

4

Avaliação das Condições de Estabilidade de Tensão Após Atuação Inversa dos Equipamentos de Controle

4.1.

Introdução

Neste capítulo o objetivo é avaliar as condições de estabilidade de tensão após atuação inversa dos equipamentos de controle. É necessário determinar se a ação de controle de tensão do gerador terá um efeito positivo ou negativo sobre os índices de estabilidade de tensão.

As ações de controle dependem da região de operação, a qual pode ser determinada através do cálculo da matriz de sensibilidade dos controles de tensão [VCS] do ponto de operação em análise.

A matriz [VCS] deve ser calculada com o modelo novo do gerador, apresentado na Seção 3.1.2, aplicado a todos os geradores do sistema, incluindo o gerador swing, porque a matriz [VCS] relaciona a tensão de excitação com a tensão controlada, seja a tensão terminal ou remota. No caso de SVCs, a matriz [VCS] relaciona o ângulo de disparo com a tensão controlada e, então, o modelo da Seção 3.2.1 deve ser utilizado.

4.2.

Matriz [VCS] dos Equipamentos de Controle

Para um sistema multi-nó, o sistema de equações lineares usado para construção da matriz [VCS] é:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \frac{\Delta V_k}{\Delta V_{SVC}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \frac{\Delta E_g}{\Delta \alpha} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Em (4.1) é evidenciado a relação entre as tensões controladas por gerador e por SVC com as respectivas grandezas controladoras: a tensão interna E_g do gerador e o ângulo de disparo α do SVC.

A matriz $[A]$ é exatamente igual à matriz Jacobiana tradicional, a matriz $[B]$ tem elementos não nulos dP_g/dE_g , dP_k/dE_g e dQ_k/dE_g para o gerador e um elemento não nulo $dQ_{SVC}/d\alpha$ para o SVC, a matriz $[C]$ tem um elemento não nulo $dV_k/dV_k = 1$ para o gerador e um elemento não nulo dV_{SVC}/dV_k para o SVC, e os elementos da matriz $[D]$ são nulos para o gerador e um elemento não nulo $dV_{SVC}/d\alpha$ para o SVC.

Os elementos das sub-matrizes B, C e D correspondentes ao gerador são:

$$\frac{\partial P_g}{\partial E_g} = \frac{V_k}{X_s} \sin(\theta_g - \theta_k) \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial E_g} = -\frac{V_k}{X_s} \sin(\theta_g - \theta_k) \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial E_g} = -\frac{V_k}{X_s} \cos(\theta_g - \theta_k) \quad (4.4)$$

Os elementos das sub-matrizes B, C e D correspondentes ao SVC são dadas em (3.35), (3.36) e (3.37) da Seção 3.2.1.2 do Capítulo 3.

Os erros das equações de controle do gerador e do SVC são:

$$\Delta V_k = V_k^{\text{esp}} - V_k^{\text{calc}} \quad (4.5)$$

$$\Delta V_{SVC} = V_{\text{esp}} + X_{sl} * \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha))}{X_C X_L} \right) * V_k^2 - V_k \quad (4.6)$$

Como o interesse é a análise da adequação das ações de controle, as variações de carga não são consideradas. No entanto, são permitidas variações de potência ativa na barra de referência angular e variações de potência reativa nas

barras de tensão controlada [17]. Assim, considera-se $\Delta P = \Delta Q = 0$ em (4.1), obtendo-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_k \\ \Delta V_{SVC} \end{bmatrix} = [VCS] \begin{bmatrix} \Delta E_g \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

onde:

$$[VCS] = [D] - [C] \cdot [A]^{-1} \cdot [B] \quad (4.8)$$

Da diagonal da matriz [VCS] são obtidos os índices de adequação das ações de controle de tensão, enquanto os termos fora da diagonal traduzem a interação entre as diversas ações de controle do sistema e as tensões controladas [17].

A matriz [VCS] também possibilita obter os valores dos parâmetros de controle ΔE_g e $\Delta \alpha$, a partir dos valores das novas tensões ΔV_t e ΔV_{SVC} . Isto é possível resolvendo (4.7) como um sistema do tipo $b = [A] \cdot X$. Assim:

$$\begin{bmatrix} \Delta E_g \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} = [VCS]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta V_t \\ \Delta V_{SVC} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Neste capítulo é considerado o caso de um equipamento controlando a tensão em uma barra. Por enquanto, a dimensão da matriz [VCS] é (nc x nc), sendo nc o número de barras de tensão controlada. Assim, nc é o número de equipamentos de controle existentes.

4.2.1.

Análise da Matriz [VCS]

A matriz [VCS] pode ser interpretada como:

1. Elemento diagonal > 0 implica relação usual entre a grandeza controladora e a tensão controlada (a ação de controle terá o efeito esperado).
2. Elemento diagonal < 0 implica relação não usual entre a grandeza controladora e a tensão controlada (a ação de controle terá o efeito oposto ao esperado).
3. Elemento diagonal $= 0$ implica que a ação de controle não terá efeito algum.

Os elementos fora da diagonal de uma linha indicam a sensibilidade das grandezas controladoras de outros equipamentos de controle com a tensão controlada em análise. Por outro lado, os elementos fora da diagonal de uma coluna indicam a sensibilidade da grandeza controladora de um equipamento de controle com as tensões controladas das outras barras do sistema.

O valor positivo fora da diagonal da matriz [VCS] implica que não existe conflito entre os controles relacionados em barras diferentes, enquanto o valor negativo implica conflito entre os controles relacionados em barras diferentes.

4.3.

Índices de Estabilidade de Tensão em Pontos de Operação com Inadequação do Controle de Tensão

Na operação normal de um sistema, a elevação do perfil de tensão da rede é obtida pela elevação das tensões de excitação dos geradores e do aumento do ângulo de disparo dos SVCs. Neste caso, diz-se que as ações de controle de tensão são adequadas. Sabe-se que as condições de estabilidade de tensão são melhoradas nesse caso. Usualmente, há redução de fluxos de potência e perdas na rede.

