



**Lívia Cristina da Silva Santos**

**Avaliação do efeito do esgotamento de recursos  
de controle sobre a estabilidade de tensão e  
cálculo de ações de controle preventivas**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Ricardo Bernardo Prada

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2018



**Lívia Cristina da Silva Santos**

**Avaliação do efeito do esgotamento de recursos de  
controle sobre a estabilidade de tensão e cálculo de ações de  
controle preventivas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Ricardo Bernardo Prada**

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Prof. Carlos Aparecido Ferreira**

Eletrobrás

**Dr. Flávio Rodrigo de Miranda Alves**

CEPEL

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de dezembro de 2018.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

## **Lívia Cristina da Silva Santos**

Graduou-se em Engenharia eletrônica e de computação na UFRJ (Rio de Janeiro, Brasil) em 2010. Desde 2015 é professora do Instituto Federal Fluminense lecionando disciplinas de eletrônica e programação.

### **Ficha Catalográfica**

Santos, Lívia Cristina da Silva

Avaliação do efeito do esgotamento de recursos de controle sobre a estabilidade de tensão e cálculo de ações de controle preventivas / Lívia Cristina da Silva Santos ; orientador: Ricardo Bernardo Prada. – 2018.

145 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2018.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Ações de controle preventivas. 3. Colapso de tensão. 4. Estabilidade de tensão. 5. Margem de potência. 6. Esgotamento de recursos. I. Prada, Ricardo Bernardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

## Agradecimentos

A meus professores da PUC-Rio pela dedicação, em especial a meu orientador Ricardo Prada pelo apoio e zelo na orientação deste trabalho.

A meu companheiro Tulio Valentim pela paciência, afeto e incentivo ininterruptos.

Aos meus colegas de mestrado pela ajuda, especialmente a Vanessa Gonzales, Diogo Cardoso, Natasha Monteiro, Deborah Kalynne e Patrícia Mansano pelo conhecimento compartilhado.

Aos meus colegas de trabalho do Instituto Federal Fluminense pelo suporte e compreensão em momentos críticos.

Aos meus pais, Lúcia e José Carlos, pelo exemplo contínuo, pelo esforço e pela persistência na jornada que me trouxe até aqui. Agradeço ao meu irmão por seu incentivo, seus conselhos, e por estar sempre a meu lado.

Ao CEPEL– Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – pela permissão de uso do *software* Anarede para fins de estudo e pesquisa.

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

## Resumo

Santos, Livia Cristina da Silva ; Prada, Ricardo Bernardo. **Avaliação do efeito do esgotamento de recursos de controle sobre a estabilidade de tensão e cálculo de ações de controle preventivas**. Rio de Janeiro, 2018. 145p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica , Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Em todos os sistemas de potência, inclusive o brasileiro, verificam-se os níveis de tensão nos barramentos e de corrente nos ramos de transmissão na presença de contingências durante a operação em tempo real. A lista de contingências inclui a perda de qualquer ramo de transmissão, a perda de alguns pares de ramos e, de menor importância, a perda de geração. As condições de estabilidade de tensão também são checadas nesse momento. Esse trabalho simula eventos em que há perda do controle de tensão devido ao esgotamento da fonte controladora em todas as barras de tensão controlada da rede e verifica seus efeitos sobre a estabilidade de tensão. As simulações realizadas incluem também o evento em que há perda de capacidade de aumentar a geração de potência ativa em todos os geradores. Um método de ordenação pelo grau de severidade do evento sobre a estabilidade de tensão é empregado. Além disso, aproveitam-se os resultados obtidos e determinam-se as tensões e gerações mais influentes sobre a estabilidade de tensão de uma certa barra. Com a finalidade de aumentar a margem de potência dessa certa barra, calculam-se ações de controle preventivas, isto é variações nas tensões e, se necessário, nas gerações ativas.

## Palavras-chave

Ações de controle preventivas; colapso de tensão; estabilidade de tensão; margem de potência; esgotamento de recursos.

## Abstract

Santos, Livia Cristina da Silva ; Prada, Ricardo Bernardo (Advisor).  
**Evaluation of the effect of control resources exhaustion on voltage stability and calculation of preventive control actions.** Rio de Janeiro, 2018. 145p. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica , Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In all power systems, including the Brazilian one, it is common to check the voltage levels in busbars and current in the transmission branches in presence of contingencies during the real-time operation. The list of contingencies includes loss of any transmission lines, loss of some pairs of branches and, less importantly, loss of power generation. Voltage stability conditions are also checked at that time. This work simulates events in which there is loss of voltage control due to the exhaustion of the control source in all voltage-controlled busbars and verifies its effects on voltage stability. Simulations also include the event which shows loss of capacity to increase the active power generation in all generators. A ranking method is employed to order events by their degree of severity over voltage stability. In addition, the obtained results are used to determine the most influential voltages and generators over the voltage stability of a specific busbar. In order to increase the margin of power of this certain busbar, preventive control actions are calculated by keeping track of variations in voltage and, when necessary, in active power generations.

## Keywords

Preventive control actions; voltage collapse; voltage stability; power range; resources exhaustion.

# Sumário

1	Introdução	14
1.1	Considerações gerais	14
1.2	Objetivos	14
1.3	Estrutura do trabalho	15
2	Fluxo de potência e controle de tensão	17
2.1	Introdução	17
2.2	Equações	18
2.3	Solução do fluxo de potência pelo Método Newton-Raphson	20
2.3.1	Rede com barras do tipo PQ, PV e $V_\theta$	20
2.3.2	Rede com controle local de tensão por LTC	22
2.4	Múltiplas barras <i>swing</i>	24
2.5	Resumo do capítulo	27
3	Estabilidade de tensão	29
3.1	O fenômeno	29
3.2	O Limite de Estabilidade de Tensão (LET)	32
3.3	Avaliação da estabilidade de tensão	36
3.3.1	Método da matriz $[D']$	36
3.3.2	Módulo do Determinante da Matriz $[D']$	38
3.3.3	Sinal do Determinante da Matriz $[D']$	40
3.3.4	Matriz $[D']$ em barras com controle de tensão	41
3.3.5	Matriz $[D']$ com múltiplas barras <i>swing</i>	43
3.4	Índices de estabilidade de tensão	46
3.5	Resumo	48
4	Esgotamento de recursos	49
4.1	Método	49
4.2	Índices de influência sobre a estabilidade de tensão	50
4.2.1	Índices de influência na barra	50
4.2.2	Índices de influência no sistema	52
4.3	Modelagem dos esgotamentos	53
4.3.1	Esgotamentos de potência ativa	53
4.3.2	Esgotamentos de potência reativa	55
4.3.3	Esgotamentos de <i>tap</i>	56
4.4	Exemplo ilustrativo	57
4.4.1	Sistema elétrico	57
4.4.2	Fluxo de potência	58
4.4.3	Matriz $[D']$	59
4.4.4	Matriz $[D']$ para esgotamento de potência ativa	62
4.4.5	Matriz $[D']$ para esgotamento de potência reativa	63
4.4.6	Matriz $[D']$ para esgotamento de <i>tap</i>	63
4.4.7	Resultados	64
4.5	Rede de exemplo: CEPEL-34	66

4.5.1	Determinação das tensões e gerações mais influentes sobre a margem de potência de certa barra da rede	67
4.5.2	Ordenação dos esgotamentos de controle de tensão e de geração de potência ativa por severidade	68
4.6	Resumo	70
5	Ações de controle preventivas	<b>71</b>
5.1	Introdução	71
5.2	Ações de controle preventivas de potência reativa	72
5.2.1	Barras de carga	72
5.2.2	Barras de geração	78
5.3	Ações de controle preventivas de potência ativa	83
5.3.1	Barras de carga	83
5.3.2	Barras de geração	86
5.4	Ações de controle preventivas combinadas: potência ativa e reativa	92
5.5	Sistema Sul-Sudeste	93
5.5.1	Ações de controle preventivas de potência reativa em barras de carga	98
5.5.2	Ações de controle preventivas de potência reativa em barras de geração	103
5.5.3	Ações de controle preventivas de <i>tap</i> de LTC em barras de carga	113
5.5.4	Ações de controle preventivas de <i>tap</i> de LTC em barras de geração	115
5.5.5	Ações de controle preventivas de potência ativa em barras de carga	121
5.5.6	Ações de controle preventivas de potência ativa em barras de geração	123
5.5.7	Ações combinadas: potência ativa e reativa	128
5.6	Resumo	131
6	Conclusões	<b>134</b>
6.1	Trabalhos futuros	136
	Referências bibliográficas	<b>137</b>
A	Apêndice A	<b>139</b>



## Lista de figuras

Figura 1	Convenção de sinais para fluxos e injeções de corrente, potência ativa e reativa[1]	20
Figura 2	Circuito de duas barras	29
Figura 3	Limite de estabilidade angular.	31
Figura 4	<i>Maximum maximorum</i> observável em figura tridimensional	31
Figura 5	$P_1$ e $Q_1$ constantes no plano $\theta_1 v_1$	32
Figura 6	Soluções no plano $v\theta$ para um fator de potência constante	33
Figura 7	Circuito com as Impedâncias da Transmissão e da Carga	34
Figura 8	Curva $\phi$ constante e o limite de estabilidade de tensão no plano Sv.	35
Figura 9	Localização dos vetores $\dot{\nabla}P$ e $\dot{\nabla}Q$ no Plano $V\theta$	41
Figura 10	Regiões de operação do sistema	48
Figura 11	Curvas do caso-base e de esgotamentos com suas respectivas margens de potência e Índices de Influência	51
Figura 12	Regiões de operação de um sistema levando em consideração os Índices de Influência e o sinal de $\beta$	52
Figura 13	Sistema-teste	57
Figura 14	Índice de influência sobre cada barra	66
Figura 15	Índice de influência de cada esgotamento sobre o sistema	66
Figura 16	Diagrama unifilar da rede CEPEL-34	67
Figura 17	Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo $\beta$	73
Figura 18	Ações de controle preventivas implementadas sobre $v_{31}$ , $v_{32}$ , $v_{33}$ , e $v_{34}$ para incrementar a margem da barra 29	76
Figura 19	Margem de potência da barra 29 em função do II das barras <i>swing</i> quando há incremento de 0,001 pu na tensão dessas barras	77
Figura 20	Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo $\beta$ da barra 1	79
Figura 21	Ações de controle preventivas implementadas sobre $v_{31}$ , $v_{33}$ , $v_{32}$ , e $v_{34}$ para incrementar a margem da barra 1	81
Figura 22	Margem de potência da barra 1 em função do II da própria barra 1 e das barras <i>swing</i> quando há incremento de 0,001 pu na tensão dessas barras	83
Figura 23	Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência $M_{29}$ e sobre o ângulo $\beta_{29}$	86
Figura 24	Ações de controle preventivas implementadas sobre $P_{G1}$ , $P_{G31}$ , $P_{G33}$ , $P_{G32}$ , e $P_{G34}$ para incrementar a margem da barra 1	88
Figura 25	Ações de controle preventivas implementadas sobre $P_G$ para incrementar a margem das barras 31, 32, 33 e 34	91

Figura 26	Ações de controle preventivas implementadas sobre $v_1$ , $P_{G1}$ , $P_{G31}$ , $P_{G33}$ , $P_{G32}$ , e $P_{G34}$ para incrementar a margem da barra 1	92
Figura 27	Diagrama unificada da rede S/SE de 65 barras (TB-65)	94
Figura 28	Estado da rede após execução de algoritmo de fluxo de potência continuado parametrizado pelo Anarede	97
Figura 29	Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo $\beta$	100
Figura 30	Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo $\beta$	103
Figura 31	Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo $\beta$	104
Figura 32	Relação entre o índice de influência e o efeito da ação de controle	108
Figura 33	Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo $\beta$	109
Figura 34	Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo $\beta$	110
Figura 35	Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo $\beta$	115
Figura 36	Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo $\beta$	115
Figura 37	Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo $\beta$	116
Figura 38	Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo $\beta$	118
Figura 39	Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo $\beta$	120
Figura 40	Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo $\beta$	120
Figura 41	Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência $M_{11}$ e sobre o ângulo $\beta_{11}$	123
Figura 42	Ações de controle preventivas implementadas sobre $P_{G1}$ , $P_{G2}$ , $P_{G17}$ , $P_{G18}$ , $P_{G19}$ , $P_{G20}$ , $P_{G26}$ , $P_{G29}$ , $P_{G30}$ , $P_{G31}$ , $P_{G43}$ , $P_{G44}$ , $P_{G45}$ , e $P_{G46}$ para incrementar a margem da barra 2	124
Figura 43	Ações de controle preventivas implementadas sobre $P_{G1}$ , $P_{G2}$ , $P_{G17}$ , $P_{G18}$ , $P_{G19}$ , $P_{G20}$ , $P_{G26}$ , $P_{G29}$ , $P_{G30}$ , $P_{G31}$ , $P_{G43}$ , $P_{G44}$ , $P_{G45}$ , e $P_{G46}$ para incrementar a margem da barra 29	126
Figura 44	Ações de controle preventivas implementadas sobre $P_{G1}$ , $P_{G2}$ , $P_{G17}$ , $P_{G18}$ , $P_{G19}$ , $P_{G20}$ , $P_{G26}$ , $P_{G29}$ , $P_{G30}$ , $P_{G31}$ , $P_{G43}$ , $P_{G44}$ , $P_{G45}$ , $P_{G46}$ e $v_2$ para incrementar a margem da barra 2	130
Figura 45	Ações de controle preventivas implementadas sobre $P_{G1}$ , $P_{G2}$ , $P_{G17}$ , $P_{G18}$ , $P_{G19}$ , $P_{G20}$ , $P_{G26}$ , $P_{G29}$ , $P_{G30}$ , $P_{G31}$ , $P_{G43}$ , $P_{G44}$ , $P_{G45}$ , e $P_{G46}$ para incrementar a margem da barra 29	132

## Lista de tabelas

Tabela 1	Informações das barras	57
Tabela 2	Informações dos ramos de transmissão	58
Tabela 3	Ponto de operação do sistema-teste	59
Tabela 4	Índices de estabilidade de tensão do sistema-teste	61
Tabela 5	Índices de influência II para cada barra em cada cenário de esgotamento e índices de influência do esgotamento sobre o sistema IIS	65
Tabela 6	Ponto de operação e índices de estabilidade de tensão do sistema CEPEL-34 barras da Figura 16 no caso-base	68
Tabela 7	Índices de estabilidade de tensão do Sistema de 34 barras	69
Tabela 8	Índice de influência de cada esgotamento sobre o sistema	69
Tabela 9	Ações de controle preventivas sobre $v_1$ implementadas para incrementar a margem da barra 29	73
Tabela 10	Índices de influência em ordem decrescente conforme dados da Tabela 7	74
Tabela 11	Ações de controle preventivas implementadas sobre $v_{31}$ , $v_{33}$ , $v_{32}$ , e $v_{34}$ para incrementar a margem da barra 29	75
Tabela 12	Ações de controle preventivas sobre $v_1$ implementadas para incrementar a margem da barra 1	79
Tabela 13	Ações de controle preventivas implementadas sobre $v_{31}$ , $v_{33}$ , $v_{32}$ , e $v_{34}$ para incrementar a margem da barra 1	80
Tabela 14	Ações de controle preventivas implementadas sobre $P_{G1}$ , $P_{G31}$ , $P_{G33}$ , $P_{G32}$ , $P_{G33}$ e $P_{G34}$ para incrementar a margem da barra 29	85
Tabela 15	Ações de controle preventivas implementadas sobre $P_{G1}$ , $P_{G31}$ , $P_{G33}$ , $P_{G32}$ , e $P_{G34}$ para incrementar a margem da barra 1	87
Tabela 16	Ações de controle preventivas implementadas sobre $P_G$ para incrementar a margem das barras 31, 32, 33 e 34	90
Tabela 17	Ponto de operação e índices de estabilidade de tensão do sistema TB-65, da Figura 27 no caso-base	96
Tabela 18	Índices de influência dos esgotamentos sobre as barras 2, 11 e 29 em ordem crescente	99
Tabela 19	Ações de controle preventivas implementadas sobre $v_3$ para incrementar a margem da barra 11	100
Tabela 20	Ações de controle preventivas implementadas sobre $v_1$ , $v_2$ , $v_{17}$ , $v_{18}$ , $v_{19}$ e $v_{20}$ para incrementar a margem da barra 11	101
Tabela 21	Ações de controle preventivas implementadas sobre $v_{26}$ , $v_{29}$ , $v_{30}$ , $v_{31}$ , $v_{43}$ , $v_{44}$ , $v_{45}$ e $v_{46}$ para incrementar a margem da barra 11	102
Tabela 22	Ações de controle preventivas implementadas sobre $v_2$ para incrementar a margem da barra 2	105
Tabela 23	Ações de controle preventivas implementadas sobre $v_1$ , $v_3$ , $v_{17}$ , $v_{18}$ , $v_{19}$ e $v_{20}$ para incrementar a margem da barra 2	106

Tabela 24	Ações de controle preventivas implementadas sobre $v_{26}$ , $v_{29}$ , $v_{30}$ , $v_{31}$ , $v_{43}$ , $v_{44}$ , $v_{45}$ e $v_{46}$ para incrementar a margem da barra 2	107
Tabela 25	Ações de controle preventivas implementadas sobre $v_{29}$ para incrementar a margem da barra 29	109
Tabela 26	Ações de controle preventivas implementadas sobre $v_1$ , $v_2$ , $v_3$ , $v_{17}$ , $v_{18}$ , $v_{19}$ e $v_{20}$ para incrementar a margem da barra 29	111
Tabela 27	Ações de controle preventivas implementadas sobre $v_{20}$ , $v_{26}$ , $v_{30}$ , $v_{31}$ , $v_{43}$ , $v_{44}$ , $v_{45}$ , e $v_{46}$ para incrementar a margem da barra 29	112
Tabela 28	Ações de controle preventivas implementadas sobre $v_{32}$ , $v_{48}$ , $v_{50}$ , $v_{55}$ , $v_{62}$ e $v_{65}$ para incrementar a margem da barra 11	114
Tabela 29	Ações de controle preventivas implementadas sobre $v_{31}$ , $v_{33}$ , $v_{32}$ , e $v_{34}$ para incrementar a margem da barra 2	117
Tabela 30	Ações de controle preventivas implementadas sobre $v_{31}$ , $v_{33}$ , $v_{32}$ , e $v_{34}$ para incrementar a margem da barra 29	119
Tabela 31	Ações de controle preventivas implementadas sobre $P_{G1}$ , $P_{G2}$ , $P_{G17}$ , $P_{G18}$ , $P_{G19}$ , $P_{G20}$ , $P_{G26}$ , $P_{G29}$ , $P_{G30}$ , $P_{G31}$ , $P_{G43}$ , $P_{G44}$ , $P_{G45}$ , e $P_{G46}$ para incrementar a margem da barra 11	122
Tabela 32	Ações de controle preventivas implementadas sobre $P_{G1}$ , $P_{G2}$ , $P_{G17}$ , $P_{G18}$ , $P_{G19}$ , $P_{G20}$ , $P_{G26}$ , $P_{G29}$ , $P_{G30}$ , $P_{G31}$ , $P_{G43}$ , $P_{G44}$ , $P_{G45}$ , e $P_{G46}$ para incrementar a margem da barra 2	125
Tabela 33	Ações de controle preventivas implementadas sobre $P_{G1}$ , $P_{G2}$ , $P_{G17}$ , $P_{G18}$ , $P_{G19}$ , $P_{G20}$ , $P_{G26}$ , $P_{G29}$ , $P_{G30}$ , $P_{G31}$ , $P_{G43}$ , $P_{G44}$ , $P_{G45}$ , e $P_{G46}$ para incrementar a margem da barra 29	127
Tabela 34	Ações de controle preventivas implementadas sobre $P_{G1}$ , $P_{G2}$ , $P_{G17}$ , $P_{G18}$ , $P_{G19}$ , $P_{G20}$ , $P_{G26}$ , $P_{G29}$ , $P_{G30}$ , $P_{G31}$ , $P_{G43}$ , $P_{G44}$ , $P_{G45}$ , $P_{G46}$ e $v_2$ para incrementar a margem da barra 2	129
Tabela 35	Ações de controle preventivas implementadas sobre $P_{G1}$ , $P_{G2}$ , $P_{G17}$ , $P_{G18}$ , $P_{G19}$ , $P_{G20}$ , $P_{G26}$ , $P_{G29}$ , $P_{G30}$ , $P_{G31}$ , $P_{G43}$ , $P_{G44}$ , $P_{G45}$ , $P_{G46}$ e $v_{29}$ para incrementar a margem da barra 29	131
Tabela 36	Informações das barras do sistema CEPEL-34	139
Tabela 37	Informações das linhas do sistema CEPEL-34	140
Tabela 39	Informações das linhas do sistema TB-65	141
Tabela 38	Informações das barras do sistema TB-65	145

## Lista de Abreviaturas

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

II - Índice de influência

LEEA – Limite de estabilidade estático angular

LET – Limite de Estabilidade de Tensão

LTC – *Load tap changer*

# 1

## Introdução

### 1.1

#### Considerações gerais

O aumento da demanda por energia elétrica sobrecarrega o sistema de transmissão, problema tradicionalmente resolvido com a inserção de compensação reativa na rede de transmissão, o que possibilita maior transferência de potência em níveis de tensão adequados. No entanto, isso trouxe um novo problema para a operação: a estabilidade de tensão.

A estabilidade de tensão está relacionada à capacidade de um sistema de potência de manter níveis de tensão aceitáveis em todas as barras do sistema sob condições de operação normal ou após ser submetido a uma contingência. Nesse caso, pode haver diminuição progressiva e incontrolável na tensão, resultando no colapso do sistema elétrico.

A manifestação mais conhecida do problema de estabilidade de tensão é a existência de uma máxima potência que pode ser transmitida pela rede elétrica. Assim, há possibilidade de ações de controle de tensão terem efeito oposto ao esperado. Assim, torna-se essencial estudar quão suscetíveis a problemas de estabilidade de tensão as barras do sistema estão.

Analisa-se como as barras se comportariam frente à restrições operativas, como esgotamento da capacidade de controle de tensão ou esgotamento da capacidade de geração de potência ativa. Propõem-se ações de controle preventivas para melhorar as condições de estabilidade de tensão. Estabelece-se relação entre as respostas do sistema aos esgotamentos e resposta do sistema às ações de controle preventivas correspondentes.

### 1.2

#### Objetivos

O primeiro objetivo é estudar o esgotamento da capacidade de controle de tensão e de geração de potência ativa que diz respeito à estabilidade de tensão. Um índice é aplicado para mensurar a variação da margem potência nos casos pré-esgotamento e pós-esgotamento. Por fim, é empregado um método de ordenação pelo grau de severidade do evento.

Parte-se da ideia de que quanto mais influente é o esgotamento de tensão ou geração sobre uma certa barra, maior é a possibilidade de variações dessa tensão ou geração provocar variações na margem de potência dessa certa barra. Assim, o segundo objetivo é elaborar ações de controle preventivas que atuem sobre tensões e/ou gerações de potência ativa e que sejam capazes de elevar a margem de potência de certa barra. Isso é especialmente importante para barras cuja margem de potência é pequena ou negativa no caso pré-esgotamento.

### 1.3

#### Estrutura do trabalho

No Capítulo 2, apresentam-se os conceitos básicos relacionados ao problema do fluxo de potência, tais como expressões gerais dos fluxos, a formulação matricial do problema e a aplicação do método de Newton-Raphson à solução do problema. Além disso, é abordada a modelagem para o tratamento de múltiplas barras *swing* no problema básico de fluxo de potência.

No Capítulo 3 traz-se uma abordagem do fenômeno da estabilidade de tensão contendo o estudo das regiões de operação da curva  $\phi$  constante no plano Sv, dos limites de estabilidade estática angular e de estabilidade de tensão, a relação entre o uso de linhas de transmissão perto de sua capacidade máxima e os problemas de estabilidade de tensão. Além disso, apresenta-se uma ferramenta analítica de avaliação das condições nodais associadas ao máximo fluxo de potência ativa e reativa de uma rede de transmissão através da determinação de índices que apontam a região de operação na curva  $\phi$  constante no plano Sv, a margem em MVA para o máximo carregamento e a importância relativa entre as barras.

No Capítulo 4, são definidos os esgotamentos de recursos relacionados à limitação de geração de potência ativa, de geração de potência reativa e de *tap* de LTC (*Load tap changer*). A análise de estabilidade de tensão é feita no caso-base e sob essas condições de exaustão de recursos. Com isso, é possível determinar as tensões e gerações mais influentes sobre a margem de potência de certa barra da rede e ordenar os esgotamentos relacionados a tensão e a geração de potência ativa por severidade.

No Capítulo 5 apresentam-se ações de controle baseadas nas constatações do Capítulo 4. Os índices de influência de cada esgotamento são utilizados para fundamentar as ações de controle preventivas baseadas na geração de potência ativa, na geração de potência reativa, na combinação de ambas ou no *tap* de LTC, com o objetivo de aumentar a margem de potência de certas barras. Estas simulações foram feitas para dois sistemas, onde cada um deles têm

barras operando próximo ao máximo carregamento ou na parte inferior da curva  $\phi$  constante.

O Capítulo 6 traz as principais conclusões sobre o esgotamento de recursos relacionados ao controle de tensão e ao redespacho de potência ativa, e sobre ações de controle preventivas com base na influência dos esgotamentos visando o incremento das margens de potência, assim como sugestões para trabalhos futuros.



## 2

## Fluxo de potência e controle de tensão

### 2.1

#### Introdução

O fluxo de carga (ou fluxo de potência) em uma rede de energia elétrica é a determinação do estado de um sistema elétrico. Para isso, os geradores e as cargas são considerados como elementos externos à rede de transmissão, sendo descritos como injeções de potência nos nós a que estão conectados. Além disso, para cada nó da rede de transmissão são aplicadas equações de conservação de potência ativa e reativa. Ou seja, a potência injetada em um nó deve ser igual à potência que sai desse nó através dos elementos internos conectados a ele. Essa abordagem equivale à primeira lei de Kirchhoff. Já a segunda lei de Kirchhoff é utilizada para expressar o fluxo de potência nos componentes internos da rede em função do estado (tensão) dos terminais conectados a eles. Então, o problema de fluxo de potência pode ser formulado como um conjunto de equações algébricas correspondentes às leis de Kirchhoff.

Para cada barra há variáveis que podem ser incógnitas ou dados do problema de fluxo de potência. Para uma formulação básica, as quatro variáveis são:

$v_k$  é módulo da tensão nodal (barra  $k$ );

$\theta_k$  é o ângulo da tensão nodal;

$P_k$  é a injeção líquida (geração menos carga) de potência ativa nodal; e

$Q_k$  é a injeção líquida (geração menos carga) de potência reativa nodal.

Dependendo de quais destas variáveis são tratadas como incógnitas e quais são tratadas como dados do problema de fluxo de potência, podem ser definidos os tipos de barras.

PQ é uma barra de carga, sem controle de tensão. Desse modo,  $P_k$  e  $Q_k$  são fornecidos (especificados a priori) e  $v_k$  e  $\theta_k$  são calculados.

PV é uma barra com dispositivos de controle, tais como os geradores e compensadores síncronos, que permitem manter o módulo da tensão e a injeção de potência ativa em valores especificados. Assim,  $P_k$  e  $v_k$  são conhecidos (especificados a priori) e  $Q_k$  e  $\theta_k$  são calculados.

PQV é uma barra de carga, que tem sua tensão controlada remotamente por uma ou mais barras ou por um ou mais transformadores. Assim,  $P_k$ ,  $Q_k$  e  $v_k$  são conhecidos (especificados a priori) e  $\theta_k$  é calculado.

$V\theta$ , também chamada de barra de referência, *slack* ou *swing* é uma barra de referência angular e, usualmente, também fecha o balanço de potência ativa do sistema, levando em consideração as perdas do sistema de transmissão. Desse modo,  $v_k$  e  $\theta_k$  são fornecidos (especificados a priori) e  $P_k$  e  $Q_k$  são calculados.

$V$  é uma barra que integra o conjunto das barras *slack* ou *swing*, fecha o balanço de potência ativa do sistema, levando em consideração as perdas ativas do sistema de transmissão. Desse modo,  $v_k$  é conhecido e  $P_k$ ,  $Q_k$  e  $\theta_k$  são calculados.

## 2.2

### Equações

O conjunto de equações do problema do fluxo de carga é formado por duas equações para cada barra, resultado da imposição da conservação das potências ativa e reativa associadas, o que equivale à primeira lei de Kirchhoff [1] :

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_K} P_{km}(v_k, v_m, \theta_k, \theta_m, a_{km}, \phi_{km}) \quad (2.1)$$

$$Q_k + Q_k^{sh} = \sum_{m \in \Omega_K} Q_{km}(v_k, v_m, \theta_k, \theta_m, a_{km}, \phi_{km}) \quad (2.2)$$

para  $k=1$  a NB, onde:

NB é o número de barras na rede;

$\Omega_K$  é o conjunto de barras vizinhas à barra  $k$ ;

$Q_k^{sh}$  é a injeção de potência reativa devido ao elemento *shunt* conectado na barra  $k$ ;

$P_{km}$  é o fluxo de potência ativa no ramo  $k$ - $m$ ;

$Q_{km}$  é o fluxo de potência reativa no ramo  $k$ - $m$ ;

$v_k$  é o módulo da tensão da barra  $k$ ;

$v_m$  é o módulo da tensão da barra  $m$ ;

$\theta_k$  é o ângulo da tensão na barra  $k$ ;

$\theta_m$  é o ângulo da tensão na barra  $m$ ;

$a_{km}$  é o *tap* do transformador no ramo  $k$ - $m$ ;

$\phi_{km}$  é a defasagem promovida pelo transformador do ramo  $k$ - $m$ .

De acordo com [1], de forma generalizada, as equações de fluxo de potência ativa e reativa no ramo k-m podem ser escritas como:

$$P_{km} = (a_{km}v_k)^2 g_{km} + (a_{km}v_k)v_m g_{km} \cos(\theta_{km} + \psi_{km}) - (a_{km}v_k)v_m b_{km} \sin(\theta_{km} + \psi_{km}) \quad (2.3)$$

$$Q_{km} = - (a_{km}v_k)^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) - (a_{km}v_k)v_m b_{km} \cos(\theta_{km} + \psi_{km}) - (a_{km}v_k)v_m g_{km} \sin(\theta_{km} + \psi_{km}) \quad (2.4)$$

onde:

$g_{km}$  é a condutância no ramo k-m;

$b_{km}$  é a susceptância no ramo k-m;

$b_{km}^{sh}$  é a susceptância devido ao elemento *shunt* no ramo k-m;

$\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$ .

Assim, caso o ramo k-m seja uma linha de transmissão,  $a_{km}=1$  e  $\psi_{km}=0$ .

Por simplicidade, ao longo desse trabalho serão abordados somente transformadores em fase, portanto  $\psi_{km}=0$ . Então, as potências ativas e reativa líquidas  $P_k$  e  $Q_k$  injetadas em uma barra k são dadas por:

$$P_k = v_k \sum_{m \in \Lambda_K} a_{km} (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2.5)$$

$$Q_k = v_k \sum_{m \in \Lambda_K} a_{km} (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (2.6)$$

para k=1 a NB, onde:

$\Lambda_K$  é formado pelo conjunto  $\Omega_K$  e pela barra k;

$G_{km}$  é elemento da matriz de condutância nodal;

$B_{km}$  é elemento da matriz de susceptância nodal.

As equações (2.1) a (2.6) adotam a convenção de sinais conforme a Figura 1, em que as injeções líquidas de potência são positivas quando entram na barra (geração) e negativas quando saem da barra (carga). Analogamente, os fluxos de potência são considerados positivos quando entram na barra e negativos quando saem da barra.

Então, a modelagem do problema de fluxo de potência pode ser resumida como um sistema de equações das variáveis de fluxo de potência ativa e reativa em função das variáveis módulo de tensões, dos ângulos das barras da rede e dos *taps* de LTC (*Load Tap Changer*).

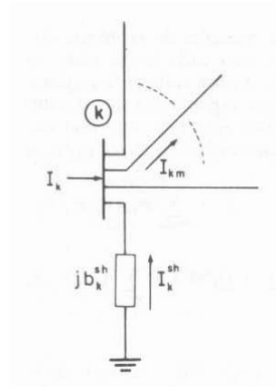


Figura 1: Convenção de sinais para fluxos e injeções de corrente, potência ativa e reativa[1]

## 2.3

### Solução do fluxo de potência pelo Método Newton-Raphson

#### 2.3.1

##### Rede com barras do tipo PQ, PV e Vθ

Considerando uma rede sem LTC, o sistema do problema de fluxo de potência determinado por (2.5) e (2.6) é reescrito como funções das incógnitas de módulo de tensões e dos ângulos das barras da rede conforme (2.7).

$$\begin{bmatrix} \bar{P} \\ \bar{Q} \end{bmatrix} = f \left( \begin{bmatrix} \bar{\theta} \\ \bar{v} \end{bmatrix} \right) \quad (2.7)$$

onde:

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_k \\ \vdots \\ P_m \\ \vdots \\ P_{NB} \end{bmatrix} \quad \bar{Q} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_k \\ \vdots \\ Q_m \\ \vdots \\ Q_{NB} \end{bmatrix} \quad \bar{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_k \\ \vdots \\ \theta_m \\ \vdots \\ \theta_{NB} \end{bmatrix} \quad \bar{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_k \\ \vdots \\ v_m \\ \vdots \\ v_{NB} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

O problema de cálculo de fluxo de potência é multivariado e usualmente possui múltiplas soluções. Portanto, a especificação de algumas variáveis a priori permite que a solução encontrada seja próxima do ponto de operação desejado, ou seja, possibilita que algumas características do sistema sejam obedecidas. Aqui, a busca pela solução do problema de fluxo de potência será feita utilizando o método de Newton-Raphson conforme descrito em [1].

Determinar o ponto de operação de uma rede elétrica formada apenas por barras do tipo PQ, PV e Vθ, é sinônimo de encontrar a solução de (2.7)

em que as potências calculadas atendem aos valores especificados para elas.

Após a finalização do processo de Newton-Raphson, os resultados obtidos para as incógnitas são combinados com as grandezas determinadas a priori - ângulo da barra de referência angular e tensões das barras de tensão controlada, e utilizados na etapa posterior, que consiste em resolver (2.5) para barras *swing* e (2.6) para barras *swing* e do tipo PV.

Dessa forma, o sistema de equações a ser resolvido pelo método de Newton-Raphson é composto por duas equações e duas incógnitas para cada barra PQ e uma equação e uma incógnita para cada barra PV. Ou seja, se  $N_{PQ}$  e  $N_{PV}$  representam as quantidades de barras PQ e PV, respectivamente, trata-se de um sistema de  $2N_{PQ} + N_{PV}$  equações algébricas não lineares com o mesmo número de incógnitas.

As equações que compõem este sistema podem ser escritas do seguinte modo:

$$g = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P - P^{esp} \\ Q - Q^{esp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta \\ v \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

e é resolvido através dos seguintes passos:

1. calculam-se os valores de  $P_k$  e  $Q_k$  utilizando os valores atuais de  $\theta_k$  e  $v_k$ ;
2. determinam-se o resíduo de  $P_k$ , sendo  $\Delta P_k \triangleq P_k - P_k^{esp}$  e o resíduo de  $Q_k$ , sendo  $\Delta Q_k \triangleq Q_k - Q_k^{esp}$ ;
3. comparam-se os resíduos com a tolerância  $\epsilon$  especificada. Caso  $\max|\Delta P_k| \leq \epsilon$  e  $\max|\Delta Q_k| \leq \epsilon$ , aceita-se a solução atual e o processo iterativo é encerrado. Caso contrário passa-se ao próximo passo;
4. lineariza-se a função  $g$  em torno do ponto determinado pela solução atual por intermédio da série de Taylor, desprezando-se os termos de ordem superior a 1;
5. calcula-se a matriz Jacobiano;
6. determinam-se as variações  $\Delta\theta_k$  e  $\Delta v_k$ ;
7. atualizam-se as variáveis  $\theta_k$  e  $v_k$ ; e
8. retorna-se ao passo 1.

Portanto, é possível chegar a um sistema linearizado de (2.5) e (2.6) conforme (2.10):

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{P} \\ \Delta \underline{Q} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial \underline{P}}{\partial \theta} & \frac{\partial \underline{P}}{\partial v} \\ \frac{\partial \underline{Q}}{\partial \theta} & \frac{\partial \underline{Q}}{\partial v} \end{bmatrix}}_{\mathbf{J}} \begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta} \\ \Delta \underline{v} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

onde:

- $\Delta \underline{P}$  é o resíduo da potência ativa de todas as barras do sistema, exceto barras do tipo  $V\theta$ ;
- $\Delta \underline{Q}$  é o resíduo da potência reativa de todas as barras do sistema, exceto barras do tipo PV e  $V\theta$ ;
- $\Delta \underline{\theta}$  é a atualização da variável  $\underline{\theta}$  na iteração atual para a próxima iteração para todas as barras do sistema, exceto barras do tipo  $V\theta$ ;
- $\Delta \underline{v}$  é a atualização da variável  $\underline{v}$  na iteração atual para a próxima iteração para todas as barras do sistema, exceto barras do tipo PV e  $V\theta$ ; e
- $\mathbf{J}$  é a matriz Jacobiano.

Portanto, o modelo linearizado de (2.5) e (2.6) inclui  $Q_k$  apenas de barras cuja potência reativa líquida seja especificada e  $P_k$  apenas de barras cuja potência ativa líquida seja especificada. Nota-se que a barra de referência angular (tipo  $V\theta$ ) não tem  $P_k$  especificada, pois a ela alocam-se as perdas ôhmicas da rede elétrica.

### 2.3.2

#### Rede com controle local de tensão por LTC

[1] Considerando uma rede com LTC, o sistema de equações o problema de fluxo de potência determinado por (2.5) e (2.6) é reescrito como funções das incógnitas de módulo de tensões, dos ângulos das barras da rede e *taps* dos LTC conforme (2.11).

$$\begin{bmatrix} \overline{P} \\ \overline{Q} \end{bmatrix} = f \left( \begin{bmatrix} \overline{\theta} \\ \overline{v} \\ \overline{a} \end{bmatrix} \right) \quad (2.11)$$

Em outras palavras, se uma rede elétrica tem uma barra  $m$  controlada localmente por um LTC conectado a uma barra  $k$ , o sistema do problema de fluxo de potência determinado por (2.5) e (2.6) reescrito como função das incógnitas de módulo de tensões, dos ângulos das barras da rede e dos *taps* de LTC é:

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_k \\ \vdots \\ P_m \\ \vdots \\ P_{NB} \end{bmatrix} \quad \bar{Q} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_k \\ \vdots \\ Q_m \\ \vdots \\ Q_{NB} \end{bmatrix} \quad \bar{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_k \\ \vdots \\ \theta_m \\ \vdots \\ \theta_{NB} \end{bmatrix} \quad \bar{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_k \\ \vdots \\ v_m \\ \vdots \\ v_{NB} \end{bmatrix} \quad \bar{a} = \begin{bmatrix} \vdots \\ a_{km} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Nesse caso, a barra  $m$  é do tipo PQV e, portanto, as variáveis de potência ativa líquida injetada ( $P_m$ ), de potência reativa líquida injetada ( $Q_m$ ) e de módulo de tensão ( $v_m$ ) são especificadas em valores  $P_m^{esp}$ ,  $Q_m^{esp}$  e  $v_m^{esp}$ , ou seja, são variáveis de controle. Por outro lado, as variáveis  $tap$  do LTC ( $a_{km}$ ) e de ângulo ( $\theta_m$ ) são incógnitas do problema, ou seja, são variáveis de estado.

As iterações do método Newton-Raphson para a solução de (2.11) utilizam o sistema linearizado (2.13), onde  $\Delta a_{km}$  é a atualização da variável  $a_{km}$  na iteração atual para a próxima iteração para barra  $m$  do tipo PQV; e a coluna da matriz Jacobiano relativa a  $a_{km}$  tem valores diferentes de zero apenas para  $\frac{\partial P_k}{\partial a_{km}}$ ,  $\frac{\partial P_m}{\partial a_{km}}$ ,  $\frac{\partial Q_k}{\partial a_{km}}$  e  $\frac{\partial Q_m}{\partial a_{km}}$ .

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_k \\ \vdots \\ \Delta P_m \\ \vdots \\ \Delta Q_k \\ \vdots \\ \Delta Q_m \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial v_k} \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial a_{km}} & \cdots \\ \vdots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial v_k} \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial a_{km}} & \cdots \\ \vdots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial v_k} \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial a_{km}} & \cdots \\ \vdots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial v_k} \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial a_{km}} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \vdots \\ \Delta \theta_m \\ \vdots \\ \Delta v_k \\ \vdots \\ \Delta a_{km} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Por fim, os resultados obtidos para as incógnitas são combinados com as variáveis determinadas a priori - ângulo da barra de referência e tensões das barras de tensão controlada, e então utilizados na etapa posterior, que consiste em resolver (2.5) para barra *swing* e (2.6) para barras *swing* e do tipo PV.

## 2.4

### Múltiplas barras *swing*

Com o aumento do emprego de geração distribuída, há necessidade de revisão das ferramentas de fluxo de potência utilizadas para planejamento e operação do sistema. Nesse sentido, em [2], questiona-se a premissa de existência de somente uma barra *swing*, ideia tipicamente empregada em algoritmos para cálculo de fluxo de carga. No lugar disso, sugere-se um modelo de barras *swing* distribuídas. Assim, há maior aderência à realidade de operação de sistemas de potência.

Aqui, o uso de múltiplas barras *swing* é feito segundo [3]. Assim, a distribuição de perdas ativas entre as barras *swing* deve ter a mesma relação de proporcionalidade que as gerações de potência ativa das barras *swing* considerando a rede elétrica sem perdas ativas. Para isso, há inclusão de equações de controle no problema geral de fluxo de potência.

O desejado é ter-se as barras *swing* com suas gerações ativas livres para variar e um ângulo de tensão de referência angular (fixo). Ou seja, apenas uma barra *swing* teria seu ângulo fixo. Já nas demais, os ângulos seriam variáveis. Empregando-se este conceito no problema de fluxo de carga, (2.18) ficaria sub-determinado, podendo dar origem a mais de uma solução. O critério adicional para tornar o sistema linearizado de equações quadrado é a distribuição de perdas ativas entre as barras *swing*. Isto é realizado através da inclusão de equações de controle no problema geral de fluxo de potência<sup>1</sup>.

A relação das potências ativas geradas pelas barras *swing* é especificada pelos respectivos dados iniciais de barra do sistema, assumindo-se que estes representam a distribuição da carga entre as unidades geradoras, sem levar em conta as perdas na rede. Logo, esta relação é obtida através das potências ativas geradas especificadas a priori nas barras *swing*.

Dado um sistema composto por  $n$  barras *swing*, o critério de proporcionalidade das perdas ativas pode ser traduzido matematicamente por [10]:

$$\begin{aligned}
 P_{G1} &= \alpha_{12} P_{G2} \\
 P_{G2} &= \alpha_{23} P_{G3} \\
 &\dots \\
 P_{G(n-1)} &= \alpha_{(n-1)n} P_{Gn}
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

<sup>1</sup>Usando fluxo de potência linearizado



A relação entre os fatores de participação das  $n$  barras *swing* são obtidas através das seguintes expressões:

$$\begin{aligned}\alpha_{12} &= \frac{P_{G1_0}}{P_{G2_0}} \\ \alpha_{23} &= \frac{P_{G2_0}}{P_{G3_0}} \\ &\dots \\ \alpha_{(n-1)n} &= \frac{P_{G(n-1)_0}}{P_{Gn_0}}\end{aligned}\tag{2.15}$$

onde os sub-índices "0" representam os valores especificados inicialmente, desconsiderando-se as perdas. Reescrevendo (2.14) obtém-se:

$$\begin{aligned}g_1 &= P_{G1}^{(h)} - \alpha_{12}P_{G2}^{(h)} \\ g_2 &= P_{G2}^{(h)} - \alpha_{23}P_{G3}^{(h)} \\ &\dots \\ g_{(n-1)} &= P_{G(n-1)}^{(h)} - \alpha_{(n-1)n}P_{Gn}^{(h)}\end{aligned}\tag{2.16}$$

A forma linearizada das novas equações de controle a serem incorporadas ao sistema linearizado das equações de fluxo de potência é:

$$\begin{aligned}\Delta g_1 &= \Delta P_{G1}^{(h)} - \alpha_{12}\Delta P_{G2}^{(h)} \\ \Delta g_2 &= \Delta P_{G2}^{(h)} - \alpha_{23}\Delta P_{G3}^{(h)} \\ &\dots \\ \Delta g_{(n-1)} &= \Delta P_{G(n-1)}^{(h)} - \alpha_{(n-1)n}\Delta P_{Gn}^{(h)}\end{aligned}\tag{2.17}$$

O novo critério estabelecido teve por objetivo criar  $n-1$  novas equações para tornar a matriz Jacobiano inversível. Essas equações são responsáveis por manter a proporcionalidade das gerações das potências ativas pelas barras *swing*, como desejado. Além disso, há inclusão de  $n$  novas incógnitas, os incrementos de potência ativa gerada das  $n$  barras *swing*. Por fim, incorporam-se as equações das injeções nodais de potência ativa das  $n$  barras *swing*, fazendo com que a matriz Jacobiano fique quadrada. Em (2.18), é representada a forma genérica do sistema linearizado expandido a ser resolvido a cada iteração pelo método de Newton-Raphson, onde "m" é uma barra de carga.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^* \\ \vdots \\ \Delta P_n^* \\ \Delta P_m \\ \vdots \\ \Delta Q_m \\ \vdots \\ \Delta g_1 \\ \vdots \\ \Delta g_{(n-1)} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial P_1^*}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_1^*}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_1^*}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_1^*}{\partial v_m} & \cdots & \frac{\partial P_1^*}{\partial P_{G1}} & \cdots & \frac{\partial P_1^*}{\partial P_{Gn}} \\ \vdots & & & & & & & & \\ \frac{\partial P_n^*}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_n^*}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n^*}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_n^*}{\partial v_m} & \cdots & \frac{\partial P_n^*}{\partial P_{G1}} & \cdots & \frac{\partial P_n^*}{\partial P_{Gn}} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial v_m} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial P_{G1}} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial P_{Gn}} \\ \vdots & & & & & & & & \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial v_m} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial P_{G1}} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial P_{Gn}} \\ \vdots & & & & & & & & \\ \frac{\partial g_1}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial g_1}{\partial \theta_m} & \frac{\partial g_1}{\partial v_m} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial P_{G1}} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial P_{Gn}} \\ \vdots & & & & & & & & \\ \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial v_m} & \cdots & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial P_{G1}} & \cdots & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial P_{Gn}} \end{bmatrix}}_J \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \vdots \\ \Delta \theta_n \\ \Delta \theta_m \\ \vdots \\ \Delta v_m \\ \vdots \\ \Delta P_{G1} \\ \vdots \\ \Delta P_{Gn} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Em (2.18), as novas variáveis de estado incorporadas são os incrementos de potência ativa gerada das  $n$  barras *swing* ( $\Delta P_{G1} \dots \Delta P_{Gn}$ ). Em contrapartida, são incluídas a equação da potência ativa referente a cada barra *swing* ( $\Delta P_1^* \dots \Delta P_n^*$ ) e as equações de controle ( $\Delta g_1 \dots \Delta g_{(n-1)}$ ). Assim, se  $i$  for uma barra *swing*, a forma linearizada da equação de potência ativa da barra  $i$  é dada por:

$$\Delta P_i^* = P_{Gi}^{(h)} - P_{Li} - P_i^{(h)} = -\Delta P_{Gi} + \frac{\partial P_i^*}{\partial \underline{\theta}} \Delta \underline{\theta} + \frac{\partial P_i^*}{\partial \underline{v}} \Delta \underline{v} \quad (2.19)$$

Ao final da  $h$ -ésima iteração do processo de solução, a potência ativa gerada da barra  $i$  é atualizada por:

$$P_{Gi}^{(h+1)} = P_{Gi}^{(h)} + \Delta P_{Gi}^{(h)} \quad (2.20)$$

Em (2.18), os elementos das colunas adicionadas à matriz Jacobiano são todos nulos, exceto nas posições correspondentes às injeções de potência ativa das barras *swing*, onde as derivadas são iguais a -1. Nas linhas das equações adicionais, somente os elementos das colunas referentes aos incrementos de potência ativa gerada das barras *swing* relacionadas são diferentes de zero. Portanto, a matriz Jacobiano é:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_n} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_1}{\partial v_m} & \cdots & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & & & & & & \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_n}{\partial v_m} & \cdots & 0 & \cdots & -1 \\ \vdots & & & & & & & & & \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_n} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial v_m} & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & & & & & & \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_n} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial v_m} & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & & & & & & \\ \frac{\partial g_1}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial \theta_n} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial \theta_m} & \frac{\partial g_1}{\partial v_m} & \cdots & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & & & & & & \\ \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial \theta_n} & \cdots & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial v_m} & \cdots & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial P_{G1}} & \cdots & -\alpha_{N(N-1)} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Uma característica importante deste modelo é que as equações de potência ativa das barras *swing* são mantidas no sistema matricial do fluxo de potência. No entanto, na modelagem correspondente ao modelo clássico, as equações de potência ativa das barras *swing* são removidas do problema.

