,7596	-46,8783		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA	0,9251	-35,1453		
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR	
	DISTÂNCIA	-0,1655	-0,2048	-0,2633	1

Pode-se minimizar o fluxo através do redespacho de potência reativa e/ou ativa. No caso do redespacho de potência ativa deve-se limitar as possíveis variações de geração ativa para

evitar que o fluxo de potência no ramo seja "totalmente minimizado" chegando até a inverter o sentido. Nesse caso, provavelmente, um outro ramo ficaria muito carregado. Essa limitação nas variações é conseguida através da imposição de limites de geração fictícios ao redor do valor gerado no ponto de operação a sofrer redespacho ativo. A Tabela 4.60 mostra os valores das gerações ativas e reativas, assim como as perdas ativas, no ponto de colapso do Caso 1.

Tabela 4.60 - Gerações Ativa, Reativa e Perdas Ativas no Sistema

	Barra	Ativa (MW)	Reativa (MVar)	Perdas (MW)
Ponto de Colapso do Caso 1	1	170	80	106
	2	170	80	
	7	270	180	
	13	872	240	
	15	185	110	
	16	130	80	
	18	350	58	
	21	295	-20	
	22	135	-32	
	23	655	64	

4.2.1.1 - Etapa 1 de Reforço

A partir do ponto de colapso do Caso 1 analisa-se a possibilidade de reforço considerando somente redespacho de potência reativa, ou seja, com 0 % de variação na geração de potência ativa.

Neste teste, e em todos os outros desta seção, os módulos de tensão foram limitados entre 0,90 e 1,10 pu.

A Tabela 4.61 mostra as condições de estabilidade do sistema avaliadas pelo programa ESTABTEN após a atuação do programa FLUPOT. O redespacho de potência reativa foi

responsável por recuperar o controle de tensão em todas as barras com geração variável de potência reativa. Além disso, em relação à barra 8, causou aumento substancial na margem $M=(1- S_i / S_{\max})$ de 0,026 para 0,604, o que corresponde a um aumento de 2223%. Isto por que S_{\max} aumentou de 5 para 12,3 MVA, o que significa um reforço de 146%. O Índice de Influência da ação de reforço também traduz o benefício: $II=(M_i / M_o - 1) = 22,23$

Tabela 4.61 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Minimização do Fluxo do Ramo 9-8

Barra	Número-Nome	Tensão	Equip	Tipo	S_i	S_{\max}	$\det[D'] \cdot V$	β	M
1	ANGRA---01MQ	1,096	GL	1	0,749	32,2	1033,2	84,0	
2	ANGRA---01MQ	1,097	GL	1	0,837	31,8	1011,3	83,0	
3	ANGRA---01MQ	0,992	L	0	1,838	14,0	194,0	99,7	0,869
4	ANGRA---01MQ	1,033	L	0	0,755	12,0	142,6	95,5	0,937
5	ANGRA---01MQ	1,063	L	0	0,724	14,9	220,5	93,8	0,951
6	ANGRA---01MQ	1,048	LR	0	1,562	13,0	166,4	103,0	0,880
7	ANGRA---01MQ	1,047	GL	1	2,087	5,7	28,5	108,3	
8	ANGRA---01MQ	0,938	L	0	4,871	12,3	127,2	123,6	0,604
9	ANGRA---01MQ	1,012	L	0	1,787	24,8	611,2	107,5	0,928
10	ANGRA---01MQ	1,054	L	0	1,991	24,9	618,1	110,0	0,920
11	ANGRA---01MQ	1,046	P	0	0,000	47,5	2258,5	96,0	
12	ANGRA---01MQ	1,049	P	0	0,000	42,7	1827,3	96,9	
13	ANGRA---01MQ	1,097	GL	2	6,336	6,3	0,0	180,0	
14	ANGRA---01MQ	1,052	LQ	1	2,417	31,1	958,7	90,7	0,922
15	ANGRA---01MQ	0,991	GL	1	1,639	41,6	1727,7	82,2	
16	ANGRA---01MQ	1,014	GL	1	0,348	52,5	2756,6	83,8	
17	ANGRA---01MQ	0,998	P	0	0,000	42,6	1816,2	82,2	
18	ANGRA---01MQ	0,989	GL	1	0,958	38,8	1500,9	83,1	
19	ANGRA---01MQ	1,040	L	0	1,847	42,2	1778,4	87,8	0,956
20	ANGRA---01MQ	1,073	L	0	1,306	57,7	3325,0	85,1	0,977
21	ANGRA---01MQ	0,992	G	1	2,958	44,2	1945,3	81,1	
22	ANGRA---01MQ	0,993	G	1	1,394	14,9	218,8	81,0	
23	ANGRA---01MQ	1,095	G	1	6,798	36,8	1307,8	78,8	
24	ANGRA---01MQ	0,980	P	0	0,000	16,6	275,1	85,8	

Observando-se a Tabela 4.61, percebe-se que a barra 8 continua sendo a barra de carga mais crítica. O programa CaTrans calculou os caminhos críticos para a barra 8 no novo ponto de operação após a Etapa 1 de Reforço, isto é, após o redespacho reativo. Agora, o pior caminho envolve as barras 23, 12, 10, 8 (Tabela 4.62). As tensões das barras terminais dos sub-caminhos estão todas na Região A. O problema foi considerado resolvido. Nada impede, entretanto, que se passe a minimizar o fluxo de potência ativa no ramo mais crítico do caminho crítico (por mais leve que seja a carga, sempre há barra, caminho e ramo críticos).

Tabela 4.62 - Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Crítico de Transmissão para o Ponto de Operação após a Etapa 1 de Reforço

***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 23 12					
			MÓDULO	ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR		1,0950	2,6873		
	TENSÃO NA CARGA		1,0495	-6,8059		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,7005	-35,9024		
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR		
	DISTÂNCIA	0,3490	0,5078	0,6162	3	
***	SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 23 12 10					
			MÓDULO	ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR		1,0950	2,6873		
	TENSÃO NA CARGA		1,0538	-18,5130		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,8268	-41,6721		
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR		
	DISTÂNCIA	0,2271	0,4042	0,4636	2	
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 23 12 10 8					
			MÓDULO	ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR		1,0950	2,6873		
	TENSÃO NA CARGA		0,9386	-34,8112		
	TENSÃO CRÍTICA NA CARGA		0,8178	-41,8386		
		DELTA V MOD	DELTA TETA	DELTA V FASOR		
	DISTÂNCIA	0,1208	0,1227	0,1722	1	

4.2.1.2 - Etapa 2 de Reforço

A Tabela 4.62 mostra cada um dos sub-caminhos do pior caminho após a Etapa 1 de Reforço. A barra terminal do pior sub-caminho está na Região A. A inclusão do ramo 10-8 torna a distância DELTA V FASOR a menor encontrada. Então, passa-se minimizar o fluxo neste ramo.

A partir do ponto de operação após a Etapa 1, o programa FLUPOT é usado com limites de geração de potência ativa em torno do valor de geração de $\pm 10\%$.

A Tabela 4.63 mostra as condições de estabilidade avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo no ramo 10-8 para até $\pm 10\%$ de variações nos valores de geração.

O redespacho de potência ativa, causou um aumento em S_{\max} de 12,3 para 12,9 MVA, o que corresponde a 5% de incremento.

Da mesma forma, o reforço na barra 8 mediante redespacho de potência ativa foi efetuado em 6 etapas sucessivas. A Tabela 4.64 mostra as condições de estabilidade na barra 8, a partir do ponto de colapso do Caso 1 até a Etapa 6, avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo de potência ativa no ramo crítico pertencente ao pior caminho de transmissão. A Tabela 4.64 também mostra a Margem de Potência e o Índice de Influência que traduz a melhoria ou deterioração das condições de operação do sistema, após a ação de controle. A Tabela 4.65 mostra os fluxos de potência ativa nos ramos 7-8, 9-8 e 10-8, que foram os ramos que tiveram seus fluxos de potência minimizados nas diversas etapas.

Tabela 4.63 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Minimização do Fluxo do Ramo 10-8

Barra	Número-Nome	Tensão	Equip	Tipo	Si	Smax	det[D`]*V	β	M
1	ANGRA---01MQ	1,060	GL	1	0,511	31,0	959,3	84,6	
2	ANGRA---01MQ	1,062	GL	1	0,611	30,7	943,1	82,8	
3	ANGRA---01MQ	1,022	L	0	1,838	14,9	217,5	98,6	0,877
4	ANGRA---01MQ	1,023	L	0	0,755	11,9	140,2	95,1	0,937
5	ANGRA---01MQ	1,045	L	0	0,724	14,6	212,4	93,2	0,950
6	ANGRA---01MQ	1,040	LR	0	1,558	12,9	164,6	102,4	0,879
7	ANGRA---01MQ	1,068	GL	1	2,291	6,1	32,2	102,5	
8	ANGRA---01MQ	0,958	L	0	4,871	12,9	142,2	119,3	0,622
9	ANGRA---01MQ	1,023	L	0	1,787	25,5	645,8	106,0	0,930
10	ANGRA---01MQ	1,054	L	0	1,991	25,3	633,7	108,5	0,921
11	ANGRA---01MQ	1,062	P	0	0,000	48,9	2390,0	94,9	
12	ANGRA---01MQ	1,052	P	0	0,000	43,1	1858,8	96,0	
13	ANGRA---01MQ	1,096	GL	2	5,013	5,0	0,0	180,0	
14	ANGRA---01MQ	1,089	LQ	1	2,271	32,7	1064,7	90,0	0,931
15	ANGRA---01MQ	1,079	GL	1	1,209	47,0	2207,9	81,8	
16	ANGRA---01MQ	1,082	GL	1	0,385	57,3	3288,1	84,0	
17	ANGRA---01MQ	1,084	P	0	0,000	48,0	2306,1	82,9	
18	ANGRA---01MQ	1,084	GL	1	0,726	44,3	1963,4	83,4	
19	ANGRA---01MQ	1,077	L	0	1,847	44,4	1968,0	87,9	0,958
20	ANGRA---01MQ	1,082	L	0	1,306	58,7	3439,9	85,1	0,978
21	ANGRA---01MQ	1,089	G	1	3,191	50,6	2548,2	81,7	
22	ANGRA---01MQ	1,087	G	1	1,470	17,2	294,1	82,5	
23	ANGRA---01MQ	1,089	G	1	6,997	36,2	1258,1	77,6	
24	ANGRA---01MQ	1,045	P	0	0,000	18,4	340,2	86,0	

Tabela 4.64 - Avaliação das Condições de Estabilidade na Barra 8

Caso	Tensão	S_i	S_{max}	β	M	II
Colapso	0,748	4,871	5,0	178,0	0,026	0
Etapa 1	0,938	4,871	12,3	123,6	0,604	22,23
Etapa 2	0,958	4,871	12,9	119,3	0,622	22,92
Etapa 3	0,960	4,871	13,1	116,2	0,628	23,15
Etapa 4	0,963	4,871	13,3	113,1	0,634	23,38
Etapa 5	0,968	4,871	13,4	110,5	0,636	23,46
Etapa 6	0,969	4,871	13,6	106,6	0,642	23,69

Tabela 4.65 - Fluxos de Potência Ativa nos Ramos onde Houve Minimização

Etapas	Ramo 7-8	Ramo 9-8	Ramo 10-8
Caso-Base	145	196	190
1.....Min (F_{9-8})	145	185	182
2.....Min (F_{10-8})	172	173	163
3.....Min (F_{9-8})	202	153	150
4.....Min (F_{10-8})	235	140	128
5.....Min (F_{3-9})	270	118	113
6.....Min (F_{10-8})	310	102	89

A Figura 4.3 mostra a variação da margem de potência na barra 8 devido as ações de reforço sucessivas. O redespacho de potência reativa causou aumento substancial de 2223%. Já os sucessivos redespachos de potência ativa não tiveram maior importância nas margens resultantes.

A Figura 4.4 mostra a representação gráfica dos Índices de Influência na barra 8, o que permite visualizar graficamente o grau de melhoria das condições de operação do sistema com respeito a uma determinada ação de controle em um determinado ponto de operação. No caso,

como já sabido, as ações foram todas bem sucedidas, especialmente o redespacho de potência reativa.

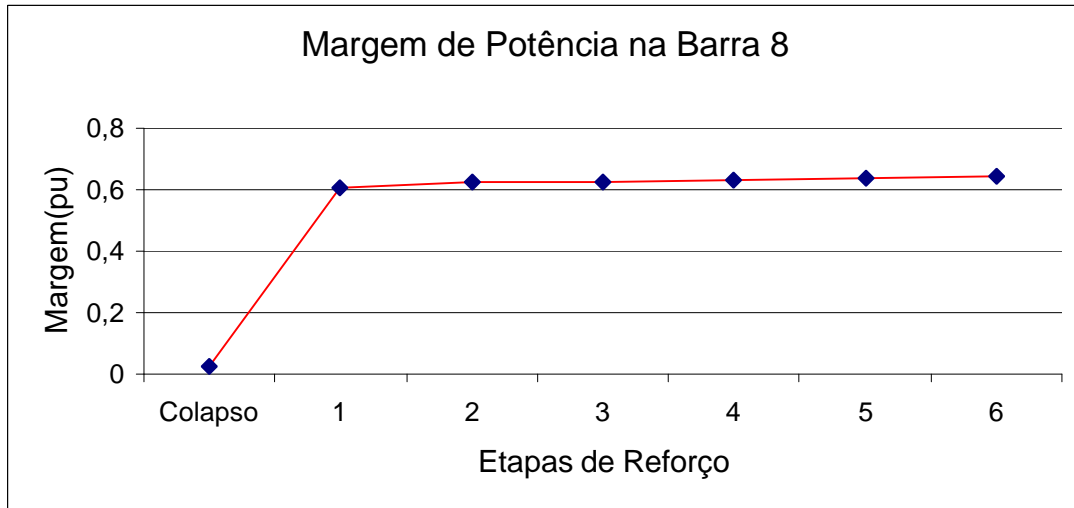


Figura 4.3

Margem de Potência Aparente em pu de S_{\max} na Barra 8

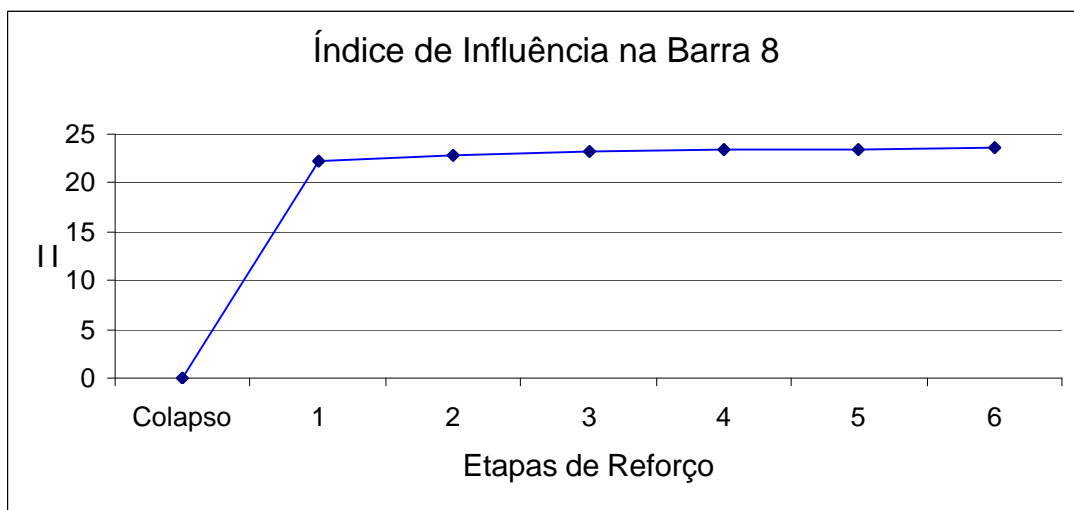


Figura 4.4

Representação Gráfica do Índice de Influência na Barra 8

A Tabela 4.66 mostra o resultado do redespacho reativo e ativo nas barras de geração e nas perdas ativas no sistema para o presente estudo. Observa-se que só com redespacho reativo se evitou 25% das perdas ativas e o restante da redução das perdas foi por redespacho de

potência ativa, principalmente da geração na barra 7, que foi a responsável por suprir a diminuição de geração ativa na barra swing 13.

Tabela 4.66 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema

Barras	Caso- Base	Etapa 1 (Min 9-8)	Etapa 2 (Min 10-8)	Etapa 3 (Min 9-8)	Etapa 4 (Min 10-8)	Etapa 5 (Min 3-9)	Etapa 6 (Min 10-8)
1	170	170	156	170	156	141	130
2	170	170	156	170	156	141	130
7	270	270	297	327	360	395	435
13	902	875	746	810	675	864	715
15	185	185	198	185	198	179	191
16	130	130	136	130	136	123	129
18	350	350	377	349	376	339	365
21	295	295	317	294	315	285	307
22	135	135	142	136	143	130	137
23	655	655	700	658	702	634	677
Perdas Ativas	106	79	69	70	62	72	59

4.2.2 - Caso 2: Aumento da Margem de Potência nas Barras de 138 kV

Novamente, a fim de forçar o aparecimento de problemas de tensão, a partir do Caso-Base (Tabela 4.57), as cargas nas barras 4, 5, 6 e 8 foram aumentadas proporcionalmente, mantendo o mesmo fator de potência, até o ponto de colapso.

Os resultados da avaliação das condições de estabilidade de tensão pelo programa ESTABTEN no ponto de colapso do Caso 2 são mostrados na Tabela 4.67. A barra 8 é a pior do ponto de vista de margem de potência dentre as barras de carga: tem uma carga de

3,195 MVA e o programa indica uma máxima carga de 3,2 MVA. O ângulo β vale 179,5° para um máximo de 180°. Portanto, a barra 8 é a que terá sua margem aumentada.

A Tabela 4.67 indica também que 7 das 11 fontes de geração reativa atingiram seus limites, com a conseqüente perda de controle de tensão.

Como na Seção 4.2.1 deste estudo, após o programa CaTrans encontrar o pior caminho de transmissão e ramo crítico, o programa FLUPOT minimiza o fluxo de potência ativa neste ramo crítico para duas situações:

1. Redespacho de potência reativa somente, isto é, 0 % de variação na geração de potência ativa,
2. Redespacho de potência ativa, para variações máximas de $\pm 10\%$ em torno do valor de geração

Tabela 4.67 - Relatório de Estabilidade de Tensão no Ponto de Colapso - Caso 2

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Barra	Número-Nome	Tensão	Equip	Tipo	Si	Smax	det[D`]*V	β	M
1	ANGRA---01MQ	0,902	GL	-1	0,849	1,1	0,5	179,3	
2	ANGRA---01MQ	0,901	GL	-1	0,945	1,2	0,5	179,3	
3	ANGRA---01MQ	0,872	L	0	1,838	2,2	1,2	178,9	0,165
4	ANGRA---01MQ	0,823	L	0	1,541	1,7	0,4	179,4	0,094
5	ANGRA---01MQ	0,840	L	0	1,498	1,6	0,4	179,5	0,064
6	ANGRA---01MQ	0,787	LR	0	2,749	2,8	0,2	179,7	0,018
7	ANGRA---01MQ	0,973	GL	-1	2,122	2,2	0,3	178,8	
8	ANGRA---01MQ	0,853	L	0	3,195	3,2	0,3	179,5	0,002
9	ANGRA---01MQ	0,858	L	0	1,787	2,2	1,5	179,4	0,188
10	ANGRA---01MQ	0,850	L	0	1,991	2,2	0,9	179,7	0,095
11	ANGRA---01MQ	0,906	P	0	0,000	2,3	5,4	179,0	
12	ANGRA---01MQ	0,887	P	0	0,000	2,3	5,4	178,7	
13	ANGRA---01MQ	0,962	GL	-2	7,812	7,8	0,0	180,0	
14	ANGRA---01MQ	0,976	LQ	-1	2,521	4,1	10,8	176,8	0,385
15	ANGRA---01MQ	0,985	GL	-1	1,398	8,2	64,5	173,9	
16	ANGRA---01MQ	0,990	GL	-1	0,671	8,6	73,7	173,9	
17	ANGRA---01MQ	0,997	P	0	0,000	15,2	231,7	172,8	
18	ANGRA---01MQ	1,000	GL	1	0,196	7,2	52,5	178,5	
19	ANGRA---01MQ	0,984	L	0	1,847	12,6	155,1	170,1	0,853
20	ANGRA---01MQ	0,991	L	0	1,306	27,9	775,8	166,9	0,953
21	ANGRA---01MQ	1,000	G	1	2,954	20,8	-425,6	-168,1	
22	ANGRA---01MQ	1,000	G	1	1,381	8,2	64,6	135,1	
23	ANGRA---01MQ	1,000	G	1	6,761	190,1	-36092,3	-2,9	
24	ANGRA---01MQ	0,924	P	0	0,000	2,3	5,2	175,5	

As Tabelas 4.68 até 4.71 mostram as condições de estabilidade das barras 4, 5, 6 e 8 respectivamente, no ponto de colapso do Caso 2 e após 6 etapas sucessivas de reforço. As tabelas também mostram a Margem de Potência e o Índice de Influência. A Tabela 4.72 mostra os fluxos de potência ativa nos ramos 9-8, 10-6 e 12-9, que foram os ramos que tiveram seus fluxos de potência minimizados nas diversas etapas.

Tabela 4.68 - Avaliação das Condições de Estabilidade na Barra 4 após 6 Etapas

Caso	Tensão	S_i	S_{max}	β	M	II
Colapso	0,823	1,541	1,7	179,4	0,094	0
Etapas 1	0,951	1,541	10,1	103,1	0,847	8,06
Etapas 2	0,927	1,541	9,6	103,6	0,839	7,98
Etapas 3	0,931	1,541	9,7	102,7	0,841	7,99
Etapas 4	0,938	1,541	9,9	101,8	0,844	8,03
Etapas 5	0,953	1,541	10,3	100,6	0,850	8,09
Etapas 6	1,004	1,541	11,5	99,0	0,866	8,26

Tabela 4.69 - Avaliação das Condições de Estabilidade na Barra 5 após 6 Etapas

Caso	Tensão	S_i	S_{max}	β	M	II
Colapso	0,840	1,498	1,6	179,5	0,064	0
Etapas 1	0,973	1,498	12,3	100,9	0,878	12,78
Etapas 2	0,949	1,498	11,2	102,8	0,866	12,59
Etapas 3	0,953	1,498	11,9	100,0	0,874	12,71
Etapas 4	0,961	1,498	11,6	100,3	0,871	12,66
Etapas 5	0,979	1,498	12,3	98,8	0,878	12,78
Etapas 6	1,033	1,498	13,6	96,9	0,890	12,96

Tabela 4.70 - Avaliação das Condições de Estabilidade na Barra 6 após 6 Etapas

Caso	Tensão	S_i	S_{max}	β	M	I I
Colapso	0,787	2,749	2,8	179,7	0,018	0
Etapa 1	0,933	2,765	10,3	116,9	0,770	41,25
Etapa 2	0,905	2,762	9,6	118,6	0,712	38,11
Etapa 3	0,909	2,762	9,8	117,4	0,718	38,43
Etapa 4	0,917	2,763	10,0	116,4	0,724	38,73
Etapa 5	0,935	2,766	10,4	114,5	0,734	39,30
Etapa 6	0,995	2,774	11,9	111,0	0,767	41,10

Tabela 4.71 - Avaliação das Condições de Estabilidade na Barra 8 após 6 Etapas

Caso	Tensão	S_i	S_{max}	β	M	I I
Colapso	0,853	3,195	3,2	179,5	0,002	0
Etapa 1	0,927	3,195	12,0	107,5	0,859	548,92
Etapa 2	0,937	3,195	11,7	112,2	0,727	464,23
Etapa 3	0,935	3,195	11,7	113,6	0,727	464,23
Etapa 4	0,937	3,195	11,7	114,9	0,727	464,23
Etapa 5	0,949	3,195	12,0	114,8	0,734	468,60
Etapa 6	0,962	3,195	13,0	108,2	0,754	481,71

Tabela 4.72 - Fluxos de Potência Ativa nos Ramos onde Houve Minimização

Etapas	Ramo 9-8	Ramo 10-6	Ramo 12-9
Caso-Base	113	223	228
1....Min (F_{12-9})	108	222	224
2....Min (F_{10-6})	121	212	216
3....Min (F_{10-6})	131	203	205
4....Min (F_{10-6})	139	192	192
5....Min (F_{10-6})	146	180	177
6....Min (F_{9-8})	130	174	177

A Figura 4.5 mostra a variação da margem de potência devido às ações de reforço sucessivas nas barras onde foi feito o acréscimo no carregamento (barras 4, 5, 6 e 8). O redespacho de potência reativa causou aumento substancial de 801% na barra 4, 1272% na barra 5, 4178% na barra 6 e especialmente na barra 8 que foi de 42850%. Já os sucessivos redespachos de potência ativa não tiveram maior importância nas margens resultantes.