Em situações especiais, por exemplo, a rede de transmissão com elementos fora de serviço, suporte de potência reativa insuficiente, cargas excessivamente altas, pode ocorrer que as relações entre as grandezas controladoras e as controladas não sejam diretas, como será tratado na Seção 4.3.1.1.b. O objetivo é verificar as condições de estabilidade de tensão nesses casos.

4.3.1.

Sistema-Teste de 5 Barras

4.3.1.1.

Cálculo da Matriz [VCS]

a) Primeiro Ponto de Operação

Será considerado o sistema-teste de 5 barras da Figura 3.6. O ponto de operação (caso-base do primeiro ponto de operação) obtido e os dados de linha são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Ponto de Operação e Dados de Linha do Sistema-Teste de 5 Barras

Barra		Tensão		Geração		Carga		Shunt
No.	Tipo	V (pu)	θ (graus)	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	Q (Mvar)
1	PQV	1,05	-3,691	–	–	–	–	–
2	PQV	1,01	4,572	–	–	–	–	–
3	PQ	0,9851	-5,907	–	–	–	–	–
4	PQ	0,9644	-2,505	–	–	–	–	–
5	PQ	0,8902	-14,854	–	–	800,00	300,00	–
6	θ	1,1837	0,00	200,00	401,98	–	–	–
7	P	1,1409	16,593	600,00	436,53	–	–	–

De	Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Susceptância (%)
1	3	0,00	2,00	0,00
2	4	0,00	2,00	0,00
3	4	0,00	4,00	0,00
3	5	0,00	4,00	0,00
4	5	0,00	4,00	0,00
6	1	0,00	4,00	0,00
7	2	0,00	4,00	0,00

O sistema de equações lineares usado para a construção da matriz [VCS] do sistema-teste de 5 barras, com controle de tensão ativo dos geradores 1 e 2, é:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5 \\ \Delta P_7 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta Q_5 \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_7} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \frac{\partial P_1}{\partial V_2} & \frac{\partial P_1}{\partial V_3} & \frac{\partial P_1}{\partial V_4} & \frac{\partial P_1}{\partial V_5} & \vdots & \frac{\partial P_1}{\partial V_6} & 0 \\ \frac{\partial P_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_7} & \frac{\partial P_2}{\partial V_1} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \frac{\partial P_2}{\partial V_3} & \frac{\partial P_2}{\partial V_4} & \frac{\partial P_2}{\partial V_5} & \vdots & 0 & \frac{\partial P_2}{\partial V_7} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_7} & \frac{\partial P_3}{\partial V_1} & \frac{\partial P_3}{\partial V_2} & \frac{\partial P_3}{\partial V_3} & \frac{\partial P_3}{\partial V_4} & \frac{\partial P_3}{\partial V_5} & \vdots & 0 & 0 \\ \frac{\partial P_4}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_4}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_4}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_4}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_4}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_4}{\partial \theta_7} & \frac{\partial P_4}{\partial V_1} & \frac{\partial P_4}{\partial V_2} & \frac{\partial P_4}{\partial V_3} & \frac{\partial P_4}{\partial V_4} & \frac{\partial P_4}{\partial V_5} & \vdots & 0 & 0 \\ \frac{\partial P_5}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_5}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_5}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_5}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_5}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_5}{\partial \theta_7} & \frac{\partial P_5}{\partial V_1} & \frac{\partial P_5}{\partial V_2} & \frac{\partial P_5}{\partial V_3} & \frac{\partial P_5}{\partial V_4} & \frac{\partial P_5}{\partial V_5} & \vdots & 0 & 0 \\ \frac{\partial P_7}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_7}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_7}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_7}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_7}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_7}{\partial \theta_7} & \frac{\partial P_7}{\partial V_1} & \frac{\partial P_7}{\partial V_2} & \frac{\partial P_7}{\partial V_3} & \frac{\partial P_7}{\partial V_4} & \frac{\partial P_7}{\partial V_5} & \vdots & 0 & \frac{\partial P_7}{\partial V_7} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_4} & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_5} & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_7} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_5} & \vdots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_6} & 0 \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_4} & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_5} & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_7} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_5} & \vdots & 0 & \frac{\partial Q_2}{\partial V_7} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_4} & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_5} & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_7} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_5} & \vdots & 0 & 0 \\ \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_4} & \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_5} & \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_7} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_5} & \vdots & 0 & 0 \\ \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_4} & \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_5} & \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_7} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_5} & \vdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta \theta_7 \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \Delta V_5 \\ \Delta E_{g1} \\ \Delta E_{g2} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

onde:

$$\Delta V_1 = V_1^{\text{esp}} - V_1^{\text{calc}} \quad (4.11)$$

$$\Delta V_2 = V_2^{\text{esp}} - V_2^{\text{calc}} \quad (4.12)$$

A matriz [VCS] é obtida considerando os valores de $\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = \Delta P_7 = \Delta Q_1 = \Delta Q_2 = \Delta Q_3 = \Delta Q_4 = \Delta Q_5 = 0$. O interesse é a análise da variação das tensões controladas nas barras terminais 1 e 2 com as variações das grandezas controladoras nas barras internas dos geradores. Assim:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} = [\text{VCS}] \begin{bmatrix} \Delta E_{g1} \\ \Delta E_{g2} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Onde a matriz [VCS] é uma matriz de dimensão 2x2 dado que o sistema têm duas barras controladas.

A matriz [VCS] calculada para o ponto de operação (caso-base do primeiro ponto de operação) da Tabela 4.1, é:

$$[VCS] = \begin{bmatrix} 0,9288 & 0,5120 \\ 0,5018 & 1,0322 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Os valores positivos dos elementos da matriz $[VCS]$ indicam que o sistema esta operando na região de operação normal. Portanto, as ações de controle de tensão terão o efeito esperado.