## 2.5

### Resumo do capítulo

No problema do fluxo de carga, há injeção de potência através dos geradores e extração de potência pelas cargas de uma rede elétrica. Assim, a busca pela solução consiste em avaliar como a rede responde à essas interferências externas levando em consideração a primeira lei Kirchhoff e a segunda lei de Kirchhoff, segundo a qual o fluxo de potência é função do estado de elementos da rede. Em outras palavras, a injeção líquida de potência em um nó da rede é dado pela tensão dos nós, pelos valores dos *taps* e pelas características intrínsecas dos elementos do sistema elétrico.

A resolução numérica do problema do fluxo de potência é feita utilizando-se primeiramente o método de Newton Raphson com os dados das barras com potência especificada a priori. Desse modo, há ajuste das variáveis de estado: módulo e ângulo de tensões e *tap* de LTC, de tal modo que as especificações de potência sejam atendidas. Em seguida, são calculadas as injeções ou extrações líquidas de potência das barras restantes, considerando-se que as especificações de tensão são respeitadas e que as perdas do sistema podem ser compensadas. Ou seja, aqui considera-se infinita a capacidade dos geradores.

Além das restrições já citadas, inclui-se uma relação adicional: as proporções entre as gerações de potência ativa das barras *swing* no sistema sem perdas devem ser iguais às do sistema com perdas. Ou seja, as perdas do sis-

tema são distribuídas entre as barras *swing* na mesma proporção de geração de potência ativa dessas barras quando considera-se a rede sem perdas.

Assim, do ponto de vista do trabalho nesta dissertação, deve-se ressaltar que a modelagem do problema de fluxo de potência utilizando o método de Newton-Raphson permite contemplar dois mecanismos importantes: o controle de tensão e o despacho de potência ativa. A inserção desses mecanismos é feita incluindo-se novas equações controle.

### 3

## Estabilidade de tensão

Mecanismos de controle de tensão garantem a capacidade de um sistema elétrico de manter tensões aceitáveis em todas as barras da rede sob condições normais e após ser submetido a distúrbios. A perda da estabilidade de tensão ocorre em um sistema quando há um declínio progressivo e incontrolável na tensão. Isso pode ser consequência de uma perturbação, um aumento na demanda de carga ou outro tipo de alteração nas condições do sistema elétrico.

O uso extensivo de compensação de potência reativa permite que linhas de transmissão sejam usadas perto de sua capacidade máxima, o que pode levar a problemas de estabilidade de tensão na operação de sistemas elétricos.

Ao longo deste capítulo será descrito como o fenômeno de estabilidade de tensão em redes elétricas está associado às condições nodais do sistema, sendo relacionado ao máximo fluxo de potência ativa e reativa transmitida dos geradores para as cargas. Além disso, será detalhado como ações de controle de tensão tem o efeito oposto ao esperado quando um sistema elétrico enfrenta problemas relacionados a esse fenômeno.

### 3.1

#### O fenômeno

Para compreensão do fenômeno de estabilidade de tensão será analisado um circuito elétrico simples, conforme Figura 2, formado por um gerador de capacidade infinita, uma carga modelada por potência constante e uma linha de transmissão, de impedância  $Z_t \angle \alpha_t$  sem limite térmico. Os valores das admitâncias *shunt* da linha de transmissão serão desprezados sem perda de generalidade.

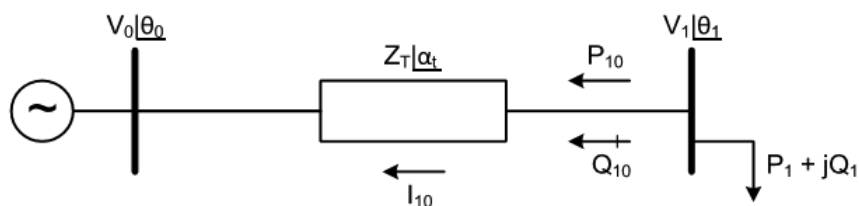


Figura 2: Circuito de duas barras

Além disso, são considerados:

$$\begin{aligned} v_0 &= 1 \text{ pu} \\ \theta_0 &= 0^\circ \\ Z_t &= 0,2 \text{ pu} \\ \alpha &= 70^\circ \\ 0 &< P_0 < +\infty \\ -\infty &< Q_0 < +\infty \end{aligned}$$

O conjugado da potência aparente saindo da barra 1 para a barra 0 é:

$$S_{10}^* = P_{10} - jQ_{10} = v_1^* I_{10} \quad (3.1)$$

onde

$$I_{10} = \frac{v_1 \angle \theta_1 - v_0 \angle \theta_0}{Z_t \angle \alpha_t} \quad (3.2)$$

e

$$v_1^* = v_1 \angle -\theta_1 \quad (3.3)$$

Substituindo (3.2) e (3.3) em (3.1), conclui-se que:

$$S_{10}^* = \frac{v_1 v_0 \cos(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t} - j \left[ \frac{v_1^2 \sin(\alpha_t) - v_1 v_0 \sin(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t} \right] \quad (3.4)$$

Comparando (3.1) e (3.4), entende-se que:

$$P_{10} = -P_1 = \frac{v_1^2 \cos(\alpha_t) - v_1 v_0 \cos(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t} \quad (3.5)$$

$$Q_{10} = -Q_1 = \frac{v_1^2 \sin(\alpha_t) - v_1 v_0 \sin(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t} \quad (3.6)$$

Na Figura 3 é apresentado um conjunto de curvas em que cada uma delas mostra a potência ativa consumida na carga ( $-P_{10}$ ) em função da defasagem angular de tensão ( $\theta_1$ ) para um dado valor de tensão  $v_1$  na carga. Em todas as curvas, nota-se que o máximo da potência ativa que pode ser transmitida à carga ocorre para valores de  $\theta_1 = -\alpha_t$ . Esse fato dá origem ao conceito de limite de estabilidade estático angular (LEEA) - linha vertical que passa por  $\theta_1 = -\alpha_t$  e divide as regiões de operação instável e de operação estável.

Na Figura 4 é mostrado um gráfico tridimensional para a potência ativa dada por (3.5), ou seja,  $P_1(v_1, \theta_1)$ .

Tanto através da Figura 3 quanto da Figura 4, pode-se constatar que a medida que  $v_1$  aumenta (através do suporte de potência reativa), o valor máximo possível para  $P_1$  também aumenta. Apesar disso, em ambas as figuras mostra-se que  $P_1$  não pode crescer indefinidamente mesmo que haja capacidade geração infinita de geração de potência reativa para tal. Ou seja, há uma máxima carga “*maximum maximorum*”  $P_1$  que pode ser alimentada pela rede.

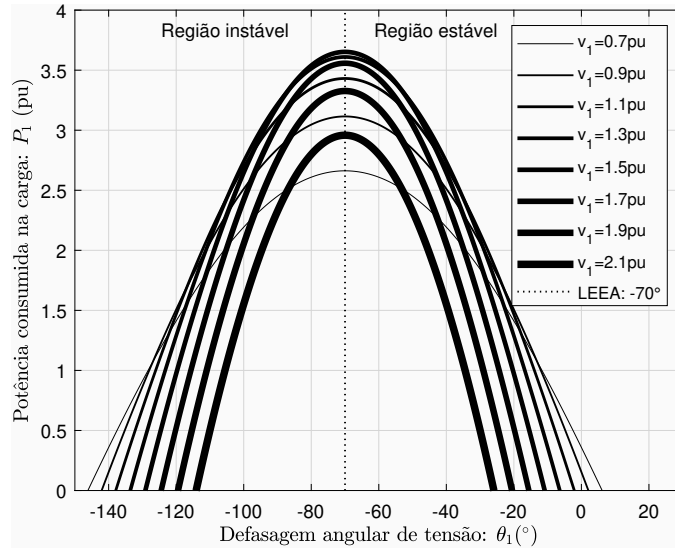
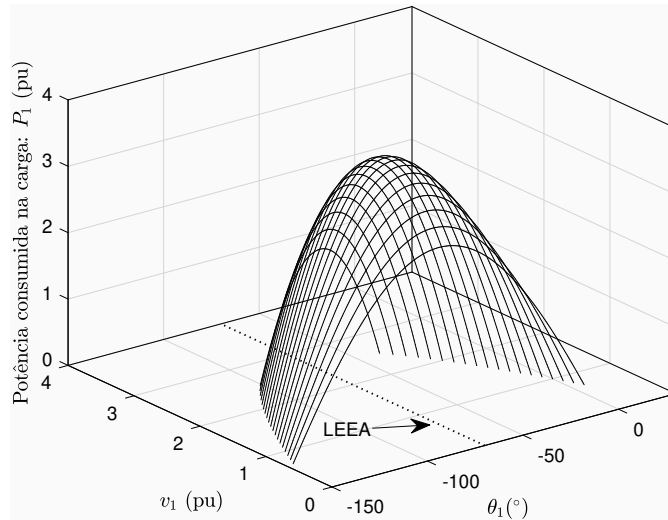


Figura 3: Limite de estabilidade angular.

Figura 4: *Maximum maximorum* observável em figura tridimensional

A existência de uma carga máxima que pode ser alimentada pela rede elétrica é uma questão importante, o que motiva a análise do sistema fora do plano  $P_1\theta_1$ . Portanto, verificam-se as características do sistema elétrico no plano  $\theta_1 v_1$ .

Em (3.5) e (3.6) a potência na barra de carga é função de duas variáveis: o módulo e o ângulo de sua tensão. Então, fixando-se  $P_1$  em (3.5), pode-se variar  $\theta_{10}$  e calcular o valor de  $v_1$ . Assim, é possível traçar a curva  $P_1$  constante no plano  $\theta_1 v_1$ . Isso equivale a traçar curvas de nível perpendiculares ao plano  $\theta_1 v_1$  da Figura 4. Analogamente, fixando-se  $Q_1$  em (3.6), pode-se variar  $\theta_{10}$  e calcular o valor de  $v_1$ . Assim, seria possível traçar a curva  $Q_1$  constante no plano  $\theta_1 v_1$ .

Nesse contexto, na Figura 5 mostram-se curvas de nível para alguns valores de  $P_1$  constante e  $Q_1$  constante.

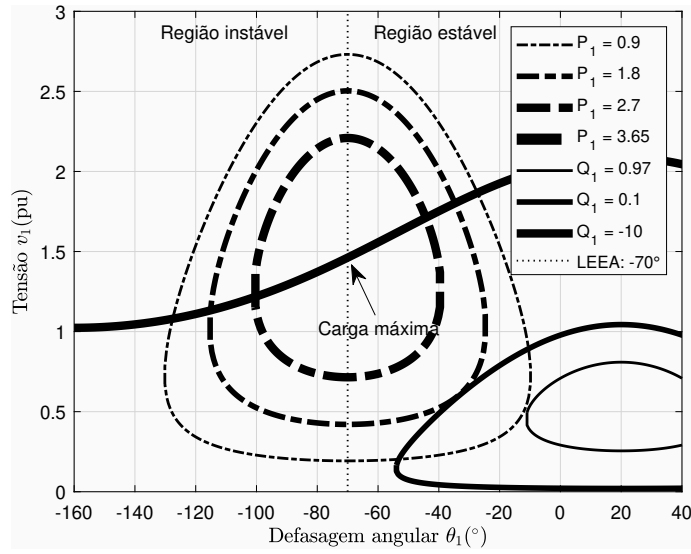


Figura 5:  $P_1$  e  $Q_1$  constantes no plano  $\theta_1 v_1$

Assim, observa-se novamente a existência de uma máxima carga que pode ser atendida – “*maximum maximorum*” – mesmo com compensação ilimitada de potência reativa. Ou seja, as curvas das Figuras 3, 4 e 5 indicam uma máxima potência que pode ser transmitida para uma carga mesmo que o fator de potência da barra 1 pudesse ser totalmente capacitivo.

### 3.2

#### O Limite de Estabilidade de Tensão (LET)

O sistema elétrico da Figura 2 com fator de potência fixo será analisado, sem que haja perda de generalidade. Na Figura 6 são exibidas três possibilidades de solução para tensão na carga para o sistema elétrico da Figura 2.

Para esse sistema elétrico (Figura 2), o fator de potência é  $\phi = 41,19^\circ$ , calculado usando:

$$\tan\phi = \frac{Q_{10}}{P_{10}} = \frac{\frac{v_1^2 \sin(\alpha_t) - v_1 v_0 \sin(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t}}{\frac{v_1^2 \cos(\alpha_t) - v_1 v_0 \cos(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t}} \quad (3.7)$$

Já  $v_1$  pode ser calculado usando-se (3.5), (3.6) e (3.7), gerando:

$$v_1 = \frac{v_0 [\sin(\theta_{10} + \alpha_t) - \tan(\phi) + \cos(\theta_{10} + \alpha_t)]}{\sin(\alpha_t) - \tan(\phi) + \cos(\alpha_t)} \quad (3.8)$$

Na Figura 6, caso seja considerado o par de curvas  $P_a$  e  $Q_a$  (correspondente à potência aparente  $S_a = P_a + jQ_a$  com fator de potência  $\phi = 41,19^\circ$ ),



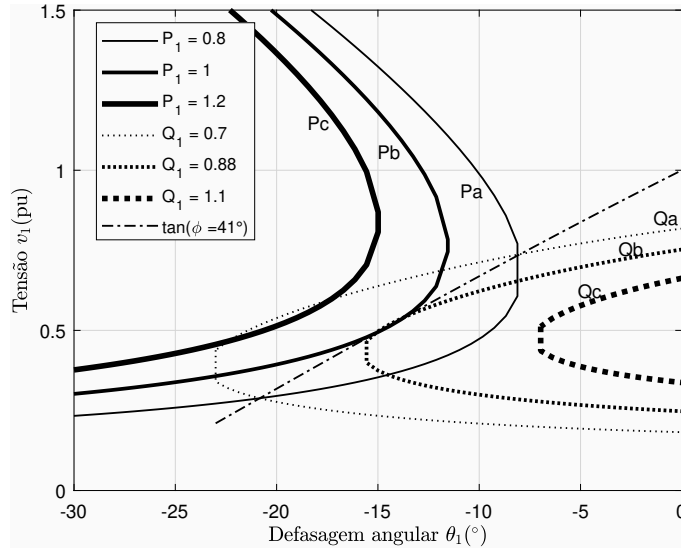


Figura 6: Soluções no plano  $v\theta$  para um fator de potência constante

observa-se que ambas se cortam em dois pontos, ou seja, em duas soluções de tensão. Portanto, para uma única carga existem duas soluções  $(\theta_1, v_1)$ .

Caso haja aumento de carga mantendo o fator de potência  $\phi$ , as curvas de potência ativa e reativa se afastam. Como exemplo, basta observar o par de curvas  $P_b$  e  $Q_b$  (correspondente à potência aparente  $S_b = P_b + jQ_b$  com fator de potência  $\phi = 41, 19^\circ$ ). Nota-se que ambas se tocam em um único ponto. Esse ponto corresponde à carga máxima que pode ser alimentada com esse fator de potência, já que, para cargas maiores, as duas curvas ( $P_c$  e  $Q_c$ , por exemplo) não se cortam (o que significa que não há solução de tensão).

Repetindo-se os mesmos gráficos para diferentes fatores de potência conclui-se que, para cada fator de potência, existe uma carga ativa e reativa máxima que pode ser alimentada. Esse máximo é determinado pela relação entre a impedância da carga e a impedância da linha de transmissão, conforme será visto nessa seção.

A corrente que flui no circuito mostrado na Figura 7, correspondente ao diagrama unifilar da Figura 2 é:

$$I_{01} = \frac{v_0}{Z_t \angle \alpha_t + Z_c \angle \phi} \quad (3.9)$$

$$I_{01} = \frac{v_0}{\sqrt{(Z_t \cos(\alpha_t) + Z_c \cos(\phi))^2 + (Z_t \sin(\alpha_t) + Z_c \sin(\phi))^2}} \quad (3.10)$$

A potência ativa que flui a partir da barra de carga, que é igual ao negativo da potência consumida na carga, é:

$$P_{10} = -P_1 = -I_{01}^2 Z_c \cos(\phi) \quad (3.11)$$

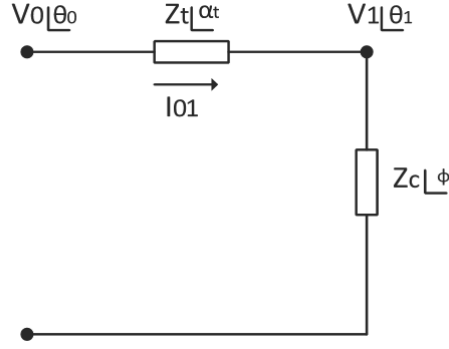


Figura 7: Circuito com as Impedâncias da Transmissão e da Carga

A potência elétrica injetada na barra 1 pode ser calculada substituindo-se (3.10) em (3.11):

$$P_{10} = -\frac{v_0^2 Z_c \cos(\phi)}{Z_t^2 + 2Z_t Z_c (\cos(\alpha_t) \cos(\phi) + \sin(\alpha_t) \sin(\phi)) + Z_c^2} \quad (3.12)$$

Reescrevendo (3.12) obtém-se (3.13):

$$P_{10} = \frac{v_0^2 Z_c \cos(\phi)}{Z_t^2 + Z_c^2 + 2Z_t Z_c \cos(\alpha - \phi)} \quad (3.13)$$

De (3.13), fazendo-se  $\partial P_1 / \partial Z_c = 0$ , encontra-se o valor de  $Z_c$  que maximiza a potência ativa na carga:  $Z_c = Z_t$ . Adicionalmente  $\partial^2 P_1 / \partial Z_c^2 < 0$  certifica que  $Z_c = Z_t$  é um ponto de máximo.

Para o ponto de máximo carregamento (onde  $P_1 = P_1^{m\acute{a}x}$ ), o módulo da impedância da carga é igual ao módulo da impedância da linha de transmissão:  $Z_c = Z_t$ . Por outro lado, como  $P_1 = -P_{10}$ , então de (3.13), tem-se:

$$P_1^{m\acute{a}x} = \frac{-v_0^2 Z_c \cos(\phi)}{2Z_c^2 [1 + \cos(\alpha_t - \phi)]} = -\frac{v_0^2 \cos(\phi)}{4Z_c \cos^2(\frac{\alpha_t - \phi}{2})} = \frac{v_0^2 \cos(\phi)}{4Z_c \cos^2(\frac{\alpha_t - \phi}{2})} \quad (3.14)$$

Para  $P_1^{m\acute{a}x}$  e uma dada impedância de carga  $Z_c$  com fator de potência  $\phi$ :

$$v_1 = Z_c I_{01} \therefore v_1 = \frac{v_0 Z_c}{\sqrt{2Z_t^2 (1 + \cos(\alpha_t - \phi))}} \therefore v_1^c = \frac{v_0}{2\cos(\frac{\alpha_t - \phi}{2})} \quad (3.15)$$

onde  $v_1^c$  é a tensão crítica na barra 1, ou seja, a tensão na barra 1 no ponto de carregamento máximo.

Como,  $v_1 = \dot{Z}_c \dot{I}_{01}$ , tem-se:

$$v_1 \angle \theta_1 = Z_c \angle \phi \frac{\dot{v}_0}{Z_t \angle \alpha_t + Z_c \angle \phi} \quad (3.16)$$

Considerando só a parte real:

$$v_1^c = \frac{v_0}{2\cos\theta_1} \quad (3.17)$$

Igualando-se (3.15) e (3.17):

$$v_1^c = \frac{v_0}{2\cos\theta_1} = \frac{v_0}{2\cos(\frac{\alpha_t - \phi}{2})} \therefore \theta_1^c = \frac{\alpha_t - \phi}{2} \quad (3.18)$$

O conjunto dos pontos que satisfazem a relação  $Z_c = Z_t$  formam o Limite de Estabilidade de Tensão – LET, que é o lugar geométrico das tensões em módulo e ângulo ( $v_1$  e  $\theta_1$ ), onde o módulo da impedância equivalente da carga é igual ao módulo da impedância da linha de transmissão série. O LET representa os pontos da máxima transmissão de potência à carga, uma para cada fator de potência (o que depende de eventual compensação reativa da carga). Em outras palavras, o LET passa pelas “pontas” de todas as curvas para  $\phi$  constante no plano Sv, isto é, une todos os pontos de máximo carregamento. Ou ainda, variando-se  $\phi$  e utilizando-se (3.18) traça-se o LET sobre as curvas de  $\phi$  constante no plano Sv, conforme ilustrado na Figura 8.

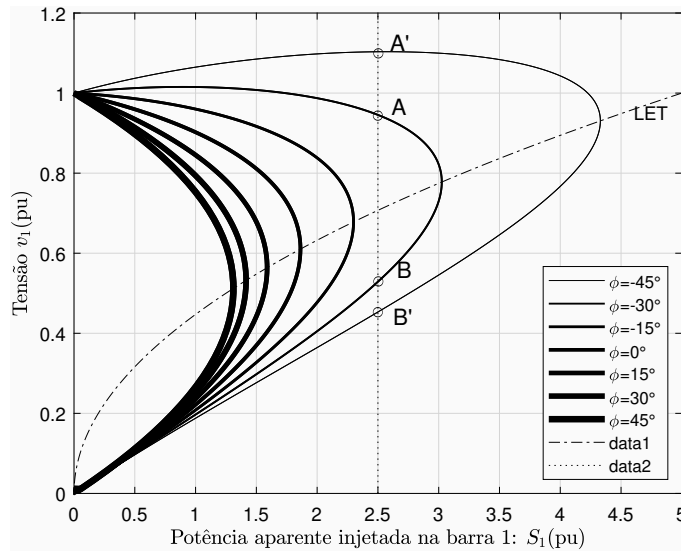


Figura 8: Curva  $\phi$  constante e o limite de estabilidade de tensão no plano Sv.

Na Figura 8 é mostrado um exemplo onde estão representadas diferentes curvas, uma para cada fator de potência. Observa-se que, para cada valor de  $\phi$  há uma potência máxima que pode ser transferida à carga. Além disso, nota-se que para pontos de operação acima do LET, para uma mesma potência  $S_1$  que pode ser transferida para a barra 1, a tensão  $v_1$  é maior quanto mais for capacitivo o fator de potência. Por exemplo, considerando  $S_1 = 2,5$  pu e fator de potência  $\phi = -30^\circ$ , o ponto de operação acima do LET é o ponto A. Se o sistema for tornado mais capacitivo, com  $\phi = -45^\circ$ , o ponto de operação passa a ser A'. Logo, nota-se  $v_{A'} > v_A$ . Por outro lado, para pontos de operação abaixo do LET, para uma mesma potência  $S_1$  que pode ser transferida para a barra 1, a tensão  $v_1$  é menor quanto mais for capacitivo o fator de potência. Por

exemplo, considerando  $S_1 = 2,5$  pu e fator de potência  $\phi = -30^\circ$ , o ponto de operação abaixo do LET é o ponto B. Se o sistema for tornado mais capacitivo, com  $\phi = -45^\circ$ , o ponto de operação passa a ser B'. Logo, nota-se  $v_{B'} < v_B$ . Segundo [4], normalmente só os pontos de operação acima dos pontos críticos apresentam condições de operação satisfatórias.

O LET separa as duas regiões de operação: a região superior da curva para  $\phi$  constante, chamada de região normal de operação, onde se tem controle sobre a tensão, e a região inferior da curva para  $\phi$  constante, chamada de região anormal de operação, onde as ações de controle de tensão baseadas em inserção de capacitores podem ter efeito oposto ao esperado.

### 3.3

#### Avaliação da estabilidade de tensão

A operação na parte inferior da curva Sv dificulta os procedimentos corretos para controle de tensão e, portanto, é necessário obter métodos capazes de avaliar se o ponto de operação de cada barra se encontra na parte inferior ou superior desta curva. Além disso, também é necessário mensurar a distância entre o ponto de operação corrente e o ponto de máximo carregamento.

O método da matriz  $[D']$  explora essa relação entre as curvas  $\phi$  constante no plano  $S_1 v_1$  e  $\phi$  constante no plano  $\theta_1 v_1$  para diferentes níveis de potência aparente  $S_1$ . Assim, esse método é uma ferramenta analítica de avaliação das condições nodais com base em modelo matemático simples, mas poderoso, de uma interpretação física direta do fenômeno.

A seguir será descrita a importância do módulo do determinante da matriz  $[D']$  para estudo da capacidade de aumento de carga do sistema elétrico. Além disso, será abordada a utilização do sinal do determinante da matriz  $[D']$  para determinar região de operação. Índices abrangentes e significativos são deduzidos [5].

#### 3.3.1

##### Método da matriz $[D']$

Considerando uma barra  $i$  do tipo PQ, o sistema linearizado 2.13) pode ser reescrito fazendo-se o deslocamento para baixo das equações referentes à barra  $i$  em análise e para a direita das colunas referentes às suas variáveis:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \vdots \\ \Delta P_m \\ \vdots \\ \Delta Q_k \\ \vdots \\ \Delta Q_m \\ \vdots \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial v_k} & \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial a_{km}} & \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_k}{\partial v_i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial v_k} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial a_{km}} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_m}{\partial v_i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial v_k} & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial a_{km}} & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_k}{\partial v_i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial v_k} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial a_{km}} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_m}{\partial v_i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_m} & \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial v_k} & \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial a_{km}} & \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial v_i} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_m} & \cdots & \frac{\partial Q_i}{\partial v_k} & \cdots & \frac{\partial Q_i}{\partial a_{km}} & \cdots & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial v_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \vdots \\ \Delta \theta_m \\ \vdots \\ \Delta v_k \\ \vdots \\ \Delta a_{km} \\ \vdots \\ \Delta \theta_i \\ \Delta v_i \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Se as partições da matriz Jacobiano forem identificadas pelas submatrizes A, B, C e D, então (3.19) pode ser reformulada conforme:

$$\begin{bmatrix} \Delta P' \\ \Delta Q' \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta' \\ \Delta v' \\ \Delta a' \\ \Delta \theta_i \\ \Delta v_i \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

onde:

- $\Delta P'$  é o vetor de potência ativa relativa a todas as barras do sistema, exceto a barra de tipo  $V\theta$  e para a barra  $i$ ; e
- $\Delta Q'$  é o vetor de potência reativa relativa a todas as barras do sistema, exceto barras do tipo PV,  $V\theta$  e para a barra  $i$ .

Como o objetivo é entender como variações infinitesimais na carga (ou na geração)  $\Delta P_i$  e  $\Delta Q_i$  influenciam  $\Delta v_i$  e  $\Delta \theta_i$  somente para a barra  $i$  de um sistema multinó, então desprezam-se as injeções de potência nas outras barras. Na prática, isso se traduz em  $\Delta P' = 0$  e  $\Delta Q' = 0$ . Todas as barras com potência ativa livre e potência reativa livre são responsáveis por absorver as variações de  $\Delta P_i$ ,  $\Delta Q_i$  e de perdas ativas e reativas. Assim:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = [D - CA^{-1}B] \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta v_i \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

ou simplesmente:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = [D'] \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta v_i \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Nota-se que (3.22) relaciona as grandezas  $\Delta P_i$ ,  $\Delta Q_i$ ,  $\Delta v_i$  e  $\Delta \theta_i$  para uma barra  $i$ , que pode ser de qualquer dos tipos mencionados, conforme desejado.

### 3.3.2

#### Módulo do Determinante da Matriz [D']

Em um sistema de duas barras, o fluxo de potência que chega à barra  $i$  é igual à carga consumida. Considerando  $k$  como a barra de geração, o determinante da matriz [D'] é calculado por:

$$\det[D'] = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \frac{\partial Q_i}{\partial v_i} - \frac{\partial P_i}{\partial v_i} \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \quad (3.23)$$

onde, de acordo com (2.5) e (2.6):

$$P_i = v_i^2 G_{ii} + v_i v_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (3.24)$$

$$Q_i = -v_i^2 B_{ii} + v_i v_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (3.25)$$

Derivando (3.24) e (3.25) e substituindo em (3.23), tem-se:

$$\begin{aligned} \det[D'] = & -v_i v_k^2 (G_{ik}^2 + B_{ik}^2) + 2v_i^2 B_{ii} (v_k G_{ik} \sin \theta_{ik} - v_k B_{ik} \cos \theta_{ik}) \\ & - 2v_i^2 G_{ii} (v_k G_{ik} \cos \theta_{ik} + v_k B_{ik} \sin \theta_{ik}) \end{aligned} \quad (3.26)$$

Como  $Y_{ik}^2 = G_{ik}^2 + B_{ik}^2$ , então, multiplicar ambos os lados de (3.26) por  $v_i$  resulta em:

$$\begin{aligned} \det[D'] \cdot v_i = & -(v_i v_k Y_{ik})^2 + 2v_i^2 B_{ii} [v_i v_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik})] \\ & - 2v_i^2 G_{ii} [v_i v_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik})] \end{aligned} \quad (3.27)$$

Por outro lado, a potência aparente injetada na barra  $i$  é dada por  $S_i = P_i + jQ_i$ . Então, de (3.24) e (3.25):

$$\begin{aligned} S_i^2 = P_i^2 + Q_i^2 = & v_i^4 (G_{ii}^2 + B_{ii}^2) + v_i^2 v_k^2 Y_{ik}^2 + 2v_i^2 G_{ii} v_i v_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \\ & - 2v_i^2 B_{ii} v_i v_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \end{aligned} \quad (3.28)$$

Se  $S_{i0}^2 \equiv v_i^4 (G_{ii}^2 + B_{ii}^2)$ , comparando-se (3.27) e (3.28) conclui-se que:

$$\det[D'] \cdot v_i = S_{i0}^2 - S_i^2 \quad (3.29)$$

O termo  $S_{i0}^2$  é função do elemento diagonal da matriz admitância de barras e do módulo da tensão na barra  $i$ . Aumentando gradativamente o valor da potência injetada  $S_i$ , a potência máxima injetada será alcançada quando  $S_i^2$  for igual a  $S_{i0}^2$  o que corresponde a  $\det[D'] \cdot v_i = 0$ .

Em resumo, usando as informações do módulo do determinante da matriz [D'] para um sistema de duas barras:

- $S_i^2$  é a potência injetada na barra  $i$  (no ponto de operação em análise) ao quadrado;
- $S_{i0}^2$  é a potência aparente máxima que pode fluir para a barra  $i$ , para um certo módulo de tensão ao quadrado; e
- $\det[D'] \cdot v_i$  é o indicador da distância de  $S_i^2$  a  $S_{i0}^2$ .

Com essa percepção, o resultado obtido em (3.29) é importante para o estudo do carregamento da rede. Por esse motivo, o mesmo raciocínio será expandido para um sistema elétrico multinó.

De (3.20) pode-se assumir que:

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial v_i} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial v_i} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} x & z \\ y & u \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

e

$$-CA^{-1}B \equiv \begin{bmatrix} b_1 & b_2 \\ b_3 & b_4 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

De acordo com (3.21) e (3.22),

$$\det[D'] = \det[D - CA^{-1}B] = \det \left[ \begin{bmatrix} x & z \\ y & u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & b_2 \\ b_3 & b_4 \end{bmatrix} \right] \quad (3.32)$$

então:

$$\det[D'] = [xu - yz] + [xb_4 - yb_3] + [b_1u - b_2z] + [b_1b_4 - b_2b_3]. \quad (3.33)$$

O resultado obtido em (3.29) para um sistema de duas barras pode ser estendido ao sistema multinó. Multiplicando todos os termos de (3.33) por  $v_i$ :

$$\det[D']v_i = \det[D]v_i - \Delta \det \cdot v_i$$

com  $\Delta \det \cdot v_i \equiv [(xb_4 - yb_3) + (b_1u - b_2) + (b_1b_4 - b_2b_3)]v_i$ .

Portanto, analogamente a (3.29):

$$\det[D']v_i = S_{i0}^2 - S_i^2 - \Delta \det \cdot v_i \quad (3.34)$$

e

$$\Delta \det \cdot v_i = (\det[D] - \det[D'])v_i. \quad (3.35)$$

Em resumo, usando as informações do módulo do determinante da matriz  $[D']$  para um sistema multinó:

- $S_i^2$  é a potência injetada na barra  $i$  (no ponto de operação em análise) ao quadrado;
- $S_{i0}^2$  seria a potência aparente máxima que pode fluir para a barra  $i$  ao quadrado, para um certo módulo de tensão constante caso o sistema fosse de duas barras;

- $\Delta det \cdot v_i$  indica a potência injetada no restante do sistema que limita a injeção de potência na barra  $i$  ao quadrado; e
- $det[D'] \cdot v_i$  é o indicador entre o que está sendo injetado, ao quadrado  $S_i^2$  e o máximo estimado ao quadrado  $S_{i0}^2$  levando em conta todo o sistema  $\Delta det \cdot v_i$ .

### 3.3.3

#### Sinal do Determinante da Matriz $[D']$

Os vetores gradiente de potência ativa e reativa podem ser escritos como:

$$\begin{aligned}\dot{\nabla} P &= \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \vec{i} + \frac{\partial P_i}{\partial v_i} \vec{j} + 0 \vec{k} \\ \dot{\nabla} Q &= \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \vec{i} + \frac{\partial Q_i}{\partial v_i} \vec{j} + 0 \vec{k}\end{aligned}\tag{3.36}$$

onde  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$  e  $\vec{k}$  são vetores unitários de uma base ortonormal.

Aplicando-se a operação de produto vetorial, tem-se:

$$\dot{\nabla} P \times \dot{\nabla} Q = \left[ \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \frac{\partial Q_i}{\partial v_i} - \frac{\partial P_i}{\partial v_i} \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \right] \vec{k}.\tag{3.37}$$

A combinação de (3.23) e (3.37) resulta em:

$$\dot{\nabla} P \times \dot{\nabla} Q = det[D'] \vec{k} = |\dot{\nabla} P| |\dot{\nabla} Q| \sin \beta \vec{k}\tag{3.38}$$

onde  $\beta$  é o ângulo entre  $\dot{\nabla} P$  e  $\dot{\nabla} Q$ . Portanto:

$$det[D'] \vec{k} = |\dot{\nabla} P| |\dot{\nabla} Q| \sin \beta\tag{3.39}$$

onde:

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

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

$$det[D'] = 0 \text{ se } \sin \beta = 0, \implies \beta = \pm 180^\circ \text{ ou } \beta = 0^\circ$$

Os dados exibidos anteriormente na Figura 6 são reapresentados na Figura 9, que destaca o comportamento dos vetores gradiente  $\dot{\nabla} P$  e  $\dot{\nabla} Q$  e do ângulo  $\beta$  formado entre eles quando  $\dot{\nabla} P$  é tomado como referência. Observa-se que na região normal de operação sempre ocorre  $0^\circ < \beta < 180^\circ$ . Já na região anormal de operação,  $0^\circ > \beta > -180^\circ$ . Por outro lado, no ponto de máximo carregamento  $\beta = 180^\circ$ .

Em resumo, usando as informações do sinal do determinante da matriz  $[D']$  para um sistema multinó:



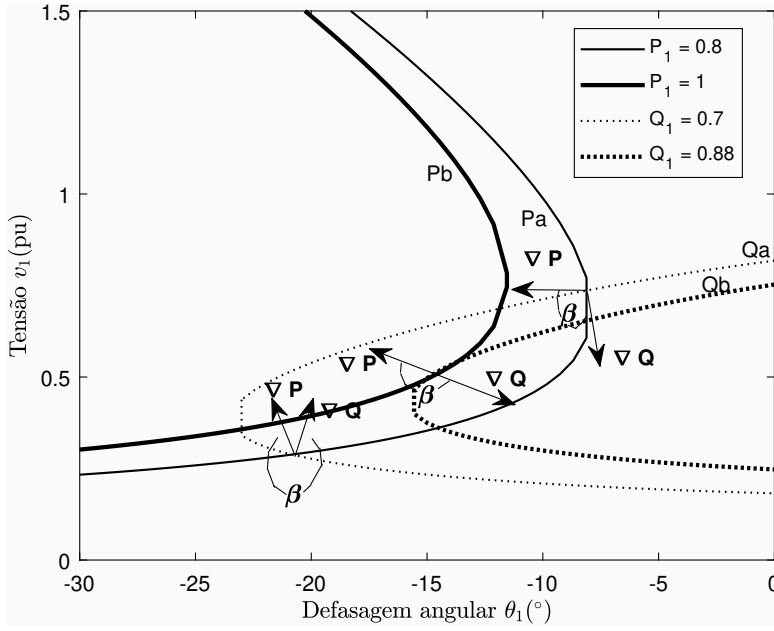


Figura 9: Localização dos vetores  $\dot{\nabla}P$  e  $\dot{\nabla}Q$  no Plano  $V\theta$

- $\beta$  indica a defasagem entre os vetores  $\dot{\nabla}P$  e  $\dot{\nabla}Q$ , assim como a localização do ponto de operação na curva para  $\phi$  constante no plano  $S_1v_1$ ;
- $\det[D'] > 0$  caracteriza a parte superior da curva para  $\phi$  constante no plano  $S_1v_1$ ;
- $\det[D'] < 0$  caracteriza a parte inferior da curva para  $\phi$  constante no plano  $S_1v_1$ ; e
- $\det[D'] = 0$  caracteriza a fronteira entre estas duas regiões, ou seja, o ponto de máximo carregamento da curva para  $\phi$  constante no plano  $S_1v_1$ .

### 3.3.4

#### Matriz $[D']$ em barras com controle de tensão

Por outro lado, um questionamento natural diz respeito à aplicação do método da matriz  $[D']$  às barras de tensão controlada por gerador, uma vez que os resíduos de potência reativa dessas barras não estão presentes no sistema de equações da abordagem clássica do fluxo de potência. Ou seja, em (2.13) não há equação de controle para as grandezas determinadas a priori. Desse modo, simplesmente assume-se que o ângulo da barra de referência e tensões atingirão o valor especificado para elas. Porém, alguns mecanismos de controle agem justamente sobre tensões de barras de tensão controlada para garantir o desejado. Por isso, seria importante a determinação de uma equação matemática que compreendesse essas grandezas a fim de analisar a atuação dos mecanismos de controle de tensão. Esse é o assunto tratado nessa seção.

O primeiro mecanismo de controle é o gerador que controla a tensão local. Assim, se uma barra  $i$  é do tipo PV, considera-se que o gerador dessa barra fornece potência reativa suficiente para manter  $v_i$  no valor especificado. Então, em princípio, não faria sentido estudar variações infinitesimais em  $\Delta P_i$  e  $\Delta Q_i$  e seus efeitos sobre  $\Delta v_i$ . Contudo, o que ocorre é que  $v_i$  não é fixo, mas oscila em torno de um valor fixo especificado (banda morta). Para capturar o efeito de variações infinitesimais em  $\Delta P_i$  e  $\Delta Q_i$  na análise de estabilidade de tensão, é necessário que  $\Delta v_i$  seja modelado como uma grandeza variável. Para isso, deve-se:

- incluir a equação de  $\Delta Q_i$ ; e
- incluir a coluna referente à variável  $\Delta v_i$ .

Outra barra com controle de tensão por gerador local é a barra de referência angular do sistema. Portanto, se uma barra  $i$  é do tipo V $\theta$ ,  $v_i$  é considerado fixo. Entretanto, isso não faz sentido, conforme já foi mencionado. Desse modo, na análise de estabilidade de tensão,  $\Delta v_i$  é modelado como grandeza variável. Além disso, outra barra geradora  $j$  deve ser escolhida como barra de referência angular. Para isso, deve-se:

- excluir a equação de  $\Delta P_j$ ;
- excluir a coluna referente à variável  $\Delta \theta_j$ ;
- incluir a equação de  $\Delta P_i$ ;
- incluir a coluna referente à variável  $\Delta \theta_i$ ;
- incluir a equação de  $\Delta Q_i$ ; e
- incluir a coluna referente à variável  $\Delta v_i$ .

O segundo mecanismo de controle é o transformador que controla a tensão local. Ou seja, se uma barra  $m$  é do tipo PQV, considera-se que o *tap*  $a_{km}$  desse transformador varia o suficiente para manter  $v_m$  no valor especificado. Então, não faria sentido estudar variações infinitesimais em  $\Delta P_m$  e  $\Delta Q_m$  e seus efeitos sobre  $\theta_m$  e  $v_m$ . Contudo, assim como ocorre com o controle de tensão por gerador local, o que ocorre é que  $v_m$  não é fixo, mas oscila em torno de um valor fixo especificado. De forma análoga, para capturar o efeito de variações infinitesimais em  $\Delta P_m$  e  $\Delta Q_m$  na análise de estabilidade de tensão, é necessário que  $\Delta v_m$  seja modelado como uma grandeza variável. Para isso, deve-se:

- incluir a coluna referente à variável  $\Delta v_m$ ; e
- excluir a coluna referente à variável  $\Delta a_{km}$ .

### 3.3.5

#### Matriz $[D']$ com múltiplas barras *swing*

O método da matriz  $[D']$  pressupõe que variações de injeções de potência ativa e reativa na barra  $i$  são absorvidas pelas barras com potência reativa livre para variar e por uma barra *swing*. A fim de tornar o método mais fidedigno ao que ocorre na prática, a ideia é que algumas barras com potência ativa livre e potência reativa livre sejam responsáveis por absorver variações de  $\Delta P_i$  e  $\Delta Q_i$  e perdas ativas e reativas, o que equivale a existência de múltiplas barras *swing*, ou barras do tipo V, na rede elétrica.

Deseja-se que a condição de proporcionalidade de gerações de potência ativa das barras *swing* considerando a rede elétrica com perdas ativas sejam iguais às proporções de gerações de potência ativa das barras *swing* considerando a rede elétrica sem perdas ativas. Assim como na Seção 2.4, isso continua sendo realizado através da inclusão de equações de controle ( $\Delta g$ ) no problema geral de fluxo de potência.

Por exemplo, suponha-se que uma rede tenha as barras 1 a  $n$  como barras *swing*, sendo 1 a barra de referência angular. Sob essa condição e partindo-se da modelagem desenvolvida na Seção 2.4, deseja-se estudar variações infinitesimais de carga (ou geração) em  $\Delta P_i$  e  $\Delta Q_i$  e seus efeitos sobre  $\Delta \theta_i$  e  $\Delta v_i$  somente para a barra  $i$  de um sistema multinó.

#### • Barra PQ

Considerando uma barra  $i$  do tipo PQ, o sistema linearizado formado por (2.18) pode ser reescrito fazendo-se o deslocamento para baixo das equações referentes à barra  $i$  em análise e para a direita das colunas referentes às suas variáveis referentes à barra  $i$ . Portanto a matriz Jacobiano modificada é:

$$\begin{bmatrix}
 \frac{\partial P_1^*}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_1^*}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_1^*}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial P_1^*}{\partial v_k} & \cdots & \frac{\partial P_1^*}{\partial P_{Gn}} & \frac{\partial P_1^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_1^*}{\partial v_i} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \frac{\partial P_n^*}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_n^*}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n^*}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial P_n^*}{\partial v_k} & \cdots & \frac{\partial P_n^*}{\partial P_{Gn}} & \frac{\partial P_n^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_n^*}{\partial v_i} \\
 \frac{\partial P_k^*}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_k^*}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_k^*}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial P_k^*}{\partial v_k} & \cdots & \frac{\partial P_k^*}{\partial P_{Gn}} & \frac{\partial P_k^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_k^*}{\partial v_i} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial v_k} & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial P_{Gn}} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_k}{\partial v_i} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial v_k} & \cdots & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial P_{Gn}} & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial v_i} \\
 \frac{\partial P_i}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial v_k} & \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial P_{Gn}} & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial v_i} \\
 \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial Q_i}{\partial v_k} & \cdots & \frac{\partial Q_i}{\partial P_{Gn}} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial v_i}
 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

### • Barras PV e PQV

Para barras dos tipos PV, as modificações do sistema linearizado de equações são análogas às descritas na Seção 3.3.4. O mesmo ocorre para barras do tipo PQV.

### • Barras V

A principal diferença de um sistema com múltiplas barras *swing* é que essas barras alocam proporcionalmente as perdas ativas. Portanto, se uma barra  $i$  é do tipo V, o resíduo  $\Delta P_i^*$  é  $\Delta P_i$  acrescido da parcela que considera variações de  $P_{Gi}$ . Entretanto, quando se estudam variações infinitesimais em  $\Delta P_i$  e  $\Delta Q_i$  e seus efeitos sobre  $\theta_i$  e  $v_i$ , deve-se evitar que perdas ativas alocadas para a barra  $i$  interfiram na análise. Assim, não faz sentido permitir que a barra  $i$  continue sendo barra *swing*.

Desse modo,  $\Delta P_i^*$  é substituído por  $\Delta P_i$ , é excluída a equação de distribuição de perdas ativas entre as barras  $(i-1)$  e  $i$  e a tensão  $v_i$  é modelada como grandeza variável.

Dessa maneira, a matriz Jacobiano modificada para estudo de estabilidade de tensão na barra  $n$  fica conforme em (3.41). Para obtê-la:

- substitui-se a equação de  $\Delta P_i^*$  pela equação de  $\Delta P_i$ ;
- exclui-se a equação de  $\Delta g_{(i-1)}$ ; e
- exclui-se a coluna referente à variável  $\Delta P_{Gi}$ .

$$\begin{bmatrix}
 \frac{\partial P_1^*}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_1^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_1^*}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial P_1^*}{\partial v_k} & \frac{\partial P_1^*}{\partial P_{G1}} & \frac{\partial P_1^*}{\partial P_{Gi}} & \cdots & \frac{\partial P_1^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_1^*}{\partial v_i} \\
 \vdots & & & & & & & & & & \\
 \frac{\partial P_k^*}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_k^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_k^*}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial P_k^*}{\partial v_k} & \frac{\partial P_k^*}{\partial P_{G1}} & \frac{\partial P_k^*}{\partial P_{Gi}} & \cdots & \frac{\partial P_k^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_k^*}{\partial v_i} \\
 \vdots & & & & & & & & & & \\
 \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial v_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial P_{G1}} & \frac{\partial Q_k}{\partial P_{Gi}} & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_k}{\partial v_i} \\
 \vdots & & & & & & & & & & \\
 \frac{\partial g_1}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial \theta_i} & \frac{\partial g_1}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial v_k} & \frac{\partial g_1}{\partial P_{G1}} & \frac{\partial g_1}{\partial P_{Gi}} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial \theta_i} & \frac{\partial g_1}{\partial v_i} \\
 \frac{\partial a_{(i-1)}}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial a_{(i-1)}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial a_{(i-1)}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial a_{(i-1)}}{\partial v_k} & \cdots & \frac{\partial a_{(i-1)}}{\partial P_{G1}} & \frac{\partial a_{(i-1)}}{\partial P_{Gi}} & \cdots & \frac{\partial a_{(i-1)}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial a_{(i-1)}}{\partial v_i} \\
 \vdots & & & & & & & & & & \\
 \frac{\partial P_i}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial v_k} & \frac{\partial P_i}{\partial P_{G1}} & \frac{\partial P_i}{\partial P_{Gi}} & \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial v_i} \\
 \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial Q_i}{\partial v_k} & \frac{\partial Q_i}{\partial P_{G1}} & \frac{\partial Q_i}{\partial P_{Gi}} & \cdots & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial v_i}
 \end{bmatrix}
 \quad (3.41)$$

### • Barras $V\theta$

Por fim, se uma barra  $i$  é uma barra de referência angular (tipo  $V\theta$ ), então  $\theta_i$  é especificado a priori. Entretanto, não faz sentido estudar variações infinitesimais em  $\Delta P_i$  e  $\Delta Q_i$  e seus efeitos sobre  $\theta_i$  e  $v_i$ , se  $\theta_i$  é fixo. Então, outra barra geradora  $j$  deve ser escolhida como barra de referência angular. Além disso, conforme já mencionando anteriormente, deve-se evitar que perdas ativas alocadas para a barra  $i$  interfiram na análise, o que faz com que  $\Delta P_i^*$  seja substituído por  $\Delta P_i$  e que não haja equação de distribuição de perdas ativas envolvendo a barra  $i$ . Ainda vale lembrar que barras dos tipos  $V\theta$  têm tensão  $v_i$  modelada como grandeza fixa, então é necessário torná-la variável.