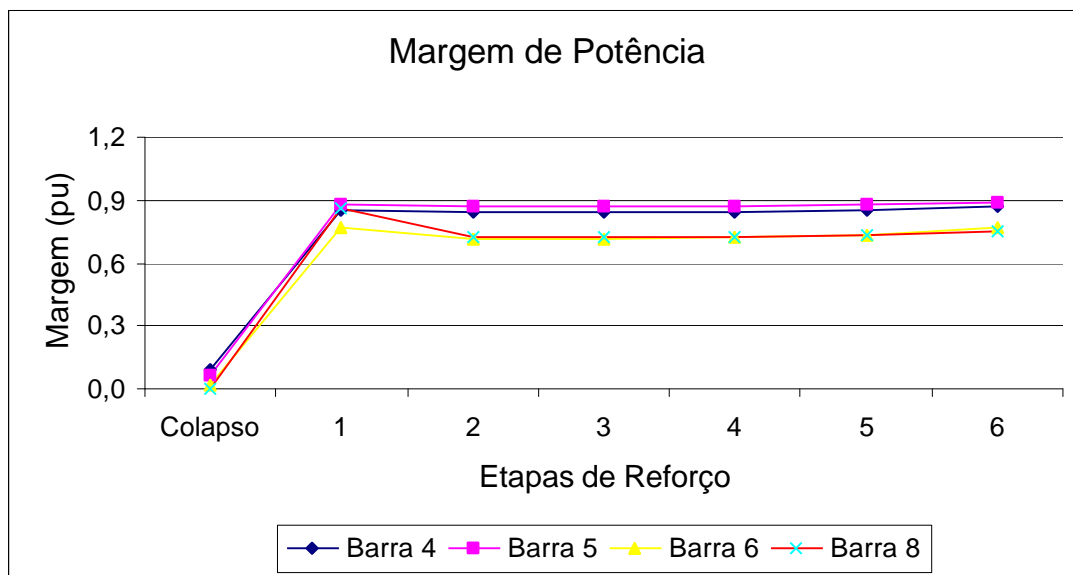


Figura 4.5

Margem de Potência Aparente em pu de S_{\max} nas Barras 4, 5, 6 e 8.

A Figura 4.6 mostra a representação gráfica dos Índices de Influência nas barras onde foi feito o máximo carregamento (barras 4, 5, 6 e 8), o que permite visualizar graficamente o grau de melhoria ou deterioração das condições de operação do sistema com respeito a uma determinada ação de controle em um determinado ponto de operação. No caso, a maioria das ações foi bem sucedida, e nota-se especialmente a influência do redespacho de potência reativa sobre a barra 8.

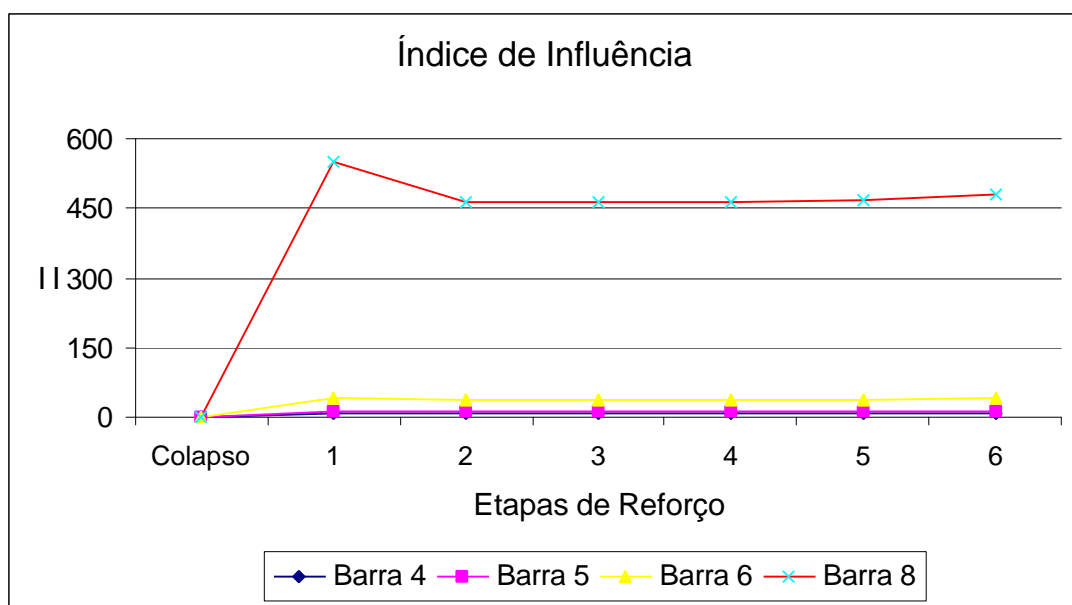


Figura 4.6
Representação Gráfica do Índice de Influência nas Barras 4, 5, 6 e 8

A Tabela 4.73 mostra o resultado do redespacho reativo e ativo nas barras de geração e nas perdas ativas no sistema. Observa-se que só com redespacho reativo se evitou 25% das perdas ativas e que o redespacho de potência ativa não teve maior importância. Observa-se que a maior variação acontece na geração das barras próximas e menor variação nas barras de geração afastadas das barras muito carregadas. A geração na barra 7 foi a principal responsável por suprir a diminuição de geração ativa na barra swing 13.

Tabela 4.73 - Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema

Barras	Caso- Base	Etapa 1 (Min 12-9)	Etapa 2 (Min 10-6)	Etapa 3 (Min 10-6)	Etapa 4 (Min 10-6)	Etapa 5 (Min 10-6)	Etapa 6 (Min 9-8)
1	170	170	187	206	227	250	273
2	170	170	187	206	227	250	273
7	270	270	249	230	214	200	220
13	1024	999	842	663	466	251	362
15	185	185	201	218	237	258	238
16	130	130	139	149	160	172	162
18	350	350	381	415	453	494	452
21	295	295	322	350	381	415	381
22	135	135	146	158	170	183	171
23	655	655	712	773	840	913	834
Perdas Ativas	101	76	82	85	92	102	81

4.2.3 - Conclusões

O objetivo original do estudo é, dado um ponto de operação com certo perfil de carga, calcular ações de controle que promovam o redespacho de potência reativa, e se necessário e eficiente, o redespacho de potência ativa, para aumentar a margem de potência da barra de carga crítica.

Partiu-se do ponto de operação do Caso-Base. O programa computacional ESTABTEN é aplicado para avaliar-se as condições de estabilidade do sistema. Os resultados indicam que no primeiro caso (Seção 4.2.1) a carga da barra 8 encontra-se praticamente no máximo e no segundo caso (Seção 4.2.2) a carga das barras 4, 5, 6 e 8 encontram-se praticamente no máximo. Usando-se o programa CaTrans, foram identificados os caminhos críticos e sub-

caminhos associados à pior barra (barra 8 para os dois casos). O programa FLUPOT foi usado para diminuir o fluxo de potência ativa em ramos destes caminhos.

Para o Caso 1 (Seção 4.2.1), quando foi permitido somente redespacho de potência reativa, obteve-se um incremento na máxima injeção de potência aparente na barra 8 de 146% em relação ao ponto de colapso do Caso 1 (Tabela 4.61). E ainda, conseguiu-se recuperar o controle de tensão em todas as barras de geração do sistema. Quando foi permitido redespacho de potência ativa, o reforço foi feito limitando-se as variações na geração ativa em $\pm 10\%$ em torno dos valores do caso anterior. Obteve-se um incremento na máxima injeção de potência aparente na barra 8 de 172% em relação ao ponto de colapso do Caso 1 (Tabela 4.64). Supõe-se que a margem de 64,18% esteja adequada.

Para o Caso 2 (Seção 4.2.2), quando foi permitido somente redespacho de potência reativa, obteve-se um incremento na máxima injeção de potência aparente em relação ao ponto de colapso do Caso 2 de 494% na barra 4 (Tabela 4.68), 669% na barra 5 (Tabela 4.69), 268% na barra 6 (Tabela 4.70), de 275% na barra 8 (Tabela 4.71). E ainda, conseguiu-se recuperar o controle de tensão em todas as barras de geração do sistema. Quando foi permitido redespacho de potência ativa, o reforço foi feito limitando-se as variações na geração ativa em $\pm 10\%$ em torno dos valores do caso anterior consecutivamente. Os resultados de reforço obtidos não tiveram impacto..

Finalmente conclui-se que, nos dois casos deste estudo, somente o redespacho de potência reativa já resolve o problema.

A metodologia iterativa usada funcionou muito bem. A determinação analítica do ramo a ter seu fluxo de potência minimizado também funcionou perfeitamente, e os resultados encontrados são considerados excelentes.

CAPÍTULO 5

REFORÇO DAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE DE TENSÃO EM BARRAS DE TENSÃO CONTROLADA

5.1 - AUMENTO DA MARGEM EM BARRAS DE GERAÇÃO

Apresenta-se uma metodologia para reforçar as condições de estabilidade de barras de geração.

Essa tarefa envolve a utilização dos programas ESTABTEN que faz a avaliação das condições nodais de carregamento, e FLUPOT que minimiza o fluxo de potência em ramos de transmissão críticos através do redespacho de potência reativa e/ou ativa.

Neste primeiro momento, os ramos de transmissão críticos associados a uma barra de geração são os ramos que conectam essa barra ao resto do sistema. Portanto, são os ramos através dos quais flui toda a potência ativa e reativa gerada.

Este estudo analisa duas etapas de reforço das condições de estabilidade de tensão do sistema:

- i) minimizando o fluxo de potência ativa no ramo crítico por redespacho reativo,
- ii) minimizando o fluxo de potência ativa no ramo crítico por redespacho ativo.

No caso do redespacho de potência ativa deve-se limitar as possíveis variações de geração ativa para evitar que o fluxo de potência no ramo seja "totalmente minimizado". Nesse caso, provavelmente, um outro ramo ficaria muito carregado. Essa limitação nas variações é

conseguida através da imposição de limites de geração fictícios ao redor do valor gerado no ponto de operação a sofrer redespacho ativo.

O sistema interligado S/SE com os dados de carga pesada de fevereiro de 1998 é usado neste teste. O diagrama do sistema é mostrado na Figura 5.1.

A avaliação das condições de estabilidade de tensão pelo programa ESTABTEN no ponto de operação do Caso-Base indica que a barra 1107 ITAIPU60-7MQ encontra-se na Região B de operação: o índice $\det[D'] \cdot V$ vale -777,8 e o ângulo β vale $-17,4^\circ$, conforme mostrado na Tabela 5.1. Portanto, a barra 1107 é a que terá sua margem aumentada.

O único ramo de transmissão que conecta a barra crítica ao resto do sistema é o transformador entre as barras 1107 ITAIPU60-7MQ e 1106 ITAIPU60-500. Então, passa-se minimizar o fluxo de potência ativa que flui da barra 1107 para a barra 1106 (ou seja, diminui-se a geração).

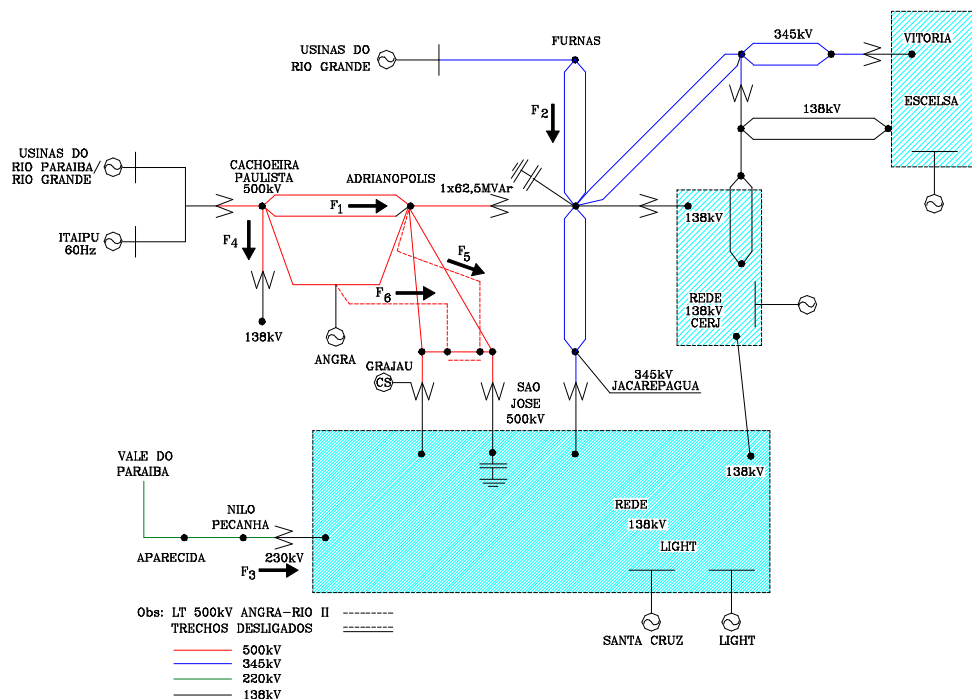


Figura 5.1

Sistema Interligado S/SE

Tabela 5.1 - Relatório de Estabilidade de Tensão do Caso-Base

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CTAP CREM; ESTABTEN: EXET

Caso	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D'] \cdot V$	β	M
barra 1107	1,05	55,124	61,8	-777,8	-17,4	-0,108

Porque diminuir a geração ?

Quando barras de carga eram analisadas, era óbvio que, para reforçar as condições de estabilidade de tensão, era necessário diminuir os fluxos de potência em ramos mais carregados transferindo-os para ramos menos carregados.

Quando uma barra de geração é analisada, parece coerente que, para reforçar as condições de estabilidade de tensão, seja necessário desviar sua geração de ramos mais carregados para ramos menos carregados.

Como existe um único tronco de transmissão conectando a barra de geração crítica ao resto do sistema, a única possibilidade é diminuir o fluxo através dele. Então, passou-se minimizar o fluxo de potência ativa que flui no transformador entre as barras 1107 ITAIPU60-7MQ e 1106 ITAIPU60-500.

Sabe-se que essa era a atitude tomada pelos operadores do sistema brasileiro S/SE durante épocas de carga pesada: diminuir a geração de Itaipu para se poder alcançar um maior FRJ, sigla que representa o somatório dos fluxos de potência ativa chegando na Área Rio [16].

O objetivo é mudar a região de operação desta barra. A análise dos quatro elementos da matriz $[D']$ mostra que $\det[D'] \cdot V < 0$ por que a relação de sensibilidade entre Q_g e V está oposta ao usual [17]. Embora o sistema possa operar normalmente nessa condição, isso não é desejável pois ações de controle de tensão podem ter efeito oposto ao desejado.

Pela definição de margem [18], o movimento de um ponto de operação na Região B em direção à "ponta do nariz" corresponde a um aumento da margem. Da mesma forma, o movimento de um ponto na Região B em direção a qualquer ponto na Região A também corresponde a um aumento da margem.

5.1.1 - Etapa 1 de Reforço: Redespacho Reativo

A partir do ponto do Caso-Base analisa-se a possibilidade de reforço considerando somente redespacho de potência reativa, ou seja, com 0% de variação na geração de potência ativa no sistema.

Neste teste, e em todos os outros desta seção, os módulos de tensão foram limitados entre 0,90 e 1,10 pu.

A Tabela 5.2 mostra as condições de estabilidade da barra 1107 avaliadas pelo programa ESTABTEN após a atuação do programa FLUPOT. O redespacho de potência reativa causou um aumento na margem $M = (1 - S_i / S_{\max})$ de -0,108 para -0,044, o que corresponde a um aumento de 59%. Isto por que $\det[D'] \cdot V$ aumentou de -777,8 para -286,6. O Índice de Influência da ação de reforço também traduz o benefício: $II = (1 - M_i / M_o) = 0,59$.

Tabela 5.2 - Relatório de Estabilidade de Tensão da Barra 1107

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CTAP CREM; ESTABTEN: EXET

Caso	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D'] \cdot V$	β	M	II
Caso-Base	1,050	55,124	61,8	-777,8	-17,4	-0,108	---
Red. Reativo	1,090	54,895	57,4	-286,6	-6,8	-0,044	0,59

5.1.2 - Etapa 2 de Reforço: Redespacho Ativo

A partir do ponto de operação após o Redespacho Reativo, o programa FLUPOT é usado com variações máximas de $\pm 10\%$ em torno dos valores de geração, mas respeitando os limites reais dos geradores. Além do gerador da barra 1107, admite-se redespacho ativo nos geradores das Áreas 1 e 9.

A Tabela 5.3 mostra as condições de estabilidade na barra 1107 avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo no ramo 1107-1106 através do redespacho de potência ativa. A Tabela 5.3 também mostra o Índice de Influência que traduz a melhoria ou deterioração das condições de operação do sistema, após a ação de controle. No caso, as ações foram bem sucedidas.

Foi possível mudar a região de operação da barra 1107, que no Caso-Base operava na Região B e que, após o redespacho reativo seguido do redespacho ativo, passou a operar na Região A.

A Tabela 5.4 mostra o resultado do redespacho reativo e ativo nas barras de geração nas Áreas 1 e 9 e na barra 1107. Observa-se que diminuindo-se somente 210 MW, o que corresponde a 4% da sua geração, é possível mudar a região de operação da barra 1107, conforme observado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Relatório de Estabilidade de Tensão da Barra 1107

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CTAP CREM; ESTABTEN: EXET

Caso	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D'] \cdot V$	β	M	II
Caso-Base	1,050	55,124	61,8	-777,8	-17,4	-0,108	---
Red. Reativo	1,090	54,895	57,4	-286,6	-6,8	-0,044	0,59
Red. Ativo	1,095	52,153	52,4	28,6	0,7	0,005	0,95

Tabela 5.4 - Gerações Ativa e Reativa nas Áreas 1, 9 e 17

Barras de Geração	Caso-Base		Redespacho Reativo		Redespacho Ativo	
	P	Q	P	Q	P	Q
Área 1						
10 ANGRA-----1MQ	600	332	600	283	606	140
12 LCBARRET--5MQ	900	26	900	-7	909	93
14 FUNIL-----2MQ	200	77	200	76	202	88
16 FURNAS-----7MQ	1267	229	1267	298	1293	303
18 ITUMBIAR---5MQ	2244	352	2244	469	2289	435
20 MARINBON -7MQ	1442	-221	1442	-127	1471	-172
22 M.MOR.-A----6MQ	250	-100	250	3	253	41
24 M.MOR.-B----4MQ	150	43	150	19	152	3
28 P.COLOMB---4MQ	300	23	300	34	303	36
30 SCRUZ-19----1MQ	45	50	45	-47	45	-86
31 SCRUZ-13----1MQ	25	4	25	3	25	-16
35 CORUMBA-- 3MQ	370	64	370	131	374	152
201 UCAMPOS---1MQ	16	-0,3	16	-1,3	16	-6
203 UCAMPOS----1MQ	16	-0,3	16	-1,3	16	-6
Área 9						
250 N.PECANH---GER	375	186	375	151	380	127
253 FONTES -----GER	132	81	132	35	132	30
255 P.PASSOS----GER	92	48	92	42	100	33
257 I.POMBOS----GER	152	47	152	41	156	12
Área 17						
1107 ITAI60-A----7MQ	5248	1711	5248	1635	5038	1381

Tabela 5.5 - Gerações Ativa, Reativa na Barra 1107 e Perdas no Sistema

Caso	Geração na Barra		Perdas					
	1107		Área 1		Área 9		Área 17	
	Ativa	Reativa	P	Q	P	Q	P	Q
Caso-Base	5248	1711	825,1	1744,2	42,8	-199,2	0	936
Redespacho Reativo	5248	1635	797,6	768,5	41,6	-215,1	0	859
Redespacho Ativo	5038	1381	754,1	-219,2	39,3	-260,4	0	776

A Tabela 5.5 mostra o resultado do redespacho reativo e ativo na barra de geração 1107 e nas perdas ativas nas Áreas 1, 9 e 17. Observa-se que se evitou 3,3% das perdas ativas na área 1 e 8,2% das perdas ativas na área 9. A diferença na geração na barra 1107 foi suprida pelas barras de geração redespachadas.

5.1.3 - Conclusões

O objetivo do estudo é, dado um ponto de operação, calcular ações de controle que promovam o redespacho de potência reativa, e se necessário e eficiente, o redespacho de potência ativa, para aumentar a margem de potência de barra de geração crítica. E mais, passar o ponto de operação da Região B para a Região A.

Partiu-se do ponto de operação do Caso-Base. O programa computacional ESTABTEN é aplicado para avaliar-se as condições de estabilidade do sistema. Os resultados indicam que a barra de geração 1107 encontrava-se operando na Região B. O programa FLUPOT foi usado para diminuir o fluxo de potência ativa no ramo que conecta esta barra ao resto do sistema.

Quando foi permitido somente redespacho de potência reativa, obteve-se um incremento na margem de potência na barra 1107 de 59% em relação ao ponto do Caso-Base (Tabela 5.2). A relação entre Q_g e V na barra continuou oposta ao usual, o que caracteriza a Região B.

Quando foi permitido redespacho de potência ativa nas Áreas 1 e 9, o reforço foi feito limitando-se em $\pm 10\%$ as variações nas gerações ativa. Obteve-se um incremento na margem de potência na barra 1107 de 105% em relação ao Caso-Base (Tabela 5.3). A relação entre Q_g e V na barra passou a ser a usual, o que caracteriza a Região A.

Observou-se também que diminuindo-se somente 210 MW, o que corresponde a 4% da sua geração (Tabela 5.5), foi possível mudar a região de operação da barra 1107, que no Caso-Base operava na Região B e que, após o redespacho de potência reativa seguido do redespacho ativo, passou a operar na Região A.

O resultado do teste não poderia ser mais encorajador para a continuidade do desenvolvimento da metodologia de reforço das condições de estabilidade.

5.2 - AUMENTO DA MARGEM DE POTÊNCIA EM BARRAS COM COMPENSAÇÃO REATIVA

Apresenta-se uma metodologia para reforçar as condições de estabilidade de barras de compensação reativa. As barras com compensação reativa são barras de tensão controlada. Já foi observado várias vezes em pontos de operação de sistemas reais, barras deste tipo com $\det[D'] < 0$, sempre devido à relação não usual entre a potência reativa gerada e a tensão controlada. Embora ainda não se tenha uma compreensão teórica de como a relação $Q_g \times V$ muda de região de operação, sabe-se que isso acontece quando a rede de transmissão está bastante carregada. A idéia então é, assim como para barras de carga, minimizar os fluxos de potência ao redor da barra de tensão controlada.

Essa tarefa envolve a utilização dos programas ESTABTEN, que faz a avaliação das condições nodais de carregamento e FLUPOT, que minimiza o fluxo de potência em ramos de transmissão críticos através do redespacho de potência reativa e/ou ativa.

Os ramos de transmissão críticos associados a uma barra de compensação reativa são os ramos aos quais está conectado o equipamento shunt de compensação reativa. Portanto, é necessário aliviar o fluxo de potência ativa neste caminho de transmissão.

Porque diminuir o fluxo de potência ativa nos ramos de transmissão aos quais está conectado o equipamento shunt de compensação reativa ?

A referência [16] estuda as condições de estabilidade na área Rio de Janeiro / Espírito Santo. O controle de tensão nesta área é feito de forma a manter uma reserva de potência reativa nos compensadores síncronos de Grajaú devido à fundamental importância que estes equipamentos têm para o desempenho da área. Inclusive, a geração destes equipamentos constitui-se referência para ações que costumam ter elevado custo para o sistema, como a elevação de geração térmica ou corte de carga.

A Figura 5.2 [16] mostra as curvas $Q \times V$ associadas a barra de 500 KV de Grajaú. Cada curva corresponde a um diferente carregamento (FRJ). Foram construídas medindo-se a potência reativa gerada por um compensador fictício conectado a esta barra para vários valores de tensão nesta barra. Como sempre, o lado direito da curva corresponde aos pontos de operação onde a relação $Q_g \times V$ é a usual. Nos pontos do lado esquerdo, a relação é oposta a usual. O ponto de mínimo de cada curva separa o lado direito do lado esquerdo. Portanto, quanto mais a direita do ponto de mínimo, mais seguro é o ponto de operação.

Observando-se a figura pode-se concluir que:

- i) para um dado FRJ, uma ação de controle que leva o ponto de operação mais para a direita é aumentar o valor da tensão na barra,
- ii) para uma dada tensão na barra, uma ação de controle que leva o ponto de operação mais para a direita é diminuir o FRJ.
- iii) para uma dada geração reativa, p.ex. $Q_g=0$, o ponto de operação estará tanto mais à direita quanto menor for o FRJ.