O teste para avaliar os resultados da matriz $[VCS]$ consistiu em aumentar o valor da tensão das barras terminais dos geradores 1 e 2 em 0,01 p.u. Na Tabela 4.2 são mostrados os resultados das tensões das barras internas dos geradores do sistema-teste de 5 barras após aumento das tensões nas barras terminais.

Tabela 4.2. Variação de Tensão na Barra Interna Após Aumento em 0,01 p.u. nas Barras Terminais dos Geradores 1 e 2

Gerador	E_g (p. u.)		ΔE_g (p. u.)	
	V1=1,05 V2=1,01	V1=1,06 V2=1,02	Fluxo de Carga	Equação (4.9)
G1	1,1837	1,1911	0,0074	0,0074
G2	1,1409	1,1471	0,0062	0,0061

Os resultados de tensões e da variação ΔE_g foram obtidos do resultado de fluxo de carga. No entanto, também é possível calcular o valor da variação ΔE_g através da solução de (4.9). O sinal positivo no valor de ΔE_g indica um acréscimo no valor da tensão interna do gerador com o objetivo de aumentar o valor de tensão da barra terminal correspondente, confirmando que as barras estão operando na região normal, onde as ações de controle tem o efeito esperado.

b) Segundo Ponto de Operação

O segundo ponto de operação analisado para o sistema-teste de 5 barras foi feito alterando os valores das reatâncias síncronas dos geradores 1 e 2. O ponto de operação (caso-base do segundo ponto de operação) obtido e os dados de linha são mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Ponto de Operação e Dados de Linha do Sistema-Teste de 5 Barras

Barra		Tensão		Geração		Carga		Shunt
No.	Tipo	V (pu)	θ (graus)	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	Q (Mvar)
1	PQV	1,0500	-18,2385	–	–	–	–	–
2	PQV	1,0100	-9,9756	–	–	–	–	–
3	PQ	0,9851	-20,4547	–	–	–	–	–
4	PQ	0,9644	-17,0523	–	–	–	–	–
5	PQ	0,8902	-29,4015	–	–	800,00	300,00	–
6	θ	2,5561	0,00	200,00	948,73	–	–	–
7	P	3,2752	39,6474	600,00	2043,81	–	–	–

De	Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Susceptância (%)
1	3	0,00	2,00	0,00
2	4	0,00	2,00	0,00
3	4	0,00	4,00	0,00
3	5	0,00	4,00	0,00
4	5	0,00	4,00	0,00
6	1	0,00	42,00	0,00
7	2	0,00	42,00	0,00

A matriz [VCS] calculada para o ponto de operação (caso-base de segundo ponto de operação) da Tabela 4.3, é:

$$[VCS] = \begin{bmatrix} -0,0539 & -0,2606 \\ -0,1777 & -0,1960 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

O sinal negativo dos elementos da diagonal da matriz [VCS] indica que as barras 1 e 2 estão na região anormal de operação. Portanto, as ações de controle de tensão terão o efeito oposto ao esperado.

Entretanto, o sinal negativo dos elementos fora da diagonal da matriz [VCS] indica que uma ação de controle de tensão feita pelos geradores 1 e 2 terão efeito conflitante nas barras de tensão controlada 2 e 1 respectivamente [18].

O teste para avaliar os resultados da matriz [VCS] consistiu em aumentar o valor das tensões das barras terminais 1 e 2 dos geradores em 0,01 p.u. Na Tabela 4.4 são mostrados os resultados das tensões das barras internas dos geradores do sistema-teste de 5 barras após aumento das tensões nas barras terminais.

Tabela 4.4. Variação de Tensão na Barra Interna Após Aumento em 0,01 p.u. nas Barras Terminais dos Geradores 1 e 2

Gerador	E_g (p. u.)		ΔE_g (p. u.)	
	V1=1,05 V2=1,01	V1=1,06 V2=1,02	Fluxo de Carga	Equação (4.9)
G1	2,5561	2,5387	- 0,0174	- 0,0181
G2	3,2752	3,2413	- 0,0339	- 0,0346

O sinal negativo no valor de ΔE_g indica uma diminuição no valor da tensão interna do gerador com o fim de aumentar o valor de tensão da barra terminal correspondente, confirmando que as barras estão operando na região anormal, onde as ações de controle tem o efeito oposto ao esperado.

4.3.1.2. Índices de Estabilidade de Tensão

Uma vez determinado se a ação de controle de tensão terá efeito oposto ao esperado, é preciso calcular os índices de estabilidade de tensão. Nos testes realizados, comprovou-se que o segundo ponto de operação tem sua ação de controle com efeito oposto ao esperado e, portanto, os índices serão calculados neste ponto de operação.

Na Tabela 4.5 são apresentados os índices no caso-base do segundo ponto de operação, e os índices do teste com a ação de controle com efeito oposto ao esperado, após aumento em 0,01 p.u. nas barras terminais dos geradores da Seção 4.3.1.1.b, são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.5. Índices de Estabilidade de Tensão do Sistema-Teste de 5 Barras – Caso-Base

Barra	Tipo	S_i	S_m	β (graus)	M (%)
2	PQV	0,00	8,9890	139,5902	100,00
3	PQ	0,00	57,5135	94,0107	100,00
4	PQ	0,00	35,2553	98,1905	100,00
5	PQ	8,544	22,2539	115,2919	61,6067

Tabela 4.6. Índices de Estabilidade de Tensão do Sistema-Teste de 5 Barras – Após Aumento em 0,01 p.u. nas Barras Terminais dos Geradores

Barra	Tipo	S_i	S_m	β (graus)	M (%)
2	PQV	0,00	9,4846	137,5468	100,00
3	PQ	0,00	58,8923	93,9131	100,00
4	PQ	0,00	36,1687	97,9202	100,00
5	PQ	8,544	22,8605	114,4886	62,6255

Comparando os resultados dos índices no caso-base e após aumento de tensão nas barras terminais, verifica-se que a ação de controle foi benéfica às condições de estabilidade de tensão. Devido ao incremento dos valores das tensões nas barras terminais e das barras do tipo PQ, os valores dos elementos das sub-matrizes A, B, C e D incrementam e, portanto, obtém-se um valor maior para $\det(D')$ melhorando assim os valores dos índices. Além disso, devido ao efeito oposto na ação de controle, os valores das tensões internas dos geradores diminuem e, portanto, as potências reativas geradas nestas barras também diminuem, permitindo uma maior potência máxima transmitida à barra em análise.