Assim:

- exclui-se a coluna referente à variável  $\Delta \theta_j$ ;
- inclui-se a coluna referente à variável  $\Delta \theta_i$ ;
- exclui-se a equação de  $\Delta P_i^*$ ;
- inclui-se a equação de  $\Delta P_i$ ;
- exclui-se a equação de  $\Delta g_i$ ;
- exclui-se a coluna referente à variável  $\Delta P_{Gi}$ .
- inclui-se a equação de  $\Delta Q_i$ ; e
- inclui-se a coluna referente à variável  $\Delta v_i$ ;

Se  $i=1$  e  $j=2$ , a matriz Jacobina modificada fica conforme (3.42):

$$\begin{bmatrix}
 \frac{\partial P_1}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial v_k} & \frac{\partial P_1}{\partial P_{G1}} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial P_{Gn}} & \vdots & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial v_1} \\
 \frac{\partial P_n}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial v_k} & \frac{\partial P_n}{\partial P_{G1}} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial P_{Gn}} & \vdots & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_n}{\partial v_1} \\
 \frac{\partial P_k}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial v_k} & \frac{\partial P_k}{\partial P_{G1}} & \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial P_{Gn}} & \vdots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_k}{\partial v_1} \\
 \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial v_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial P_{G1}} & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial P_{Gn}} & \vdots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_k}{\partial v_1} \\
 \frac{\partial g_1}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial g_1}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial v_k} & \frac{\partial g_1}{\partial P_{G1}} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial P_{Gn}} & \vdots & \frac{\partial g_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial g_1}{\partial v_1} \\
 \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial v_k} & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial P_{G1}} & \cdots & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial P_{Gn}} & \vdots & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial v_1} \\
 \frac{\partial P_n}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial v_k} & \frac{\partial P_n}{\partial P_{G1}} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial P_{G2}} & \vdots & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_n}{\partial v_1} \\
 \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial Q_n}{\partial v_k} & \frac{\partial Q_n}{\partial P_{G1}} & \cdots & \frac{\partial Q_n}{\partial P_{G2}} & \vdots & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_n}{\partial v_1}
 \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

De forma geral, se as partições da matriz Jacobiano forem identificadas pelas submatrizes A, B, C e D, então (3.19) e (3.20) podem ser reformuladas conforme:

$$\begin{bmatrix} \Delta P' \\ \Delta Q' \\ \Delta g \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta' \\ \Delta v' \\ \Delta a' \\ \Delta P_{G_0} \\ \Delta \theta_i \\ \Delta v_i \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

onde:

- $\Delta P'$  é o vetor de potência ativa relativa a todas as barras do sistema, exceto a barra  $i$ ;
- $\Delta Q'$  é o vetor de potência reativa relativa a todas as barras do sistema, exceto barras do tipo PV, V,  $V\theta$  e para a barra  $i$ ; e
- $\Delta g$  é o vetor de resíduos das equações de partição das perdas ativas entre as barras *swing*.

### 3.4

#### Índices de estabilidade de tensão

De acordo com os conceitos apresentados na Seção 3.3.2, a estimativa da máxima potência i aparente que poderia ser injetada na barra  $i$ , considerando todo o sistema é definida como:

$$S_{m_i} \equiv \text{sin}(\angle(S_{i0}^2 - \Delta \det \cdot v_i)) \sqrt{|S_{i0}^2 - \Delta \det \cdot v_i|} \quad (3.44)$$

A margem de potência é um indicador da distância que pode ser definido como o valor  $S_{m_i} - S_i$ , ou seja, a diferença de potência em MVA entre a potência que está sendo injetada na barra e a máxima potência estimada para o ponto de operação em análise. Porém, há um problema de interpretação do tamanho do índice. Afinal, a margem é considerada pequena ou grande sem levar em conta a comparação com margens de outras barras? Por exemplo, se  $S_{m_i} = 10$  e  $S_i = 1$ , então a margem é 9 vezes o que está sendo injetado. Se, por outro lado,  $S_i = 99$  e  $S_{m_i} = 100$ , então a margem é aproximadamente 0,01 do que está sendo injetado.

Para contornar esse problema, na região superior da curva  $\phi$  constante da Figura 10, esta margem é definida como:

$$M = \frac{S_{m_i} - S_i}{S_{m_i}} \quad \text{em pu de } S_{m_i} \quad (3.45)$$

$$M = \frac{S_{m_i} - S_i}{S_{m_i}} 100\% \quad \text{em percentual de } S_{m_i} \quad (3.46)$$

Na região superior da curva  $\phi$  constante da Figura 10, a margem de potência ( $S_{m_i} - S_i$ ) é um valor positivo e deve ser lido como a quantidade adicional de potência aparente, em MVA, que deveria ser injetada na barra  $i$  de tal modo que  $S_i$  atinja a estimativa do máximo  $S_{m_i}$ . Pode-se definir uma margem em pu ou em percentual. Esta margem será igual à unidade quando a potência injetada na barra  $i$  é nula ( $S_i=0$ ), e tende a zero à medida que a injeção tende ao valor máximo ( $S_i = S_{m_i}$ ).

Na região inferior da curva  $\phi$  constante da Figura 10, esta margem é definida como:

$$M = \frac{S_{m_i} - S_i}{S_i} \quad \text{em pu de } S_i \quad (3.47)$$

$$M = \frac{S_{m_i} - S_i}{S_i} 100\% \quad \text{em percentual de } S_i \quad (3.48)$$

Na região inferior da curva  $\phi$  constante da Figura 10, a margem de potência é um valor negativo e deve ser lido como a quantidade excedente de potência aparente, em MVA, e que, portanto, deveria ser extraída da barra  $i$  de tal modo que  $S_i$  atinja a estimativa do máximo  $S_{m_i}$ . Pode-se definir uma margem em pu ou em percentual. Esta margem tenderá a -1 quando  $S_{m_i}$  aproximar-se de zero e tende a zero à medida que a injeção tende ao valor máximo ( $S_i = S_{m_i}$ ).

De forma geral, esta margem pode ser definida como:

$$M = \frac{S_{m_i} - S_i}{\max(S_i, S_{m_i})} \quad \text{em pu de } S_i \text{ ou } S_{m_i} \quad (3.49)$$

$$M = \frac{S_{m_i} - S_i}{\max(S_i, S_{m_i})} 100\% \quad \text{em percentual de } S_i \text{ ou } S_{m_i} \quad (3.50)$$

No ponto de operação correspondente ao máximo carregamento,  $S_{m_i} = S_i$  e  $S_{m_i} - S_i = 0$ . Portanto, não há nada a adicionar ou retirar de  $S_i$  para atingir a estimativa  $S_{m_i}$ .

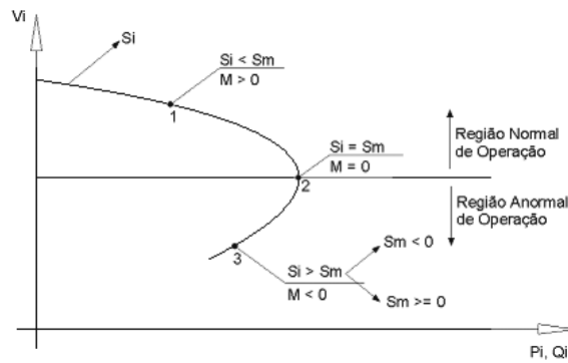


Figura 10: Regiões de operação do sistema

### 3.5

#### Resumo

O limite de estabilidade de tensão trata do máximo fluxo de potência ativa e reativa que pode chegar à barra de carga para diferentes fatores de potência na carga, tendo sido definido de forma analítica, numérica e gráfica.

Verificou-se a existência de uma carga ativa “maximum maximorum” que pode ser alimentada, mesmo com capacidade infinita de compensação reativa na barra de carga.

Apresentou-se ferramenta analítica capaz de prever o colapso de tensão em redes complexas quantificando, exatamente, as margens de estabilidade de tensão e os limites de transferência de potência; identificando os pontos fracos de tensão do sistema e áreas susceptíveis a instabilidade.

Os índices propostos  $M$  e  $\beta$  indicam a margem para a máxima transmissão de potência e a região de operação na curva  $\phi$  constante no plano SV.



## 4

### Esgotamento de recursos

O objetivo desse capítulo é apresentar situações em que há esgotamento de recursos de geração de potência ativa ou de controle de tensão (por geração de potência reativa e por variação do *tap* de transformador). Também é abordada a influência desses eventos sobre a estabilidade de tensão.

A importância deste estudo reside no fato de eventos de esgotamentos de recursos afetarem a forma como variações infinitesimais na carga (ou na geração) de uma barra influenciam a tensão dessa mesma barra em um sistema multinó. Em outras palavras, os esgotamentos desempenham papel importante no estudo do carregamento do ponto de vista de estabilidade de tensão do sistema.

#### 4.1

##### Método

Aqui são tratados três tipos de esgotamentos. O primeiro deles é a limitação de geração de potência ativa. Neste caso, assume-se ser impossível alterar a geração de potência ativa em uma barra, isto é, essa barra não participa da absorção de variações de potências nas outras barras nem das perdas. O segundo esgotamento é a limitação de geração de potência reativa. Nesse cenário, assume-se ser impossível alterar a geração de potência reativa em uma barra, isto é, considera-se a perda do controle de tensão. O último esgotamento é a limitação de variação do *tap* de LTC, o que equivale a assumir ser impossível alterar o *tap* de um LTC entre duas barras, isto é, considera-se a perda do controle de tensão. Após a simulação computacional de cada um dos três esgotamentos citados, segue-se a etapa de avaliação dos efeitos que a circunstância em questão causou sobre os índices de estabilidade de tensão do sistema.

No Capítulo 3 foi descrito o emprego do método da matriz  $[D']$  para análise da estabilidade de tensão de um sistema elétrico. Mais especificamente, na Seção 3.3.1 discutiu-se o efeito das variações infinitesimais na carga (ou na geração)  $\Delta P_i$  e  $\Delta Q_i$  sobre  $\Delta v_i$  e  $\Delta \theta_i$ . Naquele ponto, destacou-se que variações de  $\Delta P_i$ ,  $\Delta Q_i$  e perdas ativas e reativas seriam compensadas por variações de injeções de potência nas barras com potência ativa livre e barras com potência

reativa livre, pois essas potências não estão fixadas nos vetores  $\Delta \underline{P'}$  e  $\Delta \underline{Q'}$  de (3.20) ou (3.43).

Já nesse capítulo serão observadas situações em que há limitações da geração de potência ativa  $P_G$ , da geração de potência reativa  $Q_G$  e do *tap*  $a$ . Além disso, serão discutidas suas consequências para a análise de estabilidade de tensão das barras de um sistema elétrico.

As etapas dos procedimentos realizados neste capítulo serão:

- Cálculo do fluxo de potência
- Cálculo dos índices de estabilidade de tensão:  $M$  e  $\beta$
- Simulação de esgotamentos de recursos
- Cálculo dos índices relativos a esgotamentos de recursos

## 4.2

### Índices de influência sobre a estabilidade de tensão

#### 4.2.1

##### Índices de influência na barra

A partir dos índices de estabilidade de tensão apresentados na Seção 3.4, será utilizado um índice de sensibilidade para traduzir os efeitos de um evento  $j$  (por exemplo, uma ação de controle, um acréscimo de carga, um esgotamento) sobre a margem de potência da barra  $i$ . Esse índice será denominado índice de influência  $II$  conforme desenvolvido em [6]:

$$II_i^j = [\sin(\beta_0)] \left( \frac{S_{m_i}^0 - S_i^0}{S_{m_i}^j - S_i^j} \right) \quad (4.1)$$

onde:

$II_i^j$  é o índice de influência do evento  $j$  sobre a margem da barra  $i$ ;

$\beta_0$  é o valor do índice  $\beta$  para barra  $i$  no caso-base, ou seja, sem qualquer esgotamento;

$S_{m_i}^0$  é a estimativa da máxima potência aparente injetada na barra  $i$ , calculada no ponto de operação no caso-base, ou seja, sem qualquer esgotamento;

$S_i^0$  é a potência aparente injetada na barra  $i$  no caso-base, ou seja, sem qualquer esgotamento;

$S_{m_i}^j$  é a estimativa da máxima potência aparente injetada na barra  $i$ , calculada no ponto de operação no caso do evento  $j$ ; e

$S_i^j$  é a potência aparente injetada na barra  $i$  no caso do evento  $j$ .

Se  $II_i^j$  é positivo, a ocorrência do evento  $j$  foi benéfica para a margem da barra  $i$ . Se  $II_i^j$  é negativo, a ocorrência do evento  $j$  foi prejudicial para a margem da barra  $i$ , conforme ilustrado na Figura 11. Portanto, o efeito de qualquer

evento é facilmente avaliado. Por exemplo, quando o evento em questão é de esgotamento de recursos, basta comparar a margem para os dois diferentes pontos de operação: pré-esgotamento, ou caso base, e pós-esgotamento.

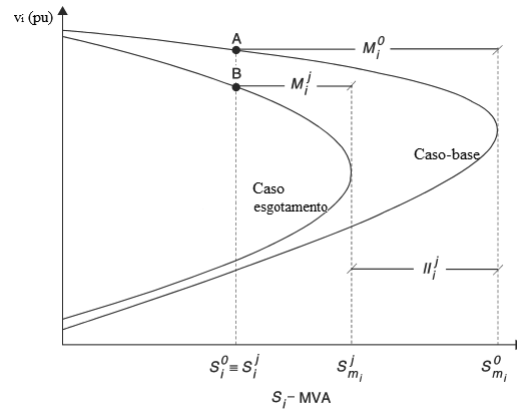


Figura 11: Curvas do caso-base e de esgotamentos com suas respectivas margens de potência e Índices de Influência

O índice de influência  $II_i^j$  indica quanto a margem de potência aparente  $M_i$  do caso-base é modificada na presença do evento  $j$ . Na ocorrência de esgotamentos, normalmente  $II_i^j$  é negativo, significando que a margem de potência aparente do caso-base foi reduzida na presença do esgotamento  $j$ . Quanto mais negativo  $II_i^j$ , mais severo é o evento  $j$ .

Conforme ilustrado na Figura 12, considerando (sinal de  $\beta_i^0$ )  $> 0$ , ou seja, considerando que o sistema opera na região superior da curva  $\phi$  constante no plano Sv, tem-se:

- Quando  $II_i^j < -1$ , depois do esgotamento o ponto de operação ficou localizado na parte inferior da curva  $\phi$  constante no plano Sv. A severidade do evento é maior quanto mais negativo for o índice;
- Quando  $II_i^j = -1$ , o esgotamento extinguiu a margem de potência da barra  $i$ . Esse é o limite de criticidade para a operação normal, ou seja, o novo ponto de operação corresponde ao ponto de máxima carga ("ponta do nariz" da curva) depois do esgotamento;
- Quando  $-1 < II_i^j < 0$ , o esgotamento causa redução da margem de potência, mas a margem continua sendo positiva. Ou seja, o novo ponto de operação continua sendo localizado na parte superior da curva  $\phi$  constante no plano Sv;
- Quando  $II_i^j = 0$ , o esgotamento não tem consequência para a barra  $i$  no ponto de operação em análise.

Por outro lado, considerando (sinal de  $\beta_i^0$ )  $< 0$ , ou seja, considerando que

o sistema opera na região inferior da curva  $\phi$  constante no plano Sv, tem-se:

- a) Quando  $II_i^j < 0$ , a margem de potência da barra i foi reduzida pelo esgotamento;
- b) Quando  $II_i^j = 0$ , o esgotamento não tem consequência para a barra i no ponto de operação em análise;
- c) Quando  $0 < II_i^j < 1$ , o ponto de operação depois do esgotamento ainda está localizado na parte inferior da curva  $\phi$  constante no plano Sv. O intervalo entre 0 e 1 denota severidade do esgotamento na região de operação anormal;
- d) Quando  $II_i^j = 1$ , depois do esgotamento o limite crítico para a operação normal foi atingido, ou seja, o novo ponto de operação corresponde ao ponto de máxima carga ("ponta do nariz" da curva) depois do esgotamento;
- e) Quando  $II_i^j > 1$ , o novo ponto de operação depois do esgotamento é localizado na parte superior da curva (situação rara).

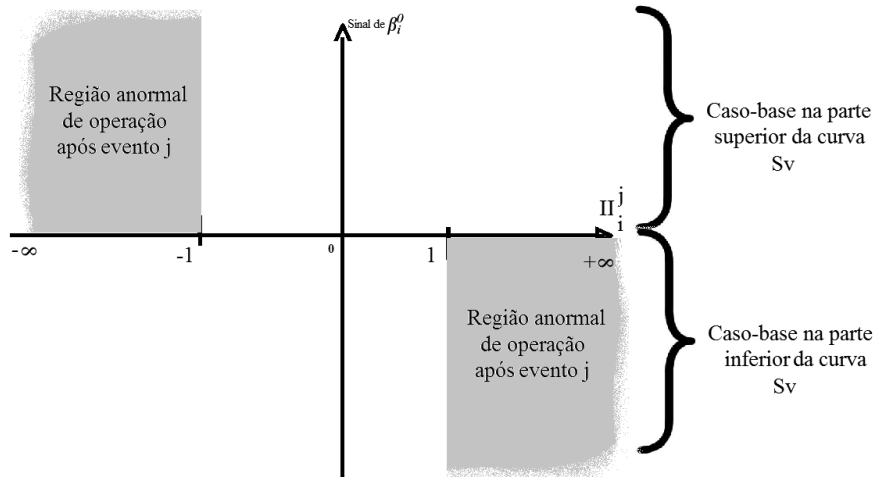


Figura 12: Regiões de operação de um sistema levando em consideração os Índices de Influência e o sinal de  $\beta$

Assim, o índice de influência  $II_i^j$  permite a identificação do grau de severidade de um esgotamento j sobre a margem de potência de uma barra i qualquer do sistema conforme ilustrado na Figura 12.

#### 4.2.2

##### Índices de influência no sistema

Para avaliar as consequências do esgotamento sobre o sistema, é proposto o índice IIS, que reflete a redução da margem de potência em todas as barras afetadas. Para isso, é considerado o índice de influência do esgotamento j sobre a barra i  $II_i^j$  (conforme visto na Seção 4.2.1) e um índice de importância relativa da barra i para o sistema  $IIR_i$ .

Faz sentido imaginar que quanto maior a estimativa de potência máxima que pode ser injetada em uma barra  $i$  no caso-base  $S_{m_i}^0$ , mais relevante é o papel dessa barra para a operação da rede elétrica. Portanto, o índice de importância relativa de uma barra considera a razão entre a estimativa de potência máxima que pode ser injetada nela e a maior estimativa de potência máxima que pode ser injetada em uma barra qualquer da rede. Esse índice é dado por:

$$IIR_i = \frac{S_{m_i}^0}{\max_b \{S_{m_b}^0\}} \quad b=1..i..NB \quad (4.2)$$

Assim, com o índice  $IIR$ , evita-se que a um esgotamento muito severo em uma barra de pouca importância para o sistema seja contabilizado da mesma forma que um esgotamento muito severo em uma barra de grande importância para o sistema elétrico. Portanto, o índice de influência do esgotamento  $j$  sobre o sistema elétrico é dado por 4.3:

$$IIS^j = \sum_i IIR_i^j \times IIR_i \quad (4.3)$$

### 4.3

#### Modelagem dos esgotamentos

A análise de esgotamento será feita considerando a possibilidade de múltiplas barras *swing* no método da matriz  $[D']$ , conforme visto na Seção 3.3.5, como é adequado em aplicações do método na prática [7].

Três tipos de esgotamentos serão explorados: limitação de potência ativa, potência reativa e *tap*. A ocorrência de esgotamentos de geração será aplicada a barras dos tipos PV, V e  $V\theta$ . Já o esgotamento de *tap* é estudado em barras de tensão controlada por LTC. Em todos os casos a análise é feita de acordo com a modelagem desenvolvida na Seção 3.3.5.

Os esgotamentos podem ocorrer caso algum recurso do sistema atinja seu limite ou caso um evento externo impeça variação de uma determinada grandeza. Nesse ponto de operação, é feita a avaliação da estabilidade de tensão.

#### 4.3.1

##### Esgotamentos de potência ativa

###### • Em barra V

Se a barra  $b$  onde vai ser simulado o esgotamento é do tipo V (barra *swing*), então, no caso pré-esgotamento, a potência ativa  $P_b$  não é especificada a priori. Desse modo, a equação relativa a  $\Delta P_b$  e a coluna referente à  $\Delta \theta_b$  estão presentes no sistema linearizado do sistema elétrico. Nele consta também a

equação  $g$  de distribuição proporcional de perdas envolvendo  $\Delta P_{Gb}$  e a coluna referente a  $\Delta P_{Gb}$ .

Novamente aqui deseja-se estudar variações infinitesimais de carga (ou geração) em  $\Delta P_i$  e  $\Delta Q_i$  e seus efeitos sobre  $\Delta \theta_i$  e  $\Delta v_i$  para a barra  $i$  de um sistema multinó quando a geração de potência ativa da barra  $b$  é fixada devido a um esgotamento de recurso. Nesse caso, a barra  $b$  perde a capacidade de aumentar ou diminuir sua geração de potência ativa para responder a variações na barra  $i$  e a perdas ativas, pois  $P_{Gb}$  está fixo. Desse modo, não faz sentido manter a variável  $\Delta P_{Gb}$  nem a equação de distribuição proporcional de perdas em que ela está envolvida. Em outras palavras após o esgotamento, a barra  $b$  deixa de ser *swing*, o que matematicamente se resume a realizar as seguintes modificações no sistema linearizado de equações utilizado na avaliação de estabilidade de tensão:

- substituir a equação de  $\Delta P_b^*$  pela equação de  $\Delta P_b$ ;
- excluir a equação de  $\Delta g_b$ ; e
- excluir a coluna referente à variável  $\Delta P_{Gb}$ .

Vale notar que do ponto de vista matemático, não importa se  $b$  era originalmente barra *swing* e em consequência de esgotamento deixou de ser ou se, originalmente, essa barra já não fazia parte do conjunto das barras *swing*. Em ambos os casos, o sistema linearizado de equações é o mesmo. O que importa é somente o fato de que, no momento da análise de estabilidade de tensão, sua capacidade de geração de potência ativa está no limite.

#### • Em barra $V\theta$

Seja  $b$  a barra de referência angular. Deseja-se estudar variações infinitesimais de carga (ou geração) em  $\Delta P_i$  e  $\Delta Q_i$  e seus efeitos sobre  $\Delta \theta_i$  e  $\Delta v_i$  para a barra  $i$  de um sistema multinó quando a geração de potência ativa na barra  $b$  não pode ser modificada.

Nesse caso, a barra  $b$  tem potência ativa fixa, então não faz sentido considerar  $\Delta P_b^*$ , que é função de  $\Delta P_{Gb}$ . Outra consequência é que a barra  $b$  perde a capacidade de absorver as perdas ativas. Por isso, outra barra geradora  $j$  deve ser escolhida como barra de referência angular. Desse modo, a referência angular do sistema deixa de ser  $\theta_b$  e passa a ser  $\theta_j$ . Por fim, como  $P_{Gb}$  é fixo, a equação  $g_b$  perde a razão de existência. Matematicamente isso significa que é preciso:

- substituir a equação de  $\Delta P_b^*$  pela equação de  $\Delta P_b$ ;

- excluir a coluna referente à variável  $\Delta\theta_j$ ;
- incluir a coluna referente à variável  $\Delta\theta_b$ ;
- excluir a equação de  $\Delta g_b$ ; e
- excluir a coluna referente à variável  $\Delta P_{Gb}$ .

### 4.3.2

#### Esgotamentos de potência reativa

No caso base, as barras PV, V e  $V\theta$  são barras em que a geração de potência reativa varia para manter a tensão no valor especificado. Então a potência reativa  $Q_b$  não é especificada a priori e, portanto, a equação relativa a  $\Delta Q_b$  e a coluna referente a  $\Delta v_b$  não estão presentes no sistema linearizado do sistema elétrico.

##### • Em barra PV

Se a geração de potência reativa da barra b do tipo PV é impossibilitada de variar,  $Q_b$  é fixado. Sob essa condição, o objetivo é estudar variações infinitesimais de carga (ou geração) em  $\Delta P_i$  e  $\Delta Q_i$  e seus efeitos sobre  $\Delta\theta_i$  e  $\Delta v_i$  para a barra i de um sistema multinó após a ocorrência do esgotamento. Aqui, como  $Q_b$  é fixo, o sistema linearizado utilizado para análise de estabilidade de tensão difere daquele no caso pré-esgotamento por:

- incluir a equação de  $\Delta Q_b$ ; e
- incluir a coluna referente à variável  $\Delta v_b$ .

##### • Em barra V

De forma semelhante, se a barra b é do tipo V (barra *swing*) e é exposta a evento que impeça a variação de sua geração de potência reativa, então o sistema linearizado utilizado para estudo de estabilidade de tensão pós-esgotamento difere daquele usado no pré-esgotamento por:

- inclusão da equação de  $\Delta Q_b$ ; e
- inclusão da coluna referente à variável  $\Delta v_b$ .

Ressalta-se aqui, que a limitação de geração de potência reativa não exclui a barra do conjunto de barras *swing*, pois sua capacidade de responder a variações e perdas de potência ativa não necessariamente está comprometida.

• **Em barra  $V\theta$**

Seja  $b$  a barra de referência angular. Deseja-se estudar variações infinitesimais de carga (ou geração) em  $\Delta P_i$  e  $\Delta Q_i$  e seus efeitos sobre  $\Delta\theta_i$  e  $\Delta v_i$  para a barra  $i$  de um sistema multinó quando a geração de potência reativa da barra  $b$  encontra-se submetida a evento que impeça sua variação. De forma análoga aos casos anteriores, como  $Q_b$  é fixo, o sistema linearizado utilizado para análise de estabilidade de tensão difere daquele no caso pré-esgotamento por:

- incluir a equação de  $\Delta Q_b$ ; e
- incluir a coluna referente à variável  $\Delta v_b$ .

Novamente, faz-se notar que a limitação de geração de potência reativa não impede que a barra seja barra de referência angular, desde que sua capacidade de responder a variações e perdas de potência ativa não esteja comprometida.

### 4.3.3

#### Esgotamentos de *tap*

O evento analisado é o esgotamento da capacidade de ajuste do *tap* do LTC que conecta a barra  $k$  à barra  $m$ , controlando a tensão dessa última. Sob essa condição e partindo-se da modelagem desenvolvida nas Seções 2.3.2 e 3.3.5, deseja-se estudar variações infinitesimais de carga (ou geração) em  $\Delta P_i$  e  $\Delta Q_i$  e seus efeitos sobre  $\Delta\theta_i$  e  $\Delta v_i$  para a barra  $i$  de um sistema multinó.

No caso pré-esgotamento, o *tap*  $a_{km}$  varia para manter  $v_m$  no valor especificado. Portanto,  $a_{km}$  é uma incógnita no sistema linearizado de equações. Entretanto, se o transformador estiver submetido a evento que impeça a variação de seu *tap*, então a tensão  $v_m$  deixa de ser controlada pelo LTC. Matematicamente isso significa que o sistema linearizado pós-esgotamento é obtido:

- excluindo-se a coluna referente à variável  $\Delta a_{km}$ ; e
- incluindo-se a coluna referente à variável  $\Delta v_m$ .



4.4  
Exemplo ilustrativo

Nessa seção será utilizado um pequeno sistema para ilustrar as ideias discutidas ao longo desse trabalho. Nele serão exemplificados e discutidos os modelos de fluxo de potência do sistema, de avaliação de condições de estabilidade de tensão via método da matriz  $[D']$  e, por fim, dos esgotamentos de geração ativa e de tensão (geração de potência reativa e *tap*) .

4.4.1  
Sistema elétrico

Na Figura 13 apresenta-se um sistema-teste de seis barras cujos dados são mostrados nas Tabelas 1 e 2. As barras 1, 5 e 6 são barras *swing*, sendo 1 a barra de referência angular. Esse sistema será usado para exemplificar o cálculo do fluxo de potência e a análise de estabilidade de tensão.

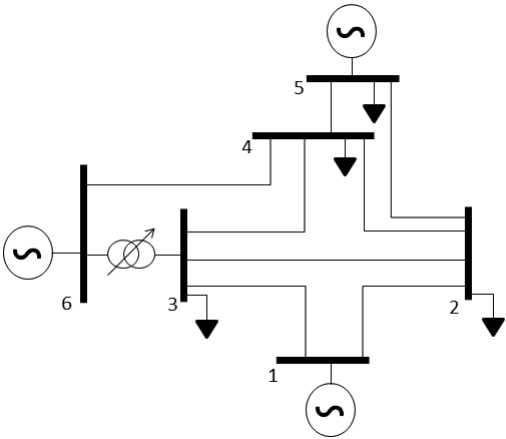


Figura 13: Sistema-teste

Tabela 1: Informações das barras

Barra	Tipo	$v(\text{pu})$	$P_G$ (MW)	$Q_G$ (MVar)	$P_D$ (MW)	$Q_D$ (MVar)
1	V $\theta$	1,005	50	30	40	10
2	PQ	0,998	0	0	25	10
3	PQ	0,975	0	0	100	50
4	PQ	1,000	0	0	50	15
5	V	1,000	70	20	60	20
6	V	1,000	120	5	0	0

Tabela 2: Informações dos ramos de transmissão

De barra	Para barra	R	X	$B^{sh}$
1	2	0,02	0,04	0,03
1	3	0,03	0,04	0,03
2	3	0,06	0,02	0,02
2	4	0,06	0,08	0,02
2	5	0,04	0,04	0,02
3	4	0,04	0,06	0,01
4	5	0,04	0,03	0,03
3	6	0,00	0,05	0,00
6	4	0,08	0,10	0,01
tap		=	1,00	

#### 4.4.2

##### Fluxo de potência

Para a rede da Figura 13, foi utilizado o fluxo de potência descrito na Seção 2.4. Assim, se:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} \\ N_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial v_m} \\ M_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} \\ L_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial v_m} \\ T_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial a_{km}} \\ W_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial a_{km}} \end{array} \right. \quad (4.4)$$

então, o sistema linearizado utilizado para o cálculo de fluxo de potência pelo método iterativo de Newton-Raphson (conforme descrito na Seção 2.3) é dado por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^* \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5^* \\ \Delta P_6^* \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta g_1 \\ \Delta g_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{12} & H_{13} & H_{14} & H_{15} & H_{16} & N_{11} & N_{12} & T_{13} & N_{14} & -1 & 0 & 0 \\ H_{22} & H_{23} & H_{24} & H_{25} & H_{26} & N_{21} & N_{22} & T_{23} & N_{24} & 0 & 0 & 0 \\ H_{32} & H_{33} & H_{34} & H_{35} & H_{36} & N_{31} & N_{32} & M_{33} & N_{34} & 0 & 0 & 0 \\ H_{42} & H_{43} & H_{44} & H_{45} & H_{46} & N_{41} & N_{42} & T_{43} & N_{44} & 0 & 0 & 0 \\ H_{52} & H_{53} & H_{54} & H_{55} & H_{56} & N_{51} & N_{52} & T_{53} & N_{54} & 0 & -1 & 0 \\ H_{62} & H_{63} & H_{64} & H_{65} & H_{66} & N_{61} & N_{62} & T_{63} & N_{64} & 0 & 0 & -1 \\ M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} & L_{21} & L_{22} & W_{23} & L_{24} & 0 & 0 & 0 \\ M_{32} & M_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{36} & L_{31} & L_{32} & W_{33} & L_{34} & 0 & 0 & 0 \\ M_{42} & M_{43} & M_{44} & M_{45} & M_{46} & L_{41} & L_{42} & W_{43} & L_{44} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \alpha_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \alpha_{56} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta v_2 \\ \Delta a_{63} \\ \Delta v_4 \\ \Delta P_{G1} \\ \Delta P_{G5} \\ \Delta P_{G6} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Nesse caso:

$$\alpha_{15} = \frac{P_{G10}}{P_{G50}} = \frac{50}{70} \text{ e } \alpha_{56} = \frac{P_{G50}}{P_{G60}} = \frac{70}{120}.$$

O ponto de operação do sistema está apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Ponto de operação do sistema-teste

#barra	tipo	v (pu)	$\theta(^{\circ})$	$P_G$ (MW)	$Q_G$ (Mvar)
1	V $\theta$	1,0050	0	58,48	113,28
2	PQ	0,9883	0,0018	0,00	0,00
3	PQV	0,9750	1,2695	-0,00	-0,00
4	PQ	0,9844	0,6181	-0,00	0,00
5	V	1,0000	-0,1202	81,88	72,39
6	V	1,0000	3,9459	140,36	-95,10
		$a_{63}$	=	1,0664	

#### 4.4.3

##### Matriz [D']

A avaliação da estabilidade de tensão para as barras 1, 2, 3 e 6 é feita usando o método da matriz [D'] descrito na Seção 3.3.5. As barras 4 e 5 são do mesmo tipo das barras 2 e 6 respectivamente, portanto não serão abordadas. Assim, conforme (3.40), para a barra de carga 2 tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^* \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5^* \\ \Delta P_6^* \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta g_1 \\ \Delta g_5 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{13} & H_{14} & H_{15} & H_{16} & N_{11} & T_{13} & N_{14} & -1 & 0 & 0 & H_{12} & N_{12} \\ H_{33} & H_{34} & H_{35} & H_{36} & N_{31} & T_{33} & N_{34} & 0 & 0 & 0 & H_{32} & N_{32} \\ H_{43} & H_{44} & H_{45} & H_{46} & N_{41} & T_{43} & N_{44} & 0 & 0 & 0 & H_{42} & N_{42} \\ H_{53} & H_{54} & H_{55} & H_{56} & N_{51} & T_{53} & N_{54} & 0 & -1 & 0 & H_{52} & N_{52} \\ H_{63} & H_{64} & H_{65} & H_{66} & N_{61} & T_{63} & N_{64} & 0 & 0 & -1 & H_{62} & N_{62} \\ M_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{36} & L_{31} & W_{33} & L_{34} & 0 & 0 & 0 & M_{32} & L_{32} \\ M_{43} & M_{44} & M_{45} & M_{46} & L_{41} & W_{43} & L_{44} & 0 & 0 & 0 & M_{42} & L_{42} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \alpha_{15} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \alpha_{56} & 0 & 0 \\ H_{23} & H_{24} & H_{25} & H_{26} & N_{21} & T_{23} & N_{24} & 0 & 0 & 0 & H_{22} & N_{22} \\ M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} & L_{21} & W_{23} & L_{24} & 0 & 0 & 0 & M_{22} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta a_{63} \\ \Delta v_4 \\ \Delta P_{G1} \\ \Delta P_{G5} \\ \Delta P_{G6} \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta v_2 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Portanto, a ideia é que as barras *swing* 1, 5 e 6 sejam responsáveis por absorver variações de  $\Delta P_2$  e perdas ativas. Por outro lado, as variações  $\Delta Q_2$  e perdas reativas são compensadas pelas barras 1, 5 e 6, que têm geração de potência reativa livres.

Já na análise de estabilidade de tensão da barra 6, *swing* do tipo V:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^* \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5^* \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta g_1 \\ \Delta P_6 \\ \Delta Q_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{12} & H_{13} & H_{14} & H_{15} & N_{11} & N_{12} & T_{13} & N_{14} & -1 & 0 & H_{16} & N_{16} \\ H_{22} & H_{23} & H_{24} & H_{25} & N_{21} & N_{22} & T_{23} & N_{24} & 0 & 0 & H_{26} & N_{26} \\ H_{32} & H_{33} & H_{34} & H_{35} & N_{31} & N_{32} & T_{33} & N_{34} & 0 & 0 & H_{36} & N_{36} \\ H_{42} & H_{43} & H_{44} & H_{45} & N_{41} & N_{42} & T_{43} & N_{44} & 0 & 0 & H_{46} & N_{46} \\ H_{52} & H_{53} & H_{54} & H_{55} & N_{51} & N_{52} & T_{53} & N_{54} & 0 & -1 & H_{56} & N_{56} \\ M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} & L_{21} & L_{22} & W_{23} & L_{24} & 0 & 0 & M_{26} & L_{26} \\ M_{32} & M_{33} & M_{34} & M_{35} & L_{31} & L_{32} & W_{33} & L_{34} & 0 & 0 & M_{36} & L_{36} \\ M_{42} & M_{43} & M_{44} & M_{45} & L_{41} & L_{42} & W_{43} & L_{44} & 0 & 0 & M_{46} & L_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \alpha_{15} & 0 & 0 \\ H_{62} & H_{63} & H_{64} & H_{65} & N_{61} & N_{62} & T_{63} & N_{64} & 0 & 0 & H_{66} & N_{66} \\ M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_{61} & L_{62} & W_{63} & L_{64} & 0 & 0 & M_{66} & L_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta a_{63} \\ \Delta v_4 \\ \Delta P_{G1} \\ \Delta P_{G5} \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta v_6 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Nota-se que, em relação a (4.5), há substituição da equação de  $\Delta P_6^*$  pela equação de  $\Delta P_6$ , exclusão da equação de  $\Delta g_5$ , exclusão da coluna referente à variável  $\Delta P_{G6}$  inclusão da equação de  $Q_6$  e inclusão da coluna referente à variável  $v_6$ . Portanto, a ideia é que as barras *swing* 1 e 5 sejam responsáveis por absorver variações de  $\Delta P_6$  e as perdas ativas. Por outro lado, as variações  $\Delta Q_6$  e as perdas reativas são compensadas pelas barras 1 e 5 que têm geração de potência reativa livres. Ou seja, para efeitos de análise de estabilidade de tensão na barra 6, ela não é considerada como barra *swing* e nem como barra de tensão controlada.

Na análise de estabilidade de tensão da barra 3, do tipo PQV:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^* \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5^* \\ \Delta P_6^* \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta g_1 \\ \Delta g_5 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{12} & H_{14} & H_{15} & H_{16} & N_{11} & N_{12} & N_{14} & -1 & 0 & 0 & H_{13} & N_{13} \\ H_{22} & H_{24} & H_{25} & H_{26} & N_{21} & N_{22} & N_{24} & 0 & 0 & 0 & H_{23} & N_{23} \\ H_{42} & H_{44} & H_{45} & H_{46} & N_{41} & N_{42} & N_{44} & 0 & 0 & 0 & H_{43} & N_{43} \\ H_{52} & H_{54} & H_{55} & H_{56} & N_{51} & N_{52} & N_{54} & 0 & -1 & 0 & H_{53} & N_{53} \\ H_{62} & H_{64} & H_{65} & H_{66} & N_{61} & N_{62} & N_{64} & 0 & 0 & -1 & H_{63} & N_{63} \\ M_{22} & M_{24} & M_{25} & M_{26} & L_{21} & L_{22} & L_{24} & 0 & 0 & 0 & M_{23} & L_{23} \\ M_{42} & M_{44} & M_{45} & M_{46} & L_{41} & L_{42} & L_{44} & 0 & 0 & 0 & M_{43} & L_{43} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \alpha_{15} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \alpha_{56} & 0 & 0 \\ H_{32} & H_{34} & H_{35} & H_{36} & N_{31} & N_{32} & N_{34} & 0 & 0 & 0 & H_{33} & N_{33} \\ M_{32} & M_{34} & M_{35} & M_{36} & L_{31} & L_{32} & L_{34} & 0 & 0 & 0 & M_{33} & L_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta v_2 \\ \Delta v_4 \\ \Delta P_{G1} \\ \Delta P_{G5} \\ \Delta P_{G6} \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta v_3 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Destaca-se que, em relação a (4.5), há exclusão da coluna referente a  $\Delta a_{63}$  e inclusão da coluna referente à variável  $\Delta v_3$ . Portanto, a ideia é que as barras *swing* 1, 5 e 6 sejam responsáveis por absorver variações de  $\Delta P_3$  e as perdas ativas. Além disso, como essas barras também têm geração de potência

reativa livres, também compensam as variações  $\Delta Q_3$  e as perdas reativas.

Por fim, para análise de estabilidade de tensão da barra 1, do tipo  $V\theta$ , a barra 5 foi escolhida como substituta no papel de barra de referência angular. Portanto:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5^* \\ \Delta P_6^* \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta g_5 \\ \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{22} & H_{23} & H_{24} & H_{26} & N_{22} & T_{23} & N_{24} & 0 & 0 & 0 & H_{21} & N_{21} \\ H_{32} & H_{33} & H_{34} & H_{36} & N_{32} & T_{33} & N_{34} & 0 & 0 & 0 & H_{31} & N_{31} \\ H_{42} & H_{43} & H_{44} & H_{46} & N_{42} & T_{43} & N_{44} & 0 & 0 & 0 & H_{41} & N_{41} \\ H_{52} & H_{53} & H_{54} & H_{56} & N_{52} & T_{53} & N_{54} & 0 & -1 & 0 & H_{51} & N_{51} \\ H_{62} & H_{63} & H_{64} & H_{66} & N_{62} & T_{63} & N_{64} & 0 & 0 & -1 & H_{61} & N_{61} \\ M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{26} & L_{22} & W_{23} & L_{24} & 0 & 0 & 0 & M_{21} & L_{21} \\ M_{32} & M_{33} & M_{34} & M_{36} & L_{32} & W_{33} & L_{34} & 0 & 0 & 0 & M_{31} & L_{31} \\ M_{42} & M_{43} & M_{44} & M_{46} & L_{42} & W_{43} & L_{44} & 0 & 0 & 0 & M_{41} & L_{41} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \alpha_{56} & 0 & 0 \\ H_{12} & H_{13} & H_{14} & H_{16} & N_{12} & W_{13} & N_{14} & -1 & 0 & 0 & H_{11} & N_{11} \\ M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{16} & L_{12} & W_{13} & L_{14} & 0 & 0 & 0 & M_{11} & L_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta v_2 \\ \Delta a_{63} \\ \Delta v_4 \\ \Delta P_{G5} \\ \Delta P_{G6} \\ \Delta \theta_1 \\ \Delta v_1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

A ideia é que as barras *swing* 5 e 6 sejam responsáveis por absorver variações de  $\Delta P_1$  e as perdas ativas. Além disso, como essas barras também têm geração de potência reativa livres, também compensam as oscilações  $\Delta Q_1$  e as perdas reativas. Para isso substitui-se a equação de  $\Delta P_1^*$  pela equação de  $\Delta P_1$ , exclui-se a coluna referente à variável  $\Delta \theta_5$ , inclui-se a coluna referente à variável  $\Delta \theta_1$ , inclui-se a equação de  $\Delta Q_1$ , inclui-se a coluna referente à variável  $\Delta v_1$ , exclui-se a equação de  $\Delta g_1$  e exclui-se a coluna referente à variável  $\Delta P_{G1}$ .

Os índices de estabilidade de tensão para o caso-base calculados usando o método da matriz  $[D']$  são expostos na Tabela 4:

Tabela 4: Índices de estabilidade de tensão do sistema-teste

#barra	tipo	$M_0(\text{pu})$	$\beta_0(^{\circ})$
1	$V\theta$	0,9665	79,7162
2	PQ	0,9960	104,0773
3	PQV	0,9836	90,4598
4	PQ	0,9887	85,1616
5	V	0,9723	74,7729
6	V	0,8311	158,6649

De forma resumida, quando há múltiplas barras *swing* na rede elétrica, entende-se que essas barras sejam responsáveis por absorver variações de P da barra em análise e das perdas ativas da rede, exceto se uma dessas barras *swing* já estiver no seu limite de geração. Em contrapartida, as barras com geração de potência reativa livres compensam as variações da barra em análise e das perdas reativas.

## 4.4.4

**Matriz [D'] para esgotamento de potência ativa**

Por exemplo, se no sistema descrito na Seção 4.4.1 a geração de potência ativa na barra 5 atingir o limite máximo, então a barra 5 não pode ser responsável por absorver variações de  $\Delta P_i$  da barra  $i$  em análise e nem das perdas ativas da rede.

Se o objetivo for entender como variações infinitesimais na carga (ou na geração) da barra 6 influenciam  $\Delta v_6$  e  $\Delta \theta_6$  no evento de limitação de geração de potência ativa na barra 5, então conforme explicado nas Seções 3.3.5 e 4.3.1, (4.7) passa a ser conforme (4.10).

Nota-se que o resíduo  $\Delta P_5$  tem valor necessariamente fixo em zero, já que não é possível variar  $P_5$ . Por isso, a equação relativa a  $P_5$  e a coluna relativa a  $\theta_5$  constam no sistema linearizado (4.10). Além disso, a equação relativa a  $g_1$  e a coluna relativa a  $P_{G5}$  são excluídas do sistema linearizado, uma vez que  $P_{G5}$  não é livre para variar.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^* \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta g_1 \\ \Delta P_6 \\ \Delta Q_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{12} & H_{13} & H_{14} & H_{15} & N_{12} & T_{13} & N_{14} & -1 & 0 & H_{16} & N_{16} \\ H_{22} & H_{23} & H_{24} & H_{25} & N_{22} & T_{23} & N_{24} & 0 & 0 & H_{26} & N_{26} \\ H_{32} & H_{33} & H_{34} & H_{35} & N_{32} & T_{33} & N_{34} & 0 & 0 & H_{36} & N_{36} \\ H_{42} & H_{43} & H_{44} & H_{45} & N_{42} & T_{43} & N_{44} & 0 & 0 & H_{46} & N_{46} \\ H_{52} & H_{53} & H_{54} & H_{55} & N_{52} & T_{53} & N_{54} & 0 & -1 & H_{56} & N_{56} \\ M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} & L_{22} & W_{23} & L_{24} & 0 & 0 & M_{26} & L_{26} \\ M_{32} & M_{33} & M_{34} & M_{35} & L_{32} & W_{33} & L_{34} & 0 & 0 & M_{36} & L_{36} \\ M_{42} & M_{43} & M_{44} & M_{45} & L_{42} & W_{43} & L_{44} & 0 & 0 & M_{46} & L_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ H_{62} & H_{63} & H_{64} & H_{65} & N_{62} & T_{63} & N_{64} & 0 & 0 & H_{66} & N_{66} \\ M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_{62} & W_{63} & L_{64} & 0 & 0 & M_{66} & L_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta v_2 \\ \Delta a_{63} \\ \Delta v_4 \\ \Delta P_{G1} \\ \Delta P_{G5} \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta v_6 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Portanto,  $\Delta P_2$ ,  $\Delta P_3$ ,  $\Delta P_4$ ,  $\Delta P_5$ ,  $\Delta Q_2$ ,  $\Delta Q_3$  e  $\Delta Q_4$  são nulos, o que equivale a dizer que não há variação nessas injeções de potência. Assim, admite-se que todas as barras com potência ativa livre e potência reativa livre sejam responsáveis por absorver variações de perdas ativas e reativas respectivamente.

Adicionalmente, teria-se  $\Delta P_1^* = \Delta P_{G1} - \Delta P_1 = 0$  ou  $\Delta P_{G1} = \Delta P_1$ , o que significa que variações nas injeções de potência na barra 1 são acompanhadas por  $P_{G1}$ . Ou, em outras palavras, a barra 1 seria do tipo *swing*.

## 4.4.5

**Matriz [D'] para esgotamento de potência reativa**

Por exemplo, se no sistema descrito na Seção 4.4.1 a geração de potência reativa na barra 5 atingir um limite,  $\Delta Q_5$  deve ser fixado e não pode contribuir para absorver as variações  $\Delta Q_i$  e das perdas reativas. Porém a barra 5 ainda pode ser responsável por absorver variações de  $\Delta P_i$  da barra  $i$  em análise e perdas ativas da rede.

Se o objetivo for entender como variações infinitesimais na carga (ou na geração) da barra 6 influenciam  $\Delta v_6$  e  $\Delta \theta_6$  no evento de limitação de geração de potência reativa na barra 5, então conforme explicado nas Seções 3.3.5 e 4.3.2, (4.7) passa a ser conforme (4.11).