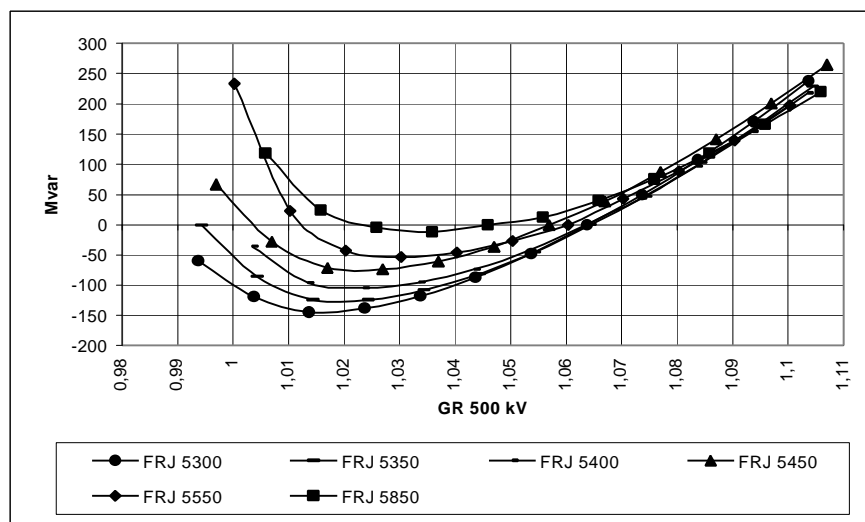


Figura 5.2
Curvas $Q \times V$ na Barra de 500 kV Grajaú

Portanto, para reforçar uma barra com compensação reativa e conseguir que as ações de controle tenham o efeito esperado, é preciso aumentar o valor da tensão controlada e, se necessário, reduzir o fluxo de potência ativa no caminho de transmissão aos quais está conectado o equipamento shunt de compensação reativa.

O sistema interligado sul / sudeste com o ponto de operação das 18:00 hs imediatamente anterior ao blackout de abril de 1997 é usado neste teste.

Este estudo analisa duas etapas de reforço das condições de estabilidade de tensão do sistema:

- i) minimizando o fluxo de potência ativa no ramo crítico por redespacho reativo,
- ii) minimizando o fluxo de potência ativa no ramo crítico por redespacho ativo.

A avaliação das condições de estabilidade de tensão pelo programa ESTABTEN no ponto de operação do Caso-Base são mostrados na Tabela 5.6 para as barras 44 GRAJAU---2CS e 48 IBIUNA---3CS que encontram-se na Região B de operação. Portanto, o objetivo é fazer estas barras passarem para a Região A de operação. De acordo com a definição de margem [18], isso significa também que essas barras terão suas margens aumentadas.

Tabela 5.6 - Relatório de Estabilidade de Tensão do Caso-Base

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CTAP CREM; ESTABTEN: EXET

Barra	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D'] \cdot V$	β	M
44 GRAJAU---2CS	0,976	0,027	8,6	-73,4	-175	-0,997
48 IBIUNA---3CS	1,039	1,566	39,4	-1553	-77	-0,960

Mais uma vez, a análise dos quatro elementos da matriz $[D']$ mostra que $\det[D'] \cdot V < 0$ por que a relação de sensibilidade entre Q_g e V está oposta ao usual [17].

5.2.1 - Reforço na Barra de Compensação Reativa 44 GRAJAU---2CS

O caminho de transmissão ao qual está conectado o compensador síncrono deve ter seu fluxo de potência aliviado. Então, passa-se a minimizar o fluxo de potência ativa que flui da barra 107 para a barra 179 como pode ser determinado pela análise da Figura 5.3.

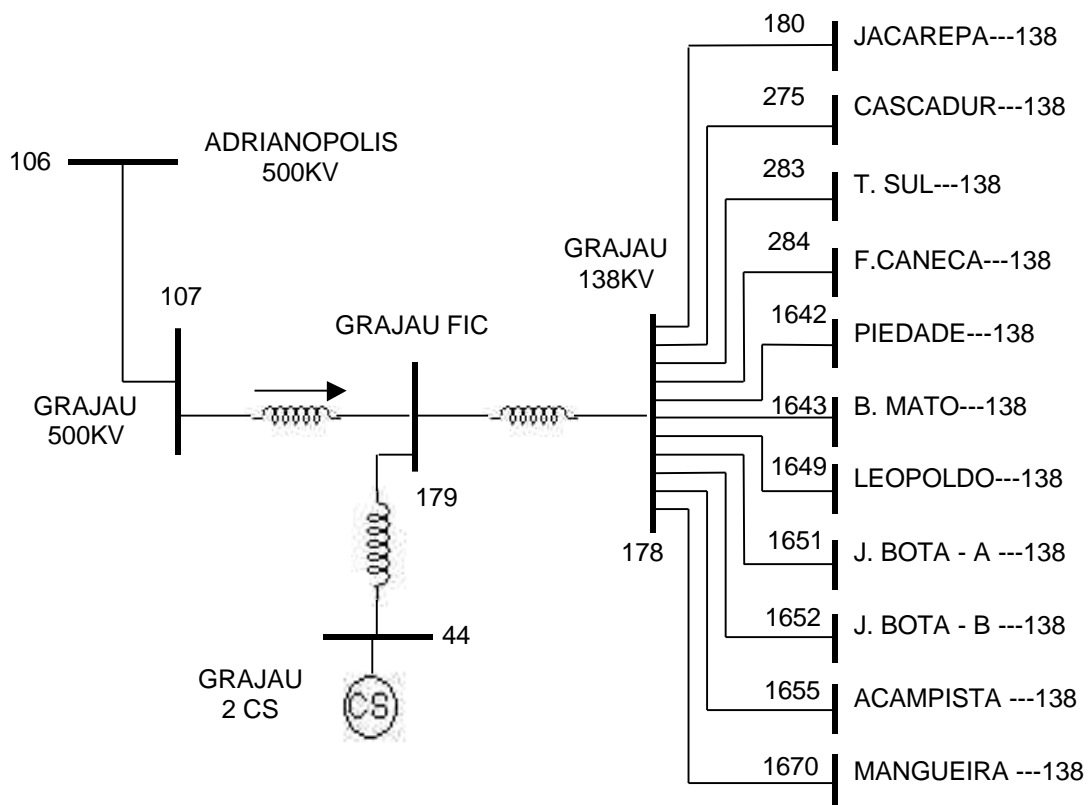


Figura 5.3

Rede de Transmissão ao Redor da Barra 44 GRAJAU---2CS

5.2.1.1 - Etapa 1 de Reforço: Redespacho Reativo

A partir do ponto do Caso-Base analisa-se a possibilidade de reforço considerando somente redespacho de potência reativa, ou seja, com 0 % de variação na geração de potência ativa no sistema.

Neste teste, e em todos os outros desta seção, os módulos de tensão foram limitados entre 0,90 e 1,10 pu. Não há limites de geração reativa.

A Tabela 5.7 mostra as condições de estabilidade do sistema avaliadas pelo programa ESTABTEN após a atuação do programa FLUPOT. Com o redespacho de potência reativa se recuperou a condição de operação na Região A da barra 44 GRAJAU---2CS. A margem $M=(1- S_i / S_{\max})$ aumentou de -0,997 para 0,206 o que corresponde a um aumento de 121%. O Índice de Influência da ação de reforço também traduz o benefício: $II= (1 - M_i / M_o) = 1,21$.

Tabela 5.7 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Reativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

44 GRAJAU---2CS	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D']*V$	β	M	II
Caso Base	0,976	0,027	8,6	-73,4	-175	-0,997	----
Redespacho Reativo	0,900	6,906	8,7	29	177	0,206	1,21

5.2.1.2 - Etapa 2 de Reforço: Redespacho Ativo

Embora o objetivo já tenha sido alcançado com o redespacho reativo, nada impede que se continue a aumentar a margem da barra 44 GRAJAU---2CS. São redespachadas a geração nas Áreas 1 e 9. A partir do ponto de operação após o redespacho reativo, o programa FLUPOT é usado com limites de geração de potência ativa em $\pm 10\%$ em torno do valor de geração.

A Tabela 5.8 mostra as condições de estabilidade avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo no ramo 107-179 através do redespacho de potência ativa nas Áreas 1 e 9.

Com o redespacho de potência ativa, foi possível conseguir uma margem de potência de 32,3%.

Tabela 5.8 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

44 GRAJAU---2CS	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D'] \cdot V$	β	M	I I
Caso Base	0,976	0,027	8,6	-73,4	-175	-0,997	----
Redespacho Reativo	0,900	6,906	8,7	29	177	0,206	1,21
Redespacho Ativo	0,900	7,113	10,5	60	173	0,323	1,32

A Tabela 5.9 mostra o resultado do redespacho reativo e ativo nas barras de geração nas Áreas 1 e 9 e na barra swing 501 ISOLT-19MAQ da Área 5. A diferença na geração da barra 1107 foi suprida pelas outras barras de geração redespachadas.

A Tabela 5.10 mostra as perdas ativas nas Áreas 1, 5 e 9. Observa-se que evitou-se 6% das perdas ativas na Área 1 e nas Áreas 5 e 9 o incremento de perdas ativas foi insignificante em relação à diminuição das perdas na área 1.

Tabela 5.9 - Gerações nas Áreas 1, 9 e barra swing 501

Barra de Geração	Geração					
	Caso Base		Red. Reativo		Red. Ativo	
	P	Q	P	Q	P	Q
ÁREA 1						
10 ANGRA-----1MQ	600	316	600	492	542	426
12 LBARRET----5MQ	868	69	868	164	949	184
14 FUNIL-----2MQ	121	71	121	109	133	104
16 FURNAS-----7MQ	966	246	966	294	1058	326
18 ITUMBIAR---5MQ	1850	199	1850	141	2027	175
20 MARINBON -7MQ	1400	-182	1400	-697	1477	-651
22 M.MOR.-A---6MQ	350	-57	350	123	279	132
24 M.MOR.-B---4MQ	128	42	128	-56	135	-53
28 P.COLOMB--4MQ	250	12	250	18	263	22
30 SCRUZ-19---1MQ	125	-32	125	93	138	91
203 UCAMPOS---0MQ	4	6	4	2	5	0
1107 ITAI60-A----7MQ	5260	1387	5260	1218	4747	602
ÁREA 9						
250 N.PECANH--GER	368	192	368	272	405	270
253 FONTES -----GER	76	44	76	72	84	70
255 P.PASSOS---GER	96	33	96	50	106	49
257 I.POMBOS---GER	148	88	148	151	163	149
ÁREA 5						
501 I.SOLTE-----19MQ	2477	-157	2463	-154	2439	-112

Tabela 5.10 - Perdas nas Áreas 1, 5 e 9

Caso	Perdas					
	Área 1		Área 5		Área 9	
	P	Q	P	Q	P	Q
Caso-Base	725	938	302	-2782	31	-100
Redespacho Reativo	719	798	305	-2631	34	-72
Redespacho Ativo	684	269	307	-2581	34	-65

5.2.2 - Reforço na Barra de Compensação Reativa 48 IBIUNA---3CS

O caminho de transmissão ao qual está conectado o compensador síncrono deve ter seu fluxo de potência diminuído. Então, passa-se minimizar o fluxo de potência ativa que flui da barra 86 para a barra 87 conforme pode ser deduzido da análise da Figura 5.4.

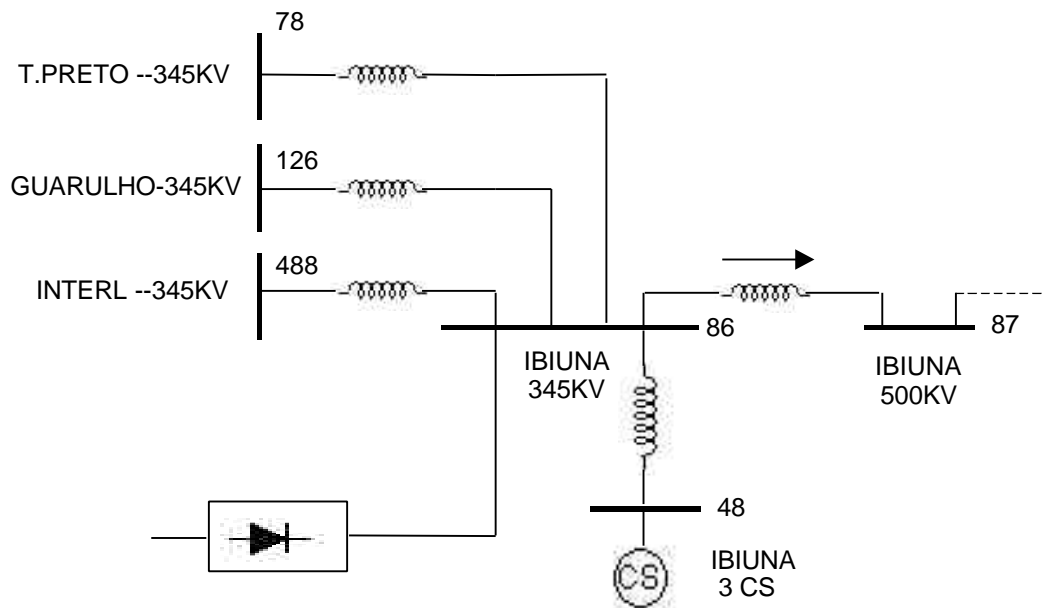


Figura 5.4

Rede de Transmissão ao Redor da Barra 48 IBIUNA---3CS

5.2.2.1 - Etapa 1 de Reforço: Redespacho Reativo

A partir do ponto do Caso-Base analisa-se a possibilidade de reforço considerando somente redespacho de potência reativa, ou seja, com 0 % de variação na geração de potência ativa no sistema.

A Tabela 5.11 mostra as condições de estabilidade do sistema avaliadas pelo programa ESTABTEN após a atuação do programa FLUPOT. Com o redespacho de potência reativa, a barra 48 IBIUNA---3CS continua na Região B, mas sua margem aumentou de -0,96 para -0,727. O Índice de Influência da ação de reforço também traduz o benefício: $\Pi = (1 - M_i / M_o) = 0,24$.

Tabela 5.11 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Reativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

48 IBIUNA---3CS	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D'] \cdot V$	β	M	II
Caso-Base	1,039	1,566	39,4	-1553	-77	-0,960	----
Redespacho Reativo	1,081	2,618	9,6	-86	-164	-0,727	0,24

5.2.2.2 - Etapa 2 de Reforço: Redespacho Ativo

Com o intuito de incrementar a margem e conseguir a operação na Região A, são redespachados os geradores nas Áreas 1 e 9. A partir do ponto de operação após o redespacho reativo, o programa FLUPOT é usado com limites de geração de potência ativa em $\pm 10\%$ em torno do valor de geração.

A Tabela 5.12 mostra as condições de estabilidade avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo no ramo 86-87 para o redespacho de potência ativa nas Áreas 1 e 9.

Com o redespacho de potência ativa em torno de $\pm 10\%$ foi possível aumentar a margem e reverter a condição de operação da barra 48 IBIUNA---3CS, que no Caso-Base operava na Região B e, após o redespacho de potência ativa passou a operar na Região A. A Tabela 5.12 também mostra o Índice de Influência que traduz a melhoria ou deterioração das condições de operação do sistema, após a ação de controle. No caso, as ações foram bem sucedidas.

Tabela 5.12 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

48 IBIUNA---3CS	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D'] \cdot V$	β	M	II
Caso-Base	1,039	1,566	39,4	-1553	-77	-0,960	----
Redespacho Reativo	1,081	2,618	9,6	-86	-164	-0,727	0,24
Redespacho Ativo	1,098	4,243	4,7	4	179	0,097	1,10

A Tabela 5.13 mostra o resultado do redespacho ativo e reativo nas barras de geração nas Áreas 1, 9 e na barra swing 501ISOLT-19MQ da Área 5. A diferença na geração na barra 1107 ITAIPU60-7MQ foi suprida pelas outras barras de geração redespachadas.

Tabela 5.13 - Gerações nas Áreas 1, 9 e Barra Swing 501

Barra de Geração	Geração					
	Caso-Base		Red. Reativo		Red. Ativo	
	P	Q	P	Q	P	Q
ÁREA 1						
10 ANGRA-----1MQ	600	316	600	-161	658	-151
12 LBARRET----5MQ	868	69	868	-600	950	-422
14 FUNIL-----2MQ	121	71	121	55	131	-17
16 FURNAS-----7MQ	966	246	966	496	1052	536
18 ITUMBIAR---5MQ	1850	199	1850	182	2033	57
20 MARINBON -7MQ	1400	-182	1400	165	1539	273
22 M.MOR.-A---6MQ	350	-57	350	-90	378	-234
24 M.MOR.-B---4MQ	128	42	128	33	120	37
28 P.COLOMB--4MQ	250	12	250	69	227	87
30 SCRUZ-19---1MQ	125	-32	125	-75	136	-22
203 UCAMPOS---0MQ	4	6	4	-0,2	5	3
1107 ITAI60-A----7MQ	5260	1387	5260	1238	4735	817
ÁREA 9						
250 N.PECANH--GER	368	192	368	90	403	164
253 FONTES -----GER	76	44	76	69	82	75
255 P.PASSOS---GER	96	33	96	10	104	12
257 I.POMBOS---GER	148	88	148	94	161	130
ÁREA 5						
501 I.SOLTE-----19MQ	2477	-157	2479	-458	2401	-393

A Tabela 5.14 mostra que na Área 1 evitou-se 7% das perdas ativas, na Área 5 as perdas ativas aumentaram 13% e na Área 9 o incremento foi insignificante.

Tabela 5.14 - Perdas nas Áreas 1, 5 e 9

Caso	Perdas					
	Área 1		Área 5		Área 9	
	P	Q	P	Q	P	Q
Caso Base	725	938	302	-2782	31	-100
Redespacho Reativo	702	-73	336	-1347	30	-115
Redespacho Ativo	675	-453	341	-1220	32	-79

5.2.3 - Conclusões

O objetivo do estudo é, dado um ponto de operação, calcular ações de controle que promovam o redespacho de potência reativa, e se necessário e eficiente, o redespacho de potência ativa, para aumentar a margem de potência em barras de compensação reativa.

Partiu-se do ponto de operação do Caso-Base. O programa computacional ESTABTEN é aplicado para avaliar-se as condições de estabilidade do sistema. Os resultados indicam que as barras de compensação reativa 44 GRAJAU---2CS e 48 IBIUNA---3CS encontram-se operando na Região B. O programa FLUPOT foi usado para diminuir o fluxo de potência ativa num ramo adjacente à barra em análise.

Na Seção 5.2.1, ao se reforçar a barra 44 GRAJAU---2CS, quando foi permitido somente redespacho de potência reativa, obteve-se um incremento na margem de potência de 121% em relação ao ponto do Caso-Base (Tabela 5.7). Quando foi permitido redespacho de potência ativa, o reforço foi feito limitando-se as variações na geração ativa em $\pm 10\%$ nas Áreas 1 e 9. Obteve-se um incremento na margem de potência de 132% em relação ao ponto do Caso-Base (Tabela 5.8).

Na Seção 5.2.2, ao se reforçar a barra 48 IBIUNA---3CS, quando foi permitido somente redespacho de potência reativa, obteve-se um incremento na margem de potência de 24% em relação ao ponto do Caso-Base (Tabela 5.11). Quando foi permitido redespacho de potência

ativa, o reforço foi feito limitando-se as variações na geração ativa em $\pm 10\%$ nas Áreas 1 e 9. Obteve-se um incremento na margem de potência de 110% em relação ao ponto do Caso-Base (Tabela 5.12).

Finalmente, em ambos os casos foi possível reverter a condição de operação de barras com compensação reativa, que no Caso-Base operavam na Região B e que, após o redespacho de potência ativa e reativa, passaram a operar na Região A.

A novidade deste trabalho é a determinação de uma metodologia sequencial usando os programas ESTABTEN e FLUPOT para se aumentar gradativamente a margem de potência em barras de compensação reativa até se atingir um ponto de operação na região A.

5.3 - AUMENTO DA MARGEM EM BARRAS COM GERADORES E BARRAS COM COMPENSAÇÃO REATIVA

Apresenta-se uma metodologia para reforçar as condições de estabilidade de um grupo de barras de tensão controlada, incluindo barras com geradores e barras com compensadores.

Essa tarefa envolve a utilização dos programas ESTABTEN que faz a avaliação das condições nodais de carregamento, e FLUPOT que minimiza o fluxo de potência em ramos de transmissão críticos através do redespacho de potência reativa e/ou ativa.

O ramo de transmissão crítico associado a uma barra de geração é o ramo que conecta essa barra ao resto do sistema. Portanto, é o ramo através do qual flui toda a potência ativa e reativa gerada.

O ramo de transmissão crítico associado a uma barra de compensação reativa é o ramo do caminho de transmissão ao qual está conectado o compensador shunt.

Este estudo analisa duas etapas de reforço das condições de estabilidade de tensão do sistema:

- i) minimizando o fluxo de potência ativa no ramo crítico por redespacho reativo,
- ii) minimizando o fluxo de potência ativa no ramo crítico por redespacho ativo.

O Caso-Base refere-se sistema S/SE no ponto de operação das 18:00 hs imediatamente antes do blackout de abril de 1997. A avaliação das condições de estabilidade de tensão pelo programa ESTABTEN no ponto de operação do Caso-Base indica que as barras 44 GRAJAU---2CS, 48 IBIUNA---3CS e 1107 ITAIPU60-7MQ encontram-se na Região B de operação: os índices $\det[D'] \cdot V$ e ângulo β são negativos, conforme mostrado na Tabela 5.15. O diagrama parcial e simplificado do sistema interligado S/SE é mostrado na Figura 5.5.

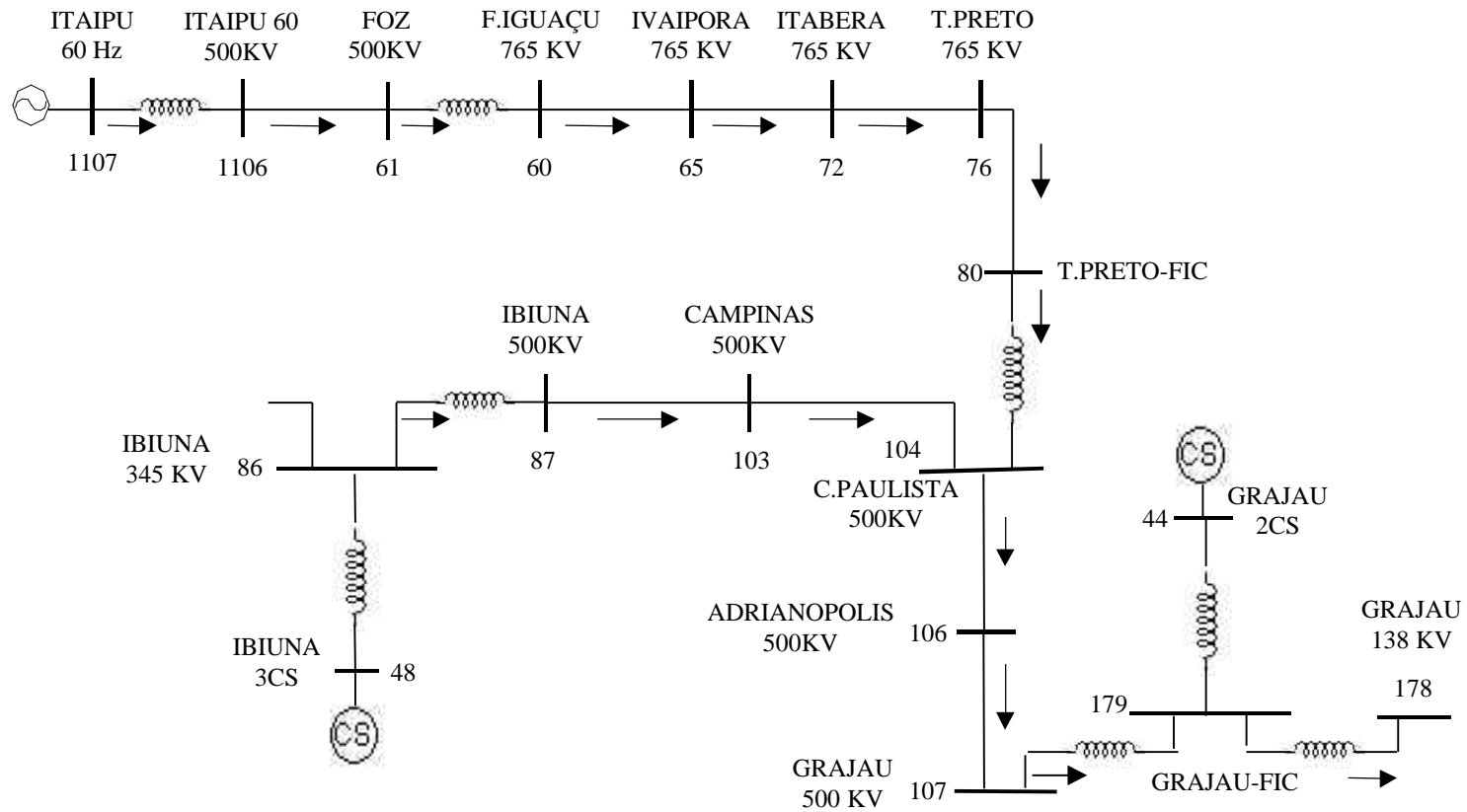


Figura 5.5

Diagrama Parcial e Simplificado do Sistema Interligado S/SE

O objetivo é mudar a região de operação destas barras. Para as três barras em análise, os elementos da matriz $[D']$ mostram que $\det[D'] \cdot V < 0$ por que a relação de sensibilidade entre Q_g e V está oposta ao usual [18].