4.3.2. Sistema-Teste de 14 Barras

4.3.2.1. Cálculo da Matriz [VCS]

O sistema-teste de 14 barras é o mesmo sistema mostrado na Figura 3.17. Assim também, os dados de barra, de linha e do SVC são apresentados nas Tabelas 3.34, 3.35 e 3.36 respectivamente. Na Figura 4.1, mostra-se o sistema a ser avaliado após a inclusão do modelo novo nos geradores e compensadores síncronos do sistema.

Os dados das reatâncias síncronas dos geradores e compensadores síncronos são apresentados na Tabela 4.7.



Gerador/ Compensador	Barra interna g	Barra terminal k	Reatância Síncrona (%)
G1	15	1	0,0592
G2	16	2	0,2230
G3	17	3	0,1980
G4	18	6	0,1763
G5	19	8	0,1739

O ponto de operação considerado é definido como o caso-base, apresentado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8. Resultado de Fluxo de Carga do Sistema-Teste de 14 Barras

Barra		Tensão		Geração		Carga		Shunt
No.	Tipo	V (pu)	θ (graus)	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	Q (Mvar)
1	PQV	1,0600	-17,4685	0,00	0,00	0,00	0,00	-
2	PQV	1,0450	-22,4435	0,00	0,00	21,7	12,7	-
3	PQV	1,0700	-30,8312	0,00	0,00	94,2	19,00	-
4	PQ	1,0318	-27,8599	-	-	47,8	0,00	-
5	PQ	1,0304	-26,2738	-	-	7,6	1,6	-
6	PQV	1,0100	-32,0721	0,00	0,00	11,2	7,5	-
7	PQ	1,0407	-31,1839	-	-	0,00	0,00	-
8	PQV	1,0900	-31,1839	0,00	0,00	0,00	0,00	-
9	PQ	1,0152	-32,9605	-	-	29,5	16,6	-
10	PQ	1,0065	-33,1281	-	-	9,00	5,8	-
11	PQ	1,0047	-32,76	-	-	3,5	1,8	-
12	PQ	0,9973	-33,0455	-	-	6,1	1,6	-
13	PQ	0,9949	-33,2181	-	-	13,5	5,8	-
14	PVB	0,9985	-34,4589	-	7,16	14,9	5,00	-
15	P	2,1522	48,4688	232,00	412,29	0,00	0,00	-
16	Θ	1,0865	0,00	41,28	12,49	0,00	0,00	-
17	P	1,8979	-30,8312	0,00	149,64	0,00	0,00	-
18	P	1,0838	-32,0718	0,00	6,4	0,00	0,00	-
19	P	1,4400	-31,1841	0,00	40,32	0,00	0,00	-

A matriz [VCS] calculada para o ponto de operação da Tabela 4.8, é:

$$[VCS] = \begin{bmatrix} -0,8961 & -0,3164 & -0,2585 & -0,2146 & -0,1879 & -0,5159 \\ -0,8851 & -0,2634 & -0,2198 & -0,1872 & -0,1629 & -0,4487 \\ -0,8574 & -0,2605 & -0,1194 & -0,1652 & -0,1409 & -0,3921 \\ -0,799 & -0,2493 & -0,1855 & -0,0178 & -0,0964 & -0,157 \\ -0,7126 & -0,2209 & -0,1608 & -0,0984 & 0,0949 & -0,1777 \\ -0,8371 & -0,2603 & -0,1916 & -0,0692 & -0,0757 & 0,1595 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Os valores negativos dos elementos diagonais dos geradores 1, 2, 3 e 4 da matriz [VCS] indicam que estão operando na região anormal e, portanto, as ações de controle de tensão terão o efeito oposto ao esperado. No entanto, os valores positivos do gerador 5 e do SVC indicam que estão operando na região normal e, portanto, as ações de controle terão o efeito esperado.

Os valores negativos dos elementos fora da diagonal indicam que qualquer ação de controle de tensão terá o efeito oposto nas outras barras controladoras do sistema. Assim, se houver redução do módulo de tensão na barra terminal 8 controlada pela tensão interna do gerador 5 (barra 19), os elementos negativos

fora da diagonal da linha correspondente à ΔV_8 indicam incremento nos valores de tensão nas barras internas dos geradores 1, 2, 3 e 4. Os elementos negativos fora da diagonal da coluna correspondente à ΔE_{g5} indicam incremento nos valores de tensão nas barras controladas 1, 2, 3 e 6, mas as tensões nessas barras são mantidas constantes pelo incremento de tensão nas correspondentes barras internas. Da mesma forma, se houver redução do módulo de tensão na barra 14 controlada por SVC, os elementos negativos fora da diagonal da linha correspondente à ΔV_{14} indicam incremento nos valores de tensão nas barras internas dos geradores 1, 2, 3 e 4. Os elementos negativos fora da diagonal da coluna correspondente à $\Delta \alpha$ indicam incremento nos valores de tensão nas barras controladas 1, 2, 3 e 6, mas as tensões nessas barras são mantidas constantes pelo incremento de tensão nas correspondentes barras internas.