Nota-se que o resíduo  $\Delta Q_5$  tem valor necessariamente fixo em zero, já que não é possível variar  $Q_5$ . Por isso, a equação relativa a  $Q_5$  e a coluna relativa a  $v_5$  (destacadas em negrito) constam no sistema linearizado (4.11). Portanto,  $\Delta P_2$ ,  $\Delta P_3$ ,  $\Delta P_4$ ,  $\Delta Q_2$ ,  $\Delta Q_3$ ,  $\Delta Q_4$  e  $\Delta Q_5$  são todos nulos, isto é, não há variação nessas injeções de potência. A ideia é que todas as barras com potência ativa livre e potência reativa livre sejam responsáveis por absorver variações de perdas ativas e reativas respectivamente.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^* \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5^* \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta Q_5 \\ \Delta g_1 \\ \Delta P_6 \\ \Delta Q_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{12} & H_{13} & H_{14} & H_{15} & N_{12} & T_{13} & N_{14} & \mathbf{N}_{15} & -1 & 0 & H_{16} & N_{16} \\ H_{22} & H_{23} & H_{24} & H_{25} & N_{22} & T_{23} & N_{24} & \mathbf{N}_{25} & 0 & 0 & H_{26} & N_{26} \\ H_{32} & H_{33} & H_{34} & H_{35} & N_{32} & T_{33} & N_{34} & \mathbf{N}_{35} & 0 & 0 & H_{36} & N_{36} \\ H_{42} & H_{43} & H_{44} & H_{45} & N_{42} & T_{43} & N_{44} & \mathbf{N}_{45} & 0 & 0 & H_{46} & N_{46} \\ H_{52} & H_{53} & H_{54} & H_{55} & N_{52} & T_{53} & N_{54} & \mathbf{N}_{55} & 0 & -1 & H_{56} & N_{56} \\ M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} & L_{22} & W_{23} & L_{24} & \mathbf{L}_{25} & 0 & 0 & M_{26} & L_{26} \\ M_{32} & M_{33} & M_{34} & M_{35} & L_{32} & W_{33} & L_{34} & \mathbf{L}_{35} & 0 & 0 & M_{36} & L_{36} \\ M_{42} & M_{43} & M_{44} & M_{45} & L_{42} & W_{43} & L_{44} & \mathbf{L}_{45} & 0 & 0 & M_{46} & L_{46} \\ \mathbf{M}_{52} & \mathbf{M}_{53} & \mathbf{M}_{54} & \mathbf{M}_{55} & \mathbf{L}_{52} & \mathbf{T}_{53} & \mathbf{L}_{54} & \mathbf{L}_{55} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M}_{56} & \mathbf{L}_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{0} & -1 & \alpha_{15} & 0 & 0 \\ H_{62} & H_{63} & H_{64} & H_{65} & N_{62} & T_{63} & N_{64} & \mathbf{N}_{65} & 0 & 0 & H_{66} & N_{66} \\ M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_{62} & W_{63} & L_{64} & \mathbf{L}_{65} & 0 & 0 & M_{66} & L_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta v_2 \\ \Delta a_{63} \\ \Delta v_4 \\ \Delta \mathbf{v}_5 \\ \Delta P_{G1} \\ \Delta P_{G5} \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta v_6 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

## 4.4.6

**Matriz [D'] para esgotamento de tap**

Por exemplo, considere-se que o tap do LTC que controla a tensão na barra 3 no sistema descrito na Seção 4.4.1 atinja um limite. Se o objetivo for entender como variações infinitesimais na carga (ou na geração) da barra

6 influenciam  $\Delta v_6$  e  $\Delta \theta_6$  neste evento, então conforme explicado nas Seções 3.3.5 e 4.3.3, (4.7) passa a ser:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^* \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5^* \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta g_1 \\ \Delta P_6 \\ \Delta Q_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{12} & H_{13} & H_{14} & H_{15} & N_{12} & \mathbf{N_{13}} & N_{14} & -1 & 0 & H_{16} & N_{16} \\ H_{22} & H_{23} & H_{24} & H_{25} & N_{22} & \mathbf{N_{23}} & N_{24} & 0 & 0 & H_{26} & N_{26} \\ H_{32} & H_{33} & H_{34} & H_{35} & N_{32} & \mathbf{N_{33}} & N_{34} & 0 & 0 & H_{36} & N_{36} \\ H_{42} & H_{43} & H_{44} & H_{45} & N_{42} & \mathbf{N_{43}} & N_{44} & 0 & 0 & H_{46} & N_{46} \\ H_{52} & H_{53} & H_{54} & H_{55} & N_{52} & \mathbf{N_{53}} & N_{54} & 0 & -1 & H_{56} & N_{56} \\ M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} & L_{22} & \mathbf{L_{23}} & L_{24} & 0 & 0 & M_{26} & L_{26} \\ M_{32} & M_{33} & M_{34} & M_{35} & L_{32} & \mathbf{L_{33}} & L_{34} & 0 & 0 & M_{36} & L_{36} \\ M_{42} & M_{43} & M_{44} & M_{45} & L_{42} & \mathbf{L_{43}} & L_{44} & 0 & 0 & M_{46} & L_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{0} & 0 & -1 & \alpha_{15} & 0 & 0 \\ H_{62} & H_{63} & H_{64} & H_{65} & N_{62} & \mathbf{N_{63}} & N_{64} & 0 & 0 & H_{66} & N_{66} \\ M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_{62} & \mathbf{L_{63}} & L_{64} & 0 & 0 & M_{66} & L_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta v_2 \\ \mathbf{\Delta v_3} \\ \Delta v_4 \\ \Delta P_{G1} \\ \Delta P_{G5} \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta v_6 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Nota-se que a coluna relativa a  $a_{63}$  foi substituída pela coluna relativa a  $v_3$  (destacada em negrito) no sistema linearizado (4.12). Isso ocorre porque não é possível variar  $a_{63}$ , que está sob esgotamento. Portanto,  $\Delta P_2$ ,  $\Delta P_3$ ,  $\Delta P_4$ ,  $\Delta Q_2$ ,  $\Delta Q_3$  e  $\Delta Q_4$  são todos nulos, isto é, não há variação nessas injeções de potência. Mais uma vez todas as barras com potência ativa livre e potência reativa livre são responsáveis por absorver variações de perdas ativas e reativas respectivamente.

#### 4.4.7 Resultados

Na Seção 4.2.1, foi utilizado o índice de influência para traduzir os efeitos de um esgotamento de recurso sobre a margem de cada barra  $i$ , conforme (4.1). O índices de influência são apresentados na Tabela 5<sup>1</sup> e, em cada linha da tabela, são destacados os índices de influência do evento mais danoso para a barra em questão do ponto de vista de estabilidade de tensão. Pode-se observar que o esgotamento Q5 é o que causa maior impacto sobre uma determinada barra, neste caso, a barra 6. Em outras palavras, pode se dizer que a barra 6 é que sofre maior impacto de um determinado esgotamento, neste caso, o esgotamento Q5. Ambas as afirmações podem ser constatadas verificando que  $II_6^{Q5}$  (índice de influência do esgotamento Q5 sobre a barra 6) tem o maior módulo dentre todos os II da Tabela 5.

<sup>1</sup>II menores que 0,5% em módulo são omitidos na Tabela.



Tabela 5: Índices de influência II para cada barra em cada cenário de esgotamento e índices de influência do esgotamento sobre o sistema IIS

Barra	II (%)							$S_m$
	Q1	Q5	Q6	t3	P1	P5	P6	
1			-0,51	-0,88		-1,00	-1,01	31,35
2								67,29
3					-0,72	-1,04	-0,57	68,02
4								46,31
5			-1,72					20,52
6		-12,33		9,72	-5,53	-2,44		10,04
IIS(%)	-0,12	-2,02	-1,15	0,92	-1,68	-2,34	-1,10	

Nota-se que para o esgotamento em uma barra  $b$ , o índice de influência desse evento sobre própria barra  $b$  é nulo. Isso ocorre porque nos casos pré-egotamento e pós-egotamento a matriz  $[D']$  é a mesma. No caso-base, ao analisar-se a estabilidade de tensão da barra  $b$ , as equações reativas a  $P_b$  e  $Q_b$  fazem parte do sistema linear. Logo, após o esgotamento  $j$ , a inclusão da equação referente ao recurso esgotado não provoca alteração, ou seja,  $M_b^i = M_b^j$ .

Em segundo lugar, na Tabela 5, constam as informações das estimativas das máximas potências injetadas em cada barra ( $S_m$ ) no ponto de operação em análise. Observa-se que a barra 6 tem  $S_{m_6}$  relativamente baixo quando comparada com a barra 3, com  $S_{m_3} \approx 7S_{m_6}$ .

Por último, na Tabela 5 também é apresentado o índice IIS, explicado na Seção 4.2.2. Esse índice avalia as consequências do esgotamento sobre o sistema, considerando importância relativa de cada barra do sistema.

Como a barra 6 tem  $S_{m_6}$  relativamente baixo, o resultado do esgotamento Q5 sobre o sistema é menor do que o resultado do esgotamento de geração de potência ativa P5. Isso porque esse último evento afeta a barra 3, que é uma barra com  $S_{m_3}$  aproximadamente sete vezes maior que  $S_{m_6}$ . Então, o esgotamento P5 é o que impacta mais negativamente o sistema ( $IIS^{P5} = -2,34\%$ ).

Os índices de influência  $II^2$  para cada barra em cada cenário de esgotamento podem ser observados na Figura 14 enquanto os índices de influência sobre o sistema podem visualizados na Figura 15.

<sup>2</sup>II menores que 0,5% em módulos são omitidos.

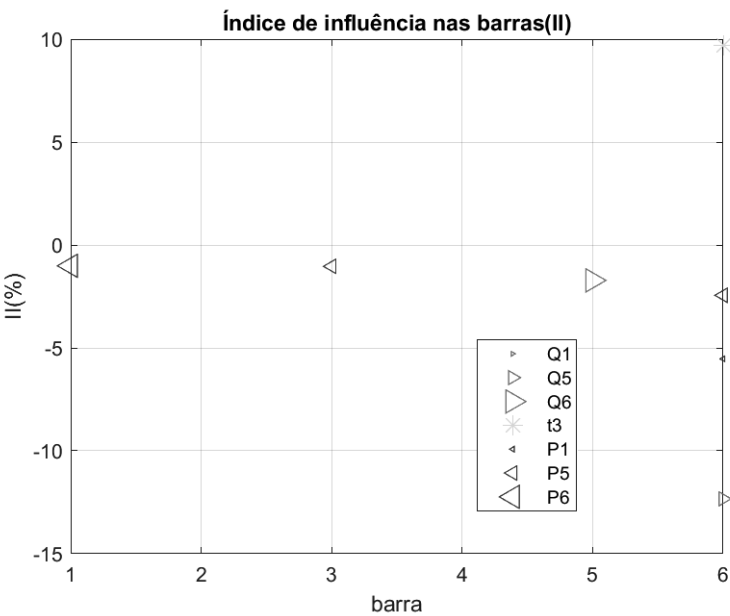


Figura 14: Índice de influência sobre cada barra

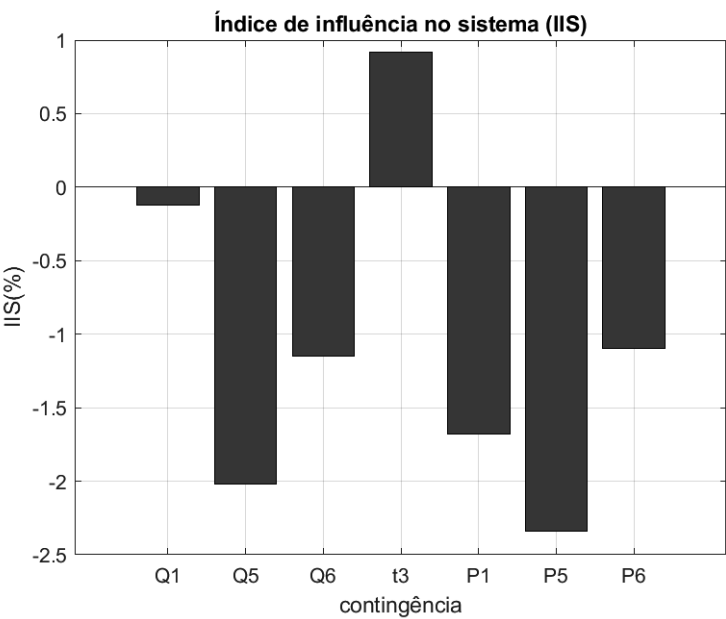


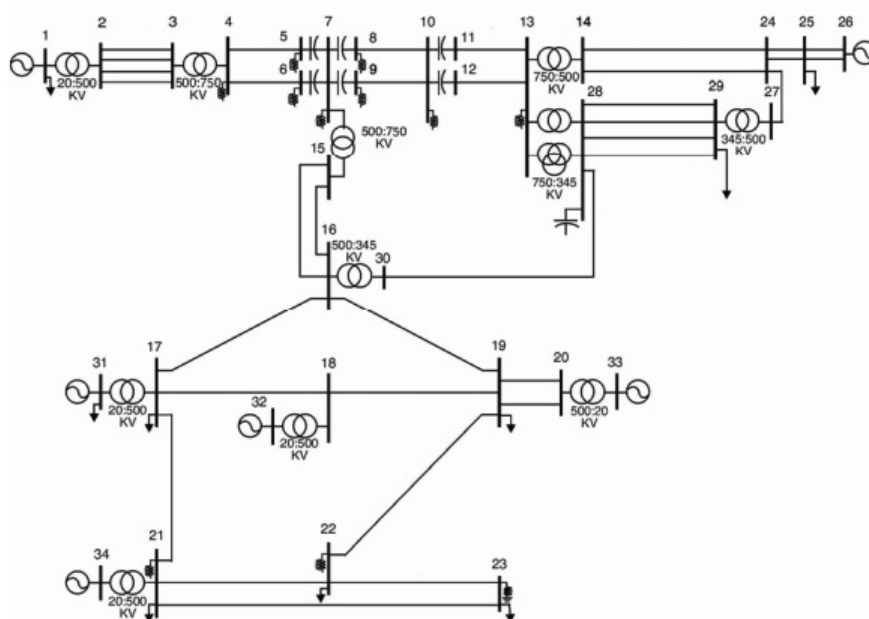
Figura 15: Índice de influência de cada esgotamento sobre o sistema

4.5  
Rede de exemplo: CEPEL-34

Na Figura 16 é mostrado o diagrama unifilar de um sistema desenvolvido no CEPEL, baseado em um equivalente do sistema S/SE brasileiro. Ele tem 34 barras, 42 linhas, 12 transformadores e 5 geradores. Os níveis de tensão

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1612966/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1612966/CA



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1612966/CA

## PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1612966/CA

## PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1612966/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1612966/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1612966/CA

Tabela 6: Ponto de operação e índices de estabilidade de tensão do sistema CEPEL-34 barras da Figura 16 no caso-base

#barra	tipo	v (pu)	$\theta(^{\circ})$	$P_G$ (MW)	$Q_G$ (MVar)	$M_0$ (pu)	$\beta_0(^{\circ})$
1	V	1,0300	4,1108	33,0042	11,3189	-3,9883	-8,2459
2	PQ	1,0118	-2,3268	0	0		
3	PQ	1,0105	-2,5521	0	0		
4	PQ	0,9514	-5,7850	0	0	1,0000	152,3970
5	PQ	0,9159	-25,9965	0	0	1,0000	-179,71722
6	PQ	0,9156	-25,9247	0	0	1,0000	-179,71241
7	PQ	0,9321	-17,7814	0	0	1,0000	172,2844
8	PQ	0,9865	-4,3467	0	0	1,0000	-178,71062
9	PQ	0,9871	-4,3508	0	0	1,0000	-178,72803
10	PQ	0,9067	-31,8724	0	0	1,0000	176,5331
11	PQ	0,9213	-14,7393	0	0		
12	PQ	0,9217	-14,7384	0	0		
13	PQ	0,8824	-49,5400	0	0	1,0000	178,2071
14	PQ	0,9660	-55,5054	0	0		
15	PQ	0,8762	-12,7131	0	0		
16	PQ	0,8790	-12,3138	0	0		
17	PQ	0,9988	9,7031	0	0	0,9997	78,3917
18	PQ	1,0373	9,9157	0	0		
19	PQ	1,0497	5,3022	0	0	0,8844	102,0663
20	PQ	1,0522	5,6919	0	0		
21	PQ	1,0744	13,4825	0	0	0,9999	44,6701
22	PQ	1,0754	9,2998	0	0	0,9998	91,4454
23	PQ	1,0665	5,3529	0	0	0,8566	111,2067
24	PQ	1,0372	-63,1734	0	0		
25	PQ	1,0934	-65,4652	0	0	0,2690	178,3923
26	PV	1,1000	-64,6750	38,7900	13,6946	-1,7768	-130,33743
27	PQ	0,9906	-63,1638	0	0		
28	PQ	0,8691	-58,6522	0	0		
29	PQ	0,8785	-63,7493	0	0	0,0487	178,1545
30	PQ	0,9288	-16,5758	0	0		
31	V	1,0070	18,0065	13,2017	-1,4227	0,3977	8,5515
32	V	1,0580	16,5952	12,0015	4,1257	0,7264	52,9796
33	V	1,0590	12,5998	12,0015	4,7792	0,6235	43,0317
34	V $\theta$	1,0490	22,3000	14,4419	3,9050	0,4942	35,4243

Por último, vale ressaltar que as barras 2, 3, 11, 12, 14, 15, 16, 18, 20, 24, 27, 28 e 30 não tem avaliação de estabilidade de tensão por serem barras de passagem.

#### 4.5.2

##### Ordenação dos esgotamentos de controle de tensão e de geração de potência ativa por severidade

Na Tabela 8 reapresentam-se em ordem crescente os índices IIS, conforme explicado na Seção 4.2.2 e exibido na Tabela 7. Esse índice avalia as consequências do esgotamento sobre o sistema, levando em conta a importância relativa

Tabela 7: Índices de estabilidade de tensão do Sistema de 34 barras

Barra	II(%)									
	Q1	Q31	Q32	Q33	Q34	P1	P31	P32	P33	P34
1		<b>-74,79</b>	-21,42	-37,68	-7,09					5,42
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17	0,01	<b>-54957,10</b>	-0,02	-0,03	-0,01	-0,05				-0,0
18										
19	4,45	<b>-456,89</b>	-6,60	-19,06	-4,03	-15,86	-1,69	-1,45	-0,88	-7,74
20										
21		<b>-477489,12</b>				-0,02				-0,03
22		<b>-227030,55</b>		-0,01	-0,01	-0,02				-0,02
23	0,58	<b>-839,77</b>	-1,36	-4,01	-5,84	-5,86	-0,33	-0,24	-0,14	-8,92
24										
25	<b>-2161,70</b>	-110,97	-39,56	-64,45	-28,01	-29,35	11,41	5,18	1,80	13,90
27										
28										
29	<b>-4495,15</b>	-116,04	-53,26	-79,00	-39,54	-51,79	21,22	9,36	3,25	33,49
30										
31	89,47		-1647,56	<b>-2089,83</b>	-1400,83	316,04				-4,43
32	9,32	29,44		<b>-1278,76</b>	-211,71	-28,65	0,54			-13,40
33	26,56	49,53	<b>-1156,43</b>		-819,80	-101,30	5,45	1,98		-12,96
34	17,73	<b>-1201,96</b>	-108,51	-607,66		10,69	-5,50	-3,22	-1,51	
IIS(%)	-1240,1	<b>-595422,1</b>	-293,3	-459,9	-256,5	-12,7	5,3	1,9	0,3	-3,5

dada à barra em esgotamento.

Assim, observa-se que o pior evento do ponto de vista de estabilidade de tensão para o sistema CEPEL-34 é a perda de capacidade de geração de potência reativa na barra 31.

Tabela 8: Índice de influência de cada esgotamento sobre o sistema

Esgotamento	IIS(%)	Esgotamento	IIS(%)
Q1	-1240,1	P1	-12,7
Q31	<b>-595422,1</b>	P31	5,3
Q32	-293,3	P32	1,9
Q33	-459,9	P33	0,3
Q34	-256,5	P34	-3,5

## 4.6

### Resumo

Para um dado ponto de operação de um sistema elétrico há índices de estabilidade de tensão  $M$  (margem de potência) e  $\beta$  associados. Contudo,  $M$  e  $\beta$  variam se houver esgotamento de algum dos recursos do sistema, o que pode ser mensurado pelo índice de influência do esgotamento sobre cada barra – II. Esse índice relaciona a margem de potência da barra nos casos pré-esgotamento e pós-esgotamento. Além disso, é apresentado o índice de influência do esgotamento sobre o sistema –IIS–, que determina como o sistema é afetado por cada esgotamento.

Com II foi possível determinar os esgotamentos mais influentes sobre a margem de potência de qualquer barra da rede, seja ele de perda de controle de tensão ou de máxima potência ativa gerada. Já com IIS foi possível ordenar os esgotamentos de tensão e de geração de potência ativa por severidade, considerando os efeitos sobre todo o sistema.

## 5

## Ações de controle preventivas

### 5.1

#### Introdução

Na Seção 4.5.1, percebeu-se que as barras possuem margem de estabilidade de tensão diferentes umas das outras. Portanto, é possível eleger uma barra crítica, ou seja, uma barra que tem margem de potência mais baixa que as demais barras do sistema. Além disso, conforme exemplificado na Seção 4.5.2, a margem de potência das barras pode se tornar ainda menor em função da ocorrência de limitações. Nesses casos, o evento do esgotamento leva a índices de influência negativos.

A importância desse capítulo consiste na indicação de que grandeza deve ser alterada para que a melhora da estabilidade de tensão seja mais significativa. Nesse caso, parte-se do princípio de que a atuação deva ocorrer sobre a grandeza cujo esgotamento mais influencia a barra em análise. Ou seja, comparando-se o caso-base com o caso pós-esgotamento, são sugeridas ações de controle preventivas que melhorem as condições de estabilidade de tensão de uma dada barra do sistema.

Dessa forma a margem de potência do caso pós-controle seria maior do que se as ações não fossem tomadas, ou em outras palavras, maiores que as margens de potência do caso-base.

As etapas dos procedimentos realizados neste capítulo serão:

- Cálculo do fluxo de potência
- Cálculo dos índices de estabilidade de tensão:  $M$  e  $\beta$
- Simulação de esgotamentos de recursos
- Cálculo dos índices relativos a esgotamentos de recursos: II
- Cálculo das ações de controle preventivas
- Execução das ações de controle preventivas (atuando sobre a tensão ou sobre a geração de potência ativa)
- Análise do efeito das ações de controle preventivas

## 5.2

### Ações de controle preventivas de potência reativa

Se um esgotamento de geração de potência reativa em uma barra  $b$  influencia a barra  $i$ , então seria possível manipular  $Q_{Gb}$  para promover melhoras em  $M_i$  (margem de potência da barra  $i$ ). Adicionalmente, espera-se que quanto maior for  $II_i^{Qb}$  (índice de influência do esgotamento de geração de potência reativa da barra  $b$  sobre a margem da barra  $i$ ), maior será o efeito da variação de  $Q_{Gb}$  sobre  $M_i$ . Desse modo, uma ação de controle preventiva baseada nos efeitos do esgotamento de geração de potência reativa sobre uma barra  $i$  qualquer, deveria mudar o ponto de operação do sistema de tal modo que a margem  $M_i$  varie. Contudo, a ação de controle não pode usar diretamente  $Q_{Gb}$  (pois essa grandeza não é explicitada no algoritmo de fluxo de potência). Assim, altera-se o módulo de tensão  $v_b$  na mesma barra.

### 5.2.1

#### Barras de carga

Considerando o sistema elétrico CEPEL-34 apresentado na Seção 4.5, serão descritas ações de controle preventivas baseadas nos efeitos de esgotamentos que afetem a barra 29, pois essa barra é a barra de carga que apresenta a menor margem de potência no caso-base:  $M = 4,87\%$ . Pela Tabela 7, sabe-se que o esgotamento que mais afeta os índices de estabilidade de tensão da barra 29 é a de potência reativa gerada na barra 1 ( $Q_{G1}$ ), com  $II_{29}^{Q1} = -4495,15\%$ .

Assim, as ações de controle preventivas para incrementar a margem da barra 29 envolvem mudar o ponto de operação do sistema de tal modo que  $Q_{G1}$  sofra uma pequena variação em torno do ponto de operação do caso-base. Contudo, a ação de controle não pode usar diretamente  $Q_{G1}$ . Assim, altera-se o módulo de tensão  $v_1$ .

As ações de controle preventivas implementadas são descritas na Tabela 9, onde notam-se as variações de tensão na barra 1 e suas consequências sobre a estabilidade de tensão da barra 29. A ação de controle preventiva identificada como "0" corresponde ao sistema sem ação de controle preventiva (caso-base). Além disso, nas ações de controle preventivas em que não há solução convergente para o problema de fluxo de potência, os índices de estabilidade são indicados como "-".

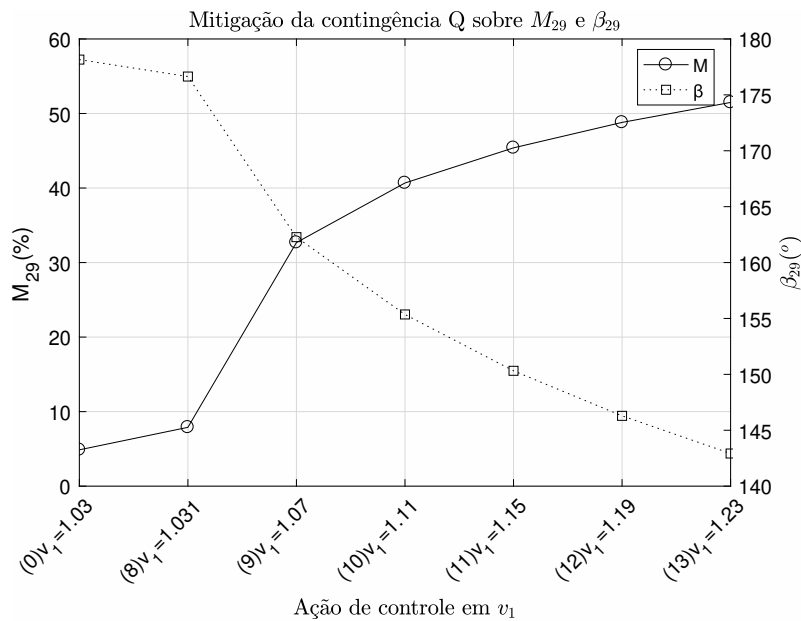
Na Figura 17, é possível ver o efeito da ação de controle preventiva sobre a margem da barra 29 –  $M_{29}$ . Para isso, o eixo vertical esquerdo representa o valor da margem de potência da barra 29, enquanto no eixo horizontal são listadas diferentes  $v_1$ , sendo cada uma delas associada a uma ação de controle preventiva ou ao caso-base. Nota-se que à medida que  $v_1$  aumenta,



Tabela 9: Ações de controle preventivas sobre  $v_1$  implementadas para incrementar a margem da barra 29

Ação	$v_1$	$Q_{G1}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^\circ)$
1	0,830	-	-	-
2	0,870	-	-	-
3	0,910	-	-	-
4	0,950	-	-	-
5	0,990	-	-	-
6	1,029	-	-	-
0	1,030	11,32	4,87	178,15
8	1,031	10,74	7,89	176,64
9	1,070	6,80	32,68	162,27
10	1,110	5,96	40,68	155,36
11	1,150	5,92	45,39	150,32
12	1,190	6,35	48,80	146,29
13	1,230	7,12	51,48	142,92

a margem  $M_{29}$  aumenta também. Análise semelhante pode ser feita com  $\beta_{29}$ , cujos valores são representados no eixo vertical direito. Nota-se que à medida que  $v_1$  aumenta,  $\beta_{29}$  é reduzido.

Figura 17: Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo  $\beta$ 

Em outras palavras, pode-se dizer que o objetivo das ações de controle preventivas, que era distanciar a margem da barra 29 do ponto crítico, foi alcançado. Ou seja, as margens da barra 29 são maiores nos casos pós-controle – em que houve ação de controle preventiva correspondente ao aumento de  $v_1$  – do que naquele sem ação de controle preventiva, o caso-base.

De acordo com a Tabela 10 ( $II_{29}$  disponíveis na Tabela 7 e reproduzidos na Tabela 10), sabe-se que os esgotamentos de potência reativa gerada nas barras 31, 32, 33 e 34 ( $Q_{G31}$ ,  $Q_{G23}$ ,  $Q_{G33}$  e  $Q_{G34}$ ) também afetam negativamente a estabilidade de tensão da barra 29, pois os índices de influência desses esgotamentos são negativos. Assim, devem-se analisar as variações de tensão nas barras 31, 32, 33 e 34 e suas consequências sobre a estabilidade de tensão da barra 29.

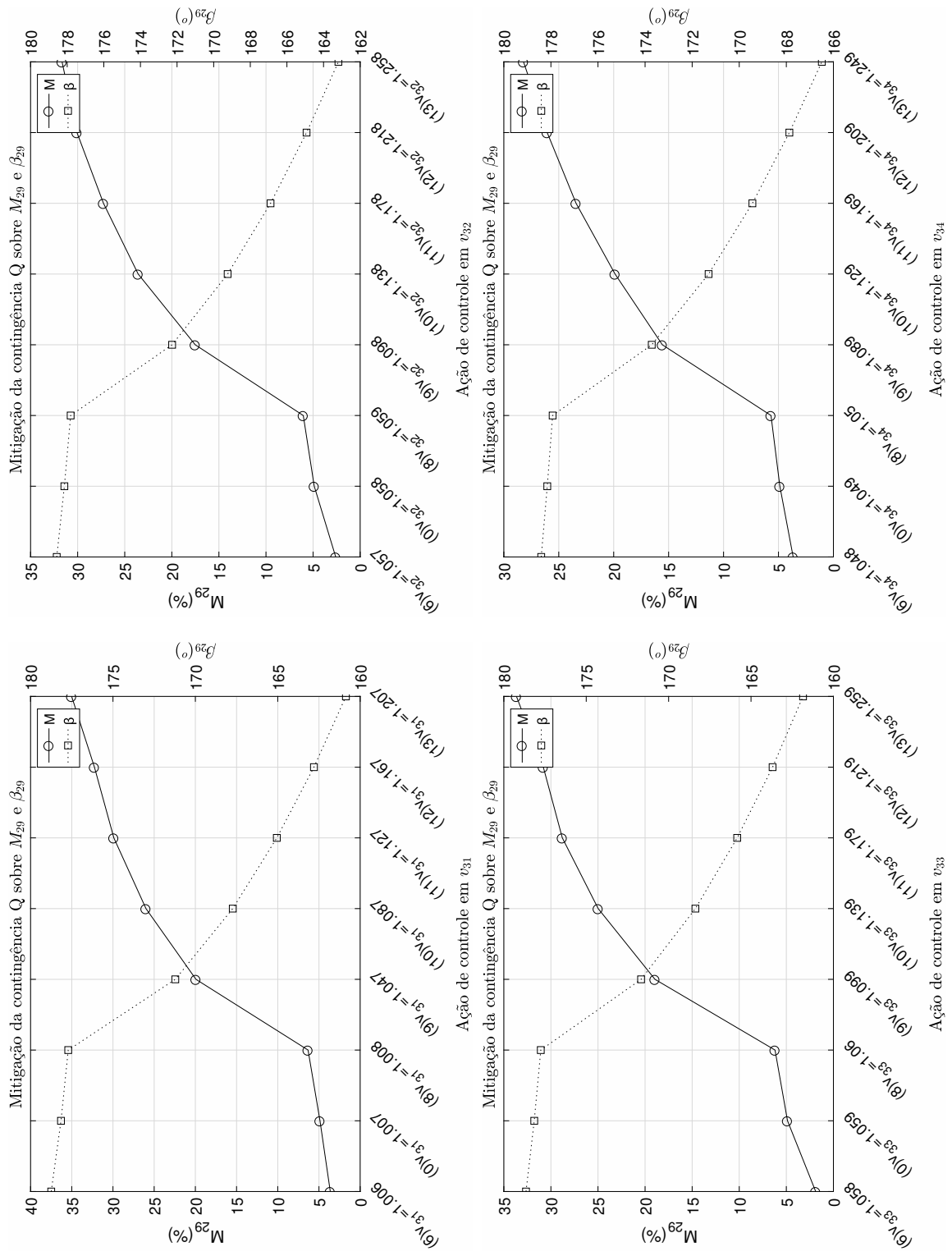
Tabela 10: Índices de influência em ordem decrescente conforme dados da Tabela 7

$II_{29}$		$II_1$		$II_{31}$		$II_{32}$		$II_{33}$		$II_{34}$	
Q1	-4495,15	Q31	-74,79	Q33	-2089,83	Q33	-1278,76	Q32	-1156,43	Q31	-1201,96
Q31	-116,04	Q33	-37,68	Q32	-1647,56	Q34	-211,71	Q34	-819,80	Q33	-607,66
Q33	-79,00	Q32	-21,42	Q34	-1400,83	P1	-28,65	P1	-101,30	Q32	-108,51
Q32	-53,26	Q34	-7,09	P34	-4,43	P34	-13,40	P34	-12,96	P31	-5,50
P1	-51,79	P31	0,00	P32	0,00	Q32	0,00	Q33	0,00	P32	-3,22
Q34	-39,54	P32	0,00	P33	0,00	P32	0,00	P33	0,00	P33	-1,51
P33	3,25	P33	0,00	Q31	0,00	P33	0,00	P32	1,98	Q34	0,00
P32	9,36	Q1	0,00	P31	0,00	P31	0,54	P31	5,45	P34	0,00
P31	21,22	P1	0,00	Q1	89,47	Q1	9,32	Q1	26,56	P1	10,69
P34	33,49	P34	5,42	P1	316,04	Q31	29,44	Q31	49,53	Q1	17,73

Na Tabela 11 é possível observar que à medida que a tensão de cada uma das barras em questão aumenta, a margem  $M_{29}$  aumenta também. Também pode-se verificar essa tendência na Figura 18.

Tabela 11: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $v_{31}$ ,  $v_{33}$ ,  $v_{32}$ , e  $v_{34}$  para incrementar a margem da barra 29

Ação	$v_{31}$	$Q_{G31}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(\circ)$	Ação	$v_{32}$	$Q_{G32}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(\circ)$
1	0,807	-	-	-	1	0,858	-	-	-
2	0,847	-	-	-	2	0,898	-	-	-
3	0,887	-	-	-	3	0,938	-	-	-
4	0,927	-	-	-	4	0,978	-	-	-
5	0,967	-	-	-	5	1,018	-	-	-
6	1,006	-1,41	3,63	178,75	6	1,057	4,10	2,60	178,57
0	1,007	-1,42	4,87	178,15	0	1,058	4,13	4,87	178,15
8	1,008	-1,42	6,32	177,71	8	1,059	4,16	6,04	177,81
9	1,047	-0,19	19,93	171,22	9	1,098	6,14	17,51	172,27
10	1,087	1,54	25,99	167,73	10	1,138	8,55	23,57	169,24
11	1,127	3,51	29,89	165,06	11	1,178	11,18	27,26	166,89
12	1,167	5,67	32,25	162,81	12	1,218	14,02	30,07	164,93
13	1,207	8,02	35,01	160,86	13	1,258	17,05	31,66	163,19
Ação	$v_{33}$	$Q_{G33}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(\circ)$	Ação	$v_{34}$	$Q_{G34}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(\circ)$
1	0,859	-	-	-	1	0,849	-	-	-
2	0,899	-	-	-	2	0,889	-	-	-
3	0,939	-	-	-	3	0,929	-	-	-
4	0,979	-	-	-	4	0,969	-	-	-
5	1,019	-	-	-	5	1,009	-	-	-
6	1,058	4,77	1,88	178,65	6	1,048	3,88	3,66	178,41
0	1,059	4,78	4,87	178,15	0	1,049	3,90	4,87	178,15
8	1,060	4,80	6,20	177,76	8	1,050	3,93	5,68	177,93
9	1,099	6,50	18,95	171,67	9	1,089	5,20	15,57	173,72
10	1,139	8,68	24,98	168,38	10	1,129	6,73	19,87	171,30
11	1,179	11,08	28,79	165,84	11	1,169	8,41	23,43	169,44
12	1,219	13,68	30,81	163,69	12	1,209	10,23	26,05	167,87
13	1,259	16,47	33,66	161,84	13	1,249	12,18	28,21	166,49

Figura 18: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $v_{31}$ ,  $v_{32}$ ,  $v_{33}$ , e  $v_{34}$  para incrementar a margem da barra 29

Vale comparar as ações de número 8 nas Tabelas 9 e 11, pois nelas há aumento de 0,001 pu nas tensões especificadas das barras 1, 31, 32, 33 e 34 em relação ao sistema elétrico sem ação de controle preventiva (ou ação de número 0). Apesar do incremento da tensão especificada aplicado em cada barra ser o mesmo, os índices de estabilidade de tensão melhoraram mais para a barra 1 do que para a barra 34, por exemplo. De forma geral, nota-se que os índices de estabilidade de tensão melhoram mais para barras cujo índice de influência do esgotamento de geração de potência reativa sobre a barra 29 é mais significativo. Ou seja,  $M_{29}$  é maior quando há incremento de 0,001 pu em  $v_1$  do que quando há incremento de 0,001 pu em  $v_{31}$ . De forma análoga,  $M_{29}$  é maior quando há incremento de 0,001 pu em  $v_{31}$  do que quando há incremento de 0,001 pu em  $v_{33}$ . E os efeitos do incremento de  $v_{33}$  prevalecem sobre  $v_{32}$ , que por sua vez traz resultados melhores que o aumento de  $v_{34}$ .

Esse comportamento pode ser verificado também na Figura 19, na qual são apresentadas as margens de potência da barra 29 em função do II das barras *swing* quando há incremento de 0,001 pu nessas barras.

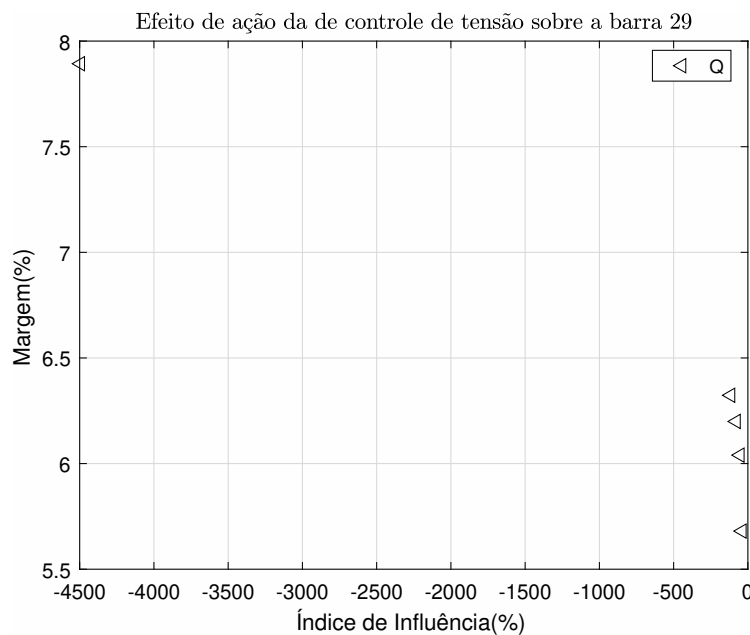


Figura 19: Margem de potência da barra 29 em função do II das barras *swing* quando há incremento de 0,001 pu na tensão dessas barras

Tais resultados corroboram a existência de uma relação entre os índices de influência sobre a barra 29 e a margem de potência dessa barra. Ou, em outras palavras, quanto mais significativa a influência da limitação de geração de potência reativa de uma barra  $b$  sobre a barra 29  $-II_{29}^{Qb}$ , maior é o efeito da variação de  $v_b$  sobre  $M_{29}$ .

### 5.2.2

#### Barras de geração

Considerando o sistema elétrico CEPEL-34 apresentado na Seção 4.5, serão descritas ações de controle preventivas para atenuar efeitos de esgotamentos que afetem a barra 1, pois essa barra de geração apresenta a menor margem de potência no caso-base:  $M = -398,83\%$ . Pela Tabela 10, sabe-se que o esgotamento que mais afeta a estabilidade de tensão da barra 1 é o de potência reativa gerada na barra 31 ( $Q_{G31}$ ), com  $II_1^{Q31} = -74,79\%$ . Assim como foi feito no caso da barra 29 (Seção 5.2.1), o natural seria que as ações de controle preventivas para incrementar a margem da barra 1 envolvessem mudar o ponto de operação do sistema de tal modo que  $Q_{G31}$  sofresse uma pequena variação em torno do ponto de operação do caso-base. Contudo, a ação de controle preventiva não poderia usar diretamente  $Q_{G31}$ . Assim, alterar-se-ia o módulo de tensão  $v_{31}$ . De fato isso será feito, porém a barra 1 é uma barra de geração. Então, além de todas as ações de controle preventivas utilizadas para incremento da margem de potência da barra 29 (barra de carga) ainda resta a alternativa de alterar a tensão na própria barra em análise, ou seja, nesse caso, alterar-se o módulo de tensão  $v_1$ . Essa será a primeira estratégia de controle explorada.

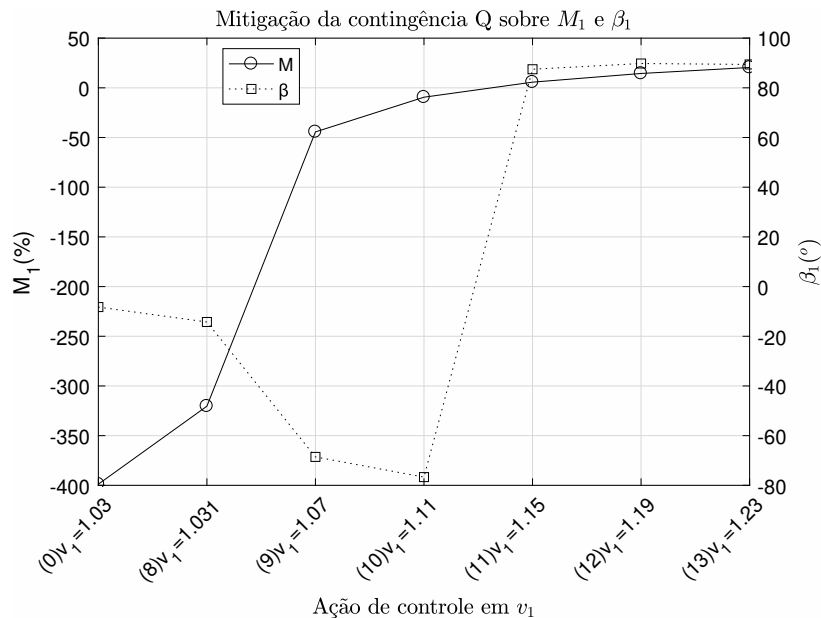
As ações de controle preventivas implementadas são descritas na Tabela 12, onde notam-se as variações de tensão na barra 1 e suas consequências sobre a estabilidade de tensão da barra 1. A ação de controle preventiva identificada como "0" corresponde ao sistema sem ação de controle preventiva (caso-base). Além disso, nas ações de controle preventivas em que não há solução convergente para o problema de fluxo de potência, os índices de estabilidade são indicados como "-".

Na Figura 20, é possível ver o efeito da ação de controle preventivas sobre a margem da barra 1 –  $M_1$ . Para isso, o eixo vertical esquerdo representa o valor da margem de potência da barra 1 enquanto no eixo horizontal são listadas diferentes  $v_1$ , sendo cada uma delas associada a uma ação de controle ou ao caso-base. Nota-se que à medida que  $v_1$  aumenta, a margem  $M_1$  aumenta também. Análise semelhante pode ser feita com  $\beta_1$ , cujos valores são representados no eixo vertical direito. Nota-se que à medida que  $v_1$  aumenta,  $\beta_1$  se afasta do valor crítico de  $0^\circ$ .

Em outras palavras, pode-se dizer que o objetivo das ações de controle preventivas, que era elevar a margem da barra 1 para valores positivos, foi alcançado. Assim, as margens da barra 1, no caso, são maiores nos casos pós-controle – em que houve ação de controle preventiva correspondente ao aumento de  $v_1$  – do que naquele sem ação de controle, o caso-base.

Tabela 12: Ações de controle preventivas sobre  $v_1$  implementadas para incrementar a margem da barra 1

Ação	$v_1$	$Q_{G1}$	$M_1(\%)$	$\beta_1(^{\circ})$
1	0,830	-	-	-
2	0,870	-	-	-
3	0,910	-	-	-
4	0,950	-	-	-
5	0,990	-	-	-
6	1,029	-	-	-
0	1,030	11,32	-398,83	-8,25
8	1,031	10,74	-320,38	-14,25
9	1,070	6,80	-44,36	-68,56
10	1,110	5,96	-9,44	-76,69
11	1,150	5,92	5,70	87,48
12	1,190	6,35	14,44	89,78
13	1,230	7,12	20,46	89,41

Figura 20: Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo  $\beta$  da barra 1

De acordo com a Tabela 10, sabe-se que os esgotamentos de potência reativa gerada nas barras 31, 32, 33 e 34 ( $Q_{G31}$ ,  $Q_{G32}$ ,  $Q_{G33}$  e  $Q_{G34}$ ) afetam negativamente a estabilidade de tensão da barra 1, pois os índices de influência desses esgotamentos são negativos. Assim, devem-se analisar as variações de tensão nas barras 31, 32, 33 e 34 e suas consequências sobre a estabilidade de tensão da barra 1.

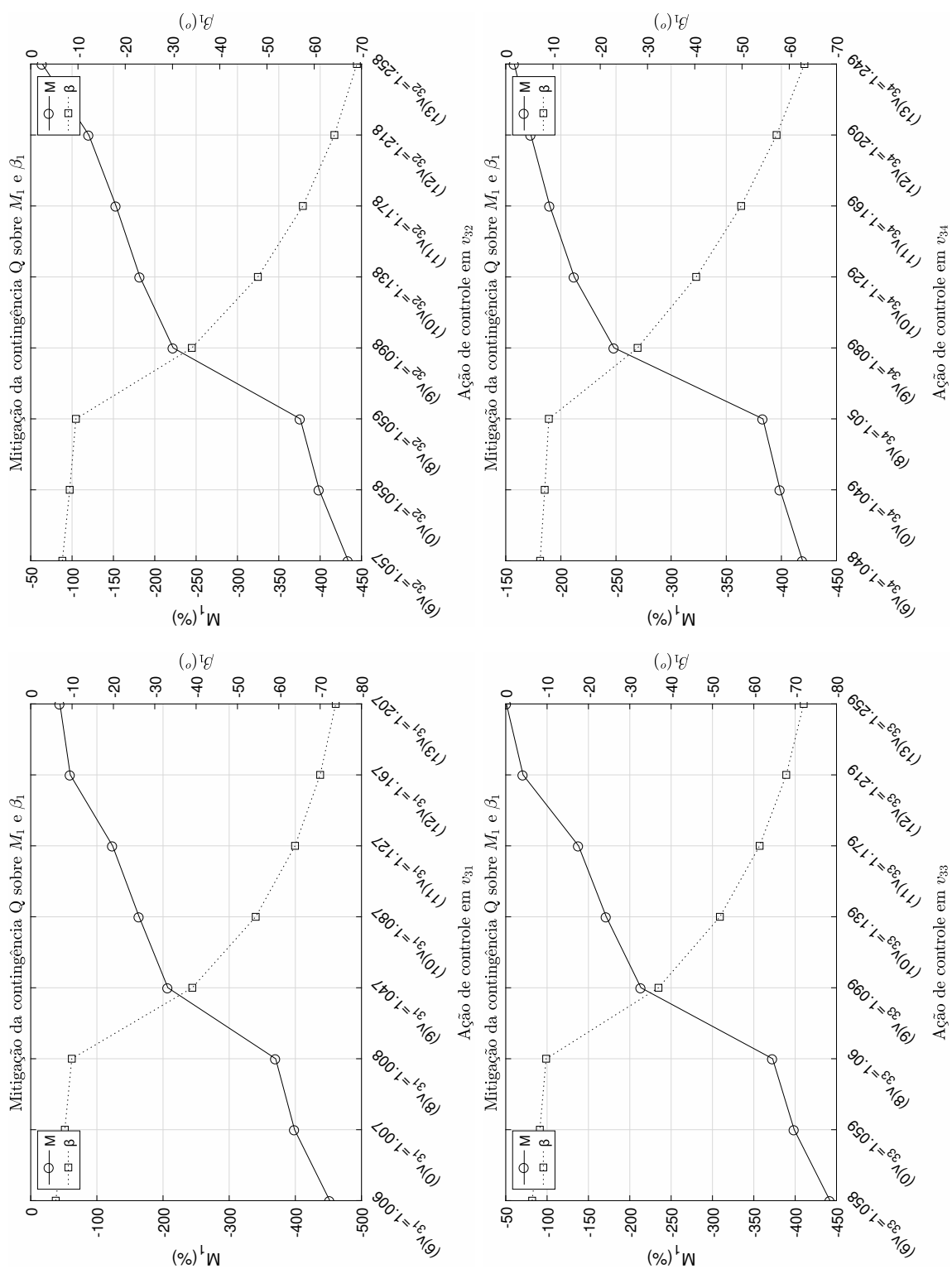
Na Tabela 13, é possível observar que à medida que a tensão de cada uma das barras em questão aumenta, a margem  $M_1$  aumenta também. Também

pode-se verificar essa tendência na Figura 21.