Pela definição de margem [17], o movimento de um ponto de operação na Região B em direção à "ponta do nariz" corresponde a um aumento da margem. Da mesma forma, o movimento de um ponto na Região B em direção a qualquer ponto na Região A também corresponde a um aumento da margem.

Tabela 5.15 - Relatório de Estabilidade de Tensão do Caso-Base

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CTAP CREM; ESTABTEN: EXET

Caso - Base	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D'] \cdot V$	β	M	I I
44 GRAJAU---2CS	0,976	0,027	8,6	-73,4	-175	-0,997	---
48 IBIUNA---3CS	1,039	1,566	39,4	-1553	-77	-0,960	---
1107 ITAIPU60-7MQ	1,030	54,321	64,8	-1244	-59	-0,162	---

São estudadas três formas de análise do reforço das condições de estabilidade no grupo de barras críticas:

1. Reforço em uma barra de cada vez
2. Reforço na barra crítica avaliada após cada ação de reforço
3. Reforço em todas as barras simultaneamente

5.3.1- Reforço de Barras Individualmente

Consiste em reforçar uma barra de cada vez, até atingir uma margem considerada aceitável. A seguir, reforçar a barra crítica seguinte (em função da margem de potência, a partir da menor), e assim por diante.

A Tabela 5.15 indica a barra 44 GRAJAU---2CS como a pior. Portanto, esta terá sua margem aumentada até atingir um valor aceitável.

O caminho de transmissão ao qual está conectado o compensador síncrono deve ter seu fluxo de potência aliviado. Então, passa-se minimizar o fluxo de potência ativa que flui da barra 107 para a barra 179 como mostra a Figura 5.5.

5.3.1.1 - Reforço na Barra de Compensação Reativa 44 GRAJAU---2CS

A. Etapa 1 de Reforço: Redespacho Reativo

A partir do Caso-Base analisa-se a possibilidade de reforço considerando somente redespacho de potência reativa.

A Tabela 5.16 mostra as condições de estabilidade do sistema avaliadas pelo programa ESTABTEN após a atuação do programa FLUPOT. Com o redespacho de potência reativa se recuperou a condição de operação na Região A da barra 44 GRAJAU---2CS, onde a margem $M = (1 - S_i / S_{\max})$ aumentou de -0,997 para 0,206. O Índice de Influência da ação de reforço também traduz o benefício: $II = (1 - M_i / M_o) = 1,21$. Nada impede, entretanto, que se continue aumentando a margem da barra 44 GRAJAU---2CS.

Tabela 5.16 - Relatório de Estabilidade de Tensão após o Redespacho Reativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Caso A Min 107 - 179	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D'] \cdot V$	β	M	II
44 GRAJAU---2CS	0,900	6,906	8,7	29	177	0,206	1,207
48 IBIUNA---3CS	1,062	1,236	5,0	-23	-175	-0,753	0,216
1107 ITAIPU60-7MQ	1,025	53,905	60,5	-755	-36	-0,109	0,326

B. Etapa 2 de Reforço: Redespacho Ativo

São redespachados os geradores das Áreas 1 e 9. A partir do ponto de operação após o redespacho reativo, o programa FLUPOT é usado com limites de geração de potência ativa de $\pm 10\%$ em torno do valor de geração.

A Tabela 5.17 mostra as condições de estabilidade avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo no ramo 107-179 através do redespacho de potência ativa. Foi possível conseguir uma margem de potência de 32,3% na barra 44. Se essa margem for considerada aceitável, então passa-se a reforçar a barra crítica seguinte.

Tabela 5.17 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Caso B Min 107 - 179	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D'] \cdot V$	β	M	I I
44 GRAJAU---2CS	0,900	7,113	10,5	60	173	0,323	1,324
48 IBIUNA---3CS	1,056	1,045	7,5	56	168	0,861	1,896
1107 ITAIPU60-7MQ	0,972	47,77	52,8	-506	-32	-0,100	0,411

5.3.1.2 - Reforço na Barra de Geração 1107 ITAIPU60-7MQ

A Tabela 5.17 indica a barra 1107 como a pior. Portanto, esta terá sua margem aumentada até atingir um valor aceitável.

Como no caso anterior, analisa-se a possibilidade de reforço considerando somente redespacho de potência reativa a partir do ponto de operação correspondente à Tabela 5.17. A Tabela 5.18 mostra os resultados correspondentes.

Tabela 5.18 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Reativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Caso C Min 1107 - 1106	Tensão	S_i	S_{\max}	$\text{Det}[D'] \cdot V$	β	M	I I
44(GRAJAU)	0,984	0,253	12,4	154	169	0,980	1,983
48(ABIUNA---3CS)	1,038	0,990	12,3	-151	-145	-0,920	0,042
1107(ITAIPU)	0,997	47,885	52,3	-447	-26	-0,084	0,478

Como os índices da barra 1107 continuaram negativos, o redespacho ativo é necessário. Como antes, são redespachados os geradores nas Áreas 1 e 9. A partir do ponto de operação do Caso C, o programa FLUPOT é usado sucessivamente com limites de geração de potência ativa de $\pm 10\%$ em torno do valor de geração do caso anterior.

As Tabelas 5.19 até 5.22 mostram as condições de estabilidade avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo no ramo 1107-1106. Com os redespachos sucessivos de potência ativa, foi possível alcançar uma margem de potência de 4,8% na barra 1107. Com os índices positivos da Tabela 5.22 para a barra 1107, passa-se a reforçar a pior barra que é a barra 48 ABIUNA---3CS.

Tabela 5.19 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Caso D Min 1107 - 1106	Tensão	S_i	S_{\max}	$\text{Det}[D'] \cdot V$	β	M	I I
44(GRAJAU)	0,982	0,503	13,3	177	167	0,962	1,965
48(ABIUNA---3CS)	1,033	0,644	8,5	-71	-163	-0,924	0,038
1107(ITAIPU)	0,966	42,681	45,2	-220	-16	-0,056	0,655

Tabela 5.20 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Caso E Min 1107 - 1106	Tensão	S_i	S_{\max}	Det[D']*V	β	M	I I
44(GRAJAU)	0,981	0,527	13,8	190	166	0,962	1,965
48(ABIUNA---3CS)	1,031	0,649	6,8	-46	-169	-0,905	0,058
1107(ITAIPU)	0,941	38,423	39,4	-78	-7	-0,025	0,847

Tabela 5.21 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Caso F Min 1107 - 1106	Tensão	S_i	S_{\max}	Det[D']*V	β	M	I I
44(GRAJAU)	0,984	0,277	14,1	200	165	0,98	1,983
48(ABIUNA---3CS)	1,031	0,847	7,1	-50	-169	-0,881	0,083
1107(ITAIPU)	0,923	34,890	35,2	21	3	0,009	1,054

Tabela 5.22 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Caso G Min 1107 - 1106	Tensão	S_i	S_{\max}	Det[D']*V	β	M	I I
44(GRAJAU)	0,990	0,302	14,4	207	165	0,979	1,982
48(ABIUNA---3CS)	1,030	1,109	9,2	-84	-162	-0,879	0,084
1107(ITAIPU)	0,913	31,902	33,5	101	14	0,048	1,295

5.3.1.3 - Reforço na Barra de Compensação 48 IBIUNA---3CS

A Tabela 5.22 indica a barra 48 IBIUNA---3CS como a pior. Portanto, esta terá sua margem aumentada até atingir um valor aceitável, através da minimização do fluxo no ramo 86-87.

Como nos casos anteriores, analisa-se a possibilidade de reforço considerando somente redespacho de potência reativa a partir do ponto de operação correspondente à Tabela 5.22.

A Tabela 5.23 mostra as condições de estabilidade avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo no ramo 86-87.

Com o redespacho de potência reativa, foi possível alcançar uma margem de potência de 62,6% na barra 48 IBIUNA---3CS. O Índice de Influência da ação de reforço também traduz o benefício.

Tabela 5.23 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Reativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Caso H Min 86 - 87	Tensão	S_i	S_{max}	$Det[D']*V$	β	M	II
44(GRAJAU)	0,984	0,549	13,8	189	165	0,960	1,963
48(IBIUNA---3CS)	1,099	5,117	13,7	160	158	0,626	1,652
1107(ITAIPU)	0,902	32,043	33,1	67	12	0,032	1,197

Conclui-se que, reforçando uma barra de cada vez, foi possível atingir um ponto de operação na Região A, para as três barras críticas analisadas. É muito importante notar que as condições de operação nas três barras são interdependentes. Ações de controle para reforçar as condições de uma barra afetam as outras duas barras.

A Figura 5.6 mostra a variação da margem de potência devido às ações de reforço sucessivas nas barras 44 GRAJAU---2CS, 48 IBIUNA---3CS e 1107 ITAIPU60-7MQ. O redespacho de

potência reativa e ativa causou aumento substancial nas margens: de 196% na barra 44, 165% na barra 48, e 120% na barra 1107.

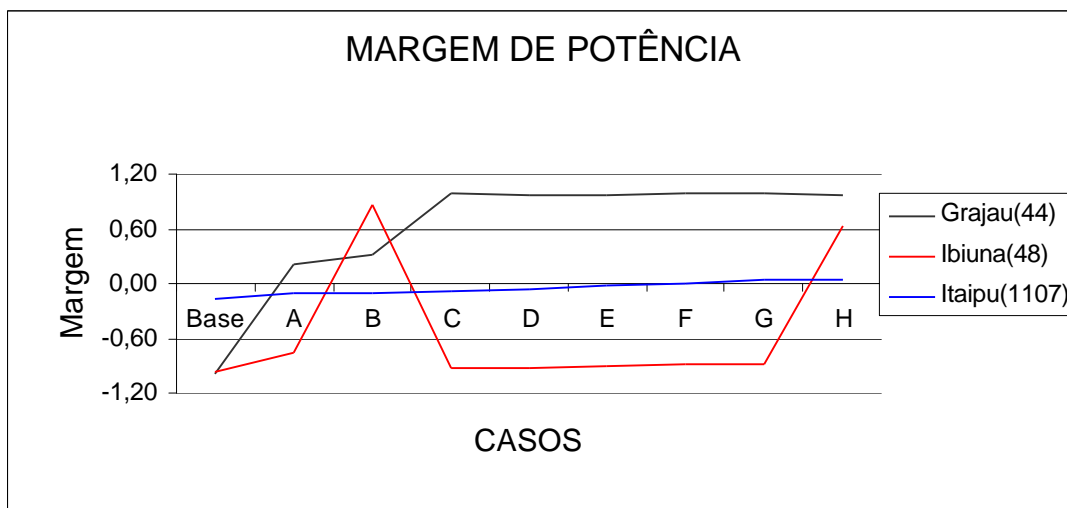


Figura 5.6

Margem de Potência Aparente em pu de S_{max} nas Barras 44, 48 e 1107

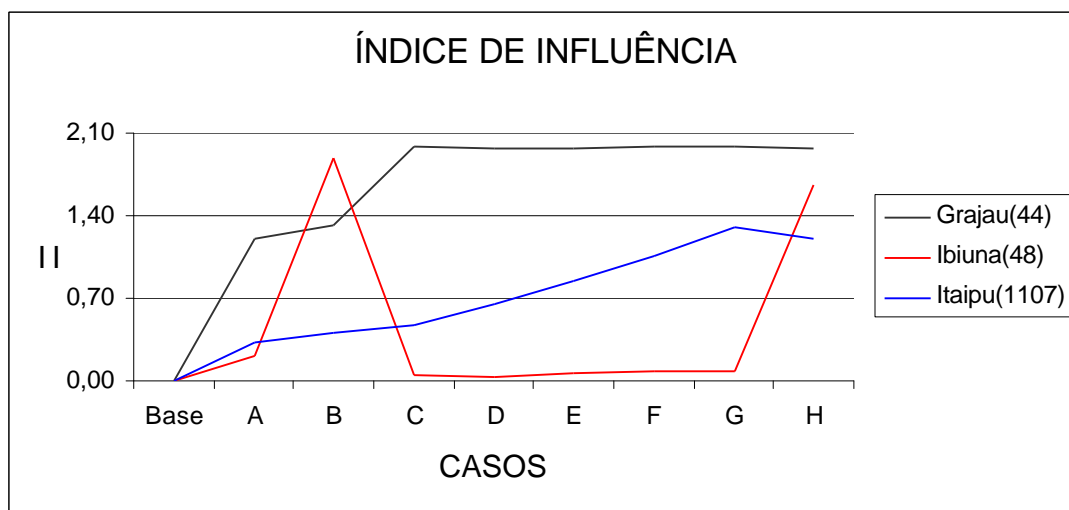


Figura 5.7

Representação Gráfica do Índice de Influência nas Barras 44, 48 e 1107

A Tabela 5.25 mostra as perdas ativas nas Áreas 1, 5 e 9. Observa-se que se evitou 15% das perdas ativas na Área 1. Na Área 5 as perdas ativas aumentaram 12%. E na Área 9, a variação de perdas ativas foi insignificante.

Tabela 5.25 - Perdas nas Áreas 1, 5 e 9

Caso	Perdas					
	Área 1		Área 5		Área 9	
	P	Q	P	Q	P	Q
Caso Base	725	938	302	-2782	31	-100
A	719	798	305	-2631	34	-72
B	684	269	307	-2581	34	-65
C	679	82	307	-2737	30	-100
D	651	-448	310	-2714	30	-93
E	632	-784	314	-2669	30	-86
F	620	-990	319	-2616	30	-80
G	614	-1098	324	-2555	30	-73
H	614	-1212	339	-1597	31	-60

5.3.2 - Reforço da Barra Crítica Determinada após cada Redespacho

Consiste em reforçar a barra crítica em função da margem de potência avaliada após cada ação de reforço.

A Tabela 5.15 indica a barra 44 GRAJAU---2CS como a pior. Portanto, esta será a primeira a ter sua margem aumentada.

O caminho de transmissão ao qual está conectada o compensador síncrono deve ter seu fluxo de potência aliviado. Então, passa-se a minimizar o fluxo de potência ativa que flui da barra 107 para a barra 179 como mostra a Figura 5.5.

5.3.2.1 - Etapa 1 de Reforço: Redespacho Reativo

A. Reforço na Barra de Compensação Reativa 44 GRAJAU---2CS

A partir do Caso-Base analisa-se a possibilidade de reforço considerando somente redespacho de potência reativa, ou seja, com 0 % de variação na geração de potência ativa no sistema.

Os resultados desta etapa de reforço são os mesmos mostrados na Tabela 5.16, onde as condições de estabilidade do sistema são avaliadas pelo programa ESTABTEN após a atuação do programa FLUPOT. Com o redespacho de potência reativa se recuperou a condição de operação na Região A da barra 44 GRAJAU---2CS.

5.3.2.2 - Etapa 2 de Reforço: Redespacho Ativo

B. Redespacho Ativo: Reforço na Barra 48 IBIUNA---3CS

A Tabela 5.16 indica a barra 48 IBIUNA---3CS como a pior. Portanto, esta terá sua margem aumentada.

A Tabela 5.26 mostra as condições de estabilidade avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo no ramo 86-87 para o redespacho de potência ativa nas Áreas 1 e 9.

A Tabela 5.26 indica que a margem na barra 48 IBIUNA-3CS aumentou de -0,753 para -0,272. O Índice de Influência da ação de reforço também traduz o benefício: $\Pi = (1 - M_i / M_o) = 0,716$.

Tabela 5.26 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Caso B Min 86 - 87	Tensão	S_i	S_{max}	$\det[D'] \cdot V$	β	M	I I
44 GRAJAU---2CS	0,993	1,485	10,0	98	172	0,852	1,854
48 IBIUNA---3CS	1,099	4,293	5,9	-16	-177	-0,272	0,716
1107 ITAIPU60-7MQ	1,078	47,983	48,6	-56	-4	-0,013	0,921

C. Redespacho Ativo: Reforço na Barra 48 IBIUNA---3CS

A Tabela 5.26 indica a barra 48 IBIUNA---3CS como a pior. Portanto, esta novamente terá sua margem aumentada.

A Tabela 5.27 mostra as condições de estabilidade avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo no ramo 86-87 para o redespacho de potência ativa nas Áreas 1 e 9.

Tabela 5.27 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Caso C Min 86 - 87	Tensão	S_i	S_{max}	$\det[D'] \cdot V$	β	M	I I
44 GRAJAU---2CS	0,984	0,690	11,2	126	170	0,938	1,941
48 IBIUNA---3CS	1,098	4,261	8,8	59	171	0,516	1,537
1107 ITAIPU60-7MQ	1,014	42,629	42,9	-24	-3	-0,006	0,961

O Caso C da Tabela 5.27 indica que a margem na barra 48 IBIUNA---3CS aumentou de -0,272 para 0,516. O Índice de Influência da ação de reforço também traduz o benefício: $\Pi = (1 - M_i / M_o) = 1,537$.

D. Redespacho Ativo: Reforço na barra 1107 ITAIPU60-7MQ

A Tabela 5.27 indica a barra 1107 ITAIPU60-7MQ como a pior.

A Tabela 5.28 mostra as condições de estabilidade avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo no ramo 1107-1106 para o redespacho de potência ativa nas Áreas 1 e 9.

A Tabela 5.28, indica que a margem na barra 1107 ITAIPU60-7MQ aumentou de -0,006 para -0,024. O Índice de Influência da ação de reforço também traduz o benefício: $\Pi = (1 - M_i / M_o) = 0,850$.

Tabela 5.28 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Caso D Min 1107 - 1106	Tensão	S_i	S_{max}	$\det[D'] * V$	β	M	I I
44 GRAJAU---2CS	0,980	0,616	14,6	212	164	0,958	1,961
48 IBIUNA---3CS	1,030	0,633	3,9	-15	-176	-0,838	0,128
1107 ITAIPU60-7MQ	0,939	38,348	39,3	-74	-7	-0,024	0,850

E. Redespacho Ativo: Reforço na barra 48 IBIUNA---3CS

A Tabela 5.28 indica a barra 48 IBIUNA---3CS como a pior.

A Tabela 5.29 mostra as condições de estabilidade avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo no ramo 86-87 para o redespacho de potência ativa nas Áreas 1 e 9.

A Tabela 5.29, indica que a margem na barra 48 IBIUNA---3CS aumentou de -0,838 para 0,520. O Índice de Influência da ação de reforço também traduz o benefício: $II = (1 - M_i / M_o) = 1,541$.

Tabela 5.29 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Caso E Min 87 - 86	Tensão	S_i	S_{max}	$\det[D']*V$	β	M	II
44 GRAJAU---2CS	0,975	0,034	12,2	148	167	0,997	2,000
48 IBIUNA---3CS	1,100	4,803	10,0	76	170	0,520	1,541
1107 ITAIPU60-7MQ	0,913	34,877	35,1	-15	-3	-0,006	0,961

F. Redespacho Ativo: Reforço na barra 1107 ITAIPU60-7MQ

A Tabela 5.29 indica a barra 1107 ITAIPU60-7MQ como a pior.

A Tabela 5.30 mostra as condições de estabilidade avaliadas pelo programa ESTABTEN após o programa FLUPOT minimizar o fluxo no ramo 1107-1106 para o redespacho de potência ativa nas Áreas 1 e 9.

Tabela 5.30 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Caso F Min 1107 - 1106	Tensão	S_i	S_{max}	$\det[D']*V$	β	M	II
44 GRAJAU---2CS	0,985	0,039	15,7	247	161	0,998	2,001
48 IBIUNA---3CS	1,027	0,943	5,6	-31	-173	-0,832	0,134
1107 ITAIPU60-7MQ	0,912	31,850	33,5	111	15	0,049	1,305

A Tabela 5.30, indica que a margem na barra 1107 ITAIPU60-7MQ aumentou de -0,006 para 0,049. O Índice de Influência da ação de reforço também traduz o benefício: $II = (1 - M_i / M_o) = 1,305$.

G. Redespacho Ativo: Reforço na Barra 48 IBIUNA---3CS

A Tabela 5.30 indica a barra 48 IBIUNA---3CS como a pior. Portanto, esta terá sua margem aumentada.

A Tabela 5.31 mostra as condições de estabilidade do sistema avaliadas pelo programa ESTABTEN após a atuação do programa FLUPOT. Com o redespacho de potência reativa e ativa foi possível reverter a condição de operação das três barras em análise, que no Caso-Base operavam na Região B e após os sucessivos redespachos passaram a operar na Região A.

Tabela 5.31 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Caso G Min 86 - 87	Tensão	S_i	S_{max}	$\det[D'] \cdot V$	β	M	II
44 GRAJAU---2CS	0,966	0,558	12,7	162	166	0,956	1,959
48 IBIUNA---3CS	1,099	5,848	8,6	39	175	0,320	1,333
1107 ITAIPU60-7MQ	0,900	29,258	31,4	128	30	0,068	1,422

A Figura 5.8 mostra a variação da margem de potência devido às ações de reforço sucessivas nas barras 44 GRAJAU---2CS, 48 IBIUNA---3CS e 1107 ITAIPU60-7MQ. Na barra 44 GRAJAU---2CS a margem $M = (1 - S_i / S_{max})$ aumentou de -0,997 para 0,956, o que corresponde a um aumento de 196%. Na barra 48 IBIUNA---3CS, a margem aumentou de -0,96 para 0,32, que corresponde a um aumento de 133%. Na barra 1107 ITAIPU60-7MQ, a margem aumentou de -0,162 para 0,068, que corresponde a um aumento de 142%.

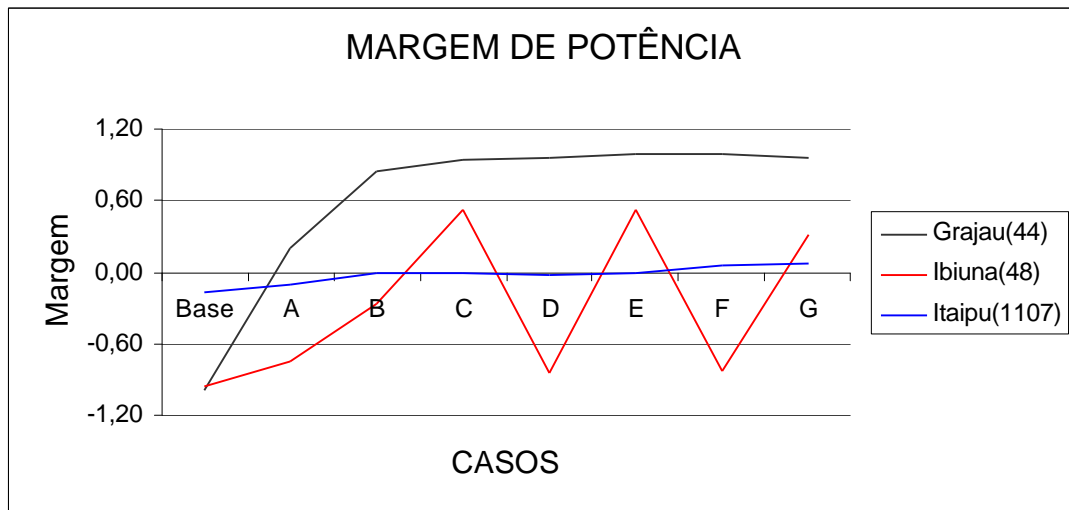


Figura 5.8

Margem de Potência Aparente em pu de S_{\max} nas Barras 44, 48 e 1107.