- Teste 1

Foi feito um primeiro teste com o objetivo de avaliar os resultados numéricos da matriz [VCS], que consistiu em diminuir o valor do módulo de tensão na barra terminal 8 e da barra 14 controlada por SVC em -0,09 p.u. e -0,02 p.u. respectivamente. Na Tabela 4.9 são mostrados os resultados das tensões nas barras internas dos geradores e do ângulo de disparo do sistema-teste de 14 barras.

Tabela 4.9. Variação de Tensão da Barra Interna e do Ângulo de Disparo Após Diminuição de Tensão nas Barras Controladas 8 e 14

Gerador	E_g (p. u.)		ΔE_g (p. u.)	
	V8=1,09	V8=1,00	Fluxo de Carga	Equação (4.9)
G1	2,1522	2,1620	0,0098	0,0096
G2	1,0865	1,1719	0,0854	0,0844
G3	1,8979	1,9566	0,0587	0,0586
G4	1,0838	1,2369	0,1531	0,1537
G5	1,4400	1,0093	-0,4307	-0,4306
Equipamento	α (rad)		$\Delta \alpha$ (rad)	
	V14=1,00	V14=0,98	Fluxo de Carga	Equação (4.9)
SVC	2,1006	2,0978	-0,0028	-0,0048

O sinal negativo nos valores de ΔE_g e $\Delta \alpha$ indicam diminuição nos valores da tensão interna do gerador 5 e do ângulo de disparo com o objetivo de diminuir os valores de tensão da barra terminal 8 e da barra 14 respectivamente, confirmando

que as barras estão operando na região normal, onde as ações de controle tem o efeito esperado. No entanto, as duas ações de controle terão o efeito oposto ao esperado, aumentando as tensões internas dos outros geradores, para manter as tensões controladas por estes no mesmo valor especificado.

- Teste 2

O segundo teste consistiu em diminuir o valor de tensão da barra terminal 8 e aumentar o valor de tensão da barra 14 controlada por SVC em -0,09 p.u e +0,05 p.u. respectivamente. Na Tabela 4.10 são mostrados os resultados das tensões das barras internas dos geradores e do ângulo de disparo do sistema-teste de 14 barras.

Tabela 4.10. Variação de Tensão da Barra Interna e Ângulo de Disparo Após Diminuição de Tensão na Barra 8 e Incremento de Tensão na Barra 14

Gerador	E_g (p. u.)		ΔE_g (p. u.)	
	V8=1,09	V8=1,00	Fluxo de Carga	Equação (4.9)
G1	2,1522	2,1588	0,0066	0,0057
G2	1,0865	1,1450	0,0585	0,0515
G3	1,8979	1,9375	0,0396	0,0359
G4	1,0838	1,0035	-0,0803	-0,1158
G5	1,4400	0,9365	-0,5035	-0,5149
Equipamento	α (rad)		$\Delta \alpha$ (rad)	
	V14=1,00	V14=1,05	Fluxo de Carga	Equação (4.9)
SVC	2,1006	2,2599	0,1593	0,1761

O sinal negativo no valor de ΔE_g indica diminuição no valor da tensão interna do gerador 5 e o sinal positivo de $\Delta \alpha$ indica acréscimo no valor do ângulo de disparo, com o objetivo de diminuir o valor de tensão da barra terminal 8 e incrementar o valor de tensão da barra 14 respectivamente, confirmando que as barras controladas 8 e 14 estão operando na região normal, onde as ações de controle tem o efeito esperado.

No entanto, segundo os elementos fora da diagonal da matriz [VCS], apresentada em (4.16), cada ação de controle terá o efeito oposto ao esperado nas outras barras controladoras. Assim, a diminuição na tensão da barra terminal 8 terá o efeito oposto incrementando as tensões das outras barras internas e, por sua vez, o aumento na barra 14 terá o efeito oposto, diminuindo as tensões nas outras barras internas.

Como se pode observar na Tabela 4.10, não é possível determinar qual ação de controle foi responsável pelas variações positivas ou negativas acontecidas nas outras barras internas. Para determinar a contribuição de cada ação de controle nestas variações, foram feitos dois testes adicionais. Cada teste consistiu em determinar o efeito individual de cada ação de controle sobre as variações das outras barras internas. Nas Tabelas 4.11 e 4.12 são apresentados os resultados dos testes.

Tabela 4.11. Variação de Tensão da Barra Interna Após Diminuição de Tensão na Barra Controlada 8

Gerador	E_g (p. u.)		ΔE_g (p. u.)	
	V8=1,09	V8=1,00	Fluxo de Carga	Equação (4.9)
G1	2,1522	2,1610	0,0088	0,0085
G2	1,0865	1,1636	0,0771	0,0750
G3	1,8979	1,9509	0,0530	0,0521
G4	1,0838	1,1699	-0,0861	-0,0767
G5	1,4400	0,9883	-0,4517	-0,4547
Equipamento	α (rad)		$\Delta\alpha$ (rad)	
	V14=1,00	V14=1,00	Fluxo de Carga	Equação (4.9)
SVC	2,1006	2,1426	0,0420	0,0469

Tabela 4.12. Variação de Tensão da Barra Interna Após Incremento de Tensão na Barra Controlada 14

Gerador	E_g (p. u.)		ΔE_g (p. u.)	
	V8=1,09	V8=1,09	Fluxo de Carga	Equação (4.9)
G1	2,1522	2,1500	-0,0022	-0,0028
G2	1,0865	1,0677	-0,0188	-0,0234
G3	1,8979	1,8842	-0,0137	-0,0162
G4	1,0838	0,9173	-0,1665	-0,1924
G5	1,4400	1,3880	-0,0520	-0,0602
Equipamento	α (rad)		$\Delta\alpha$ (rad)	
	V14=1,00	V14=1,05	Fluxo de Carga	Equação (4.9)
SVC	2,1006	2,2125	0,1119	0,1293

Nos resultados das Tabelas 4.11 e 4.12, cada ação individual de controle mostra resultados concordantes com o que indica a matriz [VCS]. Com o fim de

determinar a contribuição conjunta das duas ações de controle foram somados os valores das variações ΔE_g e $\Delta \alpha$ (utilizando os dados obtidos do fluxo de carga). Os resultados são apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13. Variações das Tensões Internas e do Ângulo de Disparo à Ação Conjunta das Ações de Controle

Gerador	ΔE_g (p. u.)
	Fluxo de Carga
G1	0,0066
G2	0,0583
G3	0,0393
G4	-0,0804
G5	-0,5037
Equipamento	$\Delta \alpha$ (rad)
	Fluxo de Carga
SVC	0,1539

Comparando os resultados obtidos das variações ΔE_g e $\Delta \alpha$ nas Tabelas 4.10 e 4.13, verifica-se que os valores são muito próximos.