Tabela 13: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $v_{31}$ ,  $v_{33}$ ,  $v_{32}$ , e  $v_{34}$  para incrementar a margem da barra 1

Ação	$v_{31}$	$Q_{G31}$	$M_1(\%)$	$\beta_1(^{\circ})$	Ação	$v_{32}$	$Q_{G32}$	$M_1(\%)$	$\beta_1(^{\circ})$
1	0,807	-	-	-	1	0,858	-	-	-
2	0,847	-	-	-	2	0,898	-	-	-
3	0,887	-	-	-	3	0,938	-	-	-
4	0,927	-	-	-	4	0,978	-	-	-
5	0,967	-	-	-	5	1,018	-	-	-
6	1,006	-1,41	-452,06	-6,05	6	1,057	4,10	-433,89	-6,69
0	1,007	-1,42	-398,83	-8,25	0	1,058	4,13	-398,83	-8,25
8	1,008	-1,42	-370,24	-9,94	8	1,059	4,16	-375,94	-9,56
9	1,047	-0,19	-207,34	-39,07	9	1,098	6,14	-222,25	-34,09
10	1,087	1,54	-163,86	-54,42	10	1,138	8,55	-182,08	-48,07
11	1,127	3,51	-123,77	-63,93	11	1,178	11,18	-153,18	-57,59
12	1,167	5,67	-59,79	-70,00	12	1,218	14,02	-120,26	-64,26
13	1,207	8,02	-44,12	-73,77	13	1,258	17,05	-63,99	-69,02
Ação	$v_{33}$	$Q_{G33}$	$M_1(\%)$	$\beta_1(^{\circ})$	Ação	$v_{34}$	$Q_{G34}$	$M_1(\%)$	$\beta_1(^{\circ})$
1	0,859	-	-	-	1	0,849	-	-	-
2	0,899	-	-	-	2	0,889	-	-	-
3	0,939	-	-	-	3	0,929	-	-	-
4	0,979	-	-	-	4	0,969	-	-	-
5	1,019	-	-	-	5	1,009	-	-	-
6	1,058	4,77	-442,12	-6,39	6	1,048	3,88	-419,22	-7,28
0	1,059	4,78	-398,83	-8,25	0	1,049	3,90	-398,83	-8,25
8	1,060	4,80	-372,72	-9,77	8	1,050	3,93	-383,26	-9,12
9	1,099	6,50	-213,52	-36,94	9	1,089	5,20	-248,27	-27,90
10	1,139	8,68	-171,58	-51,79	10	1,129	6,73	-212,14	-40,29
11	1,179	11,08	-138,04	-61,40	11	1,169	8,41	-189,96	-49,82
12	1,219	13,68	-70,96	-67,84	12	1,209	10,23	-172,82	-57,31
13	1,259	16,47	-50,84	-72,07	13	1,249	12,18	-157,79	-63,21



Figura 21: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $v_{31}$ ,  $v_{33}$ ,  $v_{32}$ , e  $v_{34}$  para incrementar a margem da barra 1

Vale comparar as ações de número 8 nas Tabelas 12 e 13, pois nelas há aumento de 0,001 pu nas tensões especificadas das barras 1, 31, 32, 33 e 34 em relação ao sistema elétrico sem ação de controle (ou ação de número 0).

Primeiramente, observa-se que  $M_1$  é maior quando há incremento de 0,001 pu em  $v_1$  do que quando há incremento de 0,001 pu em qualquer outra barra de geração. Isso significa que, para uma barra de geração, alterar a tensão na própria barra em análise, ou seja, nesse caso, alterar-se o módulo de tensão  $v_1$ , é a ação de controle preventiva que traz melhor resultado nos índices de estabilidade de tensão.

Em segundo lugar, na Tabela 13 nota-se que os índices de estabilidade de tensão melhoram mais para barras cujo índice de influência do esgotamento de geração de potência reativa sobre a barra 1 é mais significativo. Ou seja,  $M_1$  é maior quando há incremento de 0,001 pu em  $v_{31}$  do que quando há incremento de 0,001 pu em  $v_{33}$ . De forma análoga,  $M_1$  é maior quando há incremento de 0,001 pu em  $v_{32}$  do que quando há incremento de 0,001 pu em  $v_{34}$ . Tais resultados corroboram a existência de uma relação entre os índices de influência sobre a barra 1 e a margem de potência dessa barra. Ou, em outras palavras, quanto mais significativa a influência da limitação de geração de potência reativa de uma barra  $b$  sobre a barra 1  $-II_1^{Qb}$ , maior é o efeito da variação de  $v_b$  sobre  $M_1$ .

A exceção à tendência de verificada ocorre para os casos em que há esgotamento de geração de potência reativa na própria barra 1. Nesse caso,  $II_1^{Q1}$  é nulo, mas ação de controle preventiva baseada no evento correspondente é a que apresenta melhores resultados de estabilidade de tensão. Portanto, aqui observa-se uma limitação de aplicação do método proposto. Entretanto, nos demais casos, o II é útil para indicar as melhores intervenções no sistema.

Esse comportamento pode ser verificado também na Figura 22, na qual são apresentados as margens de potência da barra 1 em função do II das barras *swing* quando há incremento de 0,001 pu nessas barras.

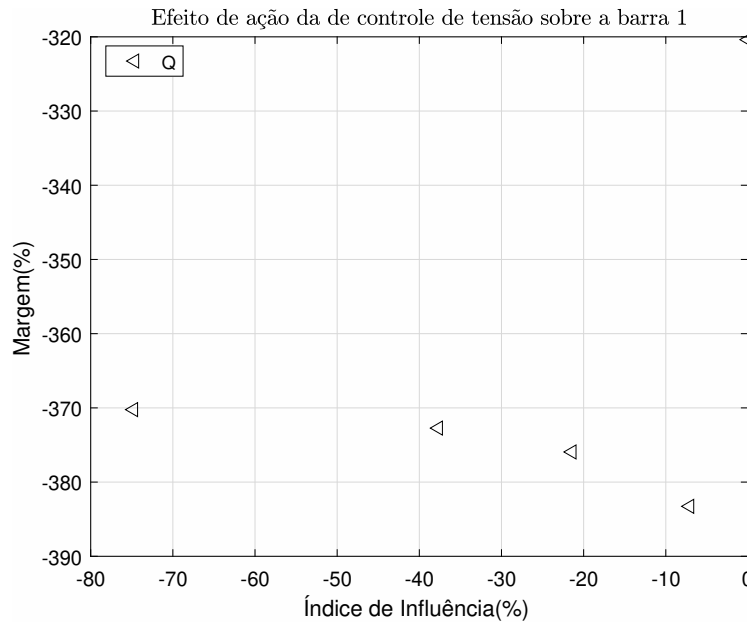


Figura 22: Margem de potência da barra 1 em função do II da própria barra 1 e das barras *swing* quando há incremento de 0,001 pu na tensão dessas barras

### 5.3

#### Ações de controle preventivas de potência ativa

Ações de controle preventivas baseadas em geração de potência ativa tem uma particularidade, pois esse tipo de ação de controle deve manter a potência total gerada no sistema elétrico. Então, não é possível modificar parâmetros apenas em uma barra. Assim, cada ação de controle preventiva é na verdade um conjunto de intervenções coordenadas.

#### 5.3.1

##### Barras de carga

Se um esgotamento de geração de potência ativa em uma barra  $b$  influencia as condições de estabilidade de tensão da barra  $i$ , então seria possível se manipular  $P_{Gb}$  para promover melhoras em  $M_i$  (margem de potência da barra  $i$ ). Adicionalmente, espera-se que, quanto maior for  $II_i^{Pb}$  (índice de influência do esgotamento de geração de potência ativa na barra  $b$  sobre a margem da barra  $i$ ), maior será o efeito da variação de  $P_{Gb}$  sobre  $M_i$ . Desse modo, uma ação de controle preventiva baseada nos efeitos do esgotamento de geração de potência ativa sobre uma barra  $i$  qualquer, deveria mudar o ponto de operação do sistema de tal modo que a margem  $M_i$  varie.

Considerando o sistema elétrico CEPEL-34 apresentado na Seção 4.5, serão descritas ações de controle preventiva baseadas nos efeitos de esgotamentos que afetem a barra 29, pois essa é a barra de carga que apresenta a menor margem de potência no caso-base:  $M = 4,87\%$ . Pela Tabela 10, sabe-se

que o esgotamento de potência ativa que mais afeta a estabilidade de tensão da barra 29 é o de potência gerada na barra 1 ( $P_{G1}$ ), com  $II_{29}^{P1} = -51,79\%$ .

Assim, as ações de controle preventivas da barra 29 envolvem mudar o ponto de operação do sistema de tal modo que  $P_{G1}$  sofra uma pequena variação em torno do ponto de operação do caso-base. Contudo, para que a geração de potência ativa total do sistema não se altere, outras barras devem compensar as variações de  $P_{G1}$ . Neste caso, sabe-se que  $II_{29}^{P1}$  tem sinal oposto a  $II_{29}^{P31}$ ,  $II_{29}^{P32}$ ,  $II_{29}^{P33}$  e  $II_{29}^{P34}$ . Portanto, as gerações de potência ativa nas barras 31, 32, 33 e 34 compensarão as variações de  $P_{G1}$ .

De forma geral, a alocação das variações de potência ativa é feita em barras agrupadas em dois conjuntos:  $\Omega_E$  e  $\Omega_R$ . No conjunto  $\Omega_E$ , formado por  $N_e$  elementos, estão todas as barras  $e$ , de tal modo que  $II_i^{Pe}$  tenha o mesmo sinal que o índice de influência do esgotamento de geração de potência ativa mais significativo para a barra  $i$ . Ou seja,  $\Omega_E$  é composto pela barra cujo esgotamento é mais significativo e todas aquelas cujo esgotamento da capacidade de geração leva a índices de influência com o mesmo sinal. Já em  $\Omega_R$  há  $N_r$  elementos e estão contidas as barras cujas esgotamentos relacionados à potência ativa resultam em índices de influência com sinal oposto às do grupo  $\Omega_E$ .

Em outras palavras,  $\Omega_E$  é o conjunto formado por todas as barras  $e$ , de tal modo que  $II_i^{Pe}$  tenha o mesmo sinal que o índice de influência do esgotamento de geração de potência ativa mais significativo para a barra  $i$ . E  $\Omega_R$  é o conjunto formado por todas as demais barras geradoras  $r$ .

Após essa separação entre barras cujos esgotamentos de geração de potência ativa geram índices de influência positivos e negativos, é possível realizar a alocação das variações de potência ativa. Assim, se as gerações ativas das barras do conjunto  $\Omega_E$  são incrementadas, as do conjunto  $\Omega_R$  são decrementadas e vice-versa. Por último, se todos os elementos de  $\Omega_E$  ou de  $\Omega_R$  tem índices de influência nulos, a variação de geração de potência ativa proposta é compartilhada igualmente entre os elementos.

As ações de controle preventivas propostas são descritas na Tabela 14, onde notam-se as variações da potência ativa gerada nas barras 1, 31, 32, 33 e 34. Essas variações são calculadas mantendo a proporcionalidade entre essas variações e seus respectivos índices de influência, conforme (5.1):

$$\begin{aligned}
\Delta P_{Ga} &= \frac{II_i^{Pa}}{\sum_e II_i^{Pe}} \times \sum_e \Delta P_{Ge} & \text{se } II_i^{Pe} \neq 0 & \quad a, e \in \Omega_E \\
\Delta P_{Ga} &= \frac{1}{N_e} \times \sum_e \Delta P_{Ge} & \text{se } II_i^{Pe} = 0 & \quad a, e \in \Omega_E \\
\Delta P_{Gb} &= \frac{II_i^{Pb}}{\sum_e II_i^{Pr}} \times \sum_e \Delta P_{Gr} & \text{se } II_i^{Pr} \neq 0 & \quad a, r \in \Omega_R \\
\Delta P_{Gb} &= \frac{1}{N_r} \times \sum_e \Delta P_{Gr} & \text{se } II_i^{Pr} = 0 & \quad a, r \in \Omega_R
\end{aligned} \tag{5.1}$$

Considere-se o caso  $i = 29$  para o sistema CEPEL-34. Como o esgotamento de geração de potência ativa mais significativo para a barra 29 é P1 e  $II_{29}^{P1} < 0$ , então o conjunto  $\Omega_E$  é formado por todas as barras  $e$  de tal modo que  $II_i^{Pe} < 0$  e  $\Omega_E = \{1\}$ . Neste caso,  $i = 29$ ,  $II_i^{Pr} \geq 0$  e  $\Omega_R = \{31, 32, 33, 34\}$ . Nota-se então que, a medida que  $P_{G1}$  é elevada,  $P_{G31}$ ,  $P_{G32}$ ,  $P_{G33}$  e  $P_{G34}$  são reduzidas de tal forma que o total de incrementos e decrementos de geração de potência ativo seja nulo.

Tabela 14: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $P_{G1}$ ,  $P_{G31}$ ,  $P_{G33}$ ,  $P_{G32}$ ,  $P_{G33}$  e  $P_{G34}$  para incrementar a margem da barra 29

Ação	$P_1$	$P_{31}$	$P_{32}$	$P_{33}$	$P_{34}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^\circ)$
1	2300	1635	1339	1248	1941	-	-
2	2500	1572	1311	1239	1842	-	-
3	2700	1509	1283	1229	1742	-	-
4	2900	1446	1256	1219	1643	-	-
5	3100	1383	1228	1210	1543	-	-
6	3295	1322	1201	1200	1446	3,07	178,51
0	3300	1320	1200	1200	1444	4,87	178,15
8	3305	1318	1199	1200	1442	5,90	177,86
9	3500	1257	1172	1190	1345	16,53	173,34
10	3700	1194	1144	1181	1245	19,72	171,58
11	3900	1131	1117	1171	1146	21,38	170,94
12	4100	1068	1089	1161	1046	21,12	171,21
13	4300	1005	1061	1152	947	17,94	172,55

Adicionalmente, na Tabela 14, a ação de controle preventiva identificada como "0" corresponde ao sistema sem ação de controle. Por último, nas ações de controle preventivas em que não há solução convergente para o problema de fluxo de potência, os índices de estabilidade são indicados como "-".

Na Figura 23, é possível ver o efeito da ação de controle preventiva sobre a margem da barra 29 –  $M_{29}$ . Para isso, o eixo vertical esquerdo representa a margem de potência da barra 29 enquanto no eixo horizontal são listadas diferentes  $P_{G1}$ , sendo cada uma delas associada a uma ação de controle preventiva ou ao caso-base, sem ação de controle. Nota-se que à medida que  $P_{G1}$  aumenta, a margem  $M_{29}$  aumenta também. Análise semelhante pode ser feita com  $\beta_{29}$ , cujos valores são representados no eixo vertical direito. Nota-se que, na proximidade do ponto de operação do caso-base à medida que  $P_{G1}$

aumenta,  $\beta_{29}$  é reduzido. Isso não ocorre para as ações de controle preventivas 12 e 13, indicando que os II têm validade somente perto do ponto de operação em que são calculados.

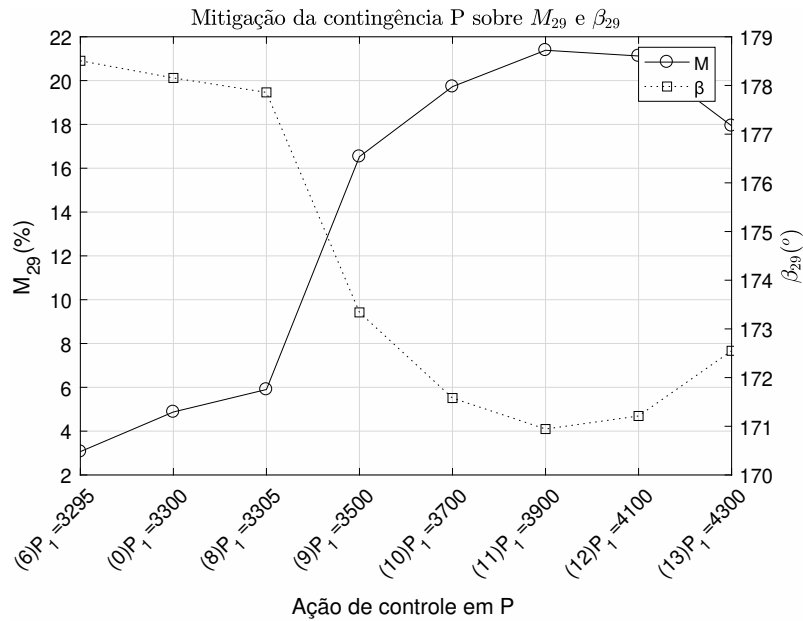


Figura 23: Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência  $M_{29}$  e sobre o ângulo  $\beta_{29}$

Em outras palavras, pode-se dizer que o objetivo das ações de controle preventivas, que era afastar a barra 29 do ponto crítico, foi alcançado. Ou seja, as margens da barra 29 são maiores nos casos pós-controle – em que houve ação de controle preventiva com elevação de  $P_{G1}$  – do que naquele sem ação de controle, o caso-base.

### 5.3.2 Barras de geração

Em uma barra de carga, como a barra 29, não há geração local de potência. Entretanto, agora deseja-se investigar os efeitos das ações de controle preventivas baseadas em geração de potência ativa sobre barras geradoras. Aqui, vale lembrar que a barra 26 não é considerada barra geradora por ser, na verdade, o equivalente de um sistema elétrico adjacente.

Tome-se como exemplo a barra 1. Pela Tabela 10, sabe-se que o esgotamento de potência ativa que mais afeta a estabilidade de tensão da barra 1 é o de potência gerada na barra 34 ( $P_{34}$ ). As ações de controle preventivas da barra 34 envolvem mudar o ponto de operação do sistema de tal modo que  $P_{G34}$  sofra uma pequena variação em torno do ponto de operação do caso-base. Contudo, para que a geração de potência ativa total do sistema não se

altere, outras barras devem compensar as variações de  $P_{G34}$  implementadas pelas ações de controle preventivas.

Neste caso, sabe-se que  $II_1^{P34}$  é positivo, enquanto  $II_1^{P1}$ ,  $II_1^{P31}$ ,  $II_1^{P32}$  e  $II_1^{P33}$  são nulos. Como não há esgotamentos atrelados a II negativos, os geradores com II nulos terão suas potência ativas alteradas. Portanto, as gerações de potência ativa nas barras 1, 31, 32 e 33 compensarão as variações de  $P_{G34}$  implementadas. Mais adiante, ainda nesta seção e na Seção 5.5.5, gerações em que os esgotamentos relacionados têm II nulos serão mantidas constantes.

As ações de controle preventivas implementadas são descritas na Tabela 15, onde notam-se as variações da potências ativas geradas. Conforme (5.1), tem-se:  $\Omega_E = \{34\}$  e  $\Omega_R = \{1, 31, 32, 33\}$ , e assim,  $P_{G1}$ ,  $P_{G31}$ ,  $P_{G32}$  e  $P_{G33}$  variam na mesma direção, que é oposta à variação de  $P_{G34}$ . A ação de controle identificada como "0" corresponde ao sistema sem ação de controle. Além disso, nas ações de controle preventivas em que não há solução convergente para o problema de fluxo de potência, os índices de estabilidade são indicados como "-". Nota-se que, na proximidade do caso-base, à medida que  $P_{G1}$  aumenta, a margem  $M_1$  aumenta e  $\beta_1$  é reduzido.

Tabela 15: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $P_{G1}$ ,  $P_{G31}$ ,  $P_{G32}$ ,  $P_{G33}$  e  $P_{G34}$  para incrementar a margem da barra 1

Ação	$P_1$	$P_{31}$	$P_{32}$	$P_{33}$	$P_{34}$	$M_1(\%)$	$\beta_1(^{\circ})$
1	3050	1070	950	950	2444	-	-
2	3100	1120	1000	1000	2244	-	-
3	3150	1170	1050	1050	2044	-	-
4	3200	1220	1100	1100	1844	-	-
5	3250	1270	1150	1150	1644	-	-
6	3299	1319	1199	1199	1449	-406,96	-7,84
0	3300	1320	1200	1200	1444	-398,83	-8,25
8	3301	1321	1201	1201	1439	-391,61	-8,64
9	3350	1370	1250	1250	1244	-293,28	-18,41
10	3400	1420	1300	1300	1044	-262,93	-24,87
11	3450	1470	1350	1350	844	-246,80	-29,84
12	3500	1520	1400	1400	644	-237,30	-33,72
13	3550	1570	1450	1450	444	-232,08	-36,63

Na Figura 24 nota-se o efeito da ação de controle preventiva sobre a margem da barra 1 –  $M_1$ . Observa-se que à medida que  $P_{G1}$  aumenta, a margem  $M_1$  aumenta também e que à medida que  $P_{G1}$  aumenta,  $\beta_1$  é reduzido.

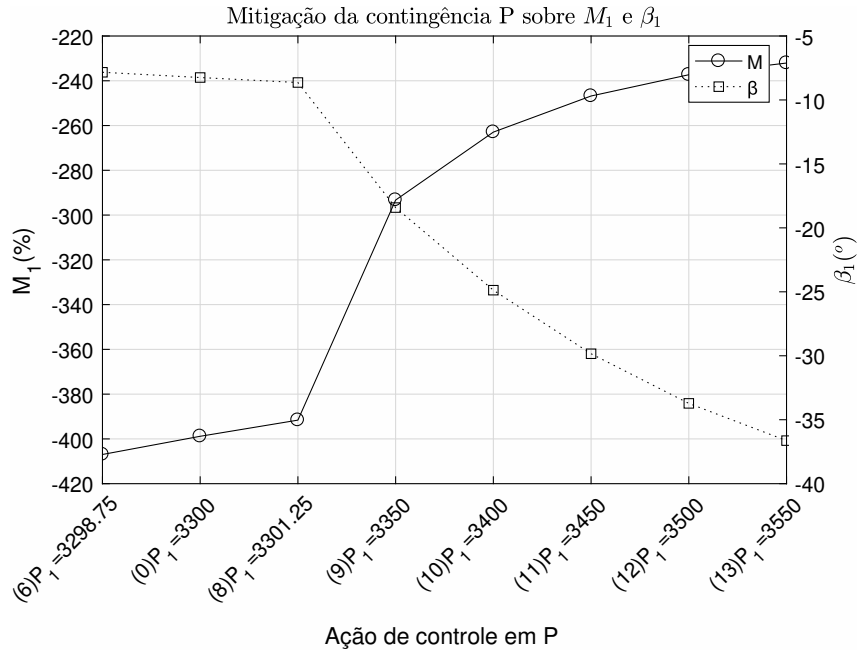


Figura 24: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $P_{G1}$ ,  $P_{G31}$ ,  $P_{G33}$ ,  $P_{G32}$ , e  $P_{G34}$  para incrementar a margem da barra 1

O procedimento para cálculo e implementação de ação de controle preventiva de potência ativa para barras de geração foi realizado com todas as demais barras geradoras da rede. As ações de controle implementadas são descritas na Tabela 16, onde notam-se as variações da potências ativas geradas.

Para o incremento da margem da barra 31,  $II_{31}^{P1} > 0$  e  $II_{31}^{P34} < 0$ . Pela Tabela 10 e por (5.1), tem-se  $P_{G1}$  aumentando enquanto  $P_{G34}$  é reduzido. Nota-se que como  $II_{31}^{P1}$  e  $II_{31}^{P34}$  têm sinais opostos e  $II_{31}^{P33} = II_{31}^{P32} = 0$ , as geração de potência ativa das barras 32 e 33 são mantidas constantes enquanto as das barras 1 e 34 se compensam mutuamente. Já para o incremento da margem da barra 32,  $P_{G1}$ ,  $P_{G33}$  e  $P_{G34}$  variam na mesma direção, que é oposta à variação de  $P_{G31}$ . Pelo mesmo motivo, para a barra 33,  $P_{G31}$  e  $P_{G32}$  decrescem enquanto  $P_{G1}$  e  $P_{G34}$  aumentam. Do mesmo modo, para a barra 34,  $P_{G1}$  cresce enquanto  $P_{G31}$ ,  $P_{G32}$  e  $P_{G33}$  decrescem.

Na Figura 25, notando-se o comportamento da barra 31 na proximidade do ponto de operação do caso-base, repara-se que à medida que  $P_{G1}$  aumenta, a margem  $M_{31}$  diminui ao mesmo tempo que  $\beta_{31}$  adquire valores negativos. Fato semelhante ocorre com a barra 34, pois  $M_{34}$  e  $\beta_{34}$  são reduzidos quando  $P_{G1}$  aumenta. Por outro lado, no comportamento da barra 32, na proximidade do ponto de operação do caso-base, repara-se que à medida que  $P_{G1}$  aumenta, a margem  $M_{32}$  e o ângulo  $\beta_{32}$  aumentam também. Fato semelhante ocorre com a barra 33, pois  $M_{33}$  e  $\beta_{33}$  são elevados quando  $P_{G1}$  aumenta.

Pode-se dizer que o objetivo das ações de controle preventivas, que era

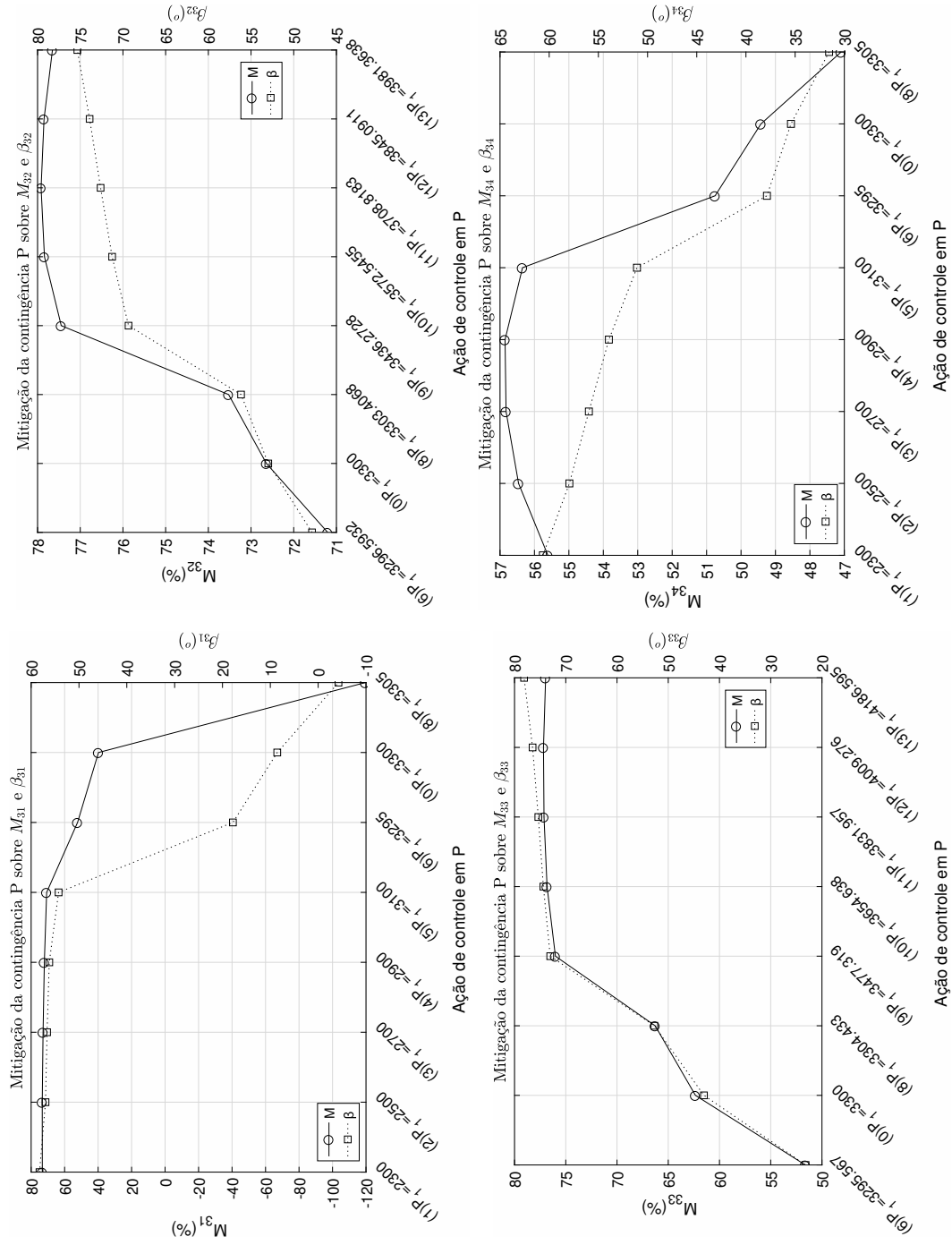


afastar as barras de geração do ponto crítico, foi alcançado. Assim, é possível escolher ações de controle preventivas de tal modo que as margens das barras de geração no caso-base são maiores nos casos com ação de controle do que naquele sem ação de controle.

Entretanto, não foi possível fazer com que  $M_1$  e  $\beta_1$  adquirissem valores positivos (Tabela 15 e Figura 24 )

Tabela 16: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $P_G$  para incrementar a margem das barras 31, 32, 33 e 34

Ação	$P_1$	$P_{31}$	$P_{32}$	$P_{33}$	$P_{34}$	$M_{31}(\%)$	$\beta_{31}(^\circ)$	Ação	$P_1$	$P_{31}$	$P_{32}$	$P_{33}$	$P_{34}$	$M_{32}(\%)$	$\beta_{32}(^\circ)$
1	2300	1320	1200	1200	2444	73,32	58,25	1	2619	2320	1200	1200	1125	-	-
2	2500	1320	1200	1200	2244	73,36	57,00	2	2755	2120	1200	1200	1189	-	-
3	2700	1320	1200	1200	2044	72,87	56,67	3	2891	1920	1200	1200	1253	-	-
4	2900	1320	1200	1200	1844	72,11	56,21	4	3027	1720	1200	1200	1317	-	-
5	3100	1320	1200	1200	1644	70,72	54,26	5	3164	1520	1200	1200	1380	-	-
6	3295	1320	1200	1200	1449	52,27	17,82	6	3297	1325	1200	1200	1442	71,20	47,86
0	3300	1320	1200	1200	1444	39,77	8,55	0	3300	1320	1200	1200	1444	72,64	52,98
8	3305	1320	1200	1200	1439	-119,63	-4,25	8	3303	1315	1200	1200	1446	73,53	56,17
9	3500	1320	1200	1200	1244	-	-	9	3436	1120	1200	1200	1508	77,45	69,35
10	3700	1320	1200	1200	1044	-	-	10	3573	920	1200	1200	1571	77,84	71,27
11	3900	1320	1200	1200	844	-	-	11	3709	720	1200	1200	1635	77,92	72,62
12	4100	1320	1200	1200	644	-	-	12	3845	520	1200	1200	1699	77,85	73,90
13	4300	1320	1200	1200	444	-	-	13	3981	320	1200	1200	1763	77,65	75,34
Ação	$P_1$	$P_{31}$	$P_{32}$	$P_{33}$	$P_{34}$	$M_{33}(\%)$	$\beta_{33}(^\circ)$	Ação	$P_1$	$P_{31}$	$P_{32}$	$P_{33}$	$P_{34}$	$M_{34}(\%)$	$\beta_{34}(^\circ)$
1	2413	2053	1467	1200	1331	-	-	1	2300	1858	1515	1347	1444	55,61	60,64
2	2591	1907	1413	1200	1353	-	-	2	2500	1750	1452	1318	1444	56,46	57,95
3	2768	1760	1360	1200	1376	-	-	3	2700	1643	1389	1288	1444	56,82	55,97
4	2945	1613	1307	1200	1399	-	-	4	2900	1535	1326	1259	1444	56,85	53,93
5	3123	1467	1253	1200	1421	-	-	5	3100	1428	1263	1229	1444	56,35	51,08
6	3296	1324	1201	1200	1443	51,62	23,19	6	3295	1323	1202	1201	1444	50,75	37,87
0	3300	1320	1200	1200	1444	62,35	43,03	0	3300	1320	1200	1200	1444	49,42	35,42
8	3304	1316	1199	1200	1445	66,27	52,71	8	3305	1317	1198	1199	1444	47,09	31,55
9	3477	1173	1147	1200	1467	76,01	73,03	9	3500	1212	1137	1171	1444	-	-
10	3655	1027	1093	1200	1489	76,83	74,37	10	3700	1105	1074	1141	1444	-	-
11	3832	880	1040	1200	1512	77,12	75,36	11	3900	997	1011	1112	1444	-	-
12	4009	733	987	1200	1535	77,18	76,48	12	4100	890	948	1082	1444	-	-
13	4187	587	933	1200	1557	76,97	78,14	13	4300	782	885	1053	1444	-	-

Figura 25: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $P_G$  para incrementar a margem das barras 31, 32, 33 e 34

## 5.4

**Ações de controle preventivas combinadas: potência ativa e reativa**

Estratégias de ações de controle preventivas usando somente controle de tensão na barra 1 cumpriram o objetivo de elevar a margem de potência da barra 1 a valores positivos. Já estratégias de ações de controle preventivas usando controle de geração de potência ativa não alcançaram tal objetivo na barra 1. A próxima etapa investiga a combinação de ambas as estratégias de ações de controle preventivas.

Por exemplo, da Tabela 12, sabe-se que para ações de controle preventivas baseadas em geração de potência reativa, quando a tensão  $v_1=1,15$  pu, tem-se  $M_1 = 5,7\%$ . Por outro, da Tabela 15 sabe-se que para ações de controle preventivas baseadas em geração de potência ativa, quando  $P_{G1} = 3400MW$ ,  $P_{G31} = 1420MW$ ,  $P_{G32} = 1300MW$ ,  $P_{G33} = 1300MW$  e  $P_{G34} = 1044MW$  (ação de controle preventiva 10),  $M_1 = -262,9332\%$ . Na Figura 26, observa-se o efeito de fazer a tensão  $v_1=1,15$  pu e variar  $P_{G1}$ ,  $P_{G31}$ ,  $P_{G33}$ ,  $P_{G32}$ , e  $P_{G34}$  conforme apresentado na Seção 5.3.2. Destaca-se o ponto A indicado na Figura 26, pois nele o módulo de tensão é  $v_1=1,15$  pu e as gerações de potência ativa são conforme as da ação de controle preventiva 10 da Tabela 15, o que leva a margem  $M_1 = 5,726\%$ .

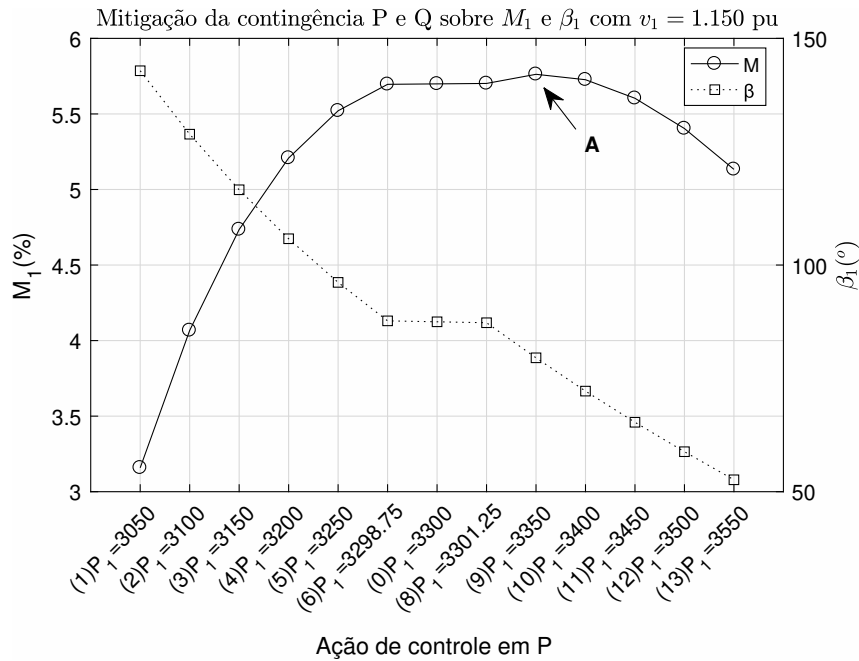


Figura 26: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $v_1$ ,  $P_{G1}$ ,  $P_{G31}$ ,  $P_{G33}$ ,  $P_{G32}$ , e  $P_{G34}$  para incrementar a margem da barra 1

Repara-se que na estratégia de ações de controle preventivas conjuntas, a margem da barra 1 tornou-se positiva, conforme desejado. Além disso, também aumentou ligeiramente mais do que quando cada uma das estratégias de

controle foi aplicada separadamente. Apesar disso, esse aumento foi muito pequeno.

## 5.5

### Sistema Sul-Sudeste

Na Figura 27 é mostrado o diagrama unifilar de um sistema com 65 barras, que abrange a região Sul, com a rede de 230kV estendida de Areia até Blumenau, conectando também a Curitiba, e a rede de 500kV da região Sudeste do Brasil, formando um sistema interligado [8]. Este sistema, aqui referido como TB-65, tem a barra 29 (Governador Bento Munhoz) como barra de referência angular e está dividido em dois subsistemas denominados de subsistema Sul (S) e subsistema Sudeste (SE). A interligação elétrica entre esses dois subsistemas é feita por dois circuitos de 500kV, que conectam a subestação de Bateias no Sul à subestação de Campinas no Sudeste, tendo entre esses dois pontos a subestação de Ibiúna (barra 3). Esta pertence eletricamente a área Sudeste, porém funciona como um ponto de controle, possuindo um compensador síncrono a ela conectado.

Apesar de CEPEL-34, apresentado na Seção 4.5, e TB-65 serem ambos representações da região Sul/Sudeste, o sistema TB-65 é mais fidedigno à realidade. Por exemplo, nele os LTC estão explicitamente incluídos na rede assim como o compensador síncrono na barra 3. Além disso, há indicação geográfica de cada barra (ou subestação).

O objetivo é observar a manifestação do fenômeno de estabilidade de tensão especialmente quando uma ou mais barras do sistema estão perto do máximo carregamento ou na região anormal de operação da curva Sv com fator de potência constante. Então, o ponto de operação apresentado em [8] é utilizado para realizar cálculo do fluxo de potência continuado parametrizado, elevando a carga na barra 11, subestação Campinas 345 kV, através do *software* Anarede. Entretanto, conforme já explicado na Seção 2.4, há interesse em estudar o sistema à luz de um modelo de fluxo de carga que contemple a existência de diversas barras *swing*.

Para isso, o ponto de operação resultante do Anarede serve de entrada para o algoritmo de fluxo de potência apresentado na Seção 2.4. Assim, os aumentos de carga e as perdas ativas são compensados pelo aumento de geração nas barras *swing* – que são as barras 1, 2, 17, 18, 19, 20, 26, 29, 30, 31, 43, 44, 45 e 46. Esse procedimento origina o ponto de operação cujas informações constam na Tabela 17.

Logicamente, como a barra 11 teve sua carga aumentada até o limite máximo, espera-se que essa barra esteja perto do limite de estabilidade de

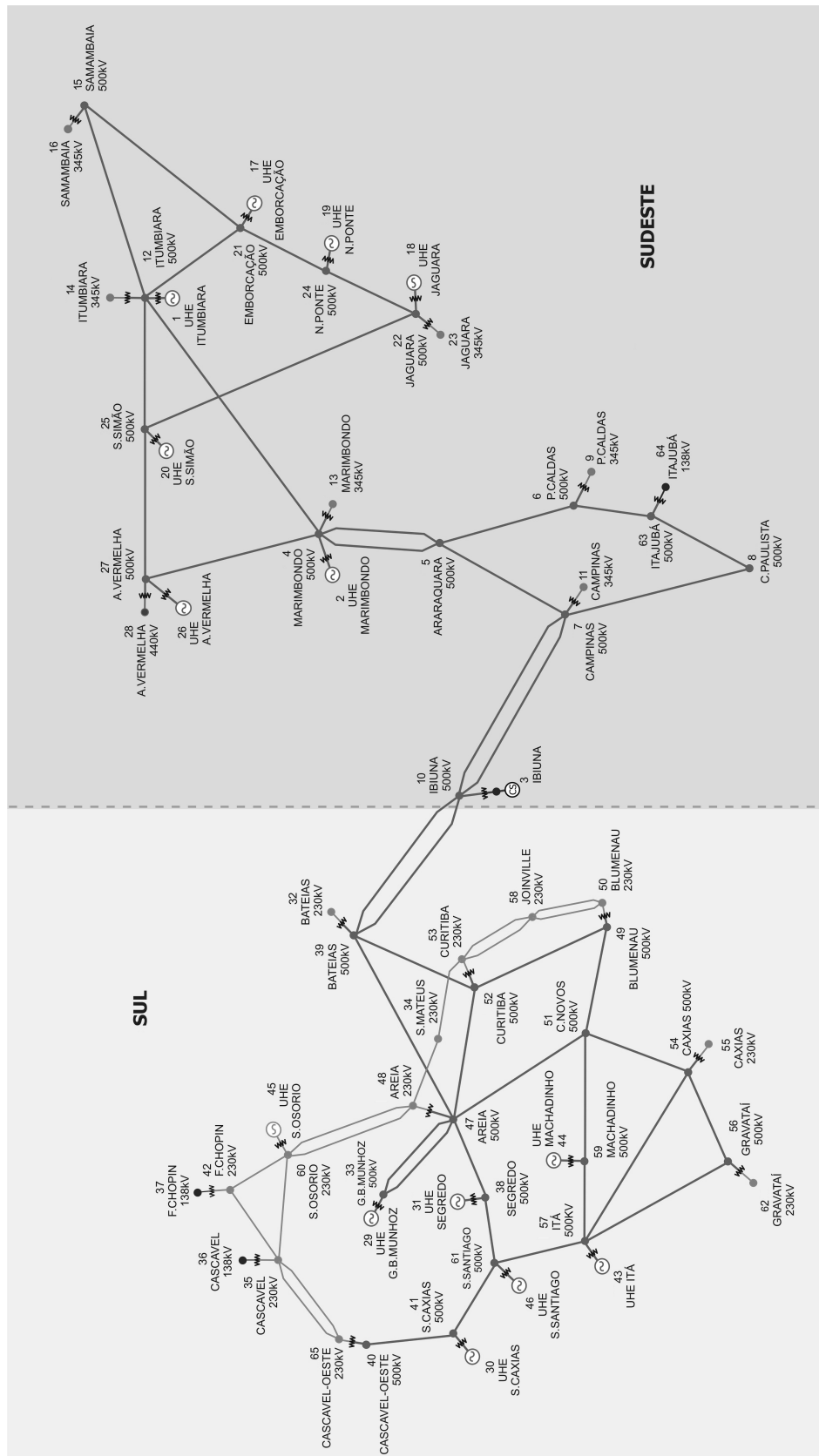


Figura 27: Diagrama unificada da rede S/SE de 65 barras (TB-65)

tensão. De fato, a margem de potência da barra 11 é de apenas 3,39%, apesar de positiva. Além disso, duas barras encontram-se na região anormal de operação: a barra 2— subestação de Marimbondo no Sudeste— e a barra 29, subestação de Governador Bento Munhoz no Sul. A geração de Marimbondo é de 9 MW e Governador Bento Munhoz é a maior do sistema, com 16 MW. Portanto, as barras 2 e 29 são as barras críticas de geração. Além disso, a barra 11 tem a margem de potência positiva mais baixa do sistema elétrico, ou seja, é a barra de carga crítica.

Esses índices sugerem que provavelmente os geradores das barras 2 e 29 entregam potência à barra 11 e que a carga dessa barra não pode mais aumentar porque o caminho entre as barras de geração e a barra de carga estão “congestionados” [9]. Para verificar tal fato, observa-se a Figura 28<sup>1</sup>. Nela é exibido o fluxo de carga calculado pelo *software* Anarede em parte do TB-65 usando o método parametrizado de fluxo de potência continuado<sup>2</sup>. Nota-se que a barra 11 é alimentada pela barra 7 e o gerador da barra 29 entrega potência à barra 47. Todo o fluxo de potência que circula entre as barras 47 e 7, tem sentido de 47 para 11. Isso indica que, em última instância, aumentos de carga da barra 11 são alimentados através desse caminho. Portanto, se o caminho está obstruído, a carga da barra 11 não pode mais ser elevada porque o gerador da barra 29 não pode mais entregar potência à carga da barra crítica.

Análise semelhante pode ser feita com o gerador da barra 2. A exceção é o trecho entre as barras 7 e 8, em que o fluxo de potência tem sentido Campinas, Cachoeira Paulista. Isso ocorre provavelmente porque Cachoeira Paulista é uma barra de carga, portanto parte da potência que chega à barra 7 se destina a alimentá-la. Por isso a margem de potência da barra 8 também é baixa, 5,43%.

Após conhecimento do ponto de operação de sistema e de suas características de estabilidade de tensão, deseja-se estudar a influência de esgotamentos de recursos sobre as barras críticas do sistema.

Como o objetivo posteriormente é sugerir ações de controle preventivas que melhorem os índices de estabilidade de tensão, então, só as barras com margens negativas ou muito baixas serão averiguadas. Essas barras são: a barra de carga 11, que tem margem de potência baixa; e as barras de geração 2 e 29, que estão na região anormal de operação. Portanto, os efeitos das limitações de geração de potência ativa, reativa e de *tap* de LTC sobre elas serão investigados.

Na Tabela 18, são listados os índices de influência dos esgotamentos Q1,

<sup>1</sup>Nomenclatura das barras de acordo com Tabela 38

<sup>2</sup>As divergências encontradas entre os fluxos de potência deste ponto de operação e aqueles em que o sistema tem múltiplas barras *slack* são menores que 10% e, portanto, não compromete a analogia.