A Figura 5.9 mostra a representação gráfica dos Índices de Influência nas barras 44 GRAJAU---2CS, 48 IBIUNA---3CS e 1107 ITAIPU60-7MQ, o que permite visualizar graficamente o grau de melhoria ou deterioração das condições de operação do sistema com respeito a uma determinada ação de controle em um determinado ponto de operação.

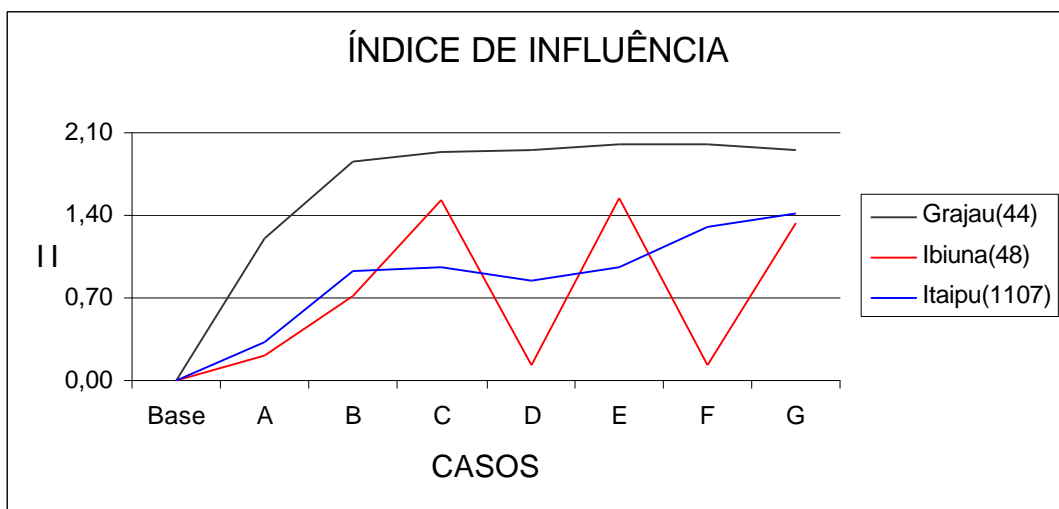


Figura 5.9

Representação Gráfica do Índice de Influência nas Barras 44, 48 e 1107.

A Tabela 5.32 mostra o resultado do redespacho ativo nas barras de geração das Áreas 1, 9 e na barra swing 501. A diferença substancial na geração da barra 1107 foi suprida pelas outras barras de geração redespachadas.

Tabela 5.32 - Gerações Ativa nas Áreas 1, 9 e Barra Swing 501

Barra de Geração	Geração Ativa							
	Casos							
	Base	A	B	C	D	E	F	G
ÁREA 1								
10 ANGRA-----1MQ	600	600	658	722	751	824	851	934
12 LBARRET-----5MQ	868	868	947	1024	1058	1106	1129	1040
14 FUNIL-----2MQ	121	121	131	141	142	153	154	165
16 FURNAS-----7MQ	966	966	1012	929	958	874	889	808
18 ITUMBIAR----5MQ	1850	1850	2032	2232	2345	2576	2641	2899
20 MARINBON---7MQ	1400	1400	1539	1692	1779	1956	2038	2241
22 M.MOR.-A-----6MQ	350	350	372	368	373	353	355	330
24 M.MOR.-B-----4MQ	128	128	119	110	110	102	102	95
28 P.COLOMB----4MQ	250	250	227	205	207	187	188	170
30 SCRUZ-19-----1MQ	125	125	136	148	150	163	165	179
203 UCAMPOS----0MQ	4	4	5	6	6	6	6	6
1107 ITAI60-A-----7MQ	5260	5260	4735	4263	3837	3454	3109	2799
ÁREA 9								
250 N.PECANH----GER	368	368	402	439	453	495	508	553
253 FONTES -----GER	76	76	82	87	88	94	95	100
255 P.PASSOS-----GER	96	96	104	111	112	120	121	128
257 I.POMBOS-----GER	148	148	161	175	179	195	199	216
ÁREA 5								
501 I.SOLTE----- 19MQ	2477	2463	2462	2462	2463	2462	2463	2462

A Tabela 5.33 mostra as perdas ativas nas Áreas 1, 5 e 9. Observa-se que se evitou 17% das perdas ativas na Área 1, enquanto que na Área 5 houve aumento nas perdas ativas de 20%, e na Área 9 houve aumento nas perdas ativas de 12,9%.

Tabela 5.33 - Perdas nas Áreas 1, 5 e 9

Caso	Perdas					
	Área 1		Área 5		Área 9	
	P	Q	P	Q	P	Q
Caso-Base	725	938	302	-2782	31	-100
A	719	798	305	-2631	34	-72
B	675	-466	346	-1131	33	-79
C	649	-646	350	-1066	33	-61
D	622	-876	313	-2667	30	-80
E	623	-663	361	-911	33	-34
F	594	-1268	322	-2546	31	-51
G	601	-930	361	-1047	35	12

5.3.3 - Reforço Simultâneo de Todas as Barras

Consiste em reforçar simultaneamente todas as barras críticas. A Tabela 5.15 indica as barras 44 GRAJAU---2CS, 48 IBIUNA---3CS e 1107 ITAIPU60-7MQ operando na Região B de operação. Portanto, estas barras terão sua margem aumentada simultaneamente. Ou seja, minimiza-se o fluxo de potência ativa simultaneamente nos três ramos críticos (Min 86-87, Min 107-179 e Min 1107-1106) mostrados na Figura 5.5.

5.3.3.1 - Etapa 1 de Reforço: Redespacho Reativo

A partir do Caso-Base analisa-se a possibilidade de reforço considerando somente redespacho de potência reativa.

A Tabela 5.34 mostra as condições de estabilidade do sistema avaliadas pelo programa ESTABTEN após a atuação do programa FLUPOT. Com o redespacho de potência reativa se recuperou a condição de operação na Região A da barra 44 GRAJAU---2CS.

Tabela 5.34 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Reativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Caso A	Tensão	S_i	S_{max}	$\det[D'] \cdot V$	β	M	I I
44 GRAJAU---2CS	0,901	6,343	7,3	13	179	0,131	1,132
48 IBIUNA---3CS	1,060	0,789	9,5	-90	-161	-0,917	0,045
1107 ITAIPU60-7MQ	1,094	53,957	57,1	-352	-21	-0,055	0,660

5.3.3.2 - Etapa 2 de Reforço: Redespacho Ativo

A Tabela 5.34 indica que as barras 48 IBIUNA---3CS e 1107 ITAIPU60-7MQ ainda operam na Região B. Portanto, deve-se continuar o reforço conjunto até conseguir-se reverter a condição de operação nas três barras.

As Tabelas 5.35 até 5.39 mostram as condições de estabilidade das barra 44, 48, 1107 após 5 etapas sucessivas de reforço. As tabelas também mostram a Margem de Potência e o Índice de Influência.

Tabela 5.35 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Caso B	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D'] \cdot V$	β	M	II
44 GRAJAU---2CS	0,900	6,299	8,1	26	177	0,222	1,223
48 IBIUNA---3CS	1,083	3,048	5,2	-18	-177	-0,414	0,569
1107 ITAIPU60-7MQ	1,063	47,9	49,0	-106	-8	-0,022	0,861

Tabela 5.36 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Caso C	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D'] \cdot V$	β	M	II
44 GRAJAU---2CS	0,901	6,328	9,3	47	174	0,320	1,321
48 IBIUNA---3CS	1,095	4,053	8,0	47	173	0,493	1,514
1107 ITAIPU60-7MQ	1,000	42,592	43,5	-75	-8	-0,021	0,871

Tabela 5.37 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Caso D	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D'] \cdot V$	β	M	II
44 GRAJAU---2CS	0,901	6,324	10,4	68	172	0,392	1,393
48 IBIUNA---3CS	1,099	4,171	10,8	100	166	0,614	1,639
1107 ITAIPU60-7MQ	0,937	38,344	39,4	-82	-12	-0,027	0,834

Tabela 5.38 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Caso E	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D']^*V$	β	M	II
44 GRAJAU---2CS	0,900	6,241	11,1	83	170	0,438	1,439
48 IBIUNA---3CS	1,100	4,414	10,7	95	167	0,587	1,612
1107 ITAIPU60-7MQ	0,902	34,872	35,5	-41	-8	-0,018	0,891

Tabela 5.39 - Relatório de Estabilidade de Tensão após Redespacho Ativo

Opções ativadas FLOW: EXLF NEWT QLIM CREM; ESTABTEN: EXET

Caso F	Tensão	S_i	S_{\max}	$\det[D']^*V$	β	M	II
44 GRAJAU---2CS	0,901	6,170	11,6	97	168	0,468	1,47
48 IBIUNA---3CS	1,100	5,115	8,2	42	174	0,376	1,392
1107 ITAIPU60-7MQ	0,901	31,833	32,7	54	13	0,027	1,164

A Tabela 5.39 mostra que com as ações de reforço sucessivas foi possível fazer com que as três barras em análise operassem na Região A.

A Figura 5.10 mostra a variação da margem de potência devido às ações de reforço sucessivas nas barras 44 GRAJAU---2CS, 48 IBIUNA---3CS e 1107 ITAIPU60-7MQ. O redespacho de potência reativa e ativa causou aumento substancial nas margens: 147% na barra 44, 139% na barra 48, e 116% na barra 1107.

A Figura 5.11 mostra a representação gráfica dos Índices de Influência nas barras 44 GRAJAU---2CS, 48 IBIUNA---3CS e 1107 ITAIPU60-7MQ, o que permite visualizar graficamente o grau de melhoria ou deterioração das condições de operação do sistema com respeito a uma determinada ação de controle em um determinado ponto de operação.

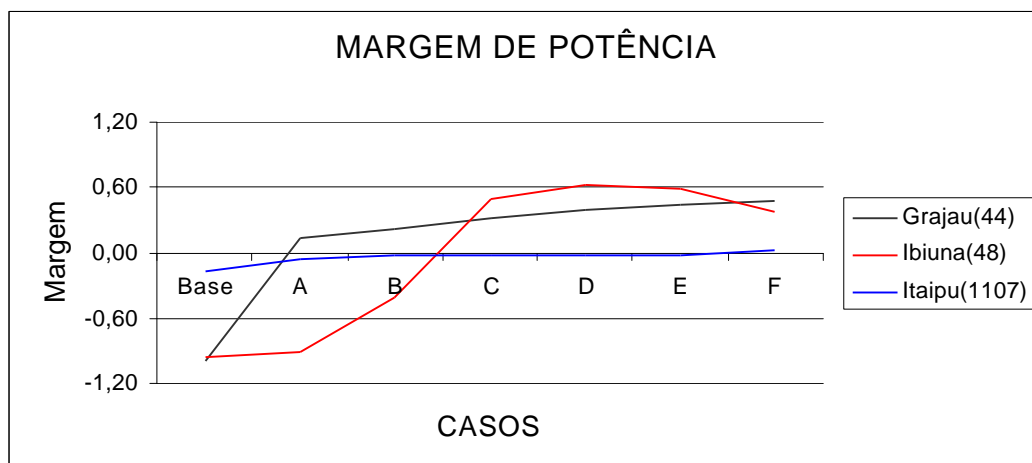


Figura 5.10

Margem de Potência Aparente em pu de S_{\max} nas Barras 44, 48 e 1107.

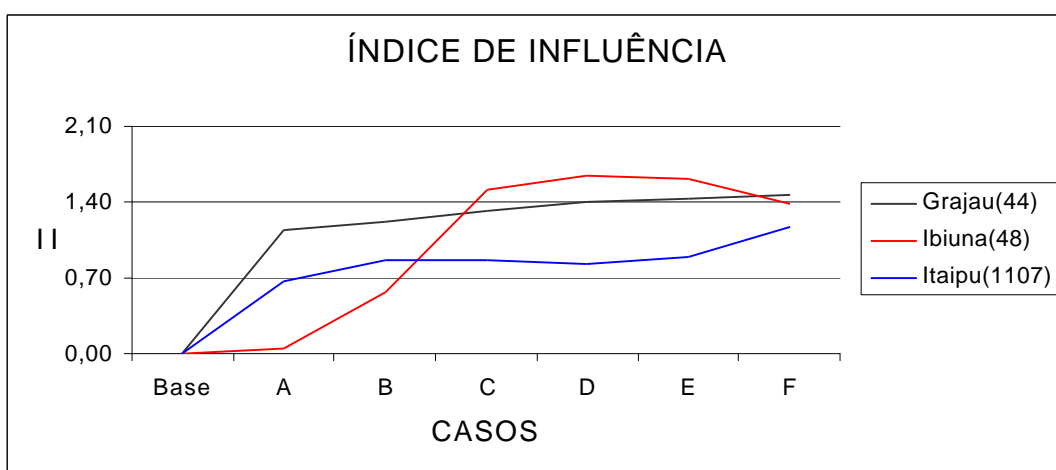


Figura 5.11

Representação Gráfica do Índice de Influência nas Barras 44, 48 e 1107

A Tabela 5.40 mostra o resultado do redespacho ativo nas barras de geração das Áreas 1, 9 e na barra swing 501. A diferença substancial na geração da barra 1107 foi suprida pelas outras barras de geração redespachadas.

Tabela 5.40 - Gerações Ativa nas Áreas 1, 9 e Barra Swing 501

Barra de Geração	Geração Ativa						
	Casos						
	Base	A	B	C	D	E	F
ÁREA 1							
10 ANGRA-----1MQ	600	600	547	495	449	407	368
12 LBARRET-----5MQ	868	868	951	1026	1096	1102	1022
14 FUNIL-----2MQ	121	121	133	146	161	177	195
16 FURNAS-----7MQ	966	966	1058	1082	1028	953	876
18 ITUMBIAR----5MQ	1850	1850	2033	2232	2451	2691	2954
20 MARINBON --7MQ	1400	1400	1539	1692	1860	2045	2249
22 M.MOR.-A-----6MQ	350	350	380	381	369	350	327
24 M.MOR.-B-----4MQ	128	128	122	113	105	98	91
28 P.COLOMB-----4MQ	250	250	227	205	186	168	152
30 SCRUZ-19-----1MQ	125	125	138	152	167	184	202
203 UCAMPOS----0MQ	4	4	5	6	7	8	9
1107 ITAI60-A-----7MQ	5260	5260	4734	4261	3835	3452	3107
ÁREA 9							
250 N.PECANH----GER	368	368	405	446	491	540	594
253 FONTES -----GER	76	76	84	92	101	111	122
255 P.PASSOS-----GER	96	96	106	117	129	142	156
257 I.POMBOS-----GER	148	148	163	179	197	217	239
ÁREA 5							
501 I.SOLTE----- 19MQ	2477	2479	2478	2478	2478	2478	2478

A Tabela 5.41 mostra as perdas ativas e reativas nas Áreas 1, 5 e 9. Observa-se que se evitou 15% das perdas ativas na Área 1, enquanto que na Área 5 houve aumento nas perdas ativas de 23% e na Área 9 houve aumento nas perdas ativas de 23%.

Tabela 5.41 - Perdas nas Áreas 1, 5 e 9

Caso	Perdas					
	Área 1		Área 5		Área 9	
	P	Q	P	Q	P	Q
Caso Base	725	938	302	-2782	31	-100
A	699	-341	337	-1315	35	-64
B	670	-693	346	-1130	35	-52
C	652	-732	352	-1031	35	-37
D	639	-711	358	-994	35	-16
E	627	-796	365	-834	36	13
F	615	-970	372	-723	38	50

5.3.4 - Conclusões

Deve ficar claro que o objetivo original do estudo é, dado um ponto de operação com certo perfil de carga, calcular ações de controle que promovam o redespacho de potência reativa, e se necessário e eficiente, o redespacho de potência ativa, para aumentar a margem de potência de barras críticas de geração e compensação reativa, levando-as a operar na região normal.

Partiu-se do ponto de operação do Caso-Base. O programa computacional ESTABTEN é aplicado para avaliar-se as condições de estabilidade do sistema. Os resultados indicam que a barra de geração 1107 ITAIPU60-7MQ e as barras de compensação reativa 44 GRAJAU---2CS e 48 IBIUNA---3CS encontram-se operando na Região B. O programa FLUPOT foi usado para diminuir o fluxo de potência ativa em ramos críticos.

A novidade deste trabalho é a determinação de uma metodologia seqüencial usando os programas ESTABTEN e FLUPOT para se aumentar a margem de potência gradativamente num grupo de barras, até se atingir um valor julgado adequado.

Na Seção 5.3.1 o reforço foi feito em uma barra de cada vez em função da margem de potência (a partir da menor), até atingir margem considerada aceitável. Após reforços sucessivos, obteve-se uma margem de potência de 96% na barra 44 GRAJAU---2CS, 63% na barra 63 IBIUNA---3CS e 3% na barra 1107 ITAIPU60-7MQ (Tabela 5.23). No novo ponto de operação, as três barras estão na Região A de operação.

Na Seção 5.3.2 o reforço foi feito sucessivamente na barra mais crítica avaliada após cada ação de reforço. Após reforços por redespacho de potência reativa e ativa, obteve-se uma margem de potência de 96% na barra 44 GRAJAU---2CS, 32% na barra 48 IBIUNA---3CS e 7% na Barra 1107 ITAIPU60-7MQ (Tabela 5.31). No novo ponto de operação, as três barras estão na Região A de operação.

Na Seção 5.3.3, o reforço foi feito nas três barras críticas simultaneamente (Min 86-87, Min 107-179 e Min 1107-1106). Após reforços sucessivos por redespacho de potência reativa e ativa, obteve-se uma margem de potência de 47% na barra 44 GRAJAU---2CS, 38% na barra 48 IBIUNA---3CS e 3% na barra 1107 ITAIPU60-7MQ (Tabela 5.39). No novo ponto de operação, as três barras estão na Região A de operação.

Finalmente conclui-se que, nos três casos deste estudo, foi possível reverter a condição de operação das três barras críticas 44 GRAJAU---2CS e 48 IBIUNA---3CS e 1107 ITAIPU60-7MQ, que inicialmente operavam na Região B e após ações de reforço, consegue-se fazer com que operem na Região A.

A Tabela 5.42 resume o resultado da comparação entre as margens para o reforço em uma barra de cada vez, reforço sucessivo na barra mais crítica avaliada após cada ação de controle individual e reforço nas três barras críticas simultaneamente

A metodologia iterativa usada funcionou muito bem. Os resultados encontrados são considerados excelentes.

Tabela 5.42 - Valores das Margens após as Ações de Reforço

Barra	Seção 5.3.1	Seção 5.3.2	Seção 5.3.3
	M	M	M
44 GRAJAU---2CS	0,960	0,956	0,468
48 IBIUNA---3CS	0,626	0,320	0,376
1107 ITAIPU60-7MQ	0,032	0,068	0,027

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 - CONCLUSÕES

A estabilidade de tensão é um problema atual que merece atenção. Esforços em todo o mundo têm sido feitos para a compreensão e posteriormente prevenção do fenômeno. Os colapsos ocorridos em razão de instabilidade de tensão, e os conseqüentes prejuízos causados, atestam a importância desses esforços.

Este trabalho iniciou-se pela compreensão e análise do fenômeno de estabilidade de tensão. Verificou-se que existe um fluxo máximo de potência ativa e reativa que pode chegar na barra de carga, ou sair da barra de geração e que, para sistemas de transmissão compensados capacitivamente, pode ocorrer com valores usuais de tensão. Mostrou-se que a parte inferior da curva $V \times P, Q$ é uma região onde ações de controle de tensão podem ter efeito oposto ao esperado. Novamente esta região pode estar na faixa normal de operação.

Foi mostrada uma ferramenta analítica de avaliação das condições de estabilidade de tensão da rede de transmissão. Fluxos de potência ativa e reativa transmitidos de geradores para cargas são avaliados. Os dois índices propostos S_{\max} e β têm significado físico. Indicam a potência aparente em MVA que poderia ser transmitida e a região de operação na curva $V \times P, Q$. O tamanho da margem é corretamente interpretado. Não há problemas de escala isto é, a importância relativa entre as barras é bem estabelecida. Uma medida de dificuldade de transmissão é dada.

Os índices são calculados para todas as barras, incluindo as barras com geradores e compensadores. Embora muitos índices populares ignorem estas barras, a análise de casos reais [44] mostram que as relações $Q-V$ devem ser avaliadas em barras PV, mesmo naquelas

com reservas de potência reativa. Elas têm importância fundamental no carregamento da rede e no colapso de tensão de regime quasi-permanente.

A localização de áreas da rede muito carregadas é imediata por que a análise é nodal. O efeito de ações de reforço é facilmente avaliado isto é, é direta a comparação do carregamento da rede com dois pontos de operação distintos.

A adequacidade e a aplicabilidade dos índices propostos são aferidas pelos resultados numéricos apresentados em [8], e que correspondem ao “black-out” de abril de 1997 no sistema S/SE brasileiro. O esforço computacional da análise é pequeno o suficiente para aplicações na operação em tempo real, incluindo análise de contingências.

Esta tese teve por objetivo estabelecer uma metodologia capaz de calcular as ações de controle necessárias para aumentar a capacidade de transmissão, fortalecendo as condições de estabilidade de tensão, uma vez detectado que isto é necessário.

Essa tarefa envolveu a determinação de uma metodologia sequencial usando os programas ESTABTEN que faz a avaliação das condições nodais de carregamento, CaTrans que determina os caminhos de transmissão críticos, conceito novo usado neste trabalho, e também o ramo crítico, conceito introduzido neste trabalho, e FLUPOT que diminui o fluxo de potência em ramos de transmissão críticos, para se aumentar a margem de potência gradativamente em barras ou grupo de barras, até se atingir um valor julgado adequado.

A metodologia foi baseada em que:

- i) para reforçar as condições de estabilidade de tensão em uma barra de carga e, consequentemente, aumentar a margem de carregamento, é necessário diminuir os fluxos de potência em ramos mais carregados transferindo-os para ramos menos carregados.
- ii) para reforçar as condições de estabilidade de tensão em uma barra de geração e, consequentemente, conseguir que as ações de controle de tensão tenham o efeito

esperado e aumentar a margem de geração, é necessário desviar sua geração de ramos mais carregados para ramos menos carregados. Quando existe um único tronco de transmissão conectando a barra de geração crítica ao resto do sistema, a única possibilidade é diminuir a geração.

- iii) para reforçar as condições de estabilidade de tensão em uma barra com compensação reativa e, conseqüentemente, conseguir que as ações de controle tenham o efeito esperado, é preciso aumentar o valor da tensão controlada e, se necessário, reduzir o fluxo de potência ativa no caminho de transmissão ao qual está conectado em paralelo o equipamento de compensação reativa.

Duas etapas de reforço das condições de estabilidade de tensão do sistema foram consideradas:

- diminuindo o fluxo de potência ativa no ramo crítico por redespacho reativo, e se necessário e adequado,
- diminuindo o fluxo de potência ativa no ramo crítico por redespacho ativo.

A função objetivo de "Mínima Transferência de Potência" usada é na realidade uma adaptação da função objetivo "Máxima Transferência de Potência" do FLUPOT. Para alcançar o objetivo de diminuir o fluxo da barra k para a barra j por exemplo, utiliza-se a função objetivo "Máxima Transferência de Potência" aplicada ao ramo j-k.

A minimização do fluxo de potência foi inibida atribuindo-se valores fictícios para os limites mínimo e máximo de geração ativa, por exemplo $\pm 10\%$ em torno do valor da potência gerada naquele momento. Se isso não fosse feito, o algoritmo iria minimizar o fluxo de potência em um caminho, chegando até a inverter o sentido, e maximizar o fluxo em outro caminho alternativo, o que simplesmente iria transferir o problema para outro lugar.

Inúmeros testes foram realizados, com sistemas pequenos para fins ilustrativos, assim como com sistemas e pontos de operação reais, inclusive muito próximos da situação de máximo carregamento e/ou com barras de geração e outras de tensão controlada operando na parte

inferior da curva $V \times P, Q$. Os resultados numéricos demonstraram que o método é adequado quanto ao que se propôs. Com a aplicação da metodologia em sistemas reais obteve-se sempre, inclusive em casos práticos considerados críticos, margens de potência muito superiores às mínimas estabelecidas pelo WSCC e pelo ONS nas diretrizes e critérios para estabilidade de tensão (mostradas em apêndice).

6.2 - CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS

Dois índices novos são incluídos para a avaliação das condições de operação: a “Margem de Potência Aparente”, potência que ainda poderia ser injetada em cada barra em pu da máxima potência que poderia ser injetada, e o “Índice de Influência” que traduz a melhoria ou deterioração das condições de operação do sistema, após um evento qualquer como por exemplo, uma ação de controle, um aumento de carga, uma contingência.