É possível afirmar que, para determinar as variações nas grandezas controladoras de várias ações de controle, pode-se calcular os efeitos com as ações simultâneas ou com cada ação de controle separadamente e somá-las para obter as variações totais. Essa afirmação é válida para pequenas variações quando, então, os resultados obtidos com a matriz [VCS] e com o algoritmo de fluxo de carga são os mesmos.

4.3.2.2. Índices de Estabilidade de Tensão

Nas Tabelas 4.14, 4.15 e 4.16 são apresentados os resultados dos índices do caso-base apresentado na Tabela 4.8 e dos testes das ações de controle com efeito oposto ao esperado apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.10.

Tabela 4.14. Índices de Estabilidade de Tensão do Sistema-Teste de 14 Barras - Caso-Base

Barra	Tipo	S_i	S_m	β (graus)	M (%)
1	PQV	0,00	19,7346	96,5143	100,00
3	PQV	0,961	10,1507	99,6272	90,533
4	PQ	0,478	19,3309	90,6669	97,5273
5	PQ	0,0777	19,2934	90,4602	99,5974
6	PQV	0,1348	5,8832	94,566	97,7089
7	PQ	0,00	8,677	90,7049	100,00
8	PQV	0,00	3,7265	91,6335	100,00
9	PQ	0,3385	7,6279	90,8494	95,5624
10	PQ	0,1071	5,5107	93,091	98,0571
11	PQ	0,0394	5,0246	99,3481	99,2167
12	PQ	0,0631	4,1227	107,3394	98,4703
13	PQ	0,1469	6,3475	108,4419	97,6852
14	PVB	0,1506	3,4861	92,6424	95,6798

Tabela 4.15. Índices de Estabilidade de Tensão do Sistema-Teste de 14 Barras Após Diminuição de Tensão nas Barras Controladas 8 e 14

Barra	Tipo	S_i	S_m	β (graus)	M (%)
1	PQV	0,00	19,7964	96,6499	100,00
3	PQV	0,961	10,1293	99,5824	90,5129
4	PQ	0,478	19,079	90,8282	97,4946
5	PQ	0,0777	19,1064	90,5335	99,5935
6	PQV	0,1348	5,8393	94,2605	97,6916
7	PQ	0,00	8,1838	90,9605	100,00
8	PQV	0,00	3,2884	91,5958	100,00
9	PQ	0,3385	7,2886	91,4696	95,3558
10	PQ	0,1071	5,2894	92,9598	97,9758
11	PQ	0,0394	4,9055	99,3653	99,1977
12	PQ	0,0631	4,0891	107,573	98,4578
13	PQ	0,1469	6,2696	108,5907	97,6564
14	PVB	0,1496	3,364	92,7276	95,5514

Tabela 4.16. Índices de Estabilidade de Tensão do Sistema-Teste de 14 Barras Após Diminuição de Tensão da Barra Controlada 8 e Aumento de Tensão da Barra Controlada 14

Barra	Tipo	S_i	S_m	β (graus)	M (%)
1	PQV	0,00	19,7764	96,6013	100,00
3	PQV	0,961	10,1352	99,6261	90,5185
4	PQ	0,478	19,1422	90,9928	97,5029
5	PQ	0,0777	19,1615	90,627	99,5947
6	PQV	0,1348	5,8709	95,9396	97,7041
7	PQ	0,00	8,2985	91,6694	100,00
8	PQV	0,00	3,3056	91,9099	100,00
9	PQ	0,3385	7,4495	93,0069	95,4561
10	PQ	0,1071	5,4144	91,993	98,0225
11	PQ	0,0394	4,9786	98,9063	99,2095
12	PQ	0,0631	4,1507	107,1207	98,4807
13	PQ	0,1469	6,3863	108,2461	97,6993
14	PVB	0,3611	3,5626	93,2078	89,8637

Dos resultados apresentados na Tabela 4.15 em comparação aos da Tabela 4.14, a ação de controle foi prejudicial nos índices de estabilidade de tensão. Isto se deve, principalmente, ao incremento das tensões internas dos geradores 1, 2, 3 e 4, com incremento no fluxo de potência reativa gerada, e às tensões que diminuíram nas barras PQ. Os índices não ficaram ainda piores devido à diminuição na tensão da barra interna do gerador 5 e do ângulo de disparo do SVC e com a consequente diminuição no fluxo de potência reativa gerada.

Dos resultados apresentados na Tabela 16 em comparação aos da Tabela 4.14, a ação de controle foi prejudicial às condições de estabilidade de tensão. Isto se deve, principalmente, ao incremento das tensões internas dos geradores 1, 2 e 3 e do ângulo de disparo, com incremento no fluxo de potência reativa gerada, e às tensões que diminuíram nas barras PQ. Os índices não ficaram ainda piores devido à diminuição na tensão da barra interna dos geradores 4 e 5 e com a consequente diminuição no fluxo de potência reativa gerada.

4.4.

Obtenção do Ponto de Operação Através da Matriz [VCS]

A mudança do perfil de tensão ocorre quando são definidas novas tensões de referência nas barras de tensão controlada.