Tabela 17: Ponto de operação e índices de estabilidade de tensão do sistema TB-65, da Figura 27 no caso-base

	BARRA	tipo	v(pu)	$\theta(^{\circ})$	$P_G(pu)$	$Q_G(pu)$	$M_0(\%)$	$\beta_0(^{\circ})$
1	Itumbiara	V	1,0000	-13,3116	7,9987	-2,3740	51,46	72,7697
2	Marimbondo	V	1,0100	-18,1037	8,9985	1,3225	-486,63	-136,4594
3	Ibiúna	PV	1,0000	-46,6557	0	5,0925	-	-
4	Marimbondo	PQ	0,9998	-24,5709	-0	-0	-	-
5	Araraquara	PQ	0,9394	-37,9277	-0	0	-	-
6	Poços de Caldas	PQ	0,8811	-51,7215	-0	0	-	-
7	Campinas	PQ	0,8858	-50,7819	-0	-0	-	-
8	Cachoeira Paulista	PQ	0,8411	-65,6981	0	0	05,43	176,1296
9	Poços de Caldas	PQ	0,8715	-53,6045	0	0	72,07	166,0403
10	Ibiúna	PQ	0,9515	-46,6557	-0	0	89,11	170,5015
11	Campinas	PQ	0,7093	-71,9944	0	0	03,39	177,3729
12	Itumbiara	PQ	1,0269	-17,7791	-0	-0	-	-
13	Marimbondo	PQ	0,9937	-25,5904	0	0	94,39	74,4192
14	Itumbiara	PQ	1,0221	-19,9110	0	0	83,53	75,7679
15	Samambaia	PQ	1,0002	-25,6658	-0	0	-	-
16	Samambaia	PQ	0,9830	-28,4296	0	0	46,47	101,5323
17	Emborcação	V	1,0000	-8,5184	6,9988	-1,8720	62,91	66,1288
18	Jaguara	V	1,0200	-8,5556	2,4996	-0,7727	79,70	75,6649
19	Nova Ponte	V	1,0100	-8,5579	3,4994	-1,3215	79,17	73,9692
20	São Simão	V	1,0100	-15,5826	1,9997	-2,0013	87,37	67,3679
21	Emborcação	PQ	1,0298	-13,8090	-0	-0	-	-
22	Jaguara	PQ	1,0501	-13,2539	-0	0	-	-
23	Jaguara	PQ	1,0422	-14,4639	-0	-0	88,96	85,5104
24	Nova Ponte	PQ	1,0375	-12,2662	-0	0	-	-
25	São Simão	PQ	1,0383	-17,1233	-0	0	-	-
26	Água Vermelha	V	1,0200	-14,7351	7,9987	0,5969	61,48	39,6244
27	Água Vermelha	PQ	1,0172	-19,2674	-0	-0	-	-
28	Água Vermelha	PQ	0,9907	-24,9280	0	0	67,84	84,6011
29	Gov. Bento Munhoz	V $\theta$	1,0300	0	16,4899	5,6571	-70,60	-87,5638
30	Salto Caxias	V	1,0300	9,5987	11,4981	1,3827	66,08	59,1364
31	Salto Segredo	V	1,0300	2,5693	11,9980	1,2324	71,83	58,1892
32	Bateias	PQV	0,9980	-36,4894	0	0	69,80	167,5069
33	Gov. Bento Munhoz	PQ	1,0086	-10,4891	-0	-0	-	-
34	São Mateus	PQ	0,9834	-24,7575	-0	0	98,79	112,7896
35	Cascavel	PQ	1,0002	-0,1509	-0	0	-	-
36	Cascavel	PQ	0,9871	-3,1328	0	-0	91,97	95,3690
37	Foz do Chopin	PQ	1,0152	0,6052	0	-0	91,32	94,7541
38	Segredo	PQ	1,0248	-4,2855	-0	0	-	-
39	Bateias	PQ	0,9445	-33,7371	-0	0	-	-
40	Cascavel do Oeste	PQ	1,0395	1,9397	0	-0	-	-
41	Salto Caxias	PQ	1,0472	3,2060	-0	-0	-	-
42	Foz do Chopin	PQ	1,0282	3,8886	-0	0	-	-
43	Itá	V	1,0400	-8,4532	6,9988	-0,1578	69,23	94,2913
44	Machadinho	V	1,0300	-9,0294	5,9990	-0,0887	72,24	87,3214
45	Salto Osório	V	1,0300	11,3787	6,9988	1,5241	66,09	60,3730
46	Salto Santiago	V	1,0300	6,0887	9,4984	1,4241	77,80	65,0295
47	Areia	PQ	1,0062	-11,0636	-0	0	-	-
48	Areia	PQV	0,9990	-11,4686	-0	0	95,86	112,1382
49	Blumenau	PQ	0,9638	-34,8713	-0	0	-	-
50	Blumenau	PQV	0,9980	-37,7038	0	0	53,85	166,2589
51	Campos Novos	PQ	1,0314	-18,5766	-0	0	-	-
52	Curitiba	PQ	0,9392	-32,7532	-0	0	100,00	169,6752
53	Curitiba	PQ	0,9964	-35,6953	0	0	65,50	166,6712
54	Caxias	PQ	1,0210	-26,0371	-0	0	-	-
55	Caxias	PQV	0,9990	-28,5850	0	0	75,56	138,4725
56	Gravataí	PQ	0,9971	-28,7703	-0	0	-	-
57	Itá	PQ	1,0466	-14,1306	-0	0	-	-
58	Joinville	PQ	0,9996	-37,7426	0	-0	96,66	153,0269
59	Machadinho	PQ	1,0388	-15,6797	-0	0	-	-
60	Salto Osório	PQ	1,0350	4,8218	-0	-0	-	-
61	Salto Santiago	PQ	1,0420	-1,7935	-0	0	-	-
62	Gravataí	PQV	0,9980	-31,6073	0	0	54,39	144,9255
63	Itajubá	PQ	0,8494	-61,8847	-0	0	-	-
64	Itajubá	PQ	0,8351	-66,4287	0	0	55,28	171,4074
65	Cascavel	PQV	0,9990	-0,3508	0	0	90,39	93,1423



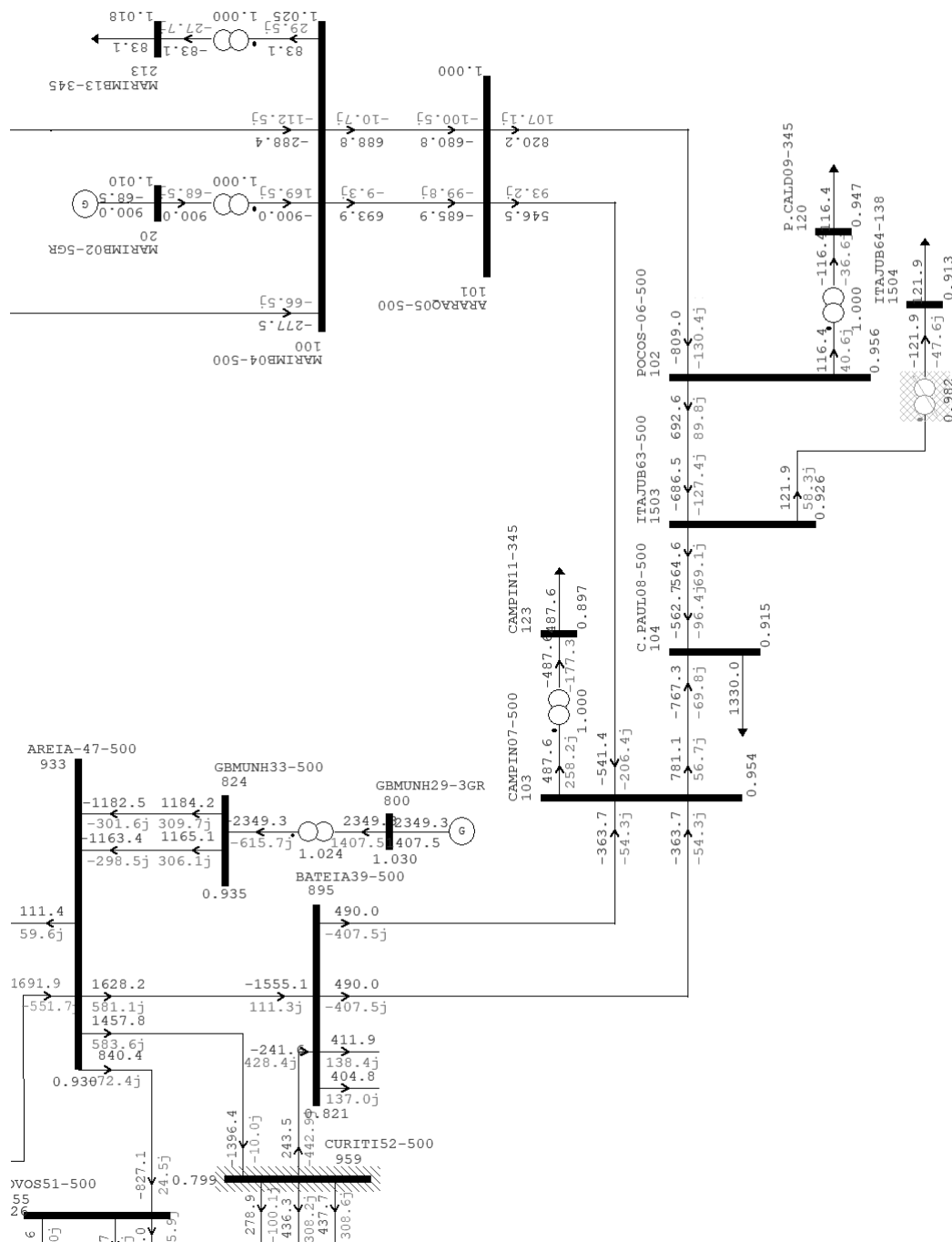


Figura 28: Estado da rede após execução de algoritmo de fluxo de potência contínuo parametrizado pelo Anarede

Q2, Q3, Q17, Q18, Q19, Q20, Q26, Q29, Q30, Q31, Q43, Q44, Q45, Q46, t32, t48, t50, t55, t62, t65, P1, P2, P17, P18, P19, P20, P26, P29, P30, P31, P43, P44, P45 e P46 sobre as barras 11, 2 e 29 do sistema TB-65 em ordem crescente.

Assim, observa-se que o evento mais significativo do ponto de vista de estabilidade de tensão para a barra 11 é a perda de capacidade de geração de potência reativa na barra 3, pois  $II_{11}^{Q3}$  tem o maior módulo dentre todos os índices de influência da barra 11. Para a barra 2, por sua vez, o esgotamento que mais afeta a margem de potência é o que limita a capacidade de geração de potência reativa na barra 29, pois tem o maior módulo dentre todos os índices de influência da barra 2.

Pelo mesmos motivos apresentados na Seção 4.4.7, se há esgotamento de recurso que limita geração de potência ou *tap* de LTC de uma barra *b*, então o índice de influência desse esgotamento sobre a própria barra *b* é nulo.

### 5.5.1

#### Ações de controle preventivas de potência reativa em barras de carga

Na Figura 29, é possível ver o efeito da ação de controle baseada em  $Q_{G3}$  sobre a margem da barra 11. Para isso, o eixo vertical esquerdo representa o valor da margem de potência da barra 11, enquanto no eixo horizontal constam os valores de  $v_3$  associados às ações de controle preventivas 8 a 11 e ao caso-base (ação de controle 0). Nota-se que com aumento de 0,001 pu em  $v_3$ , ação de controle 8, a margem  $M_{11}$  torna-se aproximadamente o dobro. Análise semelhante pode ser feita com  $\beta_{11}$ , cujos valores são representados no eixo vertical direito. Perto do ponto de operação do caso-base, é possível reparar que com aumento de  $v_3$ ,  $\beta_{11}$  é reduzido. Portando, novamente salienta-se que o emprego do II é válido para a proximidade do ponto em que ele é calculado.

Esse comportamento é detalhado na Tabela 19. Contudo, poucas das ações de controle baseadas em  $Q_{G3}$  apresentaram solução convergente, o que compromete a inferência de uma tendência sobre os efeitos da estratégia.

Entretanto, de acordo com a Tabela 18, sabe-se que os esgotamentos relativos potência reativa gerada nas barras 1, 2, 17, 18, 19, 20, 26, 29, 30, 31, 43, 44, 45 e 46 também afetam a estabilidade de tensão na barra 11. Portanto, é válido observar os efeitos das ações de controle preventivas implementadas sobre essas barras e assim salientar os benefícios propiciados por ações de controle preventivas baseadas em geração de potência reativa. Essas ações de controle preventivas e seus impactos são descritos nas Tabelas 20 e 21, onde notam-se, por exemplo, as variações de módulo de tensão na barra 2 e suas

Tabela 18: Índices de influência dos esgotamentos sobre as barras 2, 11 e 29 em ordem crescente

$II_{11}$		$II_2$		$II_{29}$	
Q3	-5146,34	Q26	-41,79	Q31	-426,33
Q2	-567,95	Q43	-38,51	Q43	-421,76
Q29	-145,48	Q44	-32,7	Q44	-379,99
Q43	-48,17	Q31	-31,21	Q26	-218,57
Q44	-43,08	Q1	-24,01	Q46	-183,28
Q31	-42,4	t50	-6,58	Q1	-163,51
Q26	-36,95	Q20	-5,80	Q30	-157,20
Q1	-22,66	Q46	-5,68	t50	-148,27
P1	-22,51	P1	-5,62	Q20	-87,18
t50	-10,89	Q30	-3,93	t32	-62,46
Q46	-10,4	Q17	-2,63	Q17	-45,84
P2	-8,77	t32	-1,12	t62	-13,06
Q30	-7,54	Q19	-0,62	Q19	-5,17
Q20	-6,02	Q18	-0,35	Q45	-3,57
Q17	-2,85	t62	-0,32	t55	-3,52
t32	-1,97	t55	-0,1	Q18	-2,78
Q19	-0,67	t65	-0,03	t65	-1,53
t62	-0,59	Q45	-0,02	Q29	0
Q18	-0,38	Q2	0	P29	0
Q45	-0,26	P2	0	P46	42,84
t55	-0,18	P17	0	t48	44,53
t65	-0,05	P18	0	P45	59,14
t48	0,36	P19	0	P44	64,67
P46	1,73	P20	0	P43	70,47
P17	2,79	P26	0	P31	81,04
P45	3,50	P30	0	P30	88,23
P44	4,27	P31	0	P26	88,41
P43	5,5	P43	0	P20	88,45
P18	8,48	P44	0	P19	88,49
P29	9,84	P45	0	P18	88,55
P19	10,21	P46	0	P17	88,69
P31	10,33	t48	0,15	P2	89,65
P20	12,4	P29	8,31	Q3	166,68
P26	13,6	Q3	113,12	Q2	172,17
P30	17,86	Q29	117,58	P1	276,21

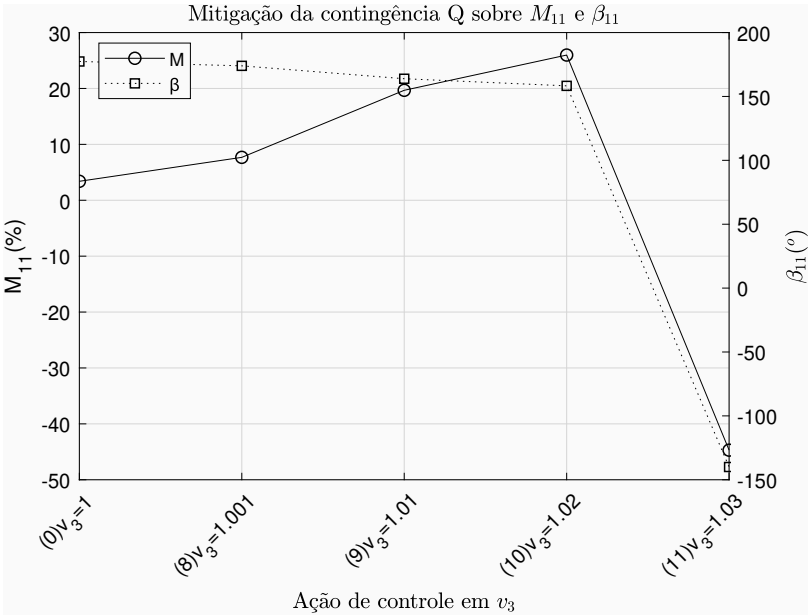


Figura 29: Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo  $\beta$

Tabela 19: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $v_3$  para incrementar a margem da barra 11

Ação	$v_3$	$Q_{G3}$	$M_{11}(\%)$	$\beta_{11}(^\circ)$
1	0,950	-	-	-
2	0,960	-	-	-
3	0,970	-	-	-
4	0,980	-	-	-
5	0,990	-	-	-
6	0,999	-	-	-
0	1,000	5,09	3,39	177,37
8	1,001	4,66	7,68	173,96
9	1,010	3,45	19,67	163,87
10	1,020	2,85	25,98	158,30
11	1,030	10,68	-44,70	-140,01
12	1,040	-	-	-
13	1,050	-	-	-

consequências sobre a estabilidade de tensão da barra 11. A ação de controle identificada como "0" corresponde ao sistema sem ação de controle (caso-base). Além disso, nas ações de controle preventivas em que não há solução convergente para o problema de fluxo de potência, os índices de estabilidade são indicados como "-".

No eixo vertical da Figura 30 são apresentadas as margens de potência da barra 11 quando há aumento de 0,001 pu em cada uma das tensões controladas localmente por potência reativa de geradores ou compensadores, ou seja,

Tabela 20: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_{17}$ ,  $v_{18}$ ,  $v_{19}$  e  $v_{20}$  para incrementar a margem da barra 11

Ação	$v_1$	$Q_{G1}$	$M_{11}(\%)$	$\beta_{11}(^\circ)$
1	0,950	-	-	-
2	0,960	-	-	-
3	0,970	-	-	-
4	0,980	-	-	-
5	0,990	-	-	-
6	0,999	-2,40	2,33	178,21
0	1,000	-2,37	3,39	177,37
8	1,001	-2,34	4,17	176,76
9	1,010	-2,01	8,12	173,59
10	1,020	-1,61	10,69	171,47
11	1,030	-1,20	12,62	169,85
12	1,040	-0,78	14,20	168,51
13	1,050	-0,34	15,55	167,35
Ação	$v_{17}$	$Q_{G17}$	$M_{11}(\%)$	$\beta_{11}(^\circ)$
1	0,950	-	-	-
2	0,960	-	-	-
3	0,970	-	-	-
4	0,980	-	-	-
5	0,990	-	-	-
6	0,999	-1,90	3,10	177,60
0	1,000	-1,87	3,39	177,37
8	1,001	-1,84	3,66	177,16
9	1,010	-1,54	5,45	175,74
10	1,020	-1,20	6,85	174,62
11	1,030	-0,85	7,96	173,72
12	1,040	-0,49	8,90	172,95
13	1,050	-0,13	9,73	172,27
Ação	$v_{19}$	$Q_{G19}$	$M_{11}(\%)$	$\beta_{11}(^\circ)$
1	0,960	-	-	-
2	0,970	-	-	-
3	0,980	-	-	-
4	0,990	-	-	-
5	1,000	-1,60	1,67	178,72
6	1,009	-1,35	3,27	177,47
0	1,010	-1,32	3,39	177,37
8	1,011	-1,29	3,52	177,28
9	1,020	-1,04	4,45	176,54
10	1,030	-0,75	5,27	175,89
11	1,040	-0,45	5,97	175,33
12	1,050	-0,15	6,58	174,84
13	1,060	0,16	7,12	174,40
Ação	$v_2$	$Q_{G2}$	$M_{11}(\%)$	$\beta_{11}(^\circ)$
1	0,960	-	-	-
2	0,970	-	-	-
3	0,980	-	-	-
4	0,990	-	-	-
5	1,000	-	-	-
6	1,009	-	-	-
0	1,010	1,32	3,39	177,37
8	1,011	1,24	5,83	175,44
9	1,020	1,11	14,13	168,56
10	1,030	1,19	18,70	164,58
11	1,040	1,34	21,92	161,70
12	1,050	1,53	24,46	159,38
13	1,060	1,75	26,57	157,43
Ação	$v_{18}$	$Q_{G18}$	$M_{11}(\%)$	$\beta_{11}(^\circ)$
1	0,970	-	-	-
2	0,980	-	-	-
3	0,990	-	-	-
4	1,000	-1,12	1,01	179,23
5	1,010	-0,95	2,53	178,05
6	1,019	-0,79	3,32	177,43
0	1,020	-0,77	3,39	177,37
8	1,021	-0,75	3,47	177,32
9	1,030	-0,59	4,06	176,85
10	1,040	-0,41	4,62	176,41
11	1,050	-0,22	5,11	176,02
12	1,060	-0,03	5,55	175,66
13	1,070	0,16	5,95	175,34
Ação	$v_{20}$	$Q_{G20}$	$M_{11}(\%)$	$\beta_{11}(^\circ)$
1	0,960	-	-	-
2	0,970	-	-	-
3	0,980	-	-	-
4	0,990	-	-	-
5	1,000	-	-	-
6	1,009	-2,04	2,92	177,74
0	1,010	-2,00	3,39	177,37
8	1,011	-1,97	3,80	177,05
9	1,020	-1,64	6,27	175,08
10	1,030	-1,26	8,07	173,63
11	1,040	-0,88	9,47	172,48
12	1,050	-0,48	10,63	171,52
13	1,060	-0,08	11,65	170,67

Tabela 21: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $v_{26}$ ,  $v_{29}$ ,  $v_{30}$ ,  $v_{31}$ ,  $v_{43}$ ,  $v_{44}$ ,  $v_{45}$  e  $v_{46}$  para incrementar a margem da barra 11

Ação	$v_{26}$	$Q_{G26}$	$M_{11}(\%)$	$\beta_{11}(^\circ)$	Ação	$v_{29}$	$Q_{G29}$	$M_{11}(\%)$	$\beta_{11}(^\circ)$
1	0,970	-	-	-	1	0,980	-	-	-
2	0,980	-	-	-	2	0,990	-	-	-
3	0,990	-	-	-	3	1,000	-	-	-
4	1,000	-	-	-	4	1,010	-	-	-
5	1,010	-	-	-	5	1,020	-	-	-
6	1,019	0,58	1,98	178,47	6	1,029	-	-	-
0	1,020	0,60	3,39	177,37	0	1,030	5,66	3,39	177,37
8	1,021	0,62	4,33	176,63	8	1,031	5,65	4,95	176,14
9	1,030	0,92	8,81	173,03	9	1,040	5,78	11,26	171,08
10	1,040	1,28	11,65	170,67	10	1,050	6,04	15,00	168,02
11	1,050	1,66	13,76	168,89	11	1,060	6,35	17,72	165,78
12	1,060	2,06	15,47	167,41	12	1,070	6,69	19,91	163,97
13	1,070	2,47	16,93	166,14	13	1,080	7,05	21,76	162,44
Ação	$v_{30}$	$Q_{G30}$	$M_{11}(\%)$	$\beta_{11}(^\circ)$	Ação	$v_{31}$	$Q_{G31}$	$M_{11}(\%)$	$\beta_{11}(^\circ)$
1	0,980	-	-	-	1	0,980	-	-	-
2	0,990	-	-	-	2	0,990	-	-	-
3	1,000	-	-	-	3	1,000	-	-	-
4	1,010	-	-	-	4	1,010	-	-	-
5	1,020	-	-	-	5	1,020	-	-	-
6	1,029	1,35	2,94	177,73	6	1,029	1,21	1,75	178,65
0	1,030	1,38	3,39	177,37	0	1,030	1,23	3,39	177,37
8	1,031	1,41	3,78	177,07	8	1,031	1,26	4,42	176,56
9	1,040	1,71	6,19	175,16	9	1,040	1,62	9,21	172,74
10	1,050	2,04	7,95	173,76	10	1,050	2,06	12,22	170,29
11	1,060	2,39	9,32	172,65	11	1,060	2,54	14,46	168,46
12	1,070	2,74	10,47	171,72	12	1,070	3,03	16,27	166,96
13	1,080	3,11	11,47	170,90	13	1,080	3,54	17,82	165,67
Ação	$v_{43}$	$Q_{G43}$	$M_{11}(\%)$	$\beta_{11}(^\circ)$	Ação	$v_{44}$	$Q_{G44}$	$M_{11}(\%)$	$\beta_{11}(^\circ)$
1	0,990	-	-	-	1	0,980	-	-	-
2	1,000	-	-	-	2	0,990	-	-	-
3	1,010	-	-	-	3	1,000	-	-	-
4	1,020	-	-	-	4	1,010	-	-	-
5	1,030	-	-	-	5	1,020	-	-	-
6	1,039	-0,17	2,27	178,25	6	1,029	-0,10	2,38	178,16
0	1,040	-0,16	3,39	177,37	0	1,030	-0,09	3,39	177,37
8	1,041	-0,14	4,20	176,74	8	1,031	-0,07	4,14	176,78
9	1,050	0,03	8,25	173,51	9	1,040	0,10	7,99	173,72
10	1,060	0,25	10,87	171,39	10	1,050	0,31	10,53	171,67
11	1,070	0,49	12,83	169,79	11	1,060	0,54	12,43	170,12
12	1,080	0,75	14,43	168,48	12	1,070	0,79	13,99	168,84
13	1,090	1,02	15,79	167,35	13	1,080	1,04	15,32	167,74
Ação	$v_{45}$	$Q_{G45}$	$M_{11}(\%)$	$\beta_{11}(^\circ)$	Ação	$v_{46}$	$Q_{G46}$	$M_{11}(\%)$	$\beta_{11}(^\circ)$
1	0,980	-	-	-	1	0,980	-	-	-
2	0,990	-	-	-	2	0,990	-	-	-
3	1,000	-	-	-	3	1,000	-	-	-
4	1,010	-	-	-	4	1,010	-	-	-
5	1,020	-	-	-	5	1,020	-	-	-
6	1,029	1,50	3,10	177,60	6	1,029	1,38	2,76	177,87
0	1,030	1,52	3,39	177,37	0	1,030	1,42	3,39	177,37
8	1,031	1,55	3,66	177,16	8	1,031	1,46	3,91	176,96
9	1,040	1,75	5,45	175,75	9	1,040	1,85	6,89	174,60
10	1,050	1,98	6,83	174,65	10	1,050	2,29	8,97	172,93
11	1,060	2,22	7,94	173,76	11	1,060	2,74	10,57	171,64
12	1,070	2,46	8,87	173,01	12	1,070	3,21	11,89	170,56
13	1,080	2,71	9,69	172,35	13	1,080	3,69	13,04	169,62

quando se aplica a ação 8 em cada barra de tensão controlada por gerador ou compensador local. Já no eixo horizontal estão os índices de influência de todos os esgotamentos relativos a geração de potência reativa possíveis.

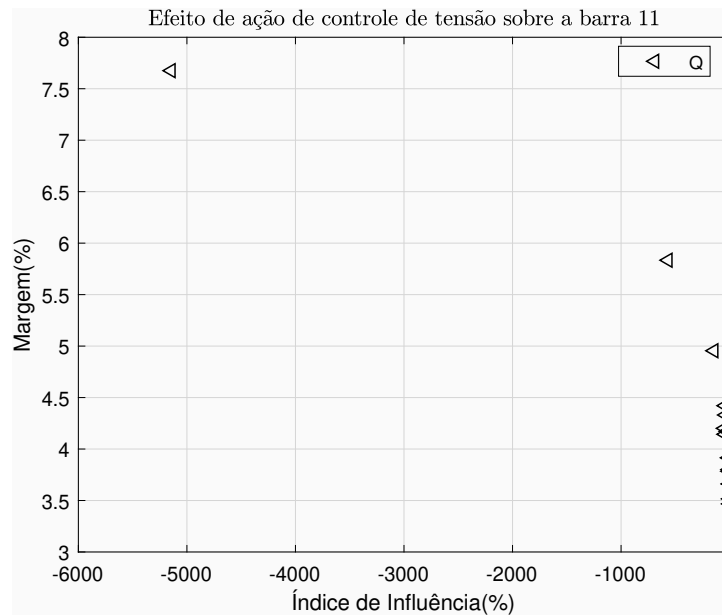


Figura 30: Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo  $\beta$

Existe uma tendência de que quanto mais negativo o índice de influência de um esgotamento, melhor o efeito de aumentar 0,001 pu a tensão da barra onde o esgotamento ocorreria. Também constata-se que a maior parte dos esgotamentos relativos à geração de potência reativa tem índice de influência menor que 1000, com exceção de um esgotamento com II mais negativo que -5000. De acordo com a Tabela 18, esse esgotamento é a limitação de geração de potência reativa em Ibiúna, Q3. Assim, do ponto de vista de estabilidade de tensão da barra 11, no Sudeste, a limitação de potência reativa mais severa ocorre em Ibiúna, a interligação com o Sul.

### 5.5.2

#### Ações de controle preventivas de potência reativa em barras de geração

O resultado de ações de controle preventivas baseadas em geração de potência reativa sobre barras geradoras também devem ser investigados. Por esse motivo, serão avaliadas as barras de geração críticas, aquelas que se encontram na região anormal de operação, as barras 2 e 29.

### • Barra 2

Na Figura 31, é possível ver o efeito da ação de controle baseada em  $Q_{G2}$  sobre a margem da barra 2. Para isso, o eixo vertical esquerdo representa o valor da margem de potência da barra 2, enquanto no eixo horizontal são listados valores de  $v_2$  associados ao caso-base e aos casos pós-controle. Nota-se que com aumento de 0,01 pu em  $v_2$ , a margem  $M_2$  passa a ser positiva. Ou seja, a operação da barra 2 é deslocada para a região normal. Análise semelhante pode ser feita com  $\beta_2$ , cujos valores são representados no eixo vertical direito. Nota-se que com aumento de  $v_2$ ,  $\beta_2$  aumenta.

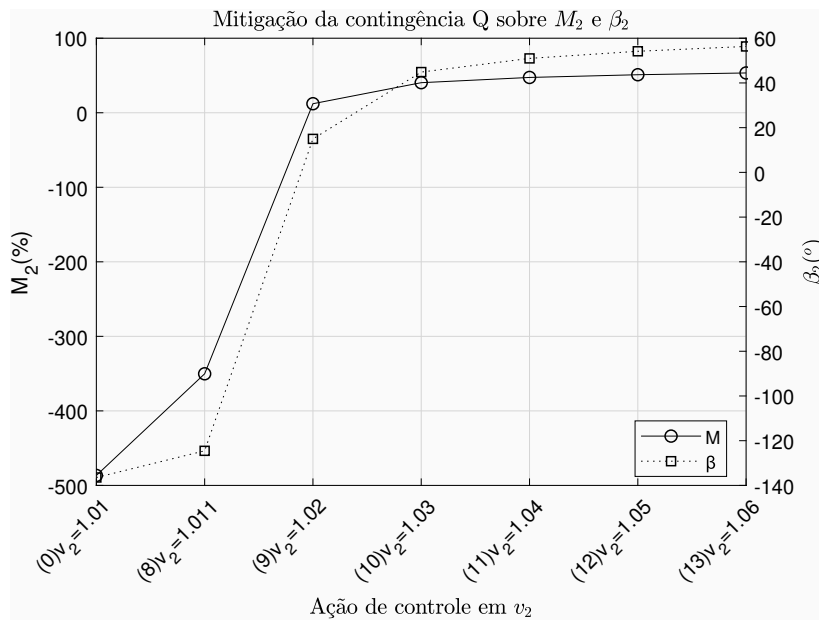


Figura 31: Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo  $\beta$

As ações de controle preventivas implementadas são descritas na Tabela 22, onde são descritas as variações de tensão na barra 2 e suas consequências sobre a estabilidade de tensão da barra 2. Para os casos pós-controle em que não há solução convergente para o problema de fluxo de potência, os índices de estabilidade são indicados como "-".

De acordo com a Tabela 18, sabe-se que os esgotamentos de potência reativa gerada nas demais barras *swing* e no compensador síncrono afetam a estabilidade de tensão da barra 2, pois os índices de influência desses esgotamentos são negativos. Assim, devem-se analisar as variações de tensão nas barras citadas e suas consequências.

Nas Tabelas 23 e 24, é possível observar que à medida que a tensão de cada uma das barras em questão aumenta, a margem  $M_2$  aumenta também.



Tabela 22: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $v_2$  para incrementar a margem da barra 2

Ação	$v_2$	$Q_{G2}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$
1	0,960	-	-	-
2	0,970	-	-	-
3	0,980	-	-	-
4	0,990	-	-	-
5	1,000	-	-	-
6	1,009	-	-	-
0	1,010	1,32	-486,63	-136,46
8	1,011	1,24	-350,24	-124,53
9	1,020	1,11	12,13	14,98
10	1,030	1,19	40,34	44,86
11	1,040	1,34	47,37	50,97
12	1,050	1,53	51,02	54,16
13	1,060	1,75	53,40	56,32

Além disso, nota-se que a geração de potência reativa da barra em que a ação de controle preventiva atua aumenta conforme a tensão especificada é elevada. Ou seja, o controle de tensão é fortemente sustentado pela geração local de potência reativa. Conclui-se que o aumento da geração de potência reativa em uma barra do sistema incrementa a margem de potência da barra 2, constatação já amplamente utilizada em ações clássicas de controle de tensão. Contudo, três casos têm comportamento diferente: a inserção de potência reativa nas barras 2, 3 e 29. Essas são justamente as únicas três barras cuja limitação de geração de potência reativa resulta em índices de influência não negativo sobre a barra 2. Isso significa que o aumento da injeção de potência reativa nessas barras na verdade reduz a margem de potência na barra 2. Mesmo assim, a elevação da tensão nessas 3 barras melhoram os índices de estabilidade. Portanto, com esse índice, é possível propor as ações de controle corretas para retirar o sistema dessa situação e evitar o colapso de tensão.

Na eixo vertical da Figura 32 são apresentadas as margens de potência da barra 2 quando há aumento de 0,001 pu em cada uma das tensões controladas localmente por potência reativa de geradores. No eixo horizontal constam os índices de influência relacionados ao esgotamento de capacidade de controle de tensão via geração de potência reativa.

Quando o índice de influência é negativo, a tendência é que quanto mais negativo o índice de influência de um esgotamento, melhor o efeito de aumentar 0,001 pu a tensão da barra onde o esgotamento ocorreria. Observa-se que aqui o que pode ser destacado é apenas uma tendência na relação entre II e os efeitos observados na margem de potência, o que se justifica pelas não-linearidades envolvidas. Também constata-se que a maior parte dos esgotamentos relativos

Tabela 23: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $v_1$ ,  $v_3$ ,  $v_{17}$ ,  $v_{18}$ ,  $v_{19}$  e  $v_{20}$  para incrementar a margem da barra 2

Ação	$v_1$	$Q_{G1}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$	Ação	$v_3$	$Q_{G3}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$
1	0,950	-	-	-	1	0,950	-	-	-
2	0,960	-	-	-	2	0,960	-	-	-
3	0,970	-	-	-	3	0,970	-	-	-
4	0,980	-	-	-	4	0,980	-	-	-
5	0,990	-	-	-	5	0,990	-	-	-
6	0,999	-2,40	-591,09	-144,08	6	0,999	-	-	-
0	1,000	-2,37	-486,63	-136,46	0	1,000	5,09	-486,63	-136,46
8	1,001	-2,34	-433,41	-132,13	8	1,001	4,66	-282,05	-116,60
9	1,010	-2,01	-266,48	-114,00	9	1,010	3,45	39,21	42,19
10	1,020	-1,61	-174,80	-90,64	10	1,020	2,85	48,36	49,79
11	1,030	-1,20	-27,37	-35,31	11	1,030	10,68	60,36	57,66
12	1,040	-0,78	9,01	11,22	12	1,040	-	-	-
13	1,050	-0,34	22,97	28,02	13	1,050	-	-	-
Ação	$v_{17}$	$Q_{G17}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$	Ação	$v_{18}$	$Q_{G18}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$
1	0,950	-	-	-	1	0,970	-	-	-
2	0,960	-	-	-	2	0,980	-	-	-
3	0,970	-	-	-	3	0,990	-	-	-
4	0,980	-	-	-	4	1,000	-1,12	-867,89	-158,69
5	0,990	-	-	-	5	1,010	-0,95	-566,67	-142,41
6	0,999	-1,90	-510,71	-138,32	6	1,019	-0,79	-492,53	-136,92
0	1,000	-1,87	-486,63	-136,46	0	1,020	-0,77	-486,63	-136,46
8	1,001	-1,84	-466,84	-134,89	8	1,021	-0,75	-481,03	-136,02
9	1,010	-1,54	-367,19	-126,17	9	1,030	-0,59	-440,36	-132,70
10	1,020	-1,20	-310,77	-120,13	10	1,040	-0,41	-408,01	-129,92
11	1,030	-0,85	-271,83	-114,82	11	1,050	-0,22	-383,04	-127,65
12	1,040	-0,49	-240,34	-109,20	12	1,060	-0,03	-362,68	-125,70
13	1,050	-0,13	-212,13	-102,53	13	1,070	0,16	-345,42	-123,95
Ação	$v_{19}$	$Q_{G19}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$	Ação	$v_{20}$	$Q_{G20}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$
1	0,960	-	-	-	1	0,960	-	-	-
2	0,970	-	-	-	2	0,970	-	-	-
3	0,980	-	-	-	3	0,980	-	-	-
4	0,990	-	-	-	4	0,990	-	-	-
5	1,000	-1,60	-692,45	-150,37	5	1,000	-	-	-
6	1,009	-1,35	-496,73	-137,25	6	1,009	-2,04	-526,75	-139,52
0	1,010	-1,32	-486,63	-136,46	0	1,010	-2,00	-486,63	-136,46
8	1,011	-1,29	-477,37	-135,73	8	1,011	-1,97	-457,18	-134,10
9	1,020	-1,04	-417,37	-130,75	9	1,020	-1,64	-332,47	-122,60
10	1,030	-0,75	-375,32	-126,94	10	1,030	-1,26	-267,81	-114,18
11	1,040	-0,45	-344,88	-123,92	11	1,040	-0,88	-220,96	-104,85
12	1,050	-0,15	-320,78	-121,28	12	1,050	-0,48	-177,05	-91,48
13	1,060	0,16	-300,64	-118,84	13	1,060	-0,08	-83,56	-69,65

Tabela 24: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $v_{26}$ ,  $v_{29}$ ,  $v_{30}$ ,  $v_{31}$ ,  $v_{43}$ ,  $v_{44}$ ,  $v_{45}$  e  $v_{46}$  para incrementar a margem da barra 2

Ação	$v_{26}$	$Q_{G26}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$	Ação	$v_{29}$	$Q_{G29}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$
1	0,970	-	-	-	1	0,980	-	-	-
2	0,980	-	-	-	2	0,990	-	-	-
3	0,990	-	-	-	3	1,000	-	-	-
4	1,000	-	-	-	4	1,010	-	-	-
5	1,010	-	-	-	5	1,020	-	-	-
6	1,019	0,58	-638,68	-147,17	6	1,029	-	-	-
0	1,020	0,60	-486,63	-136,46	0	1,030	5,66	-486,63	-136,46
8	1,021	0,62	-423,95	-131,33	8	1,031	5,65	-391,01	-128,63
9	1,030	0,92	-243,32	-109,86	9	1,040	5,78	-153,58	-80,01
10	1,040	1,28	-84,63	-69,78	10	1,050	6,04	15,80	16,94
11	1,050	1,66	1,56	1,93	11	1,060	6,35	33,04	33,73
12	1,060	2,06	22,36	27,35	12	1,070	6,69	39,69	39,19
13	1,070	2,47	30,93	36,62	13	1,080	7,05	43,39	41,97
Ação	$v_{30}$	$Q_{G30}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$	Ação	$v_{31}$	$Q_{G31}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$
1	0,980	-	-	-	1	0,980	-	-	-
2	0,990	-	-	-	2	0,990	-	-	-
3	1,000	-	-	-	3	1,000	-	-	-
4	1,010	-	-	-	4	1,010	-	-	-
5	1,020	-	-	-	5	1,020	-	-	-
6	1,029	1,35	-524,68	-139,30	6	1,029	1,21	-677,84	-149,33
0	1,030	1,38	-486,63	-136,46	0	1,030	1,23	-486,63	-136,46
8	1,031	1,41	-458,34	-134,26	8	1,031	1,26	-418,95	-131,04
9	1,040	1,71	-336,68	-123,43	9	1,040	1,62	-232,40	-107,50
10	1,050	2,04	-273,62	-115,45	10	1,050	2,06	-50,42	-52,00
11	1,060	2,39	-228,76	-106,63	11	1,060	2,54	9,32	10,06
12	1,070	2,74	-188,63	-94,28	12	1,070	3,03	25,98	27,42
13	1,080	3,11	-140,25	-74,99	13	1,080	3,54	33,44	34,27
Ação	$v_{43}$	$Q_{G43}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$	Ação	$v_{44}$	$Q_{G44}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$
1	0,990	-	-	-	1	0,980	-	-	-
2	1,000	-	-	-	2	0,990	-	-	-
3	1,010	-	-	-	3	1,000	-	-	-
4	1,020	-	-	-	4	1,010	-	-	-
5	1,030	-	-	-	5	1,020	-	-	-
6	1,039	-0,17	-598,39	-144,42	6	1,029	-0,10	-584,28	-143,48
0	1,040	-0,16	-486,63	-136,46	0	1,030	-0,09	-486,63	-136,46
8	1,041	-0,14	-431,77	-132,11	8	1,031	-0,07	-435,27	-132,40
9	1,050	0,03	-263,69	-113,81	9	1,040	0,10	-272,11	-115,21
10	1,060	0,25	-171,87	-87,62	10	1,050	0,31	-186,22	-93,32
11	1,070	0,49	-26,33	-30,00	11	1,060	0,54	-40,89	-44,47
12	1,080	0,75	8,99	9,64	12	1,070	0,79	1,77	1,88
13	1,090	1,02	22,78	24,15	13	1,080	1,04	18,96	20,28
Ação	$v_{45}$	$Q_{G45}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$	Ação	$v_{46}$	$Q_{G46}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$
1	0,980	-	-	-	1	0,980	-	-	-
2	0,990	-	-	-	2	0,990	-	-	-
3	1,000	-	-	-	3	1,000	-	-	-
4	1,010	-	-	-	4	1,010	-	-	-
5	1,020	-	-	-	5	1,020	-	-	-
6	1,029	1,50	-510,67	-138,27	6	1,029	1,38	-542,36	-140,58
0	1,030	1,52	-486,63	-136,46	0	1,030	1,42	-486,63	-136,46
8	1,031	1,55	-466,89	-134,93	8	1,031	1,46	-449,66	-133,56
9	1,040	1,75	-367,81	-126,52	9	1,040	1,85	-310,07	-120,44
10	1,050	1,98	-312,11	-120,69	10	1,050	2,29	-240,11	-109,25
11	1,060	2,22	-274,00	-115,51	11	1,060	2,74	-184,75	-92,81
12	1,070	2,46	-243,52	-109,98	12	1,070	3,21	-73,13	-62,98
13	1,080	2,71	-216,64	-103,39	13	1,080	3,69	-20,37	-23,33

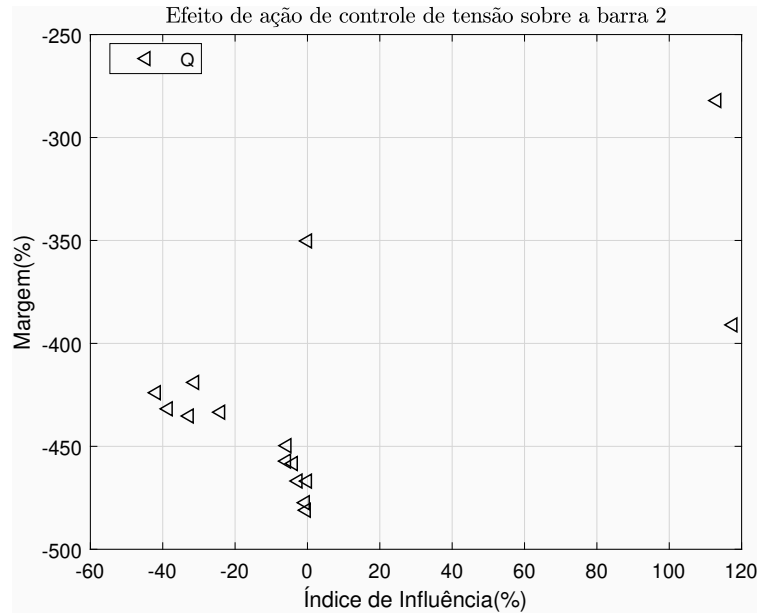


Figura 32: Relação entre o índice de influência e o efeito da ação de controle

à geração de potência reativa tem índice de influência negativo, com exceção de dois casos. De acordo com a Tabela 18, esses casos dizem respeito à limitação de geração de potência reativa em Ibiúna, Q3, e em Governador Bento Munhoz, Q29. Ou seja, do ponto de vista de estabilidade de tensão da barra 2, no Sudeste, a limitação de potência reativa mais influente ocorre em Governador Bento Munhoz, a interligação com o Sul. Por outro lado, os índices de influência positivos estão relacionados às barras cujo aumento de injeção de potência reativa leva à redução da margem de potência da barra 2.

A exceção à tendência de verificada ocorre para o caso em que há esgotamento na própria barra 2. Nesse caso,  $II_2^{Q2}$  é nulo, mas ação de controle baseada no evento correspondente apresenta bons resultados de estabilidade de tensão. Portanto, aqui observa-se uma limitação de aplicação do método proposto. Entretanto, nos demais casos, o II é útil para indicar as melhores intervenções no sistema.

#### • Barra 29

Na Figura 33, é possível ver o efeito da ação de controle baseada em  $Q_{G29}$  sobre a margem da barra 29. Para isso, o eixo vertical esquerdo representa o valor da margem de potência da barra 29, enquanto no eixo horizontal são listados valores de  $v_{29}$  associados a diferentes ações de controle preventivas e ao caso-base. Nota-se que com aumento de 0,001 pu em  $v_{29}$ , a margem  $M_{29}$  torna-se positiva. Análise semelhante pode ser feita com  $\beta_{29}$ , cujos valores são representados no eixo vertical direito. À medida que a tensão  $v_{29}$  aumenta,  $\beta_{29}$

afasta-se do valor crítico.

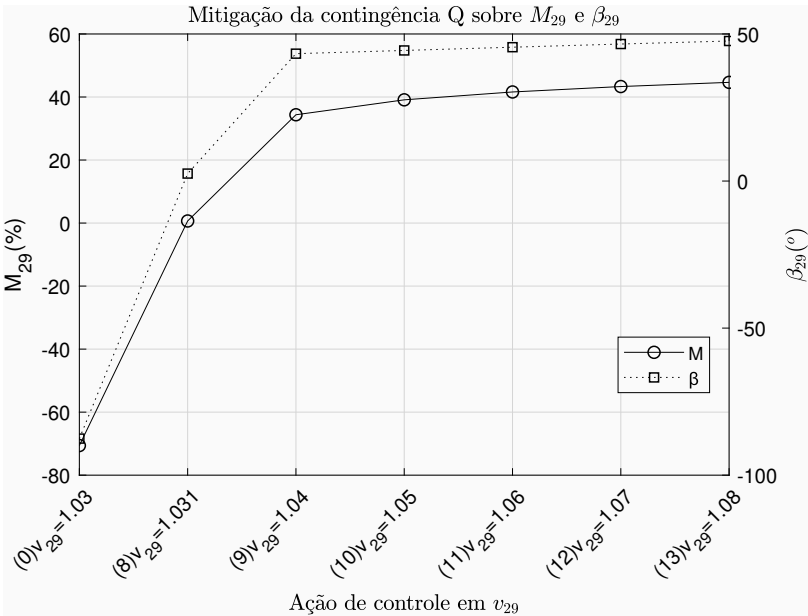


Figura 33: Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo  $\beta$

As ações de controle preventivas implementadas são descritas na Tabela 25, onde relacionam-se as variações de tensão na barra 29 e suas consequências sobre a estabilidade de tensão da barra 29. Para os casos pós-controle em que não há solução convergente para o problema de fluxo de potência, os índices de estabilidade são indicados como "-".

Tabela 25: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $v_{29}$  para incrementar a margem da barra 29

Ação	$v_{29}$	$Q_{G29}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^\circ)$
1	0,980	-	-	-
2	0,990	-	-	-
3	1,000	-	-	-
4	1,010	-	-	-
5	1,020	-	-	-
6	1,029	-	-	-
0	1,030	5,66	-70,60	-87,56
8	1,031	5,65	0,66	2,54
9	1,040	5,78	34,37	43,31
10	1,050	6,04	39,11	44,40
11	1,060	6,35	41,60	45,51
12	1,070	6,69	43,32	46,58
13	1,080	7,05	44,65	47,61

De acordo com a Tabela 18, sabe-se que os esgotamentos de potência reativa gerada nas demais barras *swing* e no compensador síncrono afetam

a estabilidade de tensão da barra 29, pois os índices de influência desses esgotamentos são negativos. Assim, devem-se analisar as variações de tensão nas barras citadas e suas consequências sobre a estabilidade de tensão da barra 29.

Nas Tabelas 26 e 27, é possível observar que à medida que a tensão de cada uma das barras em questão aumenta, a margem  $M_{29}$  aumenta também. Além disso, assim como verificado na barra 2, de forma geral, o aumento da geração de potência reativa em uma barra do sistema incrementa a margem de potência da barra 29. Contudo, dois casos têm comportamento diferente: as barras 2 e 3. Novamente verifica-se que essas são as únicas duas barras cuja limitação de geração de potência reativa resulta em índices de influência não negativo sobre a barra 29. Isso significa que o aumento da injeção de potência reativa nessas barras na verdade reduz a margem de potência na barra 29.

Na Figura 34 são apresentadas as margens de potência da barra 29 –  $M_{29}$  – quando há aumento de 0,001 pu em cada uma das tensões controladas localmente por potência reativa de geradores.

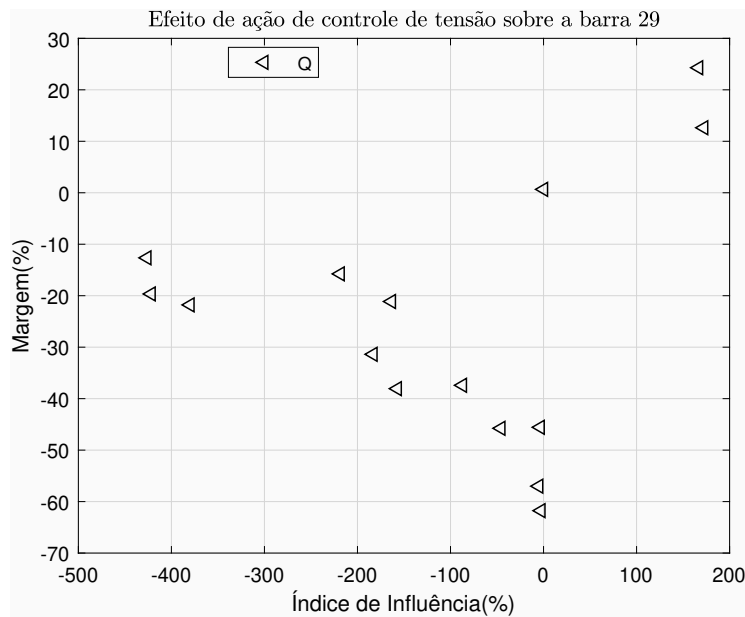


Figura 34: Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo  $\beta$

Quando o índice de influência é negativo, a tendência é que quanto mais negativo o índice de influência de um esgotamento, melhor o efeito de aumentar 0,001 pu a tensão da barra onde o esgotamento ocorreria. Também se constata que a maior parte dos esgotamentos relativos à geração de potência reativa tem índice de influência negativo, com exceção de dois casos. De acordo com a Tabela 18, esses casos dizem respeito à limitação de geração de potência

reativa em Ibiúna, Q3, e em Marimbondo, Q2. Entretanto, do ponto de vista de estabilidade de tensão da barra 29, a limitação de potência reativa mais severa ocorre em Santo Segredo (barra 31), no Sul. Por outro lado, os índices de influência positivos estão relacionados as barras cujo aumento de injeção de potência reativa leva à redução da margem de potência da barra 29.