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia totalmente nova para reforçar as condições de estabilidade em barras críticas da rede. Como barras de carga, de geração e de tensão controlada por compensadores de potência reativa em paralelo com a rede podem ser eleitas como a barra crítica, o procedimento proposto para reforçar as condições de estabilidade de tensão é adequado para qualquer tipo de barra.

Essa metodologia sequencial em três etapas utiliza o programa computacional ESTABTEN, acoplado ao pacote computacional ANAREDE de propriedade do CEPEL e usado sob licença, ligeiramente estendido para o cálculo dos dois novos índices, o programa CaTrans, renovado e estendido neste trabalho para a determinação do "ramo crítico", e o programa FLUPOT, também de propriedade do CEPEL e usado sob licença.

Como dito, o método para identificar "caminhos de transmissão críticos", proposto em [13], jamais usado e associado ao programa CaTrans, foi estendido para também determinar os sub-caminhos pertencentes ao caminho de transmissão crítico, e determinar analiticamente o "ramo crítico", i.e. o ramo mais carregado do ponto de vista de estabilidade de tensão, e que, conseqüentemente, precisa ter seu fluxo de potência ativa diminuído.

6.3 - DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

- 1- A metodologia proposta deve ser automatizada, isto é, os três programas computacionais devem ser interligados e chegar a um resultado sem a necessidade de interferência do usuário.
- 2- O método de reforço proposto em [26] com base no índice de avaliação proposto em [27], e que tem tido uma boa aceitação, é o único que tem alguma semelhança com o proposto neste trabalho. Vale a pena nesta ocasião reestudar os métodos propostos para uma eventual comparação.
- 3- A nova questão da "Available Transfer Capacity", muito importante para alguns sistemas onde a operação não é independente de contratos de compra e venda de energia, fez com que fossem introduzidos conceitos que podem ser semelhantes ao conceito do "caminho de transmissão". Vale a pena estudar o assunto.

REFERÊNCIAS

- [1] Taylor, C. - “Power System Voltage Stability”, McGraw-Hill, 1994.
- [2] Kundur, P. - “Power System Stability and Control”, McGraw Hill, New York, 1994.
- [3] Bianco, A. - “Aplicação dos Métodos de Continuação e Análise Modal ao Problema da Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência”, Dissertação de Mestrado, PUC/Rio, Setembro 1994.
- [4] Greenhalgh, A. B. - “Reforço das Condições de Estabilidade de Tensão na Operação do Sistema Elétrico através de um Modelo de Otimização”, Tese de Doutorado, DEE-PUC/Rio, Setembro de 1998.
- [5] Iveson, R. H. - “Voltage Stability and Voltage Collapse”, I Symposium of Specialists in Electric Operational planning, organized by Eletrobrás, Rio de Janeiro, August 1987.
- [6] Prada, R. B. - “Projeto de Pesquisa: Estabilidade de Tensão”, Convênio N° ECV – 310/86, Fundação Padre Leonel Franca (PUC/RJ), e Eletrobrás, Relatório Final, Maio 1992.
- [7] Prada, R. B. e dos Santos, J. O .R. - "Fast Nodal Assessment of Static Voltage Stability Including Contingency Analysis", Electric Power Systems Research, Vol. 51, pp.55 - 59, 1999.
- [8] Prada, R. B., Palomino, E. G. C., dos Santos, J. O. R., Bianco, A. e Pilotto, L. A. S. - "Voltage Stability Assessment for Real Time Operation: A Comprehensive and Meaningful Technique", Proc. IEE Generation, Transmission and Distribution, (aceito em Maio 2001).

- [9] Prada, R. B. - "Monitoração das Condições de Estabilidade de Tensão na Supervisão e Controle de Sistemas Elétricos em Tempo Real, Interpretação de Índices Negativos em Barras com Geradores", Relatório Final, Fase I, Março 2001.
- [10] dos Santos, J. O. R. - "Avaliação Estática da Estabilidade de Tensão em Redes Elétricas", Tese de Doutorado, DEE-PUC/Rio, Dezembro de 1997.
- [11] Prada, R. B., Cory, B. J., e Navarro Perez, R. - "Assessment of Steady State Voltage Collapse Critical Conditions", Proc. 10th. Power Systems Computation Conference, Graz, Austria, August 1990.
- [12] Granville, S., Pereira, L. A. C., Latorre, M. L. e Oliveira, M. L. G. - "Programa de Fluxo de Potência Ótimo" – FLUPOT, V.2.01 – 02/96. CEPEL, 1996.
- [13] Prada, R. B. - "Estabilidade de Tensão", Relatórios IV e V, Convênio N° ECV – 310/86, Fundação Padre Leonel Franca (PUC/Rio) e Eletrobrás, Dezembro 1990 e Março 1991.
- [14] Kimbark, E. W. - "Power System Stability, Synchronous Machines", Vol. III, Dover Publications, 1968.
- [15] Brown, H. E., Shipley, R. B., Coleman D. e Neid Jr, R. E. - "A Study of Stability Equivalents", IEEE Transactions, Vol. PAS-88, March 1969.
- [16] Ferreira, L. C. A. e Zambroni de Souza, A. C. - "Método Estático para Avaliação da Influência de Load Tap Changer na Estabilidade de Tensão", VII SEPOPE, Curitiba, Maio 2000.
- [17] CIGRÉ Task Force 38-02-11. - "Indices Predicting Voltage Collapse Including Dynamic Phenomena", editores N. D. Hatziaryriou e T. Van Cutsem, June 1994.

- [18] Gao, B., Morison, G. K. e Kundur, P. - "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol 7, N° 4, pp. 1529 - 1542, November 1992.
- [19] Pinto, H. J. C. P., Martins, N., Vieira F^o, X., Bianco, A., Gomes, P. e dos Santos, M. G. - "Modal Analysis for Voltage Stability Collapse: An Application at Base Case and Point of Collapse", Bulk Power System Voltage Phenomena- III Voltage Stability, Security and Control, Davos, Suíça, August 1994.
- [20] Vieira F^o, X., Martins, N., Bianco, A., Pinto, H. J. C. P., Gomes, P. e dos Santos, M. G. - "Tools for Voltage Stability Including a Probabilistic Approach", IV SEPOPE, Foz do Iguaçu, May 1994.
- [21] Grupo de Trabalho de Colapso de Tensão - GTCP, Grupo Coordenador do Planejamento do Sistema Elétrico - GCPS, Comitê Técnico para Estudos dos Sistemas de Transmissão - CTST. - "Metodologias para Avaliação de Estabilidade de Tensão e Aplicação de Programas Computacionais em Desenvolvimento pelo CEPEL", Fevereiro 1996.
- [22] Van Cutsem, T. - "A Method to Compute Reactive Power Margins with Respect to Voltage Stability", IEEE Transactions on Power Systems, Vol 6, N° 2, pp. 145 - 156, February 1991.
- [23] Takahata, A. Y. - "Aplicação do Fluxo de Potência Ótimo Com o Método de Pontos Interiores no Problema da Estabilidade de tensão", Dissertação de Mestrado, EFEI-ITAJUBÁ, Setembro 1999.
- [24] Obadina, O. O. e Berg, G. J. - "Determination of Voltage Stability Limit in Multimachine Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol 3, N° 4, November 1988.

- [25] Canizares, C. A., Alvarado, F. L., DeMarco, C. L., Dobson, I. e Long, W. F. - "Point of Collapse Methods Applied to AC/DC Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 2, May 1992,
- [26] Tran-Quoc, T. e Pierrat, L. - "A Strategy for Prevention of Voltage Instability by Generation Dispatch", Paper SPT PS 06-05-0455, Stockholm Power Conference, Estocolmo, Suécia, June 1995.
- [27] Kessel, P. e Glavitsch H. - "Estimating the Voltage Stability of a Power System", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 1, No. 3, pp. 346 - 354, July 1986.
- [28] Begovic, M. M., Chao, X. Y. e Sakis Meliopoulos, A. P. - "Voltage Stability Margin Enhancement Via Optimal Power Flow" Internacional Workshop, Bulk Power System Voltage Phenomena - Voltage Stability and Security, Energy & Control Consultants, August, 1991.
- [29] Nam, H. K., Song, C. G., Kim, D. J., Moon, Y. H. e Lee, K. Y. - "A New Efficient Unified Strategy to Compute Voltage Collapse Point and Voltage Stability Enhancement by Generation Shift", IEEE Power Engineering Society, Winter Meeting, Vol.1, pp. 640 - 645, 1999.
- [30] Kameoka, N., Kita, H., Tanaka, E., Nishiyat, K. e Hasegawa, J. - "Preventive Control Based on Non-Linear Optimization Considering Voltage Instability in Power Systems", 11th PSCC, Avignon, França, August 1993.
- [31] Johansson, S. G., Daalder, J. E., Popovic, D. e Hill, D. J. - "Avoiding Voltage Collapse by Fast Active Power Rescheduling", Electrical Power & Energy Systems, Vol. 19, No. 8, pp. 501 - 509, March 1997.
- [32] Chang, C. S. e Huang, J.S. - "Optimal Multiobjective SVC Planning for Voltage Stability Enhancement", IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, Vol. 145, Issue: 2 , pp. 203 - 209, March 1998.

- [33] Mitani, Y., Matsuihiro, G. e Tsuji, K. - "Loop Power Flow Control to Minimize Power Losses and Augment Voltage Stability", IEEE Power Engineering Society, Winter Meeting, Vol. 1, pp. 719 - 724, 1999.

- [34] Zambroni de Souza, A. C. e Brito, N. H. M. N. - "Voltage Collapse and Control Actions: Effects and Limitations", Electric Machines and Power Systems, Vol. 26, pp. 903 - 915, 1998.

- [35] Vaahedi, E., Tamby, J., Mansour, Y., Wenyuan, Li. e Sun, D. - "Large Scale Voltage Stability Constrained Optimal VAr Planning and Voltage Stability Applications Using Existing OPF/Optimal VAr Planning Tools", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, Issue: 1, pp. 65 - 74, February 1999.

- [36] Hong, Y. -Y. e Yang, Y. -L. - "Expert System for Enhancing Voltage Security/Stability in Power Systems", IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, Vol. 146, Issue: 4, pp. 349 - 354, July 1999.

- [37] Prada, R.B. e Greenhalgh, A.B. - "Enhancement of Voltage Stability Conditions in System Operation Through an Optimisation Model", Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto, Vol. 2, pp. 453 - 458, September 2001.

- [38] IEEE/PES Power System Stability Subcommittee Special Publication. - "Voltage Stability Assessment, Procedures and Guides", January 2001.

- [39] Takahata, A. Y., Carijó, L. M. S., Martins, A. C. B., Cortez, A., Aguiar, L. B., Campos, E., Neto, A. F., Dornellas, C. R. R., Pinto, H. P. e Soto, J. R. O. - "Critérios e Procedimentos de Estabilidade de Tensão para Planejamento do Sistema Elétrico Brasileiro", VII SEPOPE, Curitiba, Maio 2000.

- [40] Força-Tarefa de Estabilidade de Tensão do GTDC, Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos (CCPE), Ministério de Minas e Energia. - "Procedimentos e Critérios para Avaliação de Estabilidade de Tensão do Sistema de Transmissão", Relatório 06 / 11 / 2000.
- [41] Barbosa Martins, A. C., Pinto, H. J. C. P., Brito, N. H. M. N., Vasconcelos, L. F., Soares, V. L. C., Carijó, L. M. S., Fonseca, F. S., Yagi, S., Almeida, P., Jovita, R., Ferreira, L. C. A. e Prada, R. B. - "Criteria and Methodologies Established in the Ambit of GTAD / SCEL / GCOI Voltage Collapse Task Force for Studies on Voltage Stability in the Brazilian North/Northeast, South/Southeast and North/South Interconnected Systems", IEEE Summer Meeting, Seattle, USA, July 2000.
- [42] Reative Power Reserve Work Group, - "Voltage Stability Criteria, Undervoltage Load Shedding Strategy, and Reative Power Reserve Monitoring Methodology", Final Report, WSCC Publication, May 1998.
- [43] Operador Nacional do Sistema Elétrico. - "Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos", Procedimentos de Rede, Submódulo 23.3, em vigência a partir de 23/07/2001.
- [44] Prada, R. B., Souza, L. J. e Sousa, L. A. P. - "The Need for a New Constraint on Voltage / Reactive Power Studies to Ensure Proper Voltage Control", International Journal of Electrical Power & Energy Systems (aceito em Agosto 2001).

APÊNDICE I

MÉTODOS DE AVALIAÇÃO E REFORÇO DAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE DE TENSÃO

I.1 - GENERALIDADES

Há necessidade de métodos capazes de prever o ponto de colapso, quantificando com exatidão as margens e a proximidade de tal ponto de operação, identificando os pontos fracos e as áreas susceptíveis ao problema. Uma vez detectada a existência do problema, fazem-se necessários métodos de cálculo de ações de controle para amenizar o problema.

As metodologias existentes na literatura para avaliação da estabilidade / colapso de tensão podem ser classificadas em dois tipos. O primeiro tipo é baseado nas equações algébricas de fluxo de potência, o que leva a uma análise estática. O segundo tipo é baseado na solução das equações diferenciais não-lineares e leva a uma análise dinâmica.

I.1.a Simulação de Regime Permanente - Análise Estática

Muitas ocorrências de colapso foram registradas ocorrendo numa escala crítica de tempo da ordem de alguns minutos. Esta escala é lenta o suficiente para pertencer a um intervalo de tempo dentro do qual o operador ainda tenha condições de agir. Daí o interesse em conseguir detectar "a tempo" os riscos de instabilidade e as áreas ameaçadas [17]. Quando o problema em questão é associado a uma dinâmica lenta, muitos aspectos do problema podem ser efetivamente analisados usando-se métodos estáticos para uma dada condição de operação do sistema.

A análise estática é baseada na solução das equações algébricas de fluxo de potência convencional ou modificado, sendo computacionalmente mais eficiente do que a análise dinâmica. A técnica de análise estática permite examinar uma grande variação das condições do sistema e, se apropriadamente utilizada, pode fornecer uma análise de sensibilidade, indicando as barras ou áreas críticas sob o aspecto de estabilidade de tensão.

A análise com base na estabilidade de regime permanente é baseada também na aproximação estática, na qual se captura condições do sistema em vários períodos de tempo ao longo da trajetória no domínio do tempo. Em cada um destes períodos, a derivada no tempo das variáveis de estado é assumida nula, e as variáveis de estado levam em conta os valores apropriados para o período de tempo especificado. Consequentemente, todas as equações do sistema são reduzidas para equações puramente algébricas permitindo o uso da técnica de análise estática [2]. Uma série de pontos de operação sequenciais podem ser estudados, assim como o efeito de eventos tais como, ações de controle, incrementos de carga, contingências.

I.1.b Simulação Dinâmica - Análise Dinâmica

Algumas ocorrências de colapso de tensão podem se concretizar em alguns segundos e até se confundir com problemas de estabilidade angular e de frequência.

A análise dinâmica é geralmente indicada para os estudos detalhados de situações de colapso de tensão específicas, coordenação de proteção e controle, exame de medidas corretivas e para determinação da cronologia de instabilidade de tensão. Não é possível identificar as barras ou áreas críticas de instabilidade de tensão e nem é possível fazer uma análise de sensibilidade. Outra desvantagem é com relação ao tempo de computação requerido, elevado para avaliação de várias condições operativas do sistema.

- **Simulação de Estabilidade de Tensão Transitória**

A possibilidade de instabilidade de tensão transitória também existe por causa das características de respostas rápidas dos componentes do sistema, como motores de indução, elo CC, compensadores estáticos e reguladores de tensão. O fenômeno geralmente é analisado

pelo programa de estabilidade transitória incluindo modelagem dinâmica dos motores de indução e outros componentes.

- **Simulação de Estabilidade de Médio e Longo Prazos**

A instabilidade de tensão freqüentemente ocorre por causa da dinâmica do sistema em tempos da ordem de 10 segundos a minutos. Esta dinâmica inclui o aumento de carga, restabelecimento de carga após perturbação e redespacho de geração após uma perda de geração. A simulação dinâmica de longo prazo é utilizada nestas condições.

Várias aproximações têm sido desenvolvidas para a simulação de médio e longo prazos. A maioria dos métodos envolve solução unificada da dinâmica lenta e rápida [18].

Os seguintes elementos devem ser representados na simulação dinâmica de médio e longo prazos para complementar os modelos do programa de estabilidade transitória:

- LTC
- Chaveamento de bancos de capacitores e reatores pelos vários métodos de controle
- Sistema estático de compensação reativa, incluindo controle de potência reativa lenta e controle de chaveamento mecânico de capacitores e reatores
- Limitação da corrente do gerador
- Controle de freqüência do sistema (CAG)
- Partida e parada de unidades geradoras incluindo turbinas a gás
- Freqüência das cargas sensíveis
- Representação dinâmica dos motores
- Cargas controladas termostaticamente
- Carga em rampa por barra ou área
- Corte de carga por subtensão e subfreqüência
- Saturação do transformador
- Relés de proteção com tendência a operar em sobrecarga
- Elo de corrente contínua

Os programas que são capazes de simular a dinâmica de longo prazo com a maioria dos modelos acima são EUROSTAG [18], ETMSP (EPRI / Ontario Hydro), ST600 da Hydro-Québec e PTI [1].

I.2 - MÉTODOS DE ANÁLISE ESTÁTICA

Um número elevado de técnicas tem sido propostos na literatura para análise da estabilidade de tensão utilizando aproximação estática. Algumas destas técnicas são:

- análise com base em fluxo de potência convencional (solução das equações algébricas);
- análise com base em fluxo de potência modificados (solução das equações algébricas com alterações e inclusões de variáveis e equações);
- análise com base na otimização;
- análise com base na estabilidade de regime permanente (solução das equações algébricas e diferenciais linearizadas).

I.2.1 - Métodos com Base em Fluxo de Potência Convencional

As curvas do tipo $P \times V$ e $V \times Q$ são obtidas com grande dificuldade de convergência com os programas de fluxo de potência convencional que utilizam o método de Newton-Raphson para solução das equações da rede elétrica nas vizinhanças do ponto de colapso de tensão (ponto de sela-nó), onde o determinante da matriz Jacobiana é nulo (matriz singular com pelo menos um autovalor real nulo). No entanto, com combinação de pequenos acréscimos de carga, reduções no fator de aceleração, e na tolerância da convergência, é possível, depois de muitas tentativas, obter pontos de operação até o ponto de colapso de tensão. As barras a serem selecionadas para traçar as curvas $P \times V$ ou $V \times Q$ devem ser cuidadosamente escolhidas e um grande número de curvas pode ser necessário.

Este método é bastante trabalhoso e não fornece informação completa sobre a margem operativa, barra / área crítica e ações de controle necessárias para afastar o ponto de colapso de tensão.

I.2.2 - Método pela Análise de Indicadores de Desempenho

Diversos indicadores de desempenho são citados na literatura técnica. Eles podem ser obtidos através de programas convencionais de fluxo de potência, programas de fluxo de potência modificados (com alterações e inclusões de variáveis e equações) e por métodos de sensibilidade. Estes indicadores têm como objetivos principais a:

- a) determinação da máxima potência transferida,
- b) determinação do ponto de colapso,
- c) determinação de barras e áreas críticas do sistema e
- d) determinação das margens operativas (distância de uma dada condição operativa do ponto de colapso).

Alguns destes indicadores são descritos a seguir de forma sucinta.

- **Tensão em um dado barramento**

Para um dado ponto de operação do sistema pode-se determinar um indicador do ponto de colapso de tensão através de simulações sucessivas de fluxo de potência baseando-se no modelo convencional. A observação da tensão de um dado barramento é uma indicação simples e valiosa que pode ser utilizada como meio de avaliação. Neste caso tem-se que, se a tensão apresenta-se abaixo da crítica, então a resposta do sistema é inadequada, isto porque a tensão crítica, que é mais baixa tensão admissível, corresponde a máxima transferência de potência.

Essa idéia é muito simplista pois a tensão que corresponde ao máximo carregamento, que não é conhecida, pode estar na faixa normal de operação. Em outras palavras, atinge-se o máximo carregamento antes que a tensão atinja seu limite mínimo admissível.

- **Índice dQ_g / dP**

Baseado nas variações incrementais de potência reativa de cada unidade geradora para variações incrementais de potência ativa de determinadas barras de carga do sistema. A condição de colapso é identificada quando uma das relações do vetor dQ_g / dP torna-se muito grande.

- **Índice dQ_g / dQ**

Baseado nas variações incrementais de potência reativa de cada unidade geradora para variações incrementais de potência reativa de determinadas barras de carga do sistema. Índice semelhante ao anterior.

- **Índice dV / dP e dV / dQ**

Baseado na sensibilidade das tensões dos barramentos do sistema para variações de potência ativa ou reativa injetadas nas respectivas barras do sistema. Estes índices representam respectivamente tangentes às curvas $P \times V$ e $V \times Q$. A condição de colapso é identificada quando uma das relações do vetor dV / dP e dV / dQ torna-se elevada.

- **Indicadores da proximidade do colapso de tensão**

Os índices para avaliação da proximidade de colapso de tensão computam a variação total na geração de potência reativa (geradores, compensadores síncronos e estáticos) para variação na potência ativa ou reativa de uma determinada barra de carga i :

$$VCPI_{Pi} = \sum \Delta Q_g / \Delta P_i \quad \text{e} \quad VCPI_{Qi} = \sum \Delta Q_g / \Delta Q_i$$

Este índice varia de valores próximos da unidade até infinito para o colapso de tensão. Podem fornecer também as seguintes informações a respeito de uma barra de carga:

barra com valores grandes de $VCPI_{Pi}$ → indicada para corte de carga;

barra com valores grandes de $VCPI_{Qi}$ → indicada para inserção de compensação;

I.2.3 - Método de Ponto de Colapso e Fluxo de Potência Continuado

Estes métodos percorrem a curva entre as condições iniciais e a de máxima carga mudando a carga em degraus. Normalmente o passo consiste de uma fase de predição, onde uma estimativa das variáveis do próximo estado são encontradas a partir do valor das variáveis do estado anterior e das sensibilidades da matriz Jacobiano, e de uma fase corretiva, onde as variáveis de estado são renovadas e os limites das variáveis de saída são levados em conta na sequência das iterações [17].

Atualmente, dois programas computacionais fazem uso dos métodos de continuação aplicadas aos sistemas de potência:

- VSTAB, do EPRI
- Point of Collapse (PoC) Power Flow, da Universidade de Wisconsin

I.2.4 - Análise Modal

Uma possibilidade é usar a matriz Jacobiano reduzida calculando autovalores e os autovetores associados à direita e à esquerda [18]. Considerando $\Delta \bar{P} = 0$ tem-se:

$$\Delta \bar{Q} = (\bar{J}_{QV} - \bar{J}_{Q\theta} \cdot \bar{J}_{P\theta}^{-1} \cdot \bar{J}_{PV}) \cdot \Delta \bar{V}$$

$$\Delta \bar{Q} = \bar{J}_R \cdot \Delta \bar{V}$$

$$\Delta \bar{V} = \bar{J}_R^{-1} \cdot \Delta \bar{Q}$$

A matriz Jacobiano reduzida é a matriz de sensibilidades entre as injeções de potência reativa e os módulos de tensão em barras de carga. Usando-a para análise modal tem-se:

$$\bar{J}_R = \bar{\xi} \cdot \bar{\Lambda} \cdot \bar{\eta}$$

onde:

$\bar{\xi}$ é a matriz modal à direita de \bar{J}_R

$\bar{\eta}$ é a matriz modal à esquerda de \bar{J}_R

$\bar{\Lambda}$ é a matriz espectral ou de autovalores de \bar{J}_R

Um exemplo de utilização de Análise Modal é dado pelas referências [18, 19, 20]. Utilizam-se algoritmos para o cálculo de autovalores, zeros de função de transferência, resíduos de função de transferência, fatores de controlabilidade e de observabilidade (mode-shapes), aplicados ao modelo estático do sistema. A análise é válida para pequenas perturbações.

Os resíduos, mode-shapes e sensibilidades podem ser utilizados para se determinar os melhores locais para instalação de equipamentos dinâmicos de controle de tensão.

I.2.5 - Análise Nodal - Método do Determinante Reduzido

Os índices correspondentes à análise nodal são explicados detalhadamente no Capítulo 2 do presente trabalho, pois eles indicam: a região de operação das barras do sistema, a margem de potência aparente que ainda pode ser injetada nas barras, a dificuldade do sistema em suportar a injeção nas barras e o índice de influência que traduz a eficácia das ações de controle.

I.2.6 - Métodos Probabilísticos

Consiste na obtenção de informações baseadas na análise de diversos estados operativos do sistema. Em geral, a avaliação de índices probabilísticos é equivalente ao cálculo do valor esperado de uma dada função - teste. Utiliza programas de confiabilidade composta e de fluxo de potência probabilístico [21].