Para chegar ao novo perfil de tensão, é necessário saber como ajustar as grandezas controladoras dos equipamentos de controle de tensão e ter em conta seus limites operacionais [17]. Para definir a lógica de controle para cada equipamento é necessário conhecer a relação de sensibilidade entre a grandeza controladora e a tensão controlada, o que é realizado através da matriz de sensibilidade dos controles de tensão [VCS].

Na Figura 4.2 a relação entre a grandeza controladora e a tensão controlada é usual, isto é, para incrementar a tensão na barra controlada terminal do gerador de V_k^0 para V_k^1 deve-se incrementar a tensão na barra interna do gerador de E_g^0 para E_g^1 .

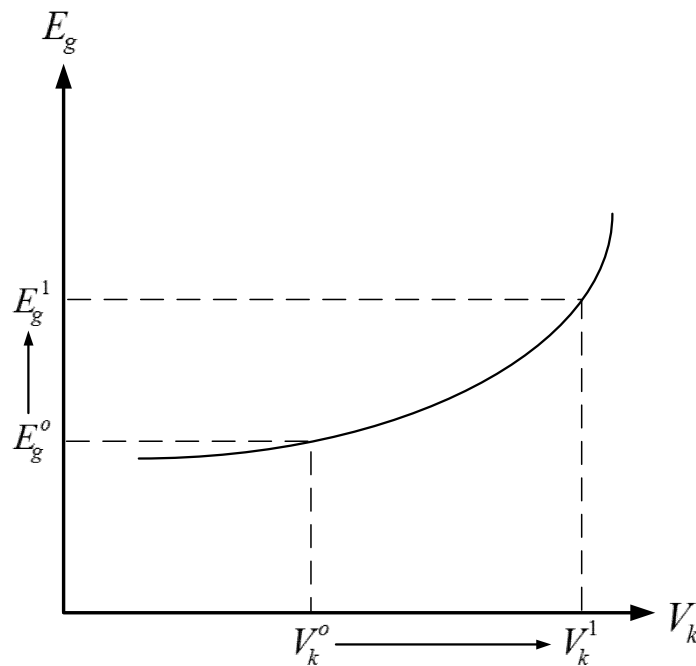


Figura 4.2. Relação Usual entre a Grandeza Controladora e a Tensão Controlada

Na Figura 4.3 a relação entre a grandeza controladora e a tensão controlada é oposta ao esperado, isto é, para incrementar a tensão na barra controlada

terminal do gerador de V_k^0 para V_k^1 deve-se diminuir a tensão na barra interna do gerador de E_g^0 para E_g^1 .

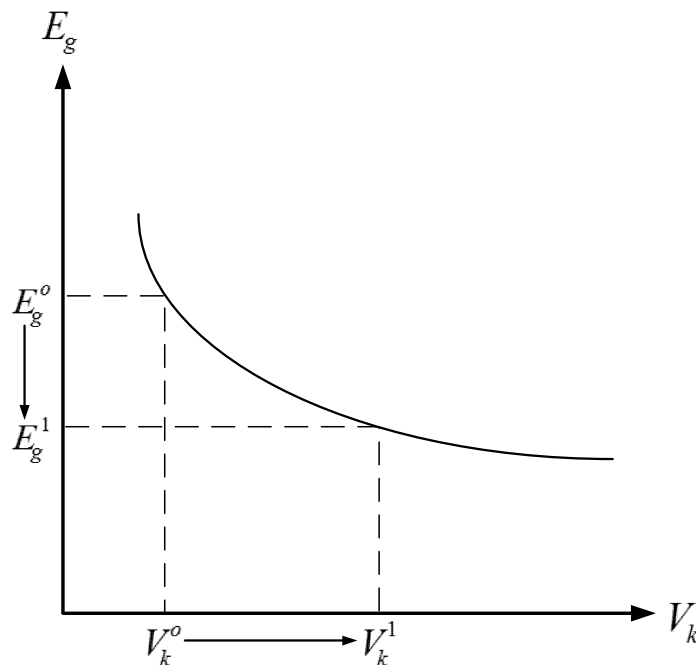


Figura 4.3. Relação Não Usual entre a Grandeza Controladora e a Tensão Controlada

Com mudanças no valor de tensão nas barras controladas há a possibilidade de transição da barra controlada de uma região de operação para outra. Como mostrado na Figura 4.4, a ação usual, para elevar a tensão da barra controlada terminal de V_k^0 para V_k^1 , seria aumentar a tensão na barra interna de E_g^0 para E_g^1 , mas pode-se comprovar que seria uma ação equivocada. Esta ação provocaria uma redução na tensão da barra terminal para V_k^2 .

O aumento na tensão da barra terminal deve ocorrer através da redução de E_g^0 e, então, neste intervalo é necessário ter a lógica de controle oposta à usual, até chegar ao ponto de inflexão da curva $V_k E_g$, onde ocorre a transição de região de operação da barra controlada. Deste ponto em diante, o incremento de V_k é obtido incrementando-se o valor de E_g , sendo necessário ter a lógica de controle usual.

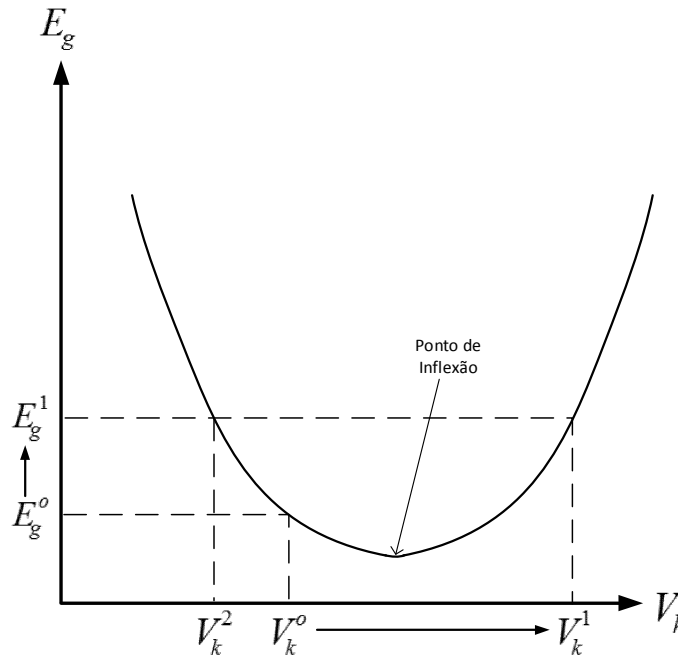


Figura 4.4. Relação com Transição de Região de Operação Entre a Grandeza Controladora e a Tensão Controlada