Tabela 26: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$ ,  $v_{17}$ ,  $v_{18}$ ,  $v_{19}$  e  $v_{20}$  para incrementar a margem da barra 29

Ação	$v_1$	$Q_{G1}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^\circ)$	Ação	$v_2$	$Q_{G2}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^\circ)$
1	0,950	-	-	-	1	0,960	-	-	-
2	0,960	-	-	-	2	0,970	-	-	-
3	0,970	-	-	-	3	0,980	-	-	-
4	0,980	-	-	-	4	0,990	-	-	-
5	0,990	-	-	-	5	1,000	-	-	-
6	0,999	-2,40	-208,38	-75,51	6	1,009	-	-	-
0	1,000	-2,37	-70,60	-87,56	0	1,010	1,32	-70,60	-87,56
8	1,001	-2,34	-21,13	-71,23	8	1,011	1,24	12,63	31,27
9	1,010	-2,01	25,92	39,92	9	1,020	1,11	36,00	39,92
10	1,020	-1,61	31,95	40,24	10	1,030	1,19	39,08	39,59
11	1,030	-1,20	34,55	40,01	11	1,040	1,34	40,60	39,51
12	1,040	-0,78	36,10	39,82	12	1,050	1,53	41,60	39,52
13	1,050	-0,34	37,19	39,67	13	1,060	1,75	42,36	39,57
Ação	$v_3$	$Q_{G3}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^\circ)$	Ação	$v_{17}$	$Q_{G17}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^\circ)$
1	0,950	-	-	-	1	0,950	-	-	-
2	0,960	-	-	-	2	0,960	-	-	-
3	0,970	-	-	-	3	0,970	-	-	-
4	0,980	-	-	-	4	0,980	-	-	-
5	0,990	-	-	-	5	0,990	-	-	-
6	0,999	-	-	-	6	0,999	-1,90	-142,41	-86,93
0	1,000	5,09	-70,60	-87,56	0	1,000	-1,87	-70,60	-87,56
8	1,001	4,66	24,29	39,97	8	1,001	-1,84	-45,76	-85,81
9	1,010	3,45	39,68	40,81	9	1,010	-1,54	8,19	23,91
10	1,020	2,85	42,33	41,41	10	1,020	-1,20	20,34	38,04
11	1,030	10,68	41,04	33,22	11	1,030	-0,85	25,37	39,84
12	1,040	-	-	-	12	1,040	-0,49	28,26	40,25
13	1,050	-	-	-	13	1,050	-0,13	30,18	40,32
Ação	$v_{18}$	$Q_{G18}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^\circ)$	Ação	$v_{19}$	$Q_{G19}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^\circ)$
1	0,970	-	-	-	1	0,960	-	-	-
2	0,980	-	-	-	2	0,970	-	-	-
3	0,990	-	-	-	3	0,980	-	-	-
4	1,000	-1,12	-340,25	-30,96	4	0,990	-	-	-
5	1,010	-0,95	-192,46	-79,85	5	1,000	-1,60	-262,93	-55,62
6	1,019	-0,79	-84,96	-87,62	6	1,009	-1,35	-115,30	-87,57
0	1,020	-0,77	-70,60	-87,56	0	1,010	-1,32	-70,60	-87,56
8	1,021	-0,75	-61,76	-87,34	8	1,011	-1,29	-57,00	-87,09
9	1,030	-0,59	-25,43	-76,39	9	1,020	-1,04	-12,30	-51,26
10	1,040	-0,41	-7,72	-33,64	10	1,030	-0,75	5,63	18,03
11	1,050	-0,22	2,91	10,18	11	1,040	-0,45	13,93	32,83
12	1,060	-0,03	9,44	26,26	12	1,050	-0,15	18,69	37,02
13	1,070	0,16	13,78	32,60	13	1,060	0,16	21,82	38,69

Tabela 27: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $v_{20}$ ,  $v_{26}$ ,  $v_{30}$ ,  $v_{31}$ ,  $v_{43}$ ,  $v_{44}$ ,  $v_{45}$ , e  $v_{46}$  para incrementar a margem da barra 29

Ação	$v_{20}$	$Q_{G20}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^{\circ})$	Ação	$v_{26}$	$Q_{G26}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^{\circ})$
1	0,960	-	-	-	1	0,970	-	-	-
2	0,970	-	-	-	2	0,980	-	-	-
3	0,980	-	-	-	3	0,990	-	-	-
4	0,990	-	-	-	4	1,000	-	-	-
5	1,000	-	-	-	5	1,010	-	-	-
6	1,009	-2,04	-160,44	-85,50	6	1,019	0,58	-235,60	-66,17
0	1,010	-2,00	-70,60	-87,56	0	1,020	0,60	-70,60	-87,56
8	1,011	-1,97	-37,40	-83,68	8	1,021	0,62	-15,76	-61,06
9	1,020	-1,64	16,53	35,39	9	1,030	0,92	28,00	40,21
10	1,030	-1,26	25,76	39,86	10	1,040	1,28	33,35	40,16
11	1,040	-0,88	29,60	40,24	11	1,050	1,66	35,68	39,91
12	1,050	-0,48	31,83	40,20	12	1,060	2,06	37,09	39,73
13	1,060	-0,08	33,33	40,08	13	1,070	2,47	38,08	39,61
Ação	$v_{30}$	$Q_{G30}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^{\circ})$	Ação	$v_{31}$	$Q_{G31}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^{\circ})$
1	0,980	-	-	-	1	0,980	-	-	-
2	0,990	-	-	-	2	0,990	-	-	-
3	1,000	-	-	-	3	1,000	-	-	-
4	1,010	-	-	-	4	1,010	-	-	-
5	1,020	-	-	-	5	1,020	-	-	-
6	1,029	1,35	-158,73	-85,83	6	1,029	1,21	-256,23	-58,77
0	1,030	1,38	-70,60	-87,56	0	1,030	1,23	-70,60	-87,56
8	1,031	1,41	-38,06	-83,87	8	1,031	1,26	-12,64	-52,71
9	1,040	1,71	16,46	36,38	9	1,040	1,62	29,84	42,19
10	1,050	2,04	26,10	41,58	10	1,050	2,06	35,27	42,79
11	1,060	2,39	30,20	42,37	11	1,060	2,54	37,81	43,21
12	1,070	2,74	32,63	42,66	12	1,070	3,03	39,43	43,65
13	1,080	3,11	34,30	42,86	13	1,080	3,54	40,61	44,10
Ação	$v_{43}$	$Q_{G43}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^{\circ})$	Ação	$v_{44}$	$Q_{G44}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^{\circ})$
1	0,990	-	-	-	1	0,980	-	-	-
2	1,000	-	-	-	2	0,990	-	-	-
3	1,010	-	-	-	3	1,000	-	-	-
4	1,020	-	-	-	4	1,010	-	-	-
5	1,030	-	-	-	5	1,020	-	-	-
6	1,039	-0,17	-213,36	-74,40	6	1,029	-0,10	-204,61	-77,02
0	1,040	-0,16	-70,60	-87,56	0	1,030	-0,09	-70,60	-87,56
8	1,041	-0,14	-19,66	-69,10	8	1,031	-0,07	-21,78	-72,27
9	1,050	0,03	27,25	41,92	9	1,040	0,10	26,31	41,66
10	1,060	0,25	33,46	42,81	10	1,050	0,31	32,78	42,68
11	1,070	0,49	36,27	43,17	11	1,060	0,54	35,68	43,01
12	1,080	0,75	38,02	43,52	12	1,070	0,79	37,49	43,32
13	1,090	1,02	39,29	43,88	13	1,080	1,04	38,78	43,63
Ação	$v_{45}$	$Q_{G45}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^{\circ})$	Ação	$v_{46}$	$Q_{G46}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^{\circ})$
1	0,980	-	-	-	1	0,980	-	-	-
2	0,990	-	-	-	2	0,990	-	-	-
3	1,000	-	-	-	3	1,000	-	-	-
4	1,010	-	-	-	4	1,010	-	-	-
5	1,020	-	-	-	5	1,020	-	-	-
6	1,029	1,50	-142,70	-87,00	6	1,029	1,38	-174,68	-83,74
0	1,030	1,52	-70,60	-87,56	0	1,030	1,42	-70,60	-87,56
8	1,031	1,55	-45,56	-85,74	8	1,031	1,46	-31,38	-80,92
9	1,040	1,75	8,82	25,84	9	1,040	1,85	21,25	39,73
10	1,050	1,98	21,09	39,72	10	1,050	2,29	29,31	42,21
11	1,060	2,22	26,23	41,70	11	1,060	2,74	32,80	42,64
12	1,070	2,46	29,23	42,33	12	1,070	3,21	34,90	42,88
13	1,080	2,71	31,26	42,62	13	1,080	3,69	36,38	43,10



A exceção à tendência de verificada ocorre para o caso em que há esgotamento na própria barra 29. Nesse caso,  $II_{29}^{Q29}$  é nulo, mas ação de controle baseada no evento correspondente é a que apresenta melhores resultados de estabilidade de tensão. Portanto, aqui observa-se uma limitação de aplicação do método proposto. Entretanto, nos demais casos, o II é útil para indicar as melhores intervenções no sistema.

### 5.5.3

#### Ações de controle preventivas de *tap* de LTC em barras de carga

Conforme já mencionado, ações de controle preventivas também podem ser baseadas em eventos em que há esgotamento da capacidade de controle de tensão via *tap* de LTC.

Por exemplo, para a barra 11, o esgotamento desse tipo mais severo do ponto de vista de estabilidade de tensão é o esgotamento t50, que impede controle de tensão da barra 50. Ações de controle preventivas baseadas nesse evento são apresentadas na Tabela 28. Notam-se, por exemplo, as variações de módulo de tensão e suas consequências sobre a estabilidade de tensão da barra 11. Entretanto, para t32, t62, t55 os índices de estabilidade de tensão são constantes. Pode-se fazer a leitura de que os II desses esgotamentos são tão próximos de zero que as ações de controle preventivas baseadas neles não chegam a alterar os índices de estabilidade de tensão, o que reforça a interpretação do índice de influências.

Além disso, também são exibidas outras ações de controle preventivas baseadas na perda de controle de tensão dos demais LTC da rede, porém menos graves. Em ordem de severidade, essas ações de controle preventivas são baseadas em t32, t62, t55, t65 e t48 conforme II da Tabela 18.

Na Figura 35, é possível ver o efeito da ação de controle baseada no *tap* t50 sobre a margem da barra 11. Para isso, o eixo vertical esquerdo representa o valor da margem de potência da barra 11, enquanto no eixo horizontal são listados valores de  $v_{50}$  associados. Nota-se que a margem  $M_{11}$  e o ângulo  $\beta_{11}$ , representado no eixo vertical direito, se afastam dos valores críticos a medida que a tensão  $v_{50}$  aumenta.

Na Figura 36 são apresentadas as margens de potência da barra 11– $M_{11}$ – quando há aumento de 0,001 pu em cada uma das tensões controladas localmente por LTC. Novamente percebe-se a tendência de obter melhores índices de estabilidade de tensão quando se atua sobre barras relacionadas aos índices de influência mais elevados.

De forma geral, quanto mais negativo o índice de influência de um esgotamento, melhor o efeito de aumentar 0,001 pu a tensão da barra onde

Tabela 28: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $v_{32}$ ,  $v_{48}$ ,  $v_{50}$ ,  $v_{55}$ ,  $v_{62}$  e  $v_{65}$  para incrementar a margem da barra 11

Ação	$v_{50}$	$t_{50}$	$M_{11}(\%)$	$\beta_{11}(^\circ)$	Ação	$v_{32}$	$t_{32}$	$M_{11}(\%)$	$\beta_{11}(^\circ)$
1	0,948	-	-	-	1	0,948	0,995	3,39	177,37
2	0,958	-	-	-	2	0,958	0,995	3,39	177,37
3	0,968	-	-	-	3	0,968	0,995	3,39	177,37
4	0,978	-	-	-	4	0,978	0,995	3,39	177,37
5	0,988	0,930	0,86	179,33	5	0,988	0,995	3,39	177,37
6	0,997	0,932	3,24	177,49	6	0,997	0,995	3,39	177,37
0	0,998	0,932	3,39	177,37	0	0,998	0,995	3,39	177,37
8	0,999	0,932	3,53	177,26	8	0,999	0,995	3,39	177,37
9	1,008	0,934	4,54	176,47	9	1,008	0,995	3,39	177,37
10	1,018	0,935	5,35	175,83	10	1,018	0,995	3,39	177,37
11	1,028	0,936	5,95	175,35	11	1,028	0,995	3,39	177,37
12	1,038	0,936	6,42	174,98	12	1,038	0,995	3,39	177,37
13	1,048	0,937	6,78	174,69	13	1,048	0,995	3,39	177,37
Ação	$v_{62}$	$t_{62}$	$M_{11}(\%)$	$\beta_{11}(^\circ)$	Ação	$v_{55}$	$t_{55}$	$M_{11}(\%)$	$\beta_{11}(^\circ)$
1	0,948	0,963	3,39	177,37	1	0,949	1,070	3,39	177,37
2	0,958	0,963	3,39	177,37	2	0,959	1,059	3,39	177,37
3	0,968	0,963	3,39	177,37	3	0,969	1,048	3,39	177,37
4	0,978	0,963	3,39	177,37	4	0,979	1,038	3,39	177,37
5	0,988	0,963	3,39	177,37	5	0,989	1,027	3,39	177,37
6	0,997	0,963	3,39	177,37	6	0,998	1,018	3,39	177,37
0	0,998	0,963	3,39	177,37	0	0,999	1,017	3,39	177,37
8	0,999	0,963	3,39	177,37	8	1,000	1,016	3,39	177,37
9	1,008	0,963	3,39	177,37	9	1,009	1,007	3,39	177,37
10	1,018	0,963	3,39	177,37	10	1,019	0,997	3,39	177,37
11	1,028	0,963	3,39	177,37	11	1,029	0,987	3,39	177,37
12	1,038	0,963	3,39	177,37	12	1,039	0,978	3,39	177,37
13	1,048	0,963	3,39	177,37	13	1,049	0,968	3,39	177,37
Ação	$v_{65}$	$t_{65}$	$M_{11}(\%)$	$\beta_{11}(^\circ)$	Ação	$v_{48}$	$t_{48}$	$M_{11}(\%)$	$\beta_{11}(^\circ)$
1	0,949	0,979	2,22	178,29	1	0,949	1,022	2,80	177,84
2	0,959	0,979	2,56	178,02	2	0,959	1,023	3,13	177,58
3	0,969	0,979	2,84	177,81	3	0,969	1,023	3,33	177,42
4	0,979	0,979	3,06	177,63	4	0,979	1,024	3,44	177,33
5	0,989	0,979	3,25	177,49	5	0,989	1,025	3,46	177,32
6	0,998	0,979	3,38	177,38	6	0,998	1,026	3,40	177,36
0	0,999	0,979	3,39	177,37	0	0,999	1,026	3,39	177,37
8	1,000	0,979	3,41	177,36	8	1,000	1,026	3,38	177,38
9	1,009	0,979	3,51	177,28	9	1,009	1,027	3,23	177,50
10	1,019	0,979	3,60	177,21	10	1,019	1,028	2,95	177,72
11	1,029	0,979	3,66	177,16	11	1,029	1,028	2,51	178,06
12	1,039	0,979	3,71	177,13	12	1,039	1,029	1,78	178,63
13	1,049	0,979	3,72	177,12	13	1,049	-	-	-

o esgotamento ocorreria. Além disso, os índices de influência relacionados à limitação de  $tap$  de LTC são cerca de 100 vezes menores que os índices de influência relacionados a limitação de geração de potência reativa. Isso auxilia na comparação das Figuras 30 e 36. Nelas observa-se que ações que modificam a tensão controlada por geração de potência reativa têm efeito mais significativo na margem de potência, mesmo quando há aumento de apenas 0,001 pu na

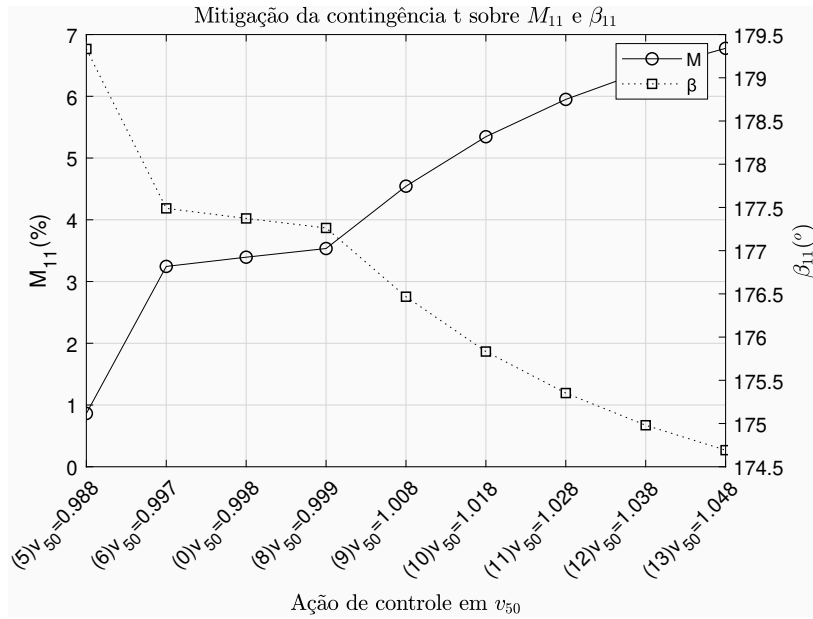


Figura 35: Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo  $\beta$



Figura 36: Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo  $\beta$

tensão controlada.

#### 5.5.4

##### Ações de controle preventivas de *tap* de LTC em barras de geração

A implementação de ações de controle preventivas baseadas em eventos em que há esgotamento da capacidade de controle de tensão por LTC também

será explorada nas barras de geração que estão operando na região anormal da curva Sv.

### • Barra 2

Por exemplo, para a barra 2, o esgotamento desse tipo mais severo do ponto de vista de estabilidade de tensão é o esgotamento t50, que impede controle de tensão da barra 50. Ações de controle preventivas baseadas nesse evento são apresentadas na Tabela 29.

Além disso, também são exibidas outras ações de controle preventivas baseadas na perda de controle de tensão dos demais LTC da rede, porém menos graves. Em ordem de severidade, essas ações de controle preventivas são baseadas em t32, t62, t55, t65 e t48 de acordo com os II da Tabela 18.

Na Figura 37, é possível ver o efeito da ação de controle baseada em  $t_{50}$  sobre a margem da barra 2. Para isso, o eixo vertical esquerdo representa o valor da margem de potência da barra 2, enquanto no eixo horizontal são listadas valores de  $v_{50}$  associados. Já  $\beta_2$  é representado no eixo vertical direito. Nota-se que com aumento de  $v_{50}$ ,  $\beta_2$  distancia-se de  $-180^\circ$ . Entretanto, tanto  $M_2$  quanto  $\beta_2$  continuam negativos.

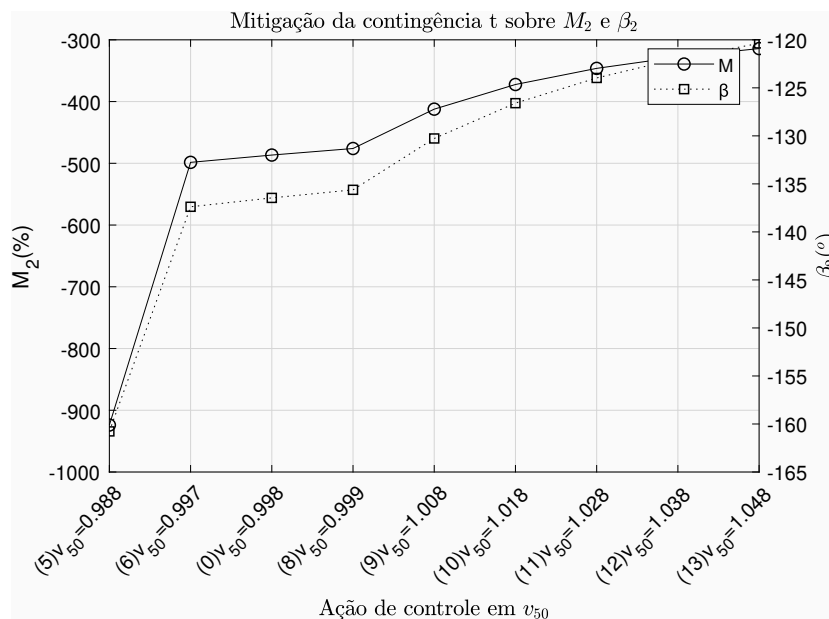


Figura 37: Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo  $\beta$

Na Figura 38 são apresentadas as margens de potência da barra 2 –  $M_2$  – quando há aumento de 0,001 pu em cada uma das tensões controladas localmente por LTC. Novamente percebe-se a tendência de obter melhores

Tabela 29: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $v_{31}$ ,  $v_{33}$ ,  $v_{32}$ , e  $v_{34}$  para incrementar a margem da barra 2

Ação	$v_{50}$	$t_{50}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$	Ação	$v_{32}$	$t_{32}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$
1	0,948	-	-	-	1	0,948	0,995	-486,64	-136,46
2	0,958	-	-	-	2	0,958	0,995	-486,62	-136,46
3	0,968	-	-	-	3	0,968	0,995	-486,60	-136,46
4	0,978	-	-	-	4	0,978	0,995	-486,59	-136,46
5	0,988	0,930	-923,94	-160,77	5	0,988	0,995	-486,62	-136,46
6	0,997	0,932	-498,46	-137,38	6	0,997	0,995	-486,63	-136,46
0	0,998	0,932	-486,63	-136,46	0	0,998	0,995	-486,63	-136,46
8	0,999	0,932	-476,03	-135,62	8	0,999	0,995	-486,62	-136,46
9	1,008	0,934	-412,28	-130,27	9	1,008	0,995	-486,60	-136,46
10	1,018	0,935	-372,36	-126,59	10	1,018	0,995	-486,59	-136,46
11	1,028	0,936	-346,23	-123,97	11	1,028	0,995	-486,62	-136,46
12	1,038	0,936	-327,70	-121,96	12	1,038	0,995	-486,64	-136,46
13	1,048	0,937	-314,18	-120,37	13	1,048	0,995	-486,56	-136,45
Ação	$v_{62}$	$t_{62}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$	Ação	$v_{55}$	$t_{55}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$
1	0,948	0,963	-486,62	-136,46	1	0,949	1,070	-486,54	-136,45
2	0,958	0,963	-486,55	-136,45	2	0,959	1,059	-486,64	-136,46
3	0,968	0,963	-486,65	-136,46	3	0,969	1,048	-486,60	-136,46
4	0,978	0,963	-486,64	-136,46	4	0,979	1,038	-486,65	-136,46
5	0,988	0,963	-486,64	-136,46	5	0,989	1,027	-486,64	-136,46
6	0,997	0,963	-486,63	-136,46	6	0,998	1,018	-486,63	-136,46
0	0,998	0,963	-486,63	-136,46	0	0,999	1,017	-486,63	-136,46
8	0,999	0,963	-486,62	-136,46	8	1,000	1,016	-486,63	-136,46
9	1,008	0,963	-486,63	-136,46	9	1,009	1,007	-486,64	-136,46
10	1,018	0,963	-486,64	-136,46	10	1,019	0,997	-486,53	-136,45
11	1,028	0,963	-486,65	-136,46	11	1,029	0,987	-486,62	-136,46
12	1,038	0,963	-486,60	-136,46	12	1,039	0,978	-486,65	-136,46
13	1,048	0,963	-486,64	-136,46	13	1,049	0,968	-486,61	-136,46
Ação	$v_{65}$	$t_{65}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$	Ação	$v_{48}$	$t_{48}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$
1	0,949	0,979	-605,32	-145,02	1	0,949	1,022	-538,17	-140,54
2	0,959	0,979	-562,91	-142,12	2	0,959	1,023	-508,29	-138,29
3	0,969	0,979	-534,46	-140,08	3	0,969	1,023	-491,33	-136,95
4	0,979	0,979	-513,83	-138,54	4	0,979	1,024	-482,88	-136,25
5	0,989	0,979	-498,31	-137,36	5	0,989	1,025	-481,43	-136,10
6	0,998	0,979	-487,67	-136,54	6	0,998	1,026	-485,79	-136,40
0	0,999	0,979	-486,63	-136,46	0	0,999	1,026	-486,63	-136,46
8	1,000	0,979	-485,62	-136,38	8	1,000	1,026	-487,55	-136,53
9	1,009	0,979	-477,68	-135,76	9	1,009	1,027	-499,74	-137,42
10	1,019	0,979	-471,14	-135,25	10	1,019	1,028	-523,99	-139,18
11	1,029	0,979	-466,51	-134,88	11	1,029	1,028	-569,03	-142,34
12	1,039	0,979	-463,78	-134,67	12	1,039	1,029	-672,90	-148,90
13	1,049	0,979	-462,69	-134,59	13	1,049	-	-	-

índices de estabilidade de tensão quando se atua sobre barras relacionadas aos índices de influência mais elevados.

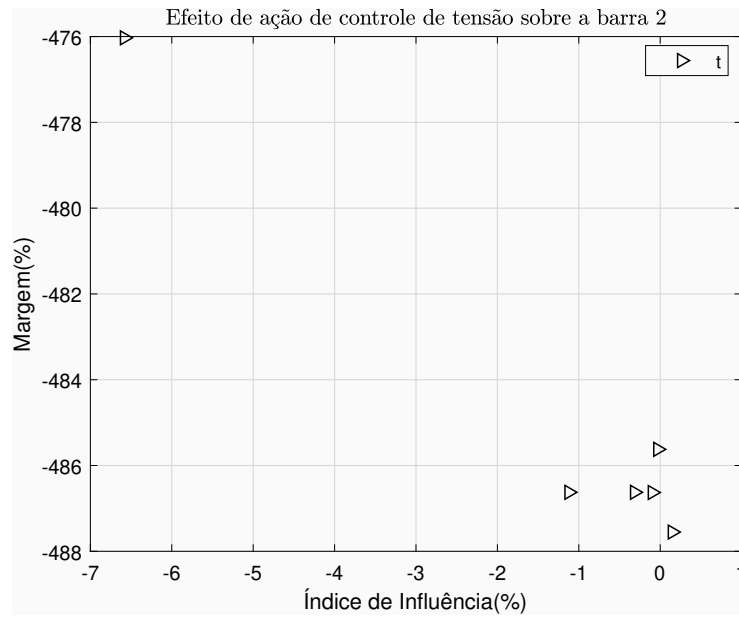


Figura 38: Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo  $\beta$

Conforme já mencionado, os índices de influência relacionados a limitação de *tap* de LTC são cerca de 100 vezes menores que os índices de influência relacionados à limitação de geração de potência reativa. Isso auxilia na comparação das Figuras 32 e 38. Nelas observa-se que ações que modificam a tensão controlada por LTC têm efeito mais limitado sobre a margem de potência. Em todos os casos, para a barra 2, não é possível nem mesmo elevar  $M_2$  e  $\beta_2$  a níveis positivos com as ações de controle preventivas propostas.

#### • Barra 29

Para a barra 29, o evento desse tipo mais severo do ponto de vista de estabilidade de tensão também é o esgotamento  $t_{50}$ , que impede controle de tensão da barra 50. Ações de controle baseadas nesse evento são apresentadas na Tabela 28.

Na Figura 39, é possível ver o efeito da ação de controle baseada em  $t_{50}$  sobre a margem da barra 29 –  $M_{29}$ . Para isso, o eixo vertical esquerdo representa o valor da margem de potência da barra 29, enquanto no eixo horizontal são listadas valores de  $v_{50}$  associados ao caso-base. Já  $\beta_{29}$  é representado no eixo vertical direito. Nota-se que com aumento de  $v_{50}$ ,  $\beta_{29}$  distancia-se de  $-180^\circ$ .

Tabela 30: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $v_{31}$ ,  $v_{33}$ ,  $v_{32}$ , e  $v_{34}$  para incrementar a margem da barra 29

Ação	$v_{50}$	$t_{50}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^\circ)$	Ação	$v_{32}$	$t_{32}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^\circ)$
1	0,948	-	-	-	1	0,948	0,995	-70,62	-87,56
2	0,958	-	-	-	2	0,958	0,995	-70,59	-87,56
3	0,968	-	-	-	3	0,968	0,995	-70,54	-87,56
4	0,978	-	-	-	4	0,978	0,995	-70,53	-87,56
5	0,988	0,930	-361,24	-26,36	5	0,988	0,995	-70,58	-87,56
6	0,997	0,932	-119,90	-87,53	6	0,997	0,995	-70,60	-87,56
0	0,998	0,932	-70,60	-87,56	0	0,998	0,995	-70,60	-87,56
8	0,999	0,932	-55,70	-87,00	8	0,999	0,995	-70,59	-87,56
9	1,008	0,934	-11,04	-46,46	9	1,008	0,995	-70,55	-87,56
10	1,018	0,935	4,82	15,45	10	1,018	0,995	-70,53	-87,56
11	1,028	0,936	11,62	28,89	11	1,028	0,995	-70,57	-87,56
12	1,038	0,936	15,13	32,80	12	1,038	0,995	-70,62	-87,56
13	1,048	0,937	17,12	34,21	13	1,048	0,995	-70,47	-87,56
Ação	$v_{62}$	$t_{62}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^\circ)$	Ação	$v_{55}$	$t_{55}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^\circ)$
1	0,948	0,963	-70,58	-87,56	1	0,949	1,070	-70,44	-87,56
2	0,958	0,963	-70,45	-87,56	2	0,959	1,059	-70,61	-87,56
3	0,968	0,963	-70,63	-87,56	3	0,969	1,048	-70,54	-87,56
4	0,978	0,963	-70,61	-87,56	4	0,979	1,038	-70,63	-87,56
5	0,988	0,963	-70,61	-87,56	5	0,989	1,027	-70,62	-87,56
6	0,997	0,963	-70,60	-87,56	6	0,998	1,018	-70,60	-87,56
0	0,998	0,963	-70,60	-87,56	0	0,999	1,017	-70,60	-87,56
8	0,999	0,963	-70,59	-87,56	8	1,000	1,016	-70,60	-87,56
9	1,008	0,963	-70,59	-87,56	9	1,009	1,007	-70,62	-87,56
10	1,018	0,963	-70,61	-87,56	10	1,019	0,997	-70,42	-87,56
11	1,028	0,963	-70,63	-87,56	11	1,029	0,987	-70,57	-87,56
12	1,038	0,963	-70,55	-87,56	12	1,039	0,978	-70,63	-87,56
13	1,048	0,963	-70,62	-87,56	13	1,049	0,968	-70,56	-87,56
Ação	$v_{65}$	$t_{65}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^\circ)$	Ação	$v_{48}$	$t_{48}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^\circ)$
1	0,949	0,979	-217,45	-72,74	1	0,949	1,022	-167,48	-84,14
2	0,959	0,979	-190,35	-80,47	2	0,959	1,023	-134,00	-86,93
3	0,969	0,979	-168,05	-84,61	3	0,969	1,023	-74,74	-87,39
4	0,979	0,979	-146,83	-86,72	4	0,979	1,024	-61,80	-87,20
5	0,989	0,979	-120,69	-87,55	5	0,989	1,025	-61,01	-87,23
6	0,998	0,979	-72,59	-87,59	6	0,998	1,026	-68,92	-87,53
0	0,999	0,979	-70,60	-87,56	0	0,999	1,026	-70,60	-87,56
8	1,000	0,979	-68,78	-87,53	8	1,000	1,026	-72,53	-87,60
9	1,009	0,979	-57,17	-87,09	9	1,009	1,027	-126,07	-87,59
10	1,019	0,979	-49,67	-86,39	10	1,019	1,028	-159,80	-85,92
11	1,029	0,979	-44,99	-85,65	11	1,029	1,028	-196,28	-79,62
12	1,039	0,979	-42,39	-85,11	12	1,039	1,029	-255,56	-59,54
13	1,049	0,979	-41,32	-84,85	13	1,049	-	-	-

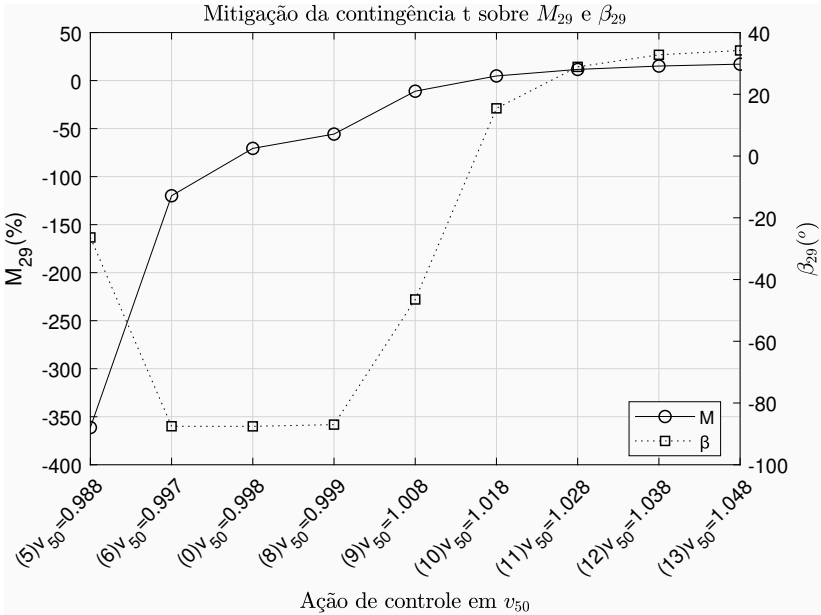


Figura 39: Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo  $\beta$

Na Figura 40 são apresentadas as margens de potência da barra 29 –  $M_{29}$  – quando há aumento de 0,001 pu em cada uma das tensões controladas localmente por LTC. Novamente percebe-se a tendência de obter melhores índices de estabilidade de tensão quando atua-se sobre barras relacionadas aos índices de influência mais elevados.

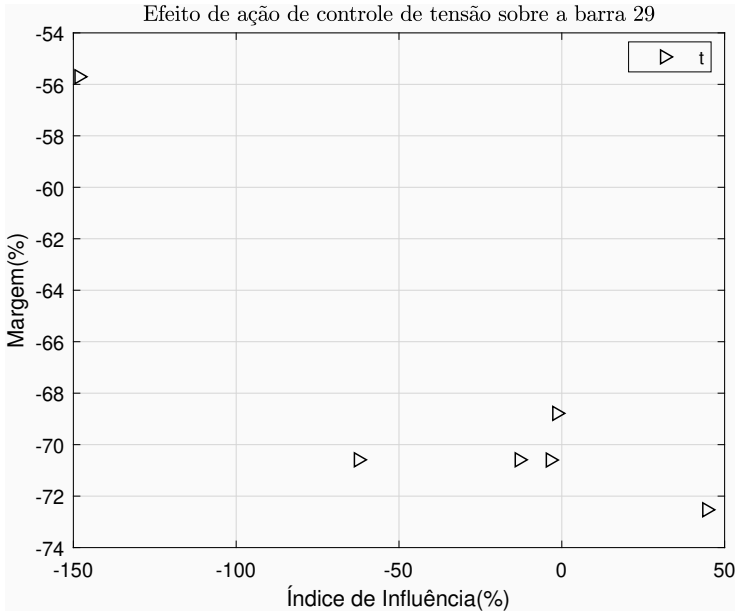


Figura 40: Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência e sobre o ângulo  $\beta$



Conforme já mencionado, os índices de influência relacionados a limitação de *tap* de LTC são cerca de 100 vezes menores que os índices de influência relacionados à limitação de geração de potência reativa. Isso auxilia na comparação das Figuras 34 e 40. Nelas observa-se que ações que modificam a tensão controlada por LTC têm efeito mais limitado sobre a margem de potência. A exceção está no caso do LTC que controla a tensão da barra 50, onde tem-se  $t_{50}$  com mesma ordem de grandeza do principal esgotamento relacionado a potência reativa, conforme observa-se na Tabela 18. A ação de controle sobre  $v_{50}$  foi a única ação de controle preventiva que tornou  $M_{29}$  e  $\beta_{29}$  positivos, como observa-se na Tabela 30.

### 5.5.5

#### Ações de controle preventivas de potência ativa em barras de carga

Conforme exposto na Seção 5.3, ações de controle preventivas baseadas em geração de potência ativa tem uma particularidade, pois esse tipo de ação de controle preventiva deve manter a potência total gerada no sistema elétrico. Então, não é possível modificar parâmetros apenas em uma barra. Portanto, cada ação de controle é na verdade um conjunto de intervenções coordenadas.

De acordo com a Tabela 18, para a barra 11, a ocorrência P1 é o pior esgotamento de geração de potência ativa. Além disso, tanto P1 quanto P2 têm índices de influência com sinal oposto aos dos demais esgotamentos de geração de potência ativa. Assim, de acordo com (5.1), as ações de controle preventivas para aumentar margem de potência da barra 11 envolvem mudar o ponto de operação do sistema de tal modo que  $P_{G1}$  e  $P_{G2}$  sofram pequena variação em torno do ponto de operação do caso-base. Contudo, para que a geração de potência ativa total do sistema não se altere, outras barras devem compensar as variações de  $P_{G1}$  e  $P_{G2}$ . Portanto, as gerações de potência ativa nas demais barras *slack* compensarão as variações de  $P_{G1}$  e  $P_{G2}$ .

As ações de controle preventivas propostas são descritas na Tabela 31, onde notam-se as variações da potência ativa gerada nas barras *slack*. Essas variações são calculadas mantendo a proporcionalidade entre essas variações e seus respectivos índices de influência, conforme (5.1).

Na Figura 41, é possível ver o efeito da ação de controle sobre a margem da barra 11. Para isso, o eixo vertical esquerdo representa a margem de potência da barra 11 enquanto no eixo horizontal são listadas diferentes  $P_{G1}$ , sendo cada uma delas associada a uma ação de controle ou ao caso-base, sem ação de controle. Nota-se que, nas proximidades do ponto de operação do caso-base (ações de controle preventivas 4 a 8), à medida que  $P_{G1}$  aumenta, a margem  $M_{11}$  diminui. Análise semelhante pode ser feita com  $\beta_{11}$ , cujos valores são

Tabela 31: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $P_{G1}$ ,  $P_{G2}$ ,  $P_{G17}$ ,  $P_{G18}$ ,  $P_{G19}$ ,  $P_{G20}$ ,  $P_{G26}$ ,  $P_{G29}$ ,  $P_{G30}$ ,  $P_{G31}$ ,  $P_{G43}$ ,  $P_{G44}$ ,  $P_{G45}$ , e  $P_{G46}$  para incrementar a margem da barra 11

Ação	$P_{G1}$	$P_{G2}$	$P_{G17}$	$P_{G18}$	$P_{G19}$	$P_{G20}$	$P_{G26}$	$P_{G29}$
1	620	830	707	271	375	231	834	1674
2	656	844	706	267	370	225	827	1669
3	692	858	704	263	365	219	820	1664
4	728	872	703	258	360	212	814	1659
5	764	886	701	254	355	206	807	1654
6	799	900	700	250	350	200	800	1649
0	800	900	700	250	350	200	800	1649
8	801	900	700	250	350	200	800	1649
9	836	914	699	246	345	194	793	1644
10	872	928	697	242	340	188	786	1639
11	908	942	696	237	335	181	780	1635
12	944	956	694	233	330	175	773	1630
13	980	970	693	229	325	169	766	1625

Ação	$P_{G30}$	$P_{G31}$	$P_{G43}$	$P_{G44}$	$P_{G45}$	$P_{G46}$	$M_{11}(\%)$	$\beta_{11}(^\circ)$
1	1194	1226	714	611	709	954	3,77	176,80
2	1186	1221	711	608	707	953	6,24	174,79
3	1177	1215	708	606	705	953	7,18	174,09
4	1168	1210	705	604	703	952	7,22	174,14
5	1159	1205	703	602	702	951	6,31	174,98
6	1150	1200	700	600	700	950	3,53	177,26
0	1150	1200	700	600	700	950	3,39	177,37
8	1150	1200	700	600	700	950	3,25	177,49
9	1141	1195	697	598	698	949	-	-
10	1132	1190	695	596	697	948	-	-
11	1123	1185	692	594	695	947	-	-
12	1114	1179	689	592	693	947	-	-
13	1106	1174	686	589	691	946	-	-

representados no eixo vertical direito. Nota-se que, à medida que  $P_{G1}$  aumenta,  $\beta_{11}$  é elevado. Isso não ocorre até a ação de controle 3, indicando que os II têm validade somente perto do ponto de operação em que são calculados.

Em outras palavras, pode-se dizer que o objetivo das ações de controle preventivas, que era afastar a barra 11 do ponto crítico, foi alcançado. Ou seja, as margens da barra 11 são maiores nos casos pós-controle – em que houve ação de controle preventiva com elevação de  $P_{G1}$  – do que naquele sem ação de controle, o caso-base. Entretanto, a partir da ação 4, verifica-se deterioração dos índices das ações 3, 2 e 1. Aqui deve-se lembrar que o problema é não linear e que os II são calculados no caso-base.

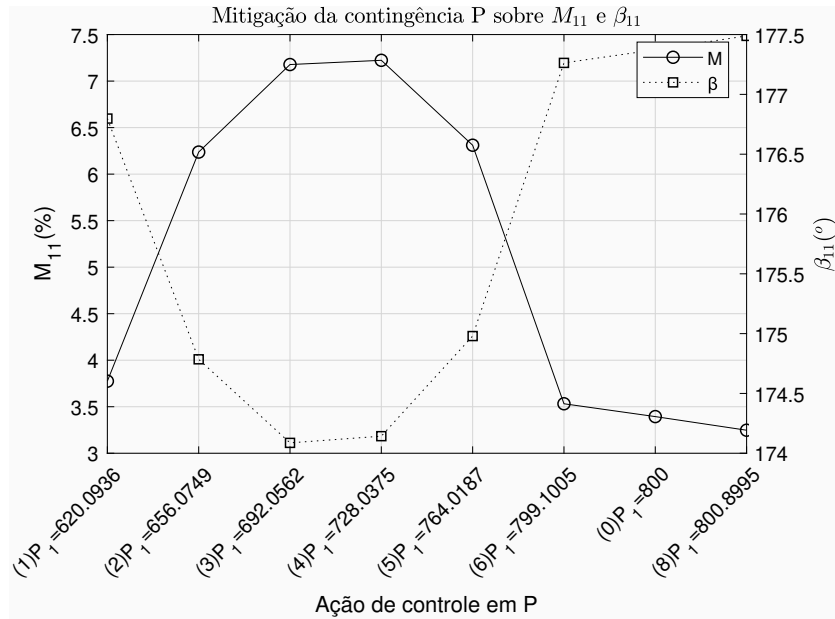


Figura 41: Efeito das ações de controle preventivas sobre a margem de potência  $M_{11}$  e sobre o ângulo  $\beta_{11}$

### 5.5.6

#### Ações de controle preventivas de potência ativa em barras de geração

##### • Barra 2

De acordo com a Tabela 18, para a barra 2, P29 identifica o esgotamento de geração de potência ativa mais influente, pois está atrelado ao II de maior módulo. Assim, as ações de controle preventivas da barra 2 envolvem mudar o ponto de operação do sistema, de acordo com (5.1), de tal modo que  $P_{G29}$  sofra pequena variação em torno do ponto de operação do caso-base. Contudo, para que a geração de potência ativa total do sistema não se altere, outras barras devem compensar as variações de  $P_{G29}$ . Neste caso, sabe-se que  $II_2^{P29}$  tem sinal oposto a  $II_2^{P1}$ . Portanto, a geração de potência ativa na barra 1 compensará as variações de  $P_{G29}$ . Além disso, sabe-se que os índices de influência relativos a limitação de geração de potência ativa das demais barras *swing* sobre a barra 2 são nulos. Consequentemente, não há necessidade de alterar a geração de potência ativa das demais barras *swing*.

As ações de controle preventivas propostas são ilustradas na Figura 32 e descritas na Tabela 32, onde notam-se as variações da potência ativa gerada nas barras *slack*. Essas variações são calculadas mantendo a proporcionalidade entre essas variações e seus respectivos índices de influência, conforme (5.1).

Nota-se que apenas as ações de controle preventivas e 6 e 8 apresentam solução convergente de fluxo de potência e que, mesmo nesses casos, os índices

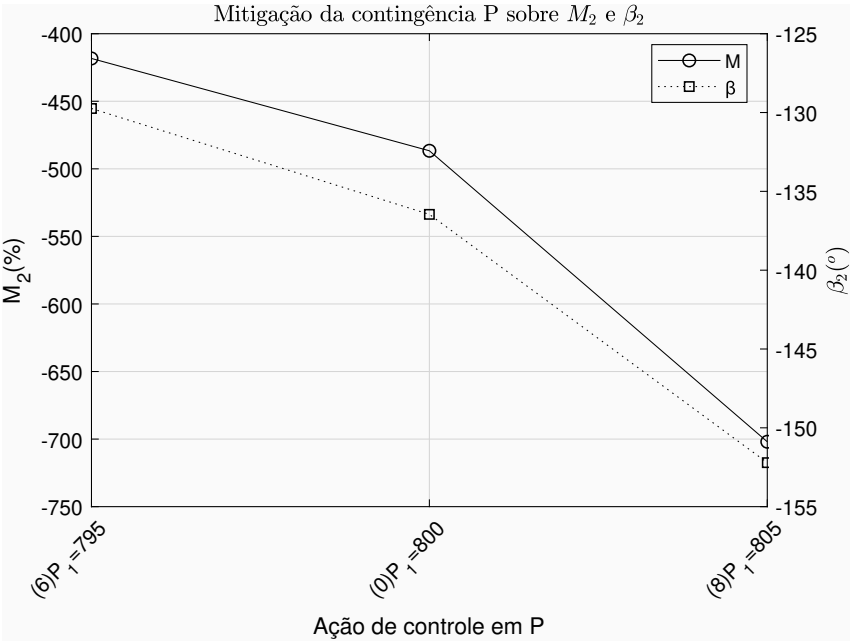


Figura 42: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $P_{G1}$ ,  $P_{G2}$ ,  $P_{G17}$ ,  $P_{G18}$ ,  $P_{G19}$ ,  $P_{G20}$ ,  $P_{G26}$ ,  $P_{G29}$ ,  $P_{G30}$ ,  $P_{G31}$ ,  $P_{G43}$ ,  $P_{G44}$ ,  $P_{G45}$ , e  $P_{G46}$  para incrementar a margem da barra 2

$M_2$  e  $\beta_2$  continuam negativos.

Tabela 32: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $P_{G1}$ ,  $P_{G2}$ ,  $P_{G17}$ ,  $P_{G18}$ ,  $P_{G19}$ ,  $P_{G20}$ ,  $P_{G26}$ ,  $P_{G29}$ ,  $P_{G30}$ ,  $P_{G31}$ ,  $P_{G43}$ ,  $P_{G44}$ ,  $P_{G45}$ , e  $P_{G46}$  para incrementar a margem da barra 2

Ação	$P_{G1}$	$P_{G2}$	$P_{G17}$	$P_{G18}$	$P_{G19}$	$P_{G20}$	$P_{G26}$	$P_{G29}$
1	-200	900	700	250	350	200	800	2649
2	-0	900	700	250	350	200	800	2449
3	200	900	700	250	350	200	800	2249
4	400	900	700	250	350	200	800	2049
5	600	900	700	250	350	200	800	1849
6	795	900	700	250	350	200	800	1654
0	800	900	700	250	350	200	800	1649
8	805	900	700	250	350	200	800	1644
9	1000	900	700	250	350	200	800	1449
10	1200	900	700	250	350	200	800	1249
11	1400	900	700	250	350	200	800	1049
12	1600	900	700	250	350	200	800	849
13	1800	900	700	250	350	200	800	649

Ação	$P_{G30}$	$P_{G31}$	$P_{G43}$	$P_{G44}$	$P_{G45}$	$P_{G46}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$
1	1150	1200	700	600	700	950	-	-
2	1150	1200	700	600	700	950	-	-
3	1150	1200	700	600	700	950	-	-
4	1150	1200	700	600	700	950	-	-
5	1150	1200	700	600	700	950	-	-
6	1150	1200	700	600	700	950	-418,32	-129,74
0	1150	1200	700	600	700	950	-486,63	-136,46
8	1150	1200	700	600	700	950	-701,97	-152,21
9	1150	1200	700	600	700	950	-	-
10	1150	1200	700	600	700	950	-	-
11	1150	1200	700	600	700	950	-	-
12	1150	1200	700	600	700	950	-	-
13	1150	1200	700	600	700	950	-	-

### • Barra 29

De acordo com a Tabela 18, para a barra 29, P1 é o esgotamento de geração de potência ativa mais significativo. Assim, as ações de controle preventivas da barra 29 envolvem mudar o ponto de operação do sistema, de acordo com (5.1), de tal modo que  $P_{G1}$  sofra pequena variação em torno do ponto de operação do caso-base. Contudo, para que a geração de potência ativa total do sistema não se altere, outras barras devem compensar as variações de  $P_{G1}$ . Neste caso, sabe-se que  $II_{29}^{P1}$  tem sinal positivo, assim como quase todas as demais barras *slack*. A exceção é a própria barra 29, com  $II_{29}^{P29} = 0$ . Portanto, a geração de potência ativa na barra 29 compensará as variações de  $P_{G1}$  e da demais barras *swing*.