I.2.7 - Método com Base em Otimização

Este é um método onde o ponto crítico é a solução para o problema de otimização. Pertence aos métodos que se baseiam em uma dada direção de crescimento da carga. Como o ponto crítico é identificado sem nenhuma solução intermediária do fluxo de potência, nenhuma informação sobre o perfil de tensão está disponível, para diferentes níveis de carga, entre as condições iniciais e o ponto crítico. O método de otimização fornece informação útil sobre a influência da margem à mudanças nas injeções nos nós [22, 23].

Algumas formulações de otimização que foram propostas na literatura [22, 24] fornecem cálculos de margens de instabilidade de tensão. O princípio básico é introduzir uma carga global como função objetivo e achar a máxima carga que pode ser suprida, que é o limite de solvabilidade do problema do fluxo de carga.

Os resultados principais destes cálculos são a margem até a carga global calculada e os multiplicadores de Lagrange. Na solução ótima, ou seja, na máxima carga, os multiplicadores de Lagrange indicam a influência na função objetivo relaxando-se as restrições. O multiplicador de Lagrange de cada equação nodal de fluxo de potência indica de quanto a margem aumentaria por uma mudança de injeção ativa ou reativa naquele nó. Avaliada para um caso instável, a margem ficaria negativa e os multiplicadores de Lagrange dão informação da melhor localização de corte de carga para tornar o caso estável.

Nos casos em que a margem é insuficiente, restrições lineares podem ser formadas a cada caso e adicionadas ao fluxo de potência ótimo para ter-se um caso de fluxo coordenado onde as margens sejam suficientes. A formulação geral desta restrição é:

$$\lambda_p^T (P - P_c) + \lambda_q^T (Q - Q_c) \leq Q_{act} - Q_{min}$$

onde:

- Q_{act} distância calculada ao colapso de tensão
- Q_{min} distância mínima aceitável ao colapso de tensão
- P vetor de injeção de potência ativa
- P_c injeções de potência ativa no ponto de avaliação de reserva
- Q vetor de injeção de potência reativa
- Q_c injeções de potência reativa no ponto de avaliação
- λ_p vetor dos multiplicadores de Lagrange para injeções de potência ativa
- λ_q vetor dos multiplicadores de Lagrange para potência reativa

A formulação assume um cálculo de margem baseado nas equações do fluxo de potência. Usando uma formulação completa não é necessária a resolução de fluxo de potência quando a margem é calculada. A formulação ótima pode ser aplicada a casos de contingência quando algumas dessas contingências poderiam levar a condições de instabilidade. Os multiplicadores

de Lagrange recebem uma interpretação de sensibilidades à real configuração do sistema. Uma decomposição de configuração de caso-base e configuração de pós-contingência é então obtida. Uma otimização do caso base pode ser feita com restrições lineares como restrições adicionais levando-se em consideração condições de pós-contingência. Devido à não-linearidade algumas iterações deverão ser necessárias.

Em um outro tipo de aplicação de Fluxo de Potência Ótimo, o método de pontos interiores proposto pelo CEPEL [12] é robusto e efetivo para lidar com sistemas mal condicionados e com problemas de tensão, permitindo calcular o mínimo corte de carga para restaurar a solubilidade matemática. Os controles podem ser fixos ou otimizados. Através deste processo poder-se-ia observar o impacto da otimização dos controles na margem.

I.3 - MÉTODOS DE REFORÇO DA ESTABILIDADE DE TENSÃO

Os métodos de avaliação apresentados fornecem as condições do sistema quanto à estabilidade de tensão. A seguir serão descritos os trabalhos que propõem o reforço da estabilidade de tensão.

No trabalho proposto em [26], utiliza-se um processo de otimização com o objetivo de redespachar a potência ativa dos geradores e, para as barras selecionadas pelos indicadores nodais L de avaliação da estabilidade de tensão [27], manter esses indicadores acima de valores desejados.

A formulação usada é:

$$\text{Min} \sum_{i \in \alpha_G} c_i^T \cdot \Delta P_i$$

sujeito a:

- condição desejada dos indicadores L: $0 \leq S_{BP} \Delta P \leq B_{\text{desejado}} - B$;
- magnitude de tensão dentro de faixas especificadas: $\Delta V_{\text{mín}} \leq S_{VP} \Delta P \leq \Delta V_{\text{máx}}$
- balanços de potência geração, demanda mais perdas na transmissão;
- limites de MVar e MW dos geradores;

- limites térmicos das linhas.

onde:

c_i^T vetor de custos associado com a potência ativa das barras de geração

S_{BP} matriz de sensibilidades que relaciona a variação de tensão das barras de carga com a mudança de potência ativa nas barras de geração.

S_{VP} matriz de sensibilidades que relaciona a variação do indicador nas barras de carga com a mudança de potência ativa nas barras de geração.

$B_{desejado}$ valor desejado para o indicador.

Este método tem alguma semelhança com o método proposto neste trabalho. Entretanto, só trata de aumentar a margem de potência de barras de carga, ignorando o problema do controle de tensão em barras com geradores e compensadores de potência reativa.

A referência [28] utiliza três indicadores de estabilidade de tensão:

- sensibilidade da potência reativa gerada em relação aos fatores de carregamento do sistema:

$$S_j = \sum_{i=1}^n \frac{dQ_i}{d\lambda_j}$$

onde S_j representa o aumento total de injeção reativa em relação a uma dada carga ativa ou reativa e λ_j é o parâmetro de crescimento da carga ativa ou reativa em um nó do sistema. A norma deste indicador é um índice de proximidade de instabilidade de tensão:

$$\lim_{\lambda \rightarrow \lambda_0} \left\| \frac{dQ_i}{d\lambda} \right\| = \infty$$

- mínimo valor singular da matriz Jacobiana do fluxo de potência $\sigma_{\min} \{J\}$
- índice puramente heurístico de carregamento reativo da rede de transmissão:

$$J_p = \sum_{i \in \ell} \omega_i \cdot \left[\frac{Q_i}{T_{i_{MAX}}} \right]^{2n}$$

onde ℓ é o número de linhas do sistema de potência, Q_i é o fluxo de potência reativa através da linha i , ω_i são fatores de ponderação, n é uma constante e $T_{i_{MAX}}$ é a capacidade da linha i .

O algoritmo de correção é baseado em fluxo de potência ótimo, e tem por objetivo remover todas as violações de restrição operativa. A função objetivo a ser minimizada é a soma ponderada dos valores absolutos das ações de controle sujeito a :

- equações de balanço de potência
- restrições de carregamento de linha
- restrições de tensão
- restrições de potência reativa
- limites operativos das ações corretivas

Embora estes índices sejam usados para monitorar as melhorias que o processo de otimização proporciona ao sistema em termos de estabilidade de tensão, é muito interessante notar que as condições de estabilidade de tensão não são modeladas explícita ou implicitamente no problema de fluxo de potência ótimo.

A referência [29] apresenta uma estratégia unificada para calcular a bifurcação do tipo sela-nó (BSN) utilizando os métodos de fluxo de potência continuado (FPC), ponto de colapso (PoC) e o método do par de múltiplas soluções de fluxo de potência (PMSFP) com interpolação de Lagrange. O nariz da curva $P \times V$ e o carregamento crítico são determinados interpolando duas soluções estáveis e duas instáveis usando PMSFP e FPC. O ponto exato da BSN é calculado usando o método PoC. A Figura (I.3) mostra a superfície singular no plano PQ onde acontece a bifurcação para um sistema de duas barras. Nesta superfície o determinante da matriz Jacobiana é zero. A direção de carregamento é um processo iterativo que avança para $N_2, N_3, \dots, N_\bullet$, até alcançar a mais próxima BSN. O autovetor à esquerda deste, fornece informação valiosa para controlar o suprimento de potência reativa para aumentar a estabilidade de tensão. Portanto, na proximidade da instabilidade de tensão a margem de estabilidade de tensão pode ser maximizada, variando a geração e as cargas na direção de $-N_\bullet$, que é ortogonal à superfície singular da BSN.

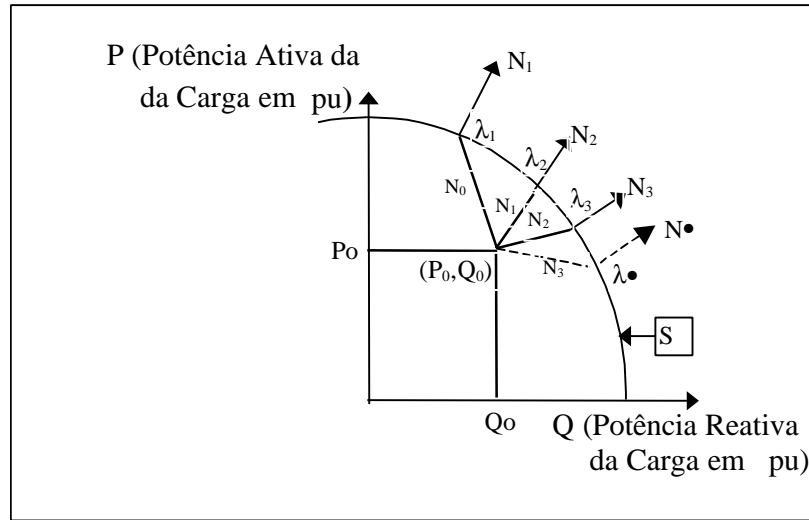


Figura I.1

Superfície Singular S no Plano P - Q e a Convergência do Processo Iterativo

Na referência [30] é apresentado um algoritmo de controle preventivo ao aumento de carga que causa instabilidade de tensão no sistema de potência. A instabilidade é caracterizada por divergência do algoritmo de fluxo de carga.

O algoritmo é especialmente eficiente para casos em que o ponto de operação está perto do ponto crítico e os estados do sistema se tornam inviáveis para condições de crescimento de carga (o método de solução de fluxo de potência desenvolvido não depende da existência de uma solução viável). Dois tipos de função-objetivo são usados para se atingir a estabilidade da tensão (solução viável) e a eliminação de violações das restrições. As duas otimizações são combinadas com sucesso para o cálculo do controle preventivo. A primeira é um índice a ser "zerado" que indica a distância de soluções viáveis do fluxo de potência e expressa o quadrado da norma Euclideana das partes imaginárias das tensões das barras; a segunda também a ser "zerada", é a soma quadrática das violações das restrições usuais de balanço e de operação.

O trabalho [31] demonstra de várias formas como os limitadores de corrente de armadura e de campo podem interagir com o sistema de potência e causar instabilidade de tensão até em um sistema simples. A proposição é um método onde a produção de potência ativa é ligeiramente redespachada de forma automática e rápida com o objetivo de aumentar a capacidade de

carregamento de um sistema durante a instabilidade de tensão. O redespacho pode ser recomendado no minuto seguinte a uma contingência quando um desses limites é atingido.

A referência [32] utiliza um esquema híbrido de otimização para a alocação de SVCs e reforço da estabilidade de tensão. O procedimento otimiza o desempenho do esquema de reforço por SVCs de acordo com três objetivos: máxima margem VAR do sistema, perdas mínimas (I^2R) e magnitude máxima de tensão em pontos críticos.

Na referência [33] apresenta-se uma metodologia para otimizar o fluxo de potência num sistema de potência com estrutura malhada, controlando a reatância da linha. Melhora-se as condições de estabilidade de tensão, minimizando as perdas na transmissão. A função objetivo de minimização de perdas é formulada como uma função quadrática de fluxo de potência num circuito fechado como mostra a Figura (I.4). A solução ótima é alcançada por muitas combinações de capacitores série instalados em algumas linhas em volta do circuito fechado. Capacitores série são adequadamente localizados para aumentar a estabilidade de tensão aumentando o perfil de tensão em barras com características PxV críticas.

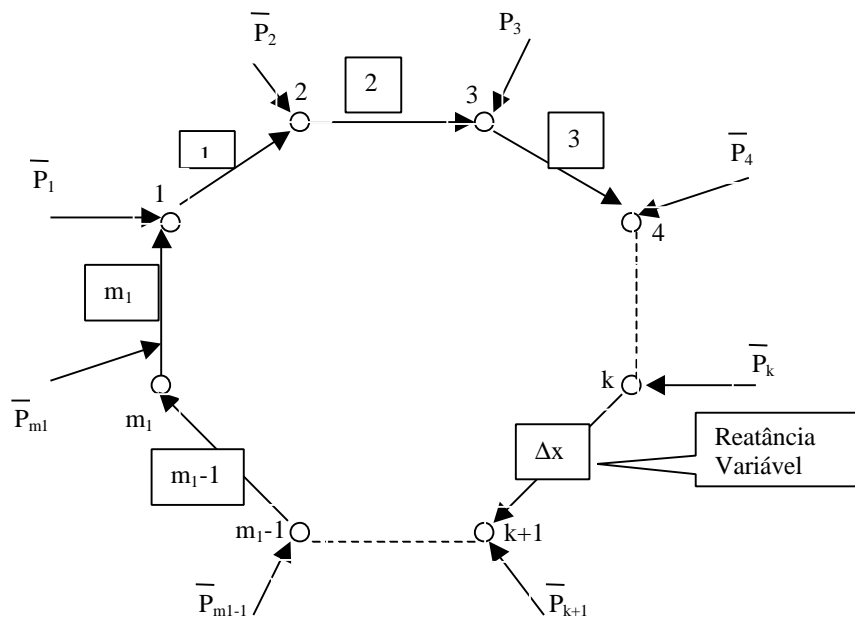


Figura I.2

Circuito fechado composto por m_1 Nós e m_1 Ramos

Um exemplo da utilização de sensibilidades como ferramenta de prevenção ao colapso é proposta em [34]. Os autores propõem ações de controle para a prevenção do colapso de tensão, através do uso de matrizes de sensibilidade calculadas em relação às barras críticas do sistema. É utilizada a técnica do Vetor Tangente para determinar as barras críticas. O conhecimento da barra crítica, permite que se melhore a condição geral de estabilidade de tensão através de compensação local de potência reativa.

A referência [35] apresenta um estudo interessante que utiliza ferramentas existentes de planejamento ótimo de VAR para alocação ótima de fontes de reativos em grandes sistemas de potência, levando em conta considerações de estabilidade de tensão. No procedimento proposto, dois problemas de fluxo de potência ótimo são resolvidos: para restrições de perfil de tensão (problema P1) e para restrições de estabilidade de tensão (problema P2). Os resultados de P1 e P2 são combinados para encontrar a solução final. Os problemas P1 e P2 são resolvidos na mesma rede e sob as mesmas condições de contingência; porém P1 inclui uma lista de violações de tensão sob contingência como parte do conjunto de dados de entrada e P2 usa o caso base original com uma lista de contingências que influenciam a estabilidade de tensão. As restrições referentes à estabilidade de tensão são margens mínimas a serem mantidas em relação ao máximo carregamento.

O artigo da referência [36] utiliza um método baseado em "expert systems" para calcular ações de controle preventivo quando contingências levam o sistema a um ponto de operação inviável.

As referências [4, 37] analisam o reforço das condições de estabilidade de tensão em barras de tensão controlada, através de um algoritmo de otimização que fornece uma lista de variáveis de controle e a direção em que estas devem ser acionadas.

O determinante da matriz reduzida $[D']$ indica as condições de estabilidade de tensão das barras do sistema [Capítulo 2], e portanto, pode ser maximizado. Foi verificado que não existe uma forma analítica do determinante $[D']$, e também sabe-se que numericamente as matrizes $[D]$ e $[D']$ variam na mesma direção quando ações de controle de tensão são implementados [4]. Portanto, a formulação de otimização usada é:

$$\text{Max } f(X,U)$$

s.a.

$$g(X,U) = 0$$

$$h(X,U) \leq 0$$

onde:

$f(X,U)$ equação do determinante da matriz $[D]$ para uma barra i

$g(X,U)$ equações estáticas de fluxo de carga

$h(X,U) \leq 0$ pode ser:

$$U^{\min} \leq U \leq U^{\max} \quad \text{restrições de desigualdade nas variáveis de controle}$$

$$X^{\min} \leq X \leq X^{\max} \quad \text{restrições de desigualdade nas variáveis dependentes}$$

O método é aplicado ao sistema N/NE Brasileiro com barras de compensação reativa e de geração operando na região instável (parte inferior da curva $Q \times V$), onde a relação entre a potência reativa gerada e a tensão terminal é oposta ao usual. Após as medidas de reforço, o novo ponto de operação corresponde à região estável (parte superior da curva).

Como visto nos artigos descritos acima, somente o da referência [26] se propõe a resolver o mesmo problema da metodologia proposta neste trabalho, qual seja, reforçar as condições de estabilidade de tensão de um determinado ponto de operação. É espantoso já que esse é um problema clássico da operação, principalmente a de tempo real.

APÊNDICE II

CRITÉRIOS PARA DETERMINAÇÃO DA MARGEM DE POTÊNCIA NA OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

II.1 - INTRODUÇÃO

O tratamento tradicional referente à segurança da tensão considera que níveis de tensão pré- e pós-contingência devem ser aceitáveis. Como resultado, as empresas tem desenvolvido critérios sobre níveis de tensão aceitáveis. São baseados principalmente na tolerância de equipamentos à tensões não nominais e, geralmente, não garantem a existência de margem de estabilidade suficiente. Sabe-se que um sistema pode ter níveis de tensão pré- e pós-contingência normais, mas pode estar perigosamente perto da instabilidade de tensão.

Atualmente o problema de estabilidade de tensão tem motivado o desenvolvimento de alguns critérios e procedimentos [38]. Os critérios e procedimentos adotados dependem principalmente da experiência, políticas e requisitos regulatórios das empresas. O sucesso depende do entendimento do mecanismo e a proximidade da instabilidade de tensão sob uma ampla variedade de possíveis condições do sistema.

A grande questão em torno do fenômeno da instabilidade de tensão é a determinação da margem (de estabilidade de tensão) dos sistemas elétricos. Esta seção apresenta alguns critérios e procedimentos, úteis para o desenvolvimento de métodos de avaliação e reforço das condições de estabilidade de tensão.

II.2 - ESTUDOS OFF-LINE E ON-LINE

Margem de estabilidade de tensão é uma medida de quão perto o sistema se encontra da instabilidade de tensão. Os métodos de avaliação da margem devem diferir pouco em estudos off-line e on-line.

Em estudos off-line é necessário determinar a margem para todas as condições do sistema, com todos os elementos em serviço e para um ou mais elementos fora de serviço. Também é necessário considerar margem para as incertezas das condições de operação devido à manutenção e paradas forçadas.

Em estudos on-line o estado e topologia do sistema são conhecidos (ou ao menos aproximadamente conhecidos) através da estimação de estado do sistema. Portanto, é necessário estudar somente o efeito de contingências a partir dos elementos em serviço. Como resultado, são necessários poucos cenários a serem analisados. Nesses estudos é requerida uma margem de segurança menor do que em estudos off-line, onde as incertezas do sistema são maiores.

Atualmente, ferramentas de análise off-line e on-line estão sendo desenvolvidas para calcular margens de estabilidade de tensão. Um aspecto importante de avaliação prática de estabilidade de tensão é a consistência entre métodos de avaliação on-line e off-line. Embora as duas ferramentas possam examinar cenários diferentes e requerem margens diferentes, o procedimento básico e modelos usados deverão ser consistentes [38]. Isto é essencial para assegurar que resultados obtidos de estudos off-line possam ser comparados com resultados on-line. Por exemplo:

- para procedimentos: uso de curvas $P \times V$, $Q \times V$, ou simulações no domínio do tempo, deverão ser consistentes em estudos on-line e off-line; a definição de como a margem é medida também deve ser equivalente.

- para modelos: a representação de cargas, da capacidade de geradores, de limitadores de corrente de campo, de chaveamentos shunt, de LTCs também devem ser equivalentes em estudos on-line e off-line.

II.3 - MARGEM DE ESTABILIDADE DE TENSÃO

Margem de estabilidade de tensão é definida como a diferença entre o valor de um determinado parâmetro-chave no ponto de operação atual e no ponto crítico de estabilidade de tensão.

Pode-se usar diferentes parâmetros baseados em:

- Margem em MW

- A margem pode ser fixa para qualquer condição. Neste caso, este valor deve ser atualizado sempre que houver expansão do sistema, ou indisponibilidades por longos períodos de tempo.
- A margem pode ser variável, como p.e., um percentual da carga de uma área ou do fluxo para uma determinada região.

- Margem em MVar

A margem em uma curva $Q \times V$ pode ser medida entre a ponta do “nariz” e o eixo V . A margem pode, ainda, ser a medida até um determinado nível de tensão. Por exemplo, a tensão da barra deve permanecer entre $+x\%$ e $-y\%$ do nominal ou pré-contingência.

A reserva de potência reativa efetiva de unidade(s) geradora(s) representativa(s) também pode ser um parâmetro a ser utilizado. Por exemplo, deve ser no mínimo $x\%$ de sua saída, ou um valor absoluto y MVar, para todas as contingências.

- Dependência do Nível de Contingência

A margem irá sempre depender do nível de contingência arbitrado: simples, dupla e múltipla provável.

II.4 - METODOLOGIAS ESTÁTICAS PARA MEDIR MARGENS

O fenômeno de instabilidade de tensão é um processo dinâmico, que envolve a interação entre vários componentes do sistema. As simulações dinâmicas, no domínio do tempo, requerem ferramentas apropriadas e um número elevado de dados, nem sempre disponíveis no setor. As análises estáticas, principalmente aquelas baseadas em levantamento de curvas $P \times V$ e $Q \times V$, tem sido adotadas internacionalmente para avaliação da estabilidade de tensão. Dentre estas o levantamento de curvas $P \times V$ se mostrou o mais adequado para a determinação das margens de estabilidade. As metodologias $Q \times V$ e análise modal são importantes para subsidiar tomadas de decisão quanto a margem de potência reativa e locais apropriados para reforços no sistema [39, 40].

O presente estudo considera a análise nodal [9] para determinar as barras críticas e os locais apropriados para ações de reforço no sistema.

II.4.1 - Levantamento das Curvas $P \times V$

A partir de um determinado ponto de operação, realiza-se aumentos sucessivos de carga em uma região selecionada, até o ponto de máximo carregamento – o ponto N da Figura II.1. A diferença entre o carregamento no ponto de colapso e no ponto inicial de operação é o que se denomina margem de carregamento da região.

Recomenda-se a análise do traçado das curvas $P \times V$ para barras importantes, para a sustentação dos níveis de tensão da região, e para as barras críticas, que são aquelas localizadas nas áreas onde o fenômeno geralmente se inicia. Alguns programas traçam automaticamente as curvas $P \times V$ para barras pré-determinadas pelo usuário e para barras com as maiores sensibilidades com relação a variação de tensão (barras críticas).

Um aspecto de muita influência que deve ser ressaltado neste tipo de avaliação é a geração que terá responsabilidade para atender o aumento de carga.

Da curva $P \times V$ típica, apresentada na Figura II.1, pode-se estabelecer como margem de carga, para o Caso-Base, a diferença entre a carga ativa total no ponto de máximo carregamento (ponto N) e o ponto de operação inicial (ponto 1). Para o caso de contingência (ponto N'), a margem é medida de forma análoga, sendo normalmente menor do que no Caso-Base [39, 40, 41]

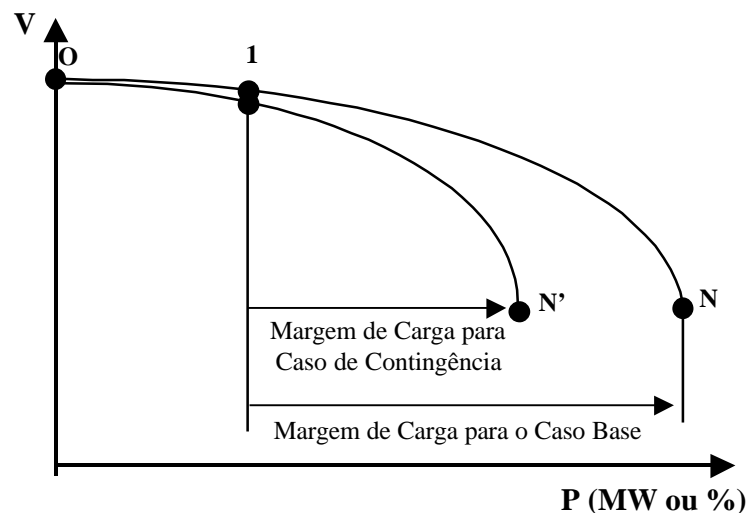


Figura II.1

Curva $P \times V$

II.4.2 - Levantamento de Curvas $Q \times V$

O método de levantamento de curvas $Q \times V$ consiste na utilização de uma fonte variável de potência reativa em uma determinada barra; se essa barra for tipo PQ utiliza-se um compensador fictício. Através de fluxos de potência sucessivos altera-se o valor da tensão e obtém-se os correspondentes valores de potência reativa.

A curva $Q \times V$ pode ser levantada para qualquer ponto de operação do sistema, sendo obtidas em geral, para o ponto de operação do caso inicial e para o ponto de máximo carregamento, para as barras críticas do sistema e barras importantes da área de interesse. Atualmente alguns programas já têm estas rotinas implementadas, permitindo o levantamento destas curvas de forma automatizada.

A Figura II.2 apresenta de forma esquemática uma curva $Q \times V$, da qual é possível obter as seguintes informações com relação a estabilidade de tensão:

- margem de potência reativa da barra, que é medida pela distância entre o eixo horizontal e o ponto de mínimo da curva;
- nível crítico de tensão, que é o valor correspondente ao ponto de mínimo da curva, a partir do qual observa-se um comportamento contrário ao esperado, isto é, uma diminuição no nível de tensão acarreta um aumento na geração de potência reativa.

A margem de potência reativa é medida pela distância entre o eixo horizontal e o ponto de mínimo. Se o mínimo da curva se encontrar acima do eixo horizontal, o sistema está deficiente de potência reativa, sendo recomendada a instalação de equipamentos adicionais. Quando o ponto crítico se encontra abaixo do eixo horizontal, o sistema tem alguma margem de potência reativa.

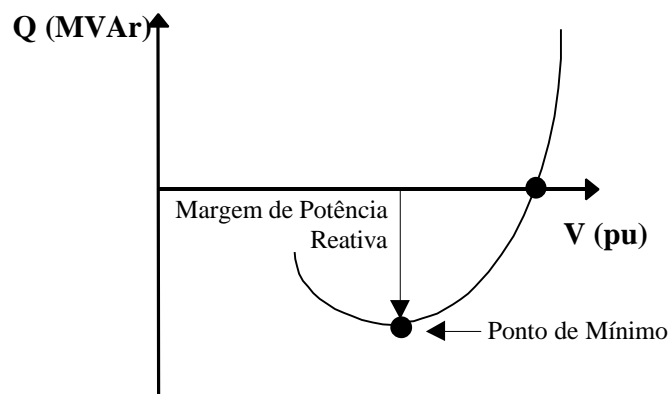


Figura II.2

Curva $Q \times V$ para Ponto de Operação Inicial

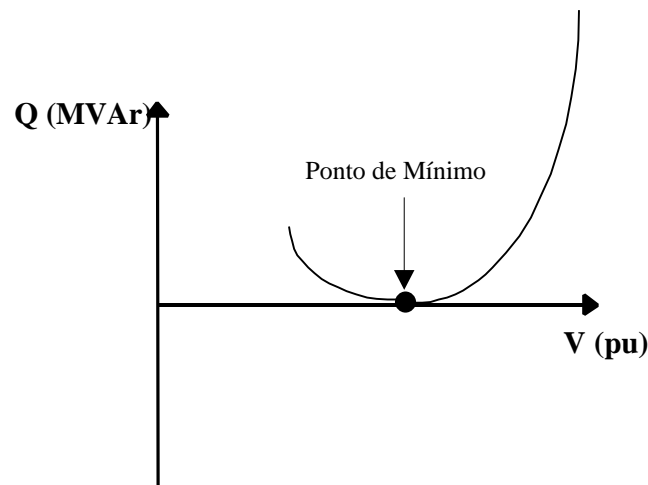


Figura II.3

Curva Q x V para Ponto de Máximo Carregamento

A curva Q x V se traçada para o ponto de máximo carregamento, obtido a partir do levantamento da curva P x V, apresenta margem de potência reativa zero para a barra crítica, ou seja, no ponto de mínimo da Figura II.3 a curva é tangente ao eixo horizontal.

II.5 - CRITÉRIOS PARA O PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO

Critérios de estabilidade de tensão devem ser selecionado para conseguir-se segurança adequada sem restringir excessivamente a operação do sistema.

II.5.1 - Critérios Adotadas pelo WSCC¹ [42]

- a) Metodologias P x V e Q x V devem ser usadas para identificação das margens;
- b) Cada agente deve planejar e operar seu sistema mantendo os níveis mínimos de margem especificados na Tabela II.1. As incertezas nos dados, no desempenho dos equipamentos e nas condições do sistema devem ser consideradas antes de se aplicar a Tabela II.1;

¹ Western Systems Coordination Council para os sistemas da parte oeste dos EUA, Canadá e México.

- c) Os critérios de estabilidade de tensão devem ser aplicados tanto internamente a um sistema quanto com relação ao impacto que um sistema possa causar a outro. As margens na Tabela II.1 não precisam ser atendidas se:
- A área local é radial ou é um sistema local;
 - A contingência considerada não causa colapso de tensão ao sistema além da área local.
- d) Modelos de carga apropriados são fundamentais para a análise de estabilidade de tensão. Se estes modelos ainda não estão disponíveis, testes de carga devem ser feitos. O uso de programas de síntese de carga devem ser utilizados para determinar os modelos de carga usando resultados de leituras de grandezas elétricas.
- e) Até se disponibilizar modelos de carga apropriados, as cargas podem ser modeladas como potência constante.

Tabela II.1 - Níveis de Margem Mínima no WSCC

Nível de Segurança	Distúrbio (1)(2)(3)(4) Iniciado por:	Margem em MW (Método $P \times V$) (5) (6) (7)	Margem em MVar (Método $Q \times V$) (6) (7)
A	Qualquer elemento, tal como: <ul style="list-style-type: none"> - Um gerador - Um circuito - Um transformador - Uma fonte de potência reativa - Um polo de elo de corrente Contínua 	$\geq 5 \%$	Cenário do pior caso (8)
B	<ul style="list-style-type: none"> - Seção de barramento 	$\geq 2,5 \%$	50 % da margem requerida no nível A

C	Quaisquer combinações de dois elementos, tais como: <ul style="list-style-type: none"> - Uma LT e um gerador - Uma LT e uma fonte de potência reativa - Dois geradores - Dois circuitos - Dois transformadores - Duas fontes de potência reativa - Um bipolo de elo de corrente contínua 	$\geq 2,5 \%$	50 % da margem requerida no nível A
D	Contingências múltiplas prováveis, tais como: <ul style="list-style-type: none"> - Três ou mais LTs em um mesmo corredor de transmissão - Uma subestação - Uma usina, incluindo a subestação 	$> 0 \%$	$> 0 \%$

Notas da Tabela II.1:

- (1) Esta tabela se aplica igualmente ao sistema com todos os elementos em serviço (N) e ao sistema sem um elemento (N-1);
- (2) O corte de carga é permitido para alcançar a segurança do nível A. Este corte de carga não é permitido se afetar outras áreas;
- (3) A lista de elementos fora de serviço em cada nível de segurança não pretende ser diferente da tabela de segurança pertencente aos critérios de confiabilidade do WSCC;
- (4) A margem para as condições de Caso-Base (N) precisam ser maiores que a margem para a segurança de nível A;
- (5) O ponto de operação precisa ter uma margem em MW igual ou maior que os valores nesta tabela, sendo medida a partir do ponto de máximo carregamento da curva P x V para cada nível de segurança;

- (6) As técnicas de análise pós-transitórios devem ser utilizadas na aplicação dos critérios;
- (7) As incertezas da Seção II.5.2.1.1 devem ser levadas em conta;
- (8) Todas as barras precisam ter uma margem adequada de potência reativa para a pior contingência simples de modo a satisfazer à condição mais severa entre: i) 5% de aumento além da máxima carga prevista, ou ii) 5% de aumento além do máximo intercâmbio permitido. A pior contingência simples é que causa a maior queda na margem de potência reativa.

II.5.1.1 - Visualização Gráfica da Margem de Potência em MW

O ponto de operação para o nível A da Tabela II.1 é definido como a carga máxima multiplicada por 0,95 (o que representa 5% de margem). Considere a curva $P \times V$ para a condição N-0 mostrada na Figura II.4 (todos os N elementos em operação / 0 contingências). Nessa condição, o ponto 1 da figura corresponde à máxima carga. Assuma que no evento da pior contingência, condição N-1, haja uma redução no máximo carregamento de 500 MW (distância entre os pontos 1 e 2). Além disso, uma margem mínima de 5% deve ser mantida, conforme estabelecido na Tabela II.1. Esses 5% são aplicadas no ponto 2. Então, a distância entre os pontos 2 e 3 representa 5% de margem para a pior contingência simples, condição N-1.

Para o nível de segurança A, o máximo carregamento é o ponto 3 mostrado na Figura II.4. A Figura II.5 representa as curvas $P \times V$ para todos os níveis de segurança A, B, C e D da Tabela II.1.

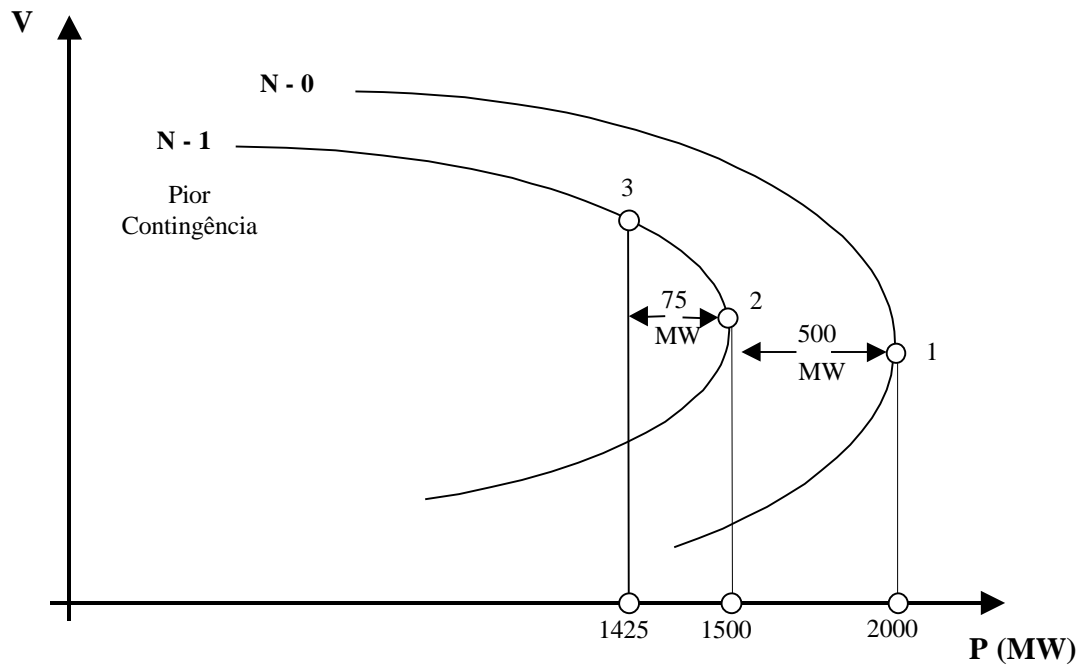


Figura II.4

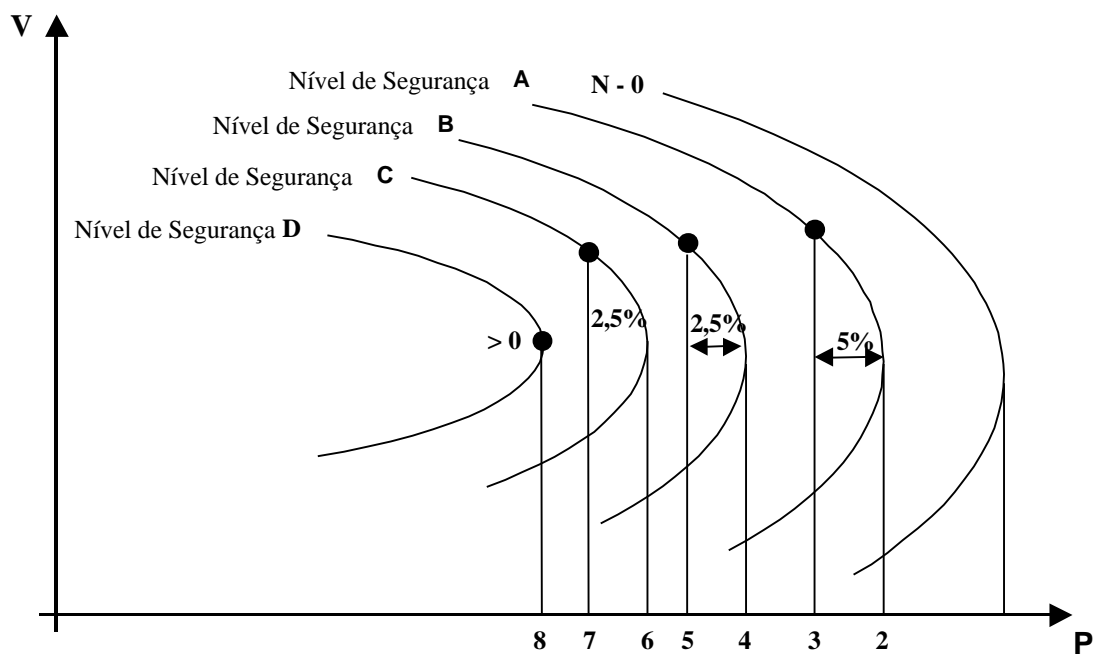
Margem de Potência Ativa em Curvas $P \times V$ 

Figura II.5

Margem de Potência em Curvas $P \times V$ para Todos os Níveis de Segurança

II.5.1.2 - Visualização Gráfica da Margem de Potência em MVar

Considere a curva $Q \times V$ para a condição N-0 mostrada na Figura II.6. Assuma que a curva para a pior contingência, condição N-1, resulta em uma redução de 500 MVar. Além disso, usando o critério do nível A, nota (8), da Tabela II.1, incrementa-se a carga em 5% e novamente é traçada a curva para a pior contingência, condição N-1. Supondo que obteve-se uma redução de 300 MVar, a margem requerida será de 300 MVar. A nova representação gráfica é mostrada na Figura II.7.

Se a margem, tanto de potência ativa como de potência reativa, não for alcançada, verificar se existem fontes adicionais planejadas para operar durante períodos pós- transitórios. Se com estas medidas a margem ainda não for alcançada, então é preciso conectar fontes adicionais ou implementar ações corretivas apropriadas.

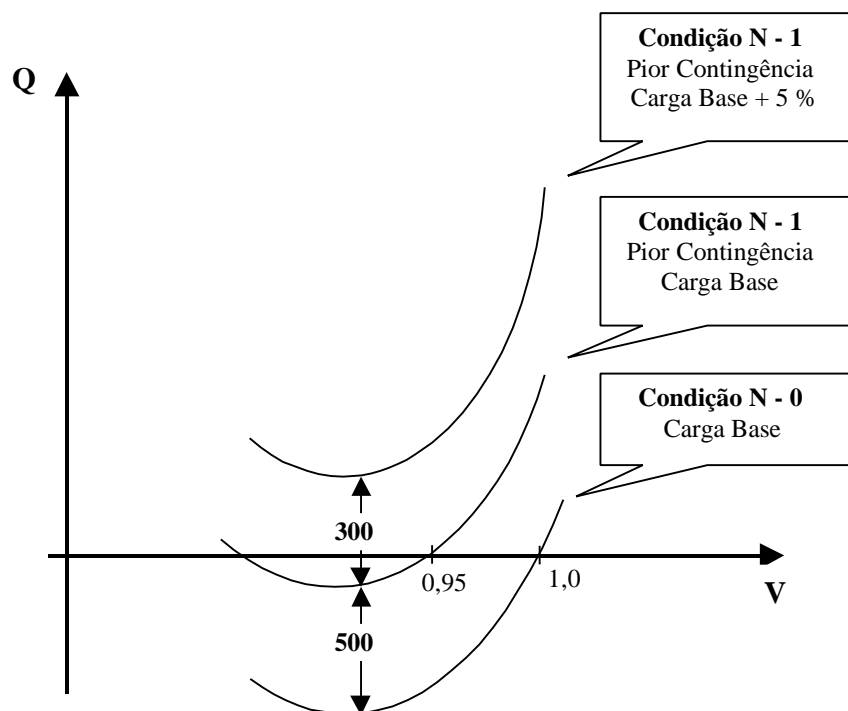


Figura II.6

Margem de Potência Reativa em Curvas $Q \times V$

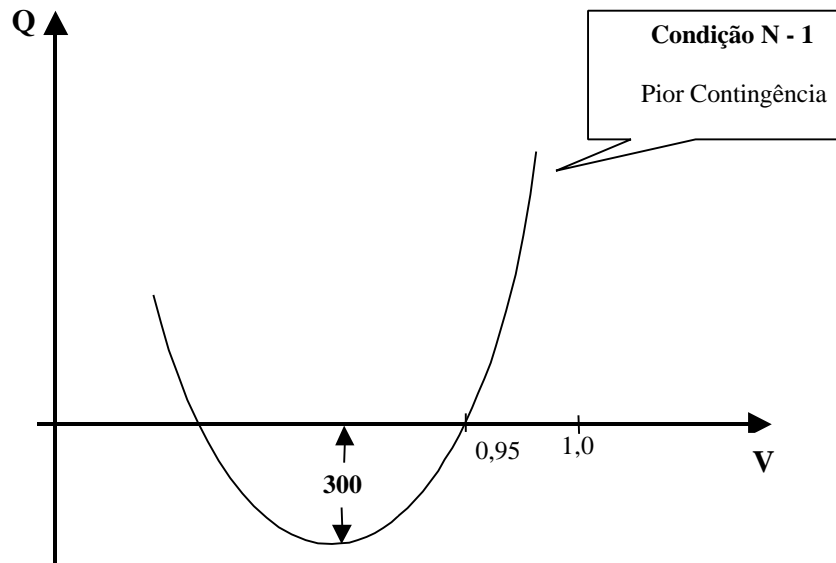


Figura II.7

Margem Requerida de Potência Reativa

II.5.2 - Critérios para Avaliação de Estabilidade de Tensão do Sistema Elétrico Brasileiro

II.5.2.1 - Critérios Propostos no Planejamento da Operação [41]

Semelhante às considerações adotadas pelo WSCC, esta publicação analisa critérios para estudos de estabilidade de tensão para o Sistema Brasileiro obedecendo os níveis mínimos da Tabela II.2.

Tabela II.2 - Níveis de Margem Mínima no Sistema Brasileiro

Nível de Desempenho	Distúrbio (1) Iniciado por: - com falta ou sem falta; - distúrbio em CCAT	Margem em MW (Método P x V) (2) (3) (4)	Margem em MVAr (Método Q x V) (3) (4)
A	Qualquer elemento	$\geq 5 \%$	cenário do pior caso (5)
B	quaisquer combinações de dois elementos	$\geq 2.5 \%$	50 % da margem requerida no nível A
C	quaisquer combinações de três ou mais elementos	$> 0 \%$	$> 0 \%$

Notas da Tabela II.2:

- (1) A margem para as condições de caso base (n) precisam ser maiores que a margem para o nível de desempenho A;
- (2) O ponto de máxima operação no eixo P precisa ter uma margem em MW igual ou maior que os valores nesta Tabela, sendo medida da ponta do nariz da curva P x V para cada Nível de Desempenho;
- (3) As técnicas de análise pós-transitória devem ser utilizadas na aplicação dos critérios;
- (4) Cada agente do sistema deve considerar, como lhe convier, as incertezas do item II.5.2.1.1 a seguir para determinar a margem requerida por seu sistema;
- (9) Todas as barras precisam ter uma margem adequada de potência reativa para a pior contingência simples de modo a satisfazer à condição mais severa entre: i) 5% de aumento além da máxima carga prevista, ou ii) 5% de aumento além do máximo intercâmbio permitido. A pior contingência simples é que causa a maior queda na margem de potência reativa.

II.5.2.1.1 - Considerações de Incertezas para Estabelecimento de Critérios de Estabilidade de Tensão:

A Tabela II.2 especifica as margens mínimas requeridas para cada agente do sistema. Antes de aplicar a Tabela II.2, o agente deve considerar, como lhe convier, as seguintes incertezas:

- a) Cargas ativa e reativa maiores que a prevista;
- b) Aproximações em estudos de planejamento da expansão e da operação;
- c) Saídas de equipamentos não rotineiramente estudadas em cada sistema;
- d) Saídas de equipamentos não rotineiramente estudadas nos sistemas vizinhos;
- e) Saída de geradores após grandes distúrbios;
- f) Saída de LTs de mais baixas tensões após grandes distúrbios;
- g) Variações nos despachos de sistemas vizinhos;
- h) Grandes e variados intercâmbios de potência reativa com sistemas vizinhos;
- i) Restrições de potência reativa nos geradores de sistemas vizinhos maiores que o planejado;
- j) Variações nas características da carga, especialmente nos fatores de potência da carga;
- k) Risco do próximo evento acontecer durante o período de 30 minutos de ajuste do sistema pós-distúrbio;
- l) Incapacidade de reajustar o sistema adequadamente para um estado seguro;
- m) Mudanças nos fluxos pós-contingências, devido a fatores, tais como o corte de carga por subtensão;
- n) Reservas de potência reativa em tempo real que não estão disponíveis;
- o) Limitadores de excitação respondendo prematuramente;
- p) Possível falha de esquemas automáticos de recomposição;
- q) Saídas anteriores de recursos do sistema;
- r) Limites de potência reativa mais restritivos que o planejado nos geradores do sistema.

II.5.2.2 - Critérios Propostos pelo CCPE e ONS [40, 43]

Os critérios foram definidos em função das características do sistema elétrico brasileiro e da realidade econômica das empresas que o integram. Foram considerados também o estágio atual das ferramentas computacionais disponíveis para as análises do fenômeno, as incertezas dos dados e os aspectos de modelagem.

Os critérios aqui apresentados somente se aplicam a uma análise estática. Assume-se que o sistema seja estável sob o ponto de vista de estabilidade angular, isto é, que as simulações de estabilidade transitórias tenham mostrado que o sistema é estável, satisfazendo os critérios vigentes no setor.

A filosofia dos critérios se baseia na segurança do sistema, através da determinação das margens de carregamento do mesmo, salvaguardando-o do problema de instabilidade de tensão, tanto para condição normal quanto em condições de emergências (contingências simples).

As margens mínimas propostas como critério estão baseadas na taxa média de crescimento anual da carga nos últimos 10 anos, nos erros médios históricos de previsão de carga (diferença entre o valor previsto e verificado), no âmbito do planejamento, e no atraso de obras de um ano (já que, normalmente, a data de entrada em operação das obras é referente ao mês anterior ao de máxima demanda anual e um atraso normal de meses desta obra significa a não entrada no período crítico). Outro aspecto levantado é o próprio valor de demanda considerado nos estudos. A demanda considerada nos estudos de planejamento é baseada no valor máximo da demanda média horária (demanda integralizada em 1 hora) prevista para o respectivo ano. No entanto, em algumas regiões do Brasil, a diferença entre os valores de demanda instantânea e integralizada pode alcançar índices de até 12%. Nestas regiões em que esta diferença é significativa, este aspecto deve ser considerado no estabelecimento de margens.

A taxa média de crescimento anual do mercado de energia elétrica nos últimos 5 anos da região sudeste foi 4,5%, com crescimento mínimo de 2,2% e crescimento máximo de 6,2%. A

taxa média de crescimento anual da região sul foi de 6% com crescimento mínimo de 3,9% e crescimento máximo de 8%. O erro médio da previsão de mercado (diferença entre o valor previsto e o verificado) tem sido 20% no sudeste e 30% no sul.

II.5.2.2.1 - Critério Para Condição Normal de Operação

O critério para condição normal de operação foi estabelecido considerando que a margem deveria incorporar o atraso de obra de um ano, o erro inerente à própria previsão de carga de um ano para outro e a diferença entre os valores de demanda instantânea e integralizada do valor da carga da área analisada. Portanto, em condição normal, a margem variará de região para região. Desta forma, a margem para condição normal proposta é:

$$\text{Margem} \geq (6 + \text{DI} / \text{D}) \%$$

onde:

6% = Taxa média de crescimento de carga (4,5%) + Erro médio de previsão de carga (25%)

DI = Demanda máxima instantânea

D = Demanda máxima integralizada de uma hora

II.5.2.2.2 - Critério Para Condição de Contingência Simples

O critério para condição de contingência simples foi estabelecido considerando que a margem deveria incorporar o atraso de obra de um ano e o erro inerente à própria previsão de carga de um ano para outro. Desta forma, a margem para condição de contingência simples proposta é:

$$\text{Margem} \geq 6\%$$

Não são abordados em [40, 43] os aspectos relativos a margens para contingências múltiplas.