As ações de controle preventivas propostas são ilustradas na Figura 33 e descritas na Tabela 33, onde notam-se as variações da potência ativa gerada nas barras *slack*. Adicionalmente, a ação de controle identificada como "0" corresponde ao sistema sem ação de controle. Por último, nas ações de controle preventivas em que não há solução convergente para o problema de fluxo de potência, os índices de estabilidade são indicados como "-".

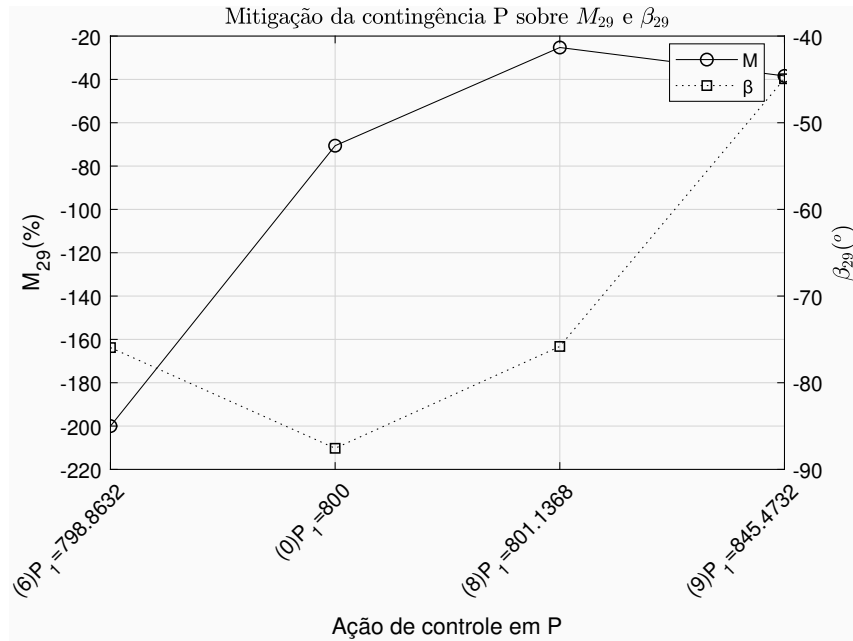


Figura 43: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $P_{G1}$ ,  $P_{G2}$ ,  $P_{G17}$ ,  $P_{G18}$ ,  $P_{G19}$ ,  $P_{G20}$ ,  $P_{G26}$ ,  $P_{G29}$ ,  $P_{G30}$ ,  $P_{G31}$ ,  $P_{G43}$ ,  $P_{G44}$ ,  $P_{G45}$ , e  $P_{G46}$  para incrementar a margem da barra 29

Nota-se que apenas as ações de controle preventivas e 6, 8 e 9 apresentam solução convergente de fluxo de potência e que, mesmo nesses casos, os índices  $M_{29}$  e  $\beta_{29}$  continuam negativos.

Comparando-se índices de influência do esgotamento P1 sobre as margens da subestação Campinas 345kV e sobre as usinas Marimbondo e Gov. Bento Munhoz (barras 11, 2 e 29 respectivamente), observa-se que não há relação entre o sinal do índice de influência e o sentido de variação da geração de potência ativa da barra 1 que faz a margem da subestação ou usina em questão aumentar. Entende-se que isso ocorre porque ações de controle preventivas em P interferem em gerações de múltiplas barras simultaneamente. Portanto, não há como inferir os efeitos da ação de controle preventiva baseando-se no II de apenas uma dessas barras.

Apesar de ações de controle preventivas baseadas em geração de potência ativa serem benéficas para as margens de potência das barras críticas de geração, essas ações isoladamente não são suficientes para colocar as barras

Tabela 33: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $P_{G1}$ ,  $P_{G2}$ ,  $P_{G17}$ ,  $P_{G18}$ ,  $P_{G19}$ ,  $P_{G20}$ ,  $P_{G26}$ ,  $P_{G29}$ ,  $P_{G30}$ ,  $P_{G31}$ ,  $P_{G43}$ ,  $P_{G44}$ ,  $P_{G45}$ , e  $P_{G46}$  para incrementar a margem da barra 29

Ação	$P_{G1}$	$P_{G2}$	$P_{G17}$	$P_{G18}$	$P_{G19}$	$P_{G20}$	$P_{G26}$	$P_{G29}$
1	573	826	627	177	277	127	727	2649
2	618	841	642	192	292	142	742	2449
3	664	856	656	206	306	156	756	2249
4	709	870	671	221	321	171	771	2049
5	755	885	685	235	335	185	785	1849
6	799	900	700	250	350	200	800	1654
0	800	900	700	250	350	200	800	1649
8	801	900	700	250	350	200	800	1644
9	845	915	715	265	365	215	815	1449
10	891	930	729	279	379	229	829	1249
11	936	944	744	294	394	244	844	1049
12	982	959	758	308	408	258	858	849
13	1027	974	773	323	423	273	873	649
Ação	$P_{G30}$	$P_{G31}$	$P_{G43}$	$P_{G44}$	$P_{G45}$	$P_{G46}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^\circ)$
1	1077	1133	642	547	651	915	-	-
2	1092	1147	654	557	661	922	-	-
3	1106	1160	665	568	671	929	-	-
4	1121	1173	677	579	681	936	-	-
5	1135	1187	688	589	690	943	-	-
6	1150	1200	700	600	700	950	-200,01	-75,94
0	1150	1200	700	600	700	950	-70,60	-87,56
8	1150	1200	700	600	700	950	-25,27	-75,81
9	1165	1213	712	611	710	957	-38,39	-44,93
10	1179	1227	723	621	719	964	-	-
11	1194	1240	735	632	729	971	-	-
12	1208	1253	746	643	739	978	-	-
13	1223	1267	758	653	749	985	-	-

2 e 29 na região normal de operação. Por isso, sugere-se ações de controle preventivas combinadas baseadas em potência ativa e reativa.

### 5.5.7

#### Ações combinadas: potência ativa e reativa

Estratégias de ações de controle preventivas baseadas em geração de potência reativa cumpriram o objetivo de elevar a margem de potência das barras críticas de geração a valores positivos. Já estratégias de ações de controle preventivas usando controle de geração de potência ativa não alcançaram tal objetivo. A próxima etapa investiga a combinação de ambas as estratégias de ações de controle preventivas.

##### • Barra 2

Por exemplo, da Tabela 22, sabe-se que para ações de controle preventivas baseadas em geração de potência reativa, quando a tensão  $v_2=1,011$  pu, tem-se  $M_2 = -350,24\%$ . Já quando a tensão  $v_2=1,020$  pu, tem-se  $M_2 = 12,13\%$ . Na Tabela 34, observa-se o efeito de escolher-se um nível intermediário de tensão  $v_2=1,017$  pu e, simultaneamente, variar a geração de potência ativa das barras *swing* conforme apresentado na Seção 5.3.2. Como a ação de controle identificada como 0 corresponde a situação em que as gerações de potências ativas coincidem com as do caso-base, então, na verdade, observa-se o efeito unicamente da elevação de tensão da barra 2. Nesse caso, o índice  $M_2$  estabelece-se em  $-36,93\%$ . Já no cenário em que aplicam-se concomitantemente a ação de controle preventiva que eleva  $v_2=1,017$  pu e a ação de controle preventiva de potência ativa 6, a margem passa a ser de  $-34,06\%$ . Esse resultado é maior que dois cenários anteriores: aquele em que altera-se somente  $v_2$ , levando a  $M_2 = -36,93\%$ , e aquele em que altera-se somente as gerações de potência ativa com  $M_2 = -418,32\%$ , conforme ação 6 da Tabela 32.

Os dados da Tabela 34 são exibidos na Figura 44, onde notam-se os efeitos da aplicação concomitante de ações de controle preventivas baseadas em geração de potência ativa e na elevação de  $v_2$  a 1,017 pu. Destaca-se o ponto relacionando à ação de controle preventiva 4, pois nele a margem de potência  $M_2 = 15,96\%$  é positiva. Ou seja, a articulação de dois tipos diferentes de ação de controle preventiva foi responsável por levar a barra 2 para a região normal de operação evitando que os recursos de geração de potência ativa e reativa fossem requisitados ao extremo.

Nota-se que ações de controle preventivas que reduzem a geração  $P_{G1}$  inicialmente melhoram os índices de estabilidade de tensão, conforme observado nas ações 6, 5 e 4. Porém, quando há grande variação nas gerações de potência ativa,  $M_2$  e  $\beta_2$  pioram, conforme observado nas ações de controle preventivas 2 e 1. Isso ocorre porque os pontos de operação pós-controle nesses casos estão distantes do ponto de operação do caso base, onde os índices de



Tabela 34: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $P_{G1}$ ,  $P_{G2}$ ,  $P_{G17}$ ,  $P_{G18}$ ,  $P_{G19}$ ,  $P_{G20}$ ,  $P_{G26}$ ,  $P_{G29}$ ,  $P_{G30}$ ,  $P_{G31}$ ,  $P_{G43}$ ,  $P_{G44}$ ,  $P_{G45}$ ,  $P_{G46}$  e  $v_2$  para incrementar a margem da barra 2

Ação	$P_{G1}$	$P_{G2}$	$P_{G17}$	$P_{G18}$	$P_{G19}$	$P_{G20}$	$P_{G26}$	$P_{G29}$
1	550	900	700	250	350	200	800	1899
2	600	900	700	250	350	200	800	1849
3	650	900	700	250	350	200	800	1799
4	700	900	700	250	350	200	800	1749
5	750	900	700	250	350	200	800	1699
6	799	900	700	250	350	200	800	1651
0	800	900	700	250	350	200	800	1649
8	801	900	700	250	350	200	800	1648
9	850	900	700	250	350	200	800	1599
10	900	900	700	250	350	200	800	1549
11	950	900	700	250	350	200	800	1499
12	1000	900	700	250	350	200	800	1449
13	1050	900	700	250	350	200	800	1399

Ação	$P_{G30}$	$P_{G31}$	$P_{G43}$	$P_{G44}$	$P_{G45}$	$P_{G46}$	$M_2(\%)$	$\beta_2(^{\circ})$
1	1150	1200	700	600	700	950	-	-
2	1150	1200	700	600	700	950	-279,71	-49,02
3	1150	1200	700	600	700	950	-5,84	-67,44
4	1150	1200	700	600	700	950	15,96	44,43
5	1150	1200	700	600	700	950	11,56	21,49
6	1150	1200	700	600	700	950	-34,06	-43,04
0	1150	1200	700	600	700	950	-36,93	-45,51
8	1150	1200	700	600	700	950	-40,04	-47,99
9	1150	1200	700	600	700	950	-276,56	-117,17
10	1150	1200	700	600	700	950	-	-
11	1150	1200	700	600	700	950	-	-
12	1150	1200	700	600	700	950	-	-
13	1150	1200	700	600	700	950	-	-

influência foram calculados. Ou seja, houve variação de geração sem que fosse feita nova linearização das equações de fluxo de potência do sistema e sem que novos índices de influência fossem calculados.

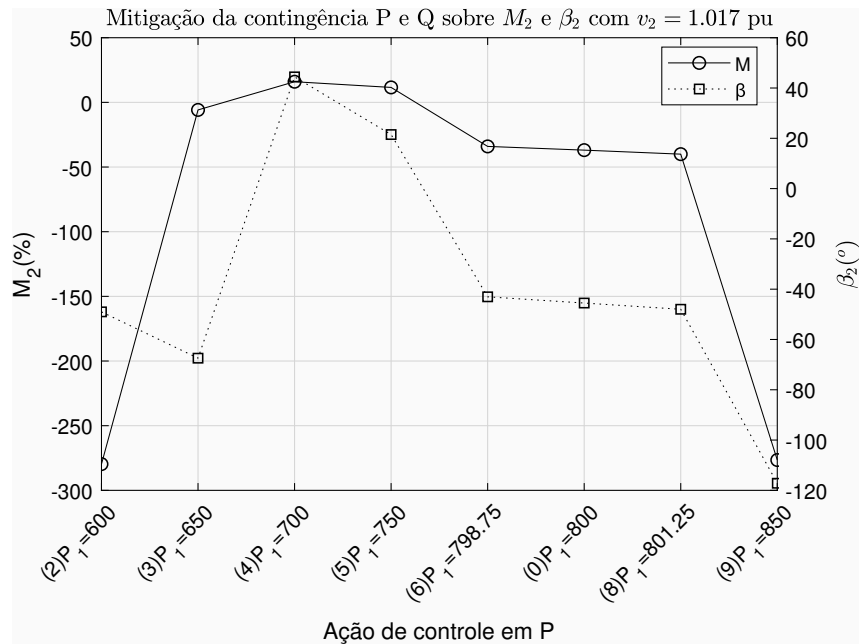


Figura 44: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $P_{G1}$ ,  $P_{G2}$ ,  $P_{G17}$ ,  $P_{G18}$ ,  $P_{G19}$ ,  $P_{G20}$ ,  $P_{G26}$ ,  $P_{G29}$ ,  $P_{G30}$ ,  $P_{G31}$ ,  $P_{G43}$ ,  $P_{G44}$ ,  $P_{G45}$ ,  $P_{G46}$  e  $v_2$  para incrementar a margem da barra 2

#### • Barra 29

Por exemplo, da Tabela 25, sabe-se que para ações de controle preventivas baseadas em geração de potência reativa, quando a tensão  $v_{29}=1,030$  pu, tem-se  $M_{29} = -70,60\%$ . Na Tabela 35, observa-se o efeito de escolher-se um nível de tensão  $v_2=1,031$  pu e, simultaneamente, variar a geração de potência ativa das barras *swing* conforme apresentado na Seção 5.3.2. Como a ação de controle identificada como 0 corresponde a situação em que as gerações de potências ativas coincidem com as do caso-base, então, na verdade, observa-se o efeito unicamente da elevação de tensão da barra 29. Nesse caso, os índices  $M_{29}$  e  $\beta_{29}$  são os mesmos da ação 8 da Tabela 25. Já no cenário em que aplicam-se concomitantemente a ação de controle que eleva  $v_{29}=1,031$  pu e a ação de controle de potência ativa 8, a margem passa a ser de 2,88%. Esse resultado é maior que dois cenários anteriores: aquele em que altera-se somente  $v_{29}$ , levando a  $M_{29} = 0,66\%$  e aquele em que altera-se somente as gerações de potência ativa com  $M_{29} = -25,27\%$ , conforme ação 8 da Tabela 33.

Os dados da Tabela 35 são exibidos na Figura 45, onde notam-se os efeitos da aplicação concomitante de ações de controle preventivas baseadas em geração de potência ativa e na elevação de  $v_{29}$  a 1,031 pu. Destaca-se o ponto relacionando à ação de controle preventiva 9, pois nele a margem de potência  $M_2 = 21,39\%$  é positiva. Ou seja, a articulação de dois tipos diferentes de ação de controle preventiva foi responsável por levar a barra 2 para a região normal de operação evitando que os recursos de geração de potência ativa e reativa

Tabela 35: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $P_{G1}$ ,  $P_{G2}$ ,  $P_{G17}$ ,  $P_{G18}$ ,  $P_{G19}$ ,  $P_{G20}$ ,  $P_{G26}$ ,  $P_{G29}$ ,  $P_{G30}$ ,  $P_{G31}$ ,  $P_{G43}$ ,  $P_{G44}$ ,  $P_{G45}$ ,  $P_{G46}$  e  $v_{29}$  para incrementar a margem da barra 29

Ação	$P_{G1}$	$P_{G2}$	$P_{G17}$	$P_{G18}$	$P_{G19}$	$P_{G20}$	$P_{G26}$	$P_{G29}$
1	743	882	682	232	332	182	782	1899
2	755	885	685	235	335	185	785	1849
3	766	889	689	239	339	189	789	1799
4	777	893	693	243	343	193	793	1749
5	789	896	696	246	346	196	796	1699
6	800	900	700	250	350	200	800	1651
0	800	900	700	250	350	200	800	1649
8	800	900	700	250	350	200	800	1648
9	811	904	704	254	354	204	804	1599
10	823	907	707	257	357	207	807	1549
11	834	911	711	261	361	211	811	1499
12	845	915	715	265	365	215	815	1449
13	857	918	718	268	368	218	818	1399

Ação	$P_{G30}$	$P_{G31}$	$P_{G43}$	$P_{G44}$	$P_{G45}$	$P_{G46}$	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^\circ)$
1	1132	1183	685	587	688	941	-	-
2	1135	1187	688	589	690	943	-	-
3	1139	1190	691	592	693	945	-	-
4	1143	1193	694	595	695	946	-	-
5	1146	1197	697	597	698	948	-	-
6	1150	1200	700	600	700	950	-1,94	-8,15
0	1150	1200	700	600	700	950	0,66	2,54
8	1150	1200	700	600	700	950	2,88	10,25
9	1154	1203	703	603	702	952	21,39	30,38
10	1157	1207	706	605	705	954	20,21	23,63
11	1161	1210	709	608	707	955	13,10	13,62
12	1165	1213	712	611	710	957	-13,39	-13,71
13	1168	1217	715	613	712	959	-	-

fossem requisitados ao extremo.

Novamente, nota-se que ações de controle preventivas que reduzem a geração  $P_{G1}$  inicialmente melhoram os índices de estabilidade de tensão, conforme observado nas ações 8 a 11. Porém, quando há grande variação nas gerações de potência ativa,  $M_{29}$  e  $\beta_{29}$  pioram, conforme observado na ação de controle preventiva 12. Conforme já mencionado, isso ocorre porque os pontos de operação pós-controle nesses casos estão distantes do ponto de operação do caso base, onde os índices de influência foram calculados.

## 5.6

### Resumo

As ações de controle preventivas propostas e implementadas ao longo deste capítulo são intervenções sobre as tensões especificadas ou sobre o

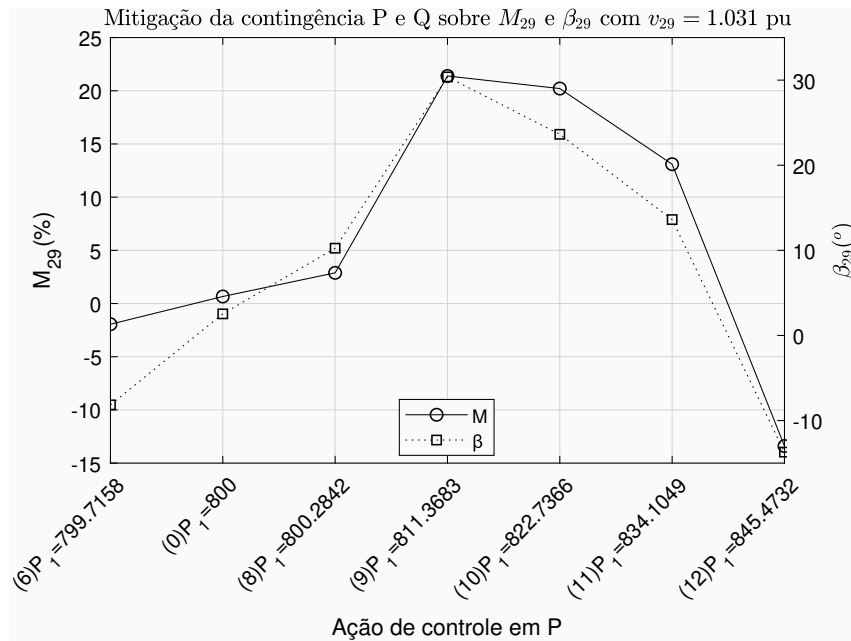


Figura 45: Ações de controle preventivas implementadas sobre  $P_{G1}$ ,  $P_{G2}$ ,  $P_{G17}$ ,  $P_{G18}$ ,  $P_{G19}$ ,  $P_{G20}$ ,  $P_{G26}$ ,  $P_{G29}$ ,  $P_{G30}$ ,  $P_{G31}$ ,  $P_{G43}$ ,  $P_{G44}$ ,  $P_{G45}$ , e  $P_{G46}$  para incrementar a margem da barra 29

despacho de potência ativa de um sistema elétrico. Essas ações de controle têm por objetivo melhorar as condições de estabilidade de tensão de uma dada barra do sistema, fazendo com que a margem de potência seja maior do que se as ações de controle preventivas não fossem tomadas. Três estratégias de ações de controle são empregadas para esse fim.

Há ações de controle preventivas baseadas na influência de esgotamentos de geração de potência reativa, critério que serve para identificar a tensão que deve ser alterada. Primeiramente, nota-se tendência de que o efeito benéfico da ação de controle preventiva é maior se a tensão modificada for da barra cuja limitação de geração de potência reativa influencia mais a margem de potência da barra crítica de carga (aquela cuja margem de potência é menor e, portanto, deve ser elevada). Já para a barra crítica de geração (aquela cuja margem de potência é menor e, portanto, deve ser elevada), o efeito benéfico da ação de controle preventiva tende a ser máximo se a tensão modificada for a tensão da própria barra crítica de geração, caso em que o índice de influência é nulo. Também é possível elevar a margem de potência de estabilidade de tensão da barra de geração crítica alterando-se a tensão de outras barras. Nesse caso, embora o efeito seja menos significativo, ele é maior se a tensão modificada for da barra cuja limitação de geração de potência reativa influenciar mais a margem de potência da barra crítica de geração. Isso indica que ações de controle preventivas baseadas em esgotamentos de II nulo apresentam melhores resultados de estabilidade de tensão que aquelas baseadas em esgotamento de

II-não nulo. Portanto, aqui observa-se uma limitação de aplicação do método proposto. Entretanto, nos demais casos, o II é útil para indicar as melhores intervenções no sistema.

Ainda há ações de controle preventivas baseadas na análise da influência de esgotamentos de geração de potência ativa. Nesse caso, observa-se que o redespacho de geração de potência ativa pode melhorar as condições de estabilidade de tensão da rede. As ações baseiam-se nos índices de influência da limitação de geração de potência ativa sobre uma barra crítica (de carga ou de geração). Assim, gerações cujo esgotamento leva a índices de influência negativos tem variação em sentido oposto a gerações cujo esgotamento leva a índices de influência positivos. Isso garante a manutenção da geração de potência ativa total do sistema. Como resultado, nota-se que a variação de geração de potência ativa feita de forma coordenada em diversas barras também é capaz de melhorar as condições de estabilidade de tensão.

Por último, há ações de controle preventivas combinadas, que consistem em aplicar ações de controle preventivas de potência ativa e reativa conjuntamente. Nesse caso, é possível elevar as margens de potência a valores maiores do que quando cada uma das ações de controle preventivas é aplicada isoladamente. Assim, pode-se dizer que, as ações de controle preventivas alcançaram o objetivo de melhorar as condições de estabilidade de tensão das barras críticas do sistema, conforme exemplificado no sistema CEPEL-34.

De forma geral, nota-se que o aumento de tensão faz com que os índices  $M$  e  $\beta$  sejam elevados. Em princípio, isso induziria à tentativa de realizar grandes incrementos de tensão. Entretanto, vale lembrar que os índices de influência foram calculados para o ponto de operação do caso-base, portanto servem para calcular ações de controle preventivas nesse ponto de operação e suas proximidades. Em pontos de operação mais distantes seria necessário linearizar o sistema de equações de fluxo de potência e recalcular os II.

Um sistema real de grande porte, TB-65, é empregado para averiguar a adequação das ações de controle preventivas desenvolvidas. Nele são aplicadas as ações controle preventivas baseadas em controle de potência ativa, em potência reativa e em ambas. Novamente verifica-se que as ações de controle preventivas alcançaram o objetivo de melhorar as condições de estabilidade de tensão das barras críticas do sistema. Além disso, também são implementadas ações de controle preventivas baseadas na análise da influência de esgotamentos de controle de tensão via *tap* de LTC. Nesse caso, observa-se que a elevação do *tap* tem baixa influência nas condições de estabilidade de tensão da rede, apesar de também acrescentar consequências ligeiramente benéficas.

O ponto de operação de um sistema pode ser obtido através do algoritmo de fluxo de potência. As condições de estabilidade de tensão são avaliadas nesse ponto de operação. Para que a modelagem se assemelhasse à realidade, múltiplas barras *swing* foram consideradas.

As condições de estabilidade de tensão foram avaliadas no caso-base e sob influência de esgotamentos de recursos.

Três tipos de esgotamentos foram abordados: o esgotamento da capacidade de geração de potência ativa e reativa e a impossibilidade de variação de *tap* de LTC, ou seja, a incapacidade de redespacho de potência ativa e a perda do controle de tensão.

A fim de verificar o efeito de esgotamentos sobre a estabilidade de tensão, foi utilizado inicialmente o sistema de testes CEPEL-34. No ponto de operação considerado, foram identificadas barras de carga e de geração operando próximo do ponto crítico da “curva do nariz”, e na parte inferior dessa curva. Determinaram-se os esgotamentos de tensão e de geração mais influentes sobre a margem de potência dessas barras de carga e de geração.

Na barra de carga foi constatado que o índice de influência relativo aos esgotamentos geralmente é negativo, o que revelou que a situação pós-egotamento levou a um cenário de estabilidade de tensão pior do que aquele verificado no sistema pré-egotamento. Por outro lado, para as barras de geração, o esgotamento da capacidade de geração de potência também acarretou em índices de influência negativos, exceto quando se considerou o esgotamento na própria barra em análise. Quando se avaliou a exaustão da capacidade de geração no local em que o esgotamento ocorreu, o índice de influência foi nulo. Esse detalhe deve-se às premissas de cálculo dos índices de estabilidade de tensão em barras de tensão controlada, ou seja, era um resultado esperado com base na teoria.

Percebeu-se que o efeito de cada esgotamento sobre a margem de potência poderia ser usado para determinar as intervenções eficazes para incrementar essas margens. Essas intervenções são ações de controle preventivas que têm por objetivo melhorar os índices de estabilidade de tensão, o que equivale a afastar o ponto de operação do ponto de máximo da “curva do nariz” ou evitar

que a barra permaneça operando na região anormal de operação.

As ações de controle preventivas podem ser baseadas em controle de potência reativa, de potência ativa, de *tap* de LTC ou na combinação delas, isto é, alteração do perfil de tensão e redespacho de potência ativa.

Após a aplicação de uma ação de controle, esperava-se obter índices de estabilidade de tensão positivos e maiores que do caso-base. De fato, melhoras significativas foram alcançadas quando empregaram-se ações de controle preventivas baseadas em geração de potência reativa no sistema CEPEL-34. Além disso, revelou-se tendência de relação decrescente entre os índices de influência e o efeito da intervenção proposta. Ou seja, quanto mais negativo o índice de influência alusivo a um determinado esgotamento, maior foi a margem de potência resultante da atuação sobre a barra relacionada a esse esgotamento. Esse comportamento foi observado tanto na análise de estabilidade de tensão da barra de carga quanto nas barras de geração. Entretanto, para barras de geração, há uma peculiaridade: quando se avalia a exaustão da capacidade de geração no local em que o esgotamento ocorre, o índice de influência é nulo (como já explicado), porém a ação de controle correspondente resultou em maior incremento de margem de potência.

Ações de controle preventivas baseadas em geração da potência ativa, por outro lado, resultaram em pouca melhora nos índices de estabilidade de tensão. Para a barra de geração, por exemplo, há casos em que os índices de estabilidade de tensão permanecem negativos apesar de apresentarem melhora. Isso motivou a implementação de ações de controle preventivas combinadas, baseadas em geração de potência ativa e reativa simultaneamente. Assim, alterou-se tanto a tensão especificada da barra de geração quanto o despacho de potência ativa da rede. Dessa forma, alcançou-se ponto de operação na região normal de operação e distante do ponto de máximo, conforme desejado.

Verificou-se a validade do método proposto em sistema originalmente real e de grande porte, o sistema TB-65, equivalente das regiões Sul e Sudeste. De forma geral, ações de controle preventivas baseadas na geração de potência reativa foram capazes de incrementar significativamente os índices de estabilidade. Também notou-se tendência de correlação negativa entre o índice de influência e o efeito provocado sobre a margem de tensão quando a ação de controle correspondente foi implementada. A principal diferença foi a existência de alguns índices de influência positivos. Ou seja, quando houve esgotamento da capacidade de geração de potência reativa em uma barra, a condição de estabilidade de tensão melhorou para outras. Nesses casos a variação da tensão especificada para uma barra e a variação da potência reativa gerada nela se dão em sentidos opostos.

No sistema TB-65 foram implementadas ações de controle preventivas baseadas em controle de *tap*, levando a incrementos de margem de potência. Apesar disso, os incrementos são menores que aqueles gerados por ações de controle preventivas baseadas em geração de potência reativa. Isso pode ser explicado pela comparação entre os índices de influência dos esgotamentos relacionados à geração de potência reativa e ao *tap*. Os índices relativos a essa última sendo centenas de vezes menores que os do primeiro. Portanto, o índice de influência ajuda na seleção do tipo de ação mais eficaz do ponto de vista de estabilidade de tensão.

Ações de controle preventivas baseadas em geração de potência ativa levaram a resultados semelhantes tanto no sistema TB-65 quanto no sistema CEPEL-34. Isto é, pouca melhoria foi observada, o que incentivou o uso de ações de controle preventivas baseadas simultaneamente na geração de potência ativa e reativa. Nesse caso foi possível retirar barras geradoras da região anormal de operação sem ter que provocar grandes variações na tensão especificada. Em todos os casos, foi possível identificar ações de controle preventivas capazes de elevar os índices de estabilidade de tensão, conforme desejado.

## 6.1

### Trabalhos futuros

Este trabalho mostrou que há índices que apontam a estratégia a ser utilizada para elevar a margem de potência das barras da rede, melhorando as condições de estabilidade de tensão.

No futuro podem ser empregadas técnicas tanto para automatização da busca da estratégia empregada quanto para redução de complexidade computacional do método, de tal forma que seja possível sua aplicação na operação em tempo real.

Além disso, também seria recomendável o emprego da técnica desenvolvida em outros sistemas elétricos.



## Referências bibliográficas

- [1] MONTICELLI, J. A. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. Edgar Blucher Ltda, São Paulo, 1983.
- [2] TONG, S. ; KLEINBERG, M.; MIU, K.. **A distributed slack bus model and its impact on distribution system application techniques**. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Japão, 5:4743–4746, 2005.
- [3] CASTRO, M. R. V.. **Modelagem do controle de tensão por geradores e de múltiplas barras swing na avaliação das condições de estabilidade de tensão**. Dissertação de mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2007.
- [4] KUNDUR, P.. **Power system stability and control**. McGraw-Hill, California, 1994.
- [5] PRADA, R.B.; PALOMINO, E.G.C.; DOS SANTOS, J.O.R.; BIANCO, A.; PILOTO, L.A.S. . **Voltage stability assessment for real-time operation**. IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib, 149(2):175–181, 2002.
- [6] DE MOURA, R.D.; PRADA, R.B. . **Contingency screening and ranking method for voltage stability assessment**. IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib, 152(6):891–898, 2005.
- [7] PRADA, R. B.; DOS SANTOS, J.O.R.; POMA, C. E. P.. **Relatório final - projeto 02/061/2008 entre a PUC - Rio e o CEPEL**. Relatório técnico, CEPEL e PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2010.
- [8] ALVES, W. F. . **Proposição de sistemas-teste para análise computacional de sistemas de potência**. Dissertação de mestrado, UFF, Niterói, 2007.
- [9] VEGA, J.L.L.. **Avaliação e reforço das condições de estabilidade de tensão em barras de tensão controlada por geradores e compensadores síncronos**. Tese de doutorado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2009.

- [10] FILHO, J. A. P. . Representação e avaliação do desempenho de dispositivos de controle no problema de fluxo de potência. Tese de doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

# A

## Apêndice A

Tabela 36: Informações das barras do sistema CEPEL-34

Barra	Tipo	v(pu)	$\theta(^{\circ})$	$P_G$ (MW)	$Q_G$ (MVar)	$P_D$ (MW)	$Q_D$ (MVar)	$B$ (pu)
1	PV	1,030	0,0	3300	1128,0	8,00	0,0	0,0
2	PQ	1,012	0,0	0	0,0	0,00	0,0	0,0
3	PQ	1,011	0,0	0	0,0	0,00	0,0	0,0
4	PQ	0,952	0,0	0	0,0	0,00	0,0	-6,6
5	PQ	0,916	0,0	0	0,0	0,00	0,0	-1,5
6	PQ	0,915	0,0	0	0,0	0,00	0,0	-1,5
7	PQV	0,932	0,0	0	0,0	0,00	0,0	-3,3
8	PQ	0,987	0,0	0	0,0	0,00	0,0	-3,3
9	PQ	0,987	0,0	0	0,0	0,00	0,0	-3,3
10	PQ	0,907	0,0	0	0,0	0,00	0,0	-6,6
11	PQ	0,922	0,0	0	0,0	0,00	0,0	0,0
12	PQ	0,922	0,0	0	0,0	0,00	0,0	0,0
13	PQV	0,883	0,0	0	0,0	0,00	0,0	-3,3
14	PQ	0,966	0,0	0	0,0	0,00	0,0	0,0
15	PQ	0,953	0,0	0	0,0	0,00	0,0	0,0
16	PQ	0,879	0,0	0	0,0	0,00	0,0	0,0
17	PQ	0,9999	0,0	0	0,0	4,44	0,0	0,0
18	PQ	1,037	0,0	0	0,0	0,00	0,0	0,0
19	PQ	1,050	0,0	0	0,0	1461,00	-339,0	0,0
20	PQ	1,052	0,0	0	0,0	0,00	0,0	0,0
21	PQ	1,074	0,0	0	0,0	2,83	0,0	-3,0
22	PQ	1,075	0,0	0	0,0	2,36	0,0	-2,0
23	PQ	1,067	0,0	0	0,0	678,30	120,8	-3,0
24	PQ	1,037	0,0	0	0,0	0,00	0,0	0,0
25	PQ	1,093	0,0	0	0,0	6150,00	-2400,0	0,0
26	PV	1,100	0,0	3879	1363,0	0,00	0,0	0,0
27	PQ	0,991	0,0	0	0,0	0,00	0,0	0,0
28	PQ	0,951	0,0	0	0,0	0,00	0,0	0,0
29	PQ	0,879	0,0	0	0,0	3425,00	561,4	0,0
30	PQ	0,929	0,0	0	0,0	0,00	0,0	0,0
31	PV	1,007	0,0	1320	-143,0	1,71	0,0	0,0
32	PV	1,058	0,0	1200	411,9	0,00	0,0	0,0
33	PV	1,059	0,0	1200	477,1	0,00	0,0	0,0
34	V $\theta$	1,049	22,3	1444	390,1	0,00	0,0	0,0

Tabela 37: Informações das linhas do sistema CEPEL-34

De barra	Para barra	tap	R(%)	X(%)	$B^{sh}$ (MVar)
2	1	1,0140	0,0000	0,3500	
2	3		0,0052	0,0500	11,033
2	3		0,0051	0,0500	10,870
2	3		0,0050	0,0500	10,688
2	3		0,0050	0,0500	10,538
3	4	1,0500	0,0000	0,1569	
4	5		0,0760	1,8400	927,800
4	6		0,0760	1,8500	929,100
5	7		0,0000	-0,7490	
6	7		0,0000	-0,7490	
7	8		0,0000	-0,7780	
7	9		0,0000	-0,7780	
8	10		0,0640	1,5300	760,000
9	10		0,0630	1,5300	755,700
10	11		0,0000	-0,9150	
10	12		0,0000	-0,9150	
11	13		0,0720	1,7500	877,500
12	13		0,0720	1,7500	873,000
14	13	1,0400	0,0000	0,3457	
14	24		0,0826	1,0400	32,000
14	24		0,0826	1,0400	32,000
15	7	X	0,0000	0,3467	
15	16		0,0100	0,0500	1,135
15	16		0,0100	0,0500	1,135
16	17		0,1540	1,9400	236,970
17	18		0,0560	0,6970	85,746
17	31	0,9681	0,0165	11,3620	
18	19		0,0624	0,7848	96,592
18	32	1,0130	0,0000	1,0500	
19	16		0,1910	2,4140	294,920
19	22		0,1620	2,0480	250,170
20	19		0,0100	0,1260	15,428
20	19		0,0100	0,1300	15,160
20	33	1,0340	0,0000	1,0800	
21	17		0,1720	2,1700	265,160

De barra	Para barra	tap	R(%)	X(%)	$B^{sh}$ (MVar)
21	34	1,0570	0,0165	11,3620	
22	21		0,1020	1,2680	155,240
22	23		0,2250	3,0330	381,460
23	21		0,2820	3,8520	493,700
24	25		0,0284	0,3520	10,830
24	25		0,0284	0,3520	10,830
24	27		0,0223	0,2800	14,462
25	26		0,0070	0,0880	2,707
25	26		0,0070	0,0880	2,707
27	29	0,9933	0,0000	0,7200	
28	13	X	0,0000	0,8990	
28	13	X	0,0000	0,8990	
28	29		0,0812	0,8000	7,560
28	29		0,0812	0,8000	7,560
28	29		0,0812	0,8000	7,560
28	29		0,0812	0,8000	7,560
28	30		1,6000	9,0000	300,000
30	16	1,0660	0,0000	0,8990	

Tabela 39: Informações das linhas do sistema TB-65

De barra	Para barra	tap	R(%)	X(%)	$B^{sh}$ (MVar)
4	2	1,000	0,0000	1,2640	0,0000
4	5		0,1720	2,7200	231,4000
4	5		0,1710	2,7000	230,2000
4	12		0,2090	2,9350	254,6000
4	13	1,000	0,0000	2,3570	0,0000
4	27		0,1530	2,4000	203,8000
5	6		0,1560	2,4600	208,5000
5	7		0,1520	2,3900	202,6000
6	9	1,000	0,0000	2,4030	0,0000
6	63		0,1100	1,9100	161,8500
7	11	1,000	0,0000	2,4190	0,0000
8	7		0,1960	3,1000	264,9000
8	63		0,0500	0,8200	69,3600
10	3	1,000	0,0000	0,9530	0,0000
10	7		0,1050	1,6190	136,3500

De barra	Para barra	tap	R(%)	X(%)	$B^{sh}$ (MVar)
10	7		0,1050	1,6190	136,3500
12	1	1,000	0,0000	1,0000	0,0000
12	14	1,000	0,0000	1,7200	0,0000
12	14	1,000	0,0000	1,7200	0,0000
12	25		0,1470	2,3200	196,6000
15	12		0,2800	3,9900	355,3600
15	21		0,2700	3,8700	344,0300
16	15	1,000	0,0000	1,1130	0,0000
16	15	1,000	0,0000	1,0000	0,0000
21	12		0,1250	1,9370	149,9600
21	17	1,000	0,0000	1,3567	0,0000
21	24		0,0820	1,2560	98,9900
22	18	1,000	0,0000	3,5100	0,0000
22	23	1,000	0,0000	2,1600	0,0000
22	23	1,000	0,0000	2,1600	0,0000
22	24		0,1000	1,5190	119,6700
22	25		0,2800	4,8400	419,5000
24	19	1,000	0,0000	1,9367	0,0000
25	20	1,000	0,0000	1,4100	0,0000
25	27		0,0931	1,3758	112,3000
27	26	1,000	0,0000	1,0250	0,0000
28	27	1,000	0,0000	1,4200	0,0000
32	39	1,074 *	0,0320	1,1460	0,0000
32	39	1,074 *	0,0300	1,1651	0,0000
33	29	1,024	0,0000	1,1200	0,0000
33	47		0,0100	0,1240	15,2040
33	47		0,0100	0,1260	15,4280
34	48		2,4440	12,6520	21,7060
35	36	1,000	0,0000	6,6400	0,0000
35	36	1,000	0,0000	6,2900	0,0000
35	42		1,1300	6,9900	12,6170
35	60		1,2200	7,6900	13,8100
35	65		0,2200	1,0900	1,8601
35	65		0,1700	1,0300	2,0537
38	31	1,000	0,0000	1,0500	0,0000
38	47		0,0520	0,6540	80,4930
38	61		0,0560	0,6970	85,7460
39	10		0,3080	3,9580	444,8400

De barra	Para barra	tap	R(%)	X(%)	$B^{sh}$ (MVar)
39	10		0,3080	3,9580	444,8400
40	41		0,0500	0,7300	78,0600
41	30	1,024	0,0000	1,0200	0,0000
42	37	1,000	0,0000	6,3600	0,0000
42	60		0,1500	0,8900	1,6317
47	39		0,2000	2,5500	312,7200
47	51		0,1620	2,0480	250,1700
47	52		0,2000	2,6900	336,4000
48	47	1,005 *	0,0310	1,2070	0,0000
48	60		3,0450	15,7380	27,1230
48	60		3,0410	15,7180	27,0890
49	51		0,2556	2,9224	360,4000
49	52		0,1270	1,6030	195,8900
50	49	1,041 *	0,0310	1,1500	0,0000
50	49	1,041 *	0,0320	1,1630	0,0000
50	49	1,041 *	0,0000	1,2770	0,0000
50	58		1,2710	6,5620	11,3050
50	58		1,2830	6,5640	11,5220
51	54		0,1877	2,3467	287,2400
52	39		0,0500	0,4400	47,5800
53	34		2,2100	11,4750	19,6870
53	52	1,100	0,0320	1,1630	0,0000
53	52	1,100	0,0310	1,1660	0,0000
53	58		1,8920	9,7760	16,8450
53	58		1,8950	9,7040	17,0290
54	56		0,0733	0,9164	112,1700
55	54	0,9841*	0,0200	1,2110	0,0000
55	54	0,9841*	0,0200	1,2330	0,0000
56	57		0,2820	3,8520	493,7000
57	43	1,000	0,0123	1,5383	0,0000
57	54		0,1643	3,0339	354,8800
57	59		0,0730	0,9200	112,2600
57	61		0,1720	2,1700	265,1600
59	44	1,000	0,0000	2,0655	0,0000
59	51		0,0470	0,5900	71,8180
60	45	1,025	0,0243	1,7022	0,0000
61	41		0,0760	1,1710	124,5800
61	46	1,024	0,0113	1,5150	0,0000

De barra	Para barra	tap	R(%)	X(%)	$B^{sh}$ (MVar)
62	56	1,022 *	0,0300	1,2190	0,0000
62	56	1,022 *	0,0390	1,1380	0,0000
62	56	1,022 *	0,0360	1,2170	0,0000
63	64	0,9824	0,0000	5,2000	0,0000
65	40	0,9761*	0,0000	1,2700	0,0000



Tabela 38: Informações das barras do sistema TB-65

Barra	Nome	Tipo	v(pu)	$\theta(^{\circ})$	$P_G$ (MW)	$Q_G$ (MVar)	$P_D$ (MW)	$Q_D$ (MVar)	$B$ (pu)
1	ITUMBI01-4GR	PV	1,000	-13,29	0,00	0,00	800	-236,46	0
2	MARIMB02-5GR	PV	1,010	-18,08	0,00	0,00	900	135,93	0
3	IBIUNA03-3CS	PV	1,000	-46,70	0,00	0,00	0	517,34	0
4	MARIMB04-500	PQ	0,999	-24,55	0,00	0,00	0	0	0
5	ARARAO05-500	PQ	0,938	-37,94	0,00	0,00	0	0	0
6	POCOS-06-500	PQ	0,879	-51,77	0,00	0,00	0	0	0
7	CAMPIN07-500	PQ	0,884	-50,84	0,00	0,00	0	0	0
8	C.PAUL08-500	PQ	0,839	-65,81	1200,00	150,00	0	0	0
9	P.CALD09-345	PQ	0,870	-53,67	105,00	33,00	0	0	0
10	IBIUNA10-500	PQ	0,951	-46,70	200,00	38,00	0	0	0
11	CAMPIN11-345	PQ	0,707	-72,15	939,81	341,75	0	0	0
12	ITUMBI12A500	PQ	1,027	-17,76	0,00	0,00	0	0	0
13	MARIMB13-345	PQ	0,993	-25,57	75,00	25,00	0	0	0
14	ITUMBI14A345	PQ	1,022	-19,89	454,00	48,00	0	0	0
15	SAMAMB15-500	PQ	1,000	-25,64	0,00	0,00	0	0	0
16	SAMAMB16-345	PQ	0,983	-28,41	900,00	300,00	0	0	0
17	EMBORC17-3GR	PV	1,000	-8,49	0,00	0,00	700	-186,89	0
18	JAGUAR18-3GR	PV	1,020	-8,53	0,00	0,00	250	-77,19	0
19	N,PONT19-3GR	PV	1,010	-8,53	0,00	0,00	350	-132,01	0
20	S,SIMA20-3GR	PV	1,010	-15,56	0,00	0,00	200	-199,67	0
21	EMBORC21-500	PQ	1,030	-13,78	0,00	0,00	0	0	0
22	JAGUAR22-500	PQ	1,050	-13,23	0,00	0,00	0	0	0
23	JAGUAR23-345	PQ	1,042	-14,44	214,00	74,00	0	0	0
24	NPONTE24-500	PQ	1,037	-12,24	0,00	0,00	0	0	0
25	SSIMAO25-500	PQ	1,038	-17,10	0,00	0,00	0	0	0
26	A,VERME26-4GR	PV	1,020	-14,71	0,00	0,00	800	60,86	0
27	AVERME27A500	PQ	1,017	-19,24	0,00	0,00	0	0	0
28	AVERME28-440	PQ	0,991	-24,91	700,00	150,00	0	0	0
29	GBMUNH29-3GR	V $\theta$	1,030	0,00	0,00	0,00	1649,27	568,79	0
30	SCAXIA30-4GR	PV	1,030	9,60	0,00	0,00	1150	141,43	0
31	SSEGRE31-4GR	PV	1,030	2,57	0,00	0,00	1200	125,42	0
32	BATEIA32-230	PQV	0,998	-36,53	735,40	191,00	0	0	0
33	GBMUNH33-500	PQ	1,008	-10,49	0,00	0,00	0	0	0
34	S,MATE34-230	PQ	0,983	-24,77	13,40	4,20	0	0	0
35	CASCAV35-230	PQ	1,001	-0,15	0,00	0,00	0	0	0
36	CASCAV36-138	PQ	0,988	-3,13	159,00	36,00	0	0	0
37	FCHOPI37-138	PQ	1,015	0,60	94,00	18,00	0	0	0
38	SEGRED38-500	PQ	1,025	-4,29	0,00	0,00	0	0	0
39	BATEIA39-500	PQ	0,944	-33,77	0,00	0,00	0	0	0
40	CASCAV40O500	PQ	1,039	1,94	0,00	0,00	0	0	0
41	SCAXIA41-500	PQ	1,047	3,21	0,00	0,00	0	0	0
42	FCHOPI42-230	PQ	1,028	3,89	0,00	0,00	0	0	0
43	ITA—43-3GR	PV	1,040	-8,46	0,00	0,00	700	-14,03	0
44	MACHAD44-2GR	PV	1,030	-9,04	0,00	0,00	600	-7,36	0
45	SOSOR145-4GR	PV	1,030	11,38	0,00	0,00	700	151,53	0
46	SSANTI46-3GR	PV	1,030	6,09	0,00	0,00	950	143,87	0
47	AREIA-47-500	PQ	1,006	-11,07	0,00	0,00	0	0	0
48	AREIA-48-230	PQV	0,999	-11,47	237,00	59,00	0	0	0
49	BLUMEN49-500	PQ	0,963	-34,91	0,00	0,00	0	0	0
50	BLUMEN50-230	PQV	0,998	-37,75	1149,00	53,06	0	0	0
51	CNOVOS51-500	PQ	1,031	-18,59	0,00	0,00	0	0	0
52	CURITI52-500	PQ	0,938	-32,78	0,00	0,00	0	0	1
53	CURITI53-230	PQ	0,996	-35,73	844,70	469,10	0	0	0
54	CAXIAS54-500	PQ	1,021	-26,05	0,00	0,00	0	0	0
55	CAXIAS55-230	PQV	0,999	-28,60	755,60	56,24	0	0	0
56	GRAVAT56-500	PQ	0,997	-28,79	0,00	0,00	0	0	0
57	ITA—57-500	PQ	1,046	-14,14	0,00	0,00	0	0	0
58	JOINV158E230	PQ	1,000	-37,79	70,00	2,00	0	0	0
59	MACHAD59-500	PQ	1,038	-15,69	0,00	0,00	0	0	0
60	SOSORI60-230	PQ	1,035	4,82	0,00	0,00	0	0	0
61	SSANTI61-500	PQ	1,042	-1,79	0,00	0,00	0	0	0
62	GRAVAT62-230	PQV	0,998	-31,63	1228,00	425,00	0	0	0
63	ITAJUB63-500	PQ	0,847	-61,98	0,00	0,00	0	0	0
64	ITAJUB64-138	PQ	0,833	-66,55	110,00	43,00	0	0	0
65	CASCAV65-230	PQV	0,999	-0,35	403,00	123,00	0	0	0