A ideia é fazer a variação da tensão interna dos geradores em pequenos “passos”, e verificar o comportamento dos elementos da matriz [VCS], para se estabelecer se a ação de controle de tensão deverá ser executada da maneira usual ou não após cada “passo”. Evidentemente, isso implica em calcular a matriz [VCS] após cada “passo”, pois, obviamente, o ponto de operação muda [17].

Devem-se definir os valores do “passo” em conformidade com o incremento mínimo possível (de acordo com a realidade física dos equipamentos), até atingir o novo valor da tensão de referência.

Assume-se, nas barras de tensão controlada, que a variação mínima na tensão de referência especificada é de mais ou menos 0,009 pu. Este dado corresponde ao valor mínimo de variação na tensão terminal de barras com tensão controlada por geradores ou SVC pertencentes ao sistema elétrico. Não representa um valor absoluto, mas a média de valores reais. Se a barra com tensão controlada não estiver próxima do ponto de inflexão da curva VE_g , fronteira entre as duas regiões de operação, pode-se considerar o uso de “passos” maiores, ou seja, superiores a 0,009 pu [17].

4.4.1.

Sistema-Teste de 5 Barras

Será considerado para ilustração o sistema-teste de 5 barras da Figura 4.5. Os dados de barra e de linha são mostrados nas Tabelas 4.17 e 4.18 respectivamente.

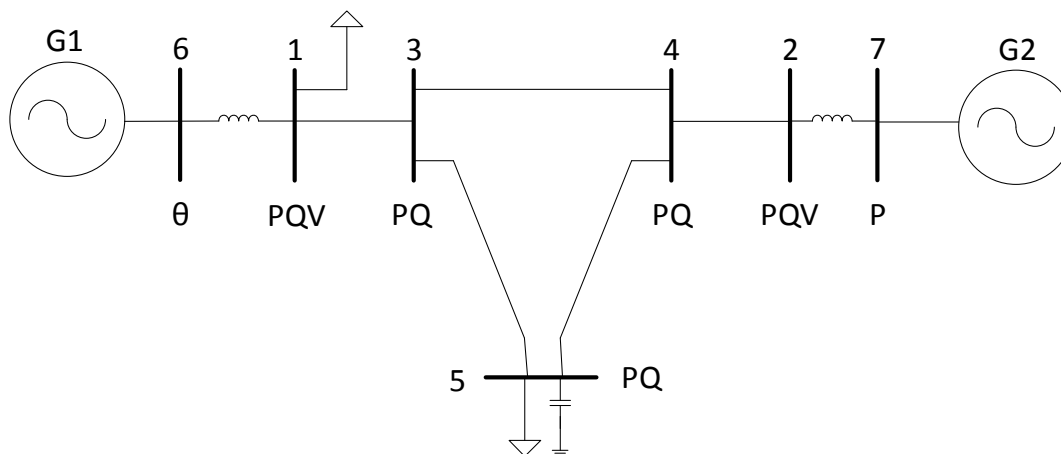


Figura 4.5. Sistema-Teste de 5 Barras

Tabela 4.17. Dados de Barra do Sistema de 5 Barras

Barra		Tensão		Geração		Carga		Shunt
No.	Tipo	V (pu)	θ (graus)	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	Q (Mvar)
1	PQV	1,05	-	-	-	500,00	200,00	-
2	PQV	1,01	-	-	-	-	-	-
3	PQ	1,00	-	-	-	-	-	-
4	PQ	1,00	-	-	-	-	-	-
5	PQ	1,00	-	-	-	800,00	700,00	100*
6	θ	1,00	0,00	-	-999 +999	-	-	-
7	P	1,00	-	1,00	-999 +999	-	-	-

*Q nominal

Tabela 4.18. Dados de Linha do Sistema de 5 Barras

De	Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Susceptância (%)
1	3	0,00	2,00	0,00
2	4	0,00	2,00	0,00
3	4	0,00	4,00	0,00
3	5	0,00	4,00	0,00
4	5	0,00	4,00	0,00
6	1	0,00	4,00	0,00
7	2	0,00	4,00	0,00

O ponto de operação definido como o caso-base é apresentado na Tabela 4.19.

Tabela 4.19. Resultado do Fluxo de Carga do Sistema de 5 Barras
Caso-Base

Barra		Tensão		Geração		Carga		Shunt
No.	Tipo	V (pu)	θ (graus)	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	Q (Mvar)
1	PQV	1,05	-18,2133	–	–	500,00	200,00	–
2	PQV	1,01	-37,2237	–	–	–	–	–
3	PQ	0,8745	-28,2359	–	–	–	–	–
4	PQ	0,8706	-37,2367	–	–	–	–	–
5	PQ	0,6144	-50,1468	–	–	800,00	700,00	37,75
6	Θ	1,5833	0,00	1299,00	2318,97	–	–	–
7	P	1,2887	-37,2061	1,00	898,00	–	–	–

O novo perfil de tensão é analisado considerando mudança de tensão nas barras 1 e 2, apresentado na Tabela 4.20.

**Tabela 4.20. Mudança do Perfil de Tensão nas barras 1 e 2 do Sistema-
Teste de 5 Barras**

Gerador	Barra Controlada	Tensão (p.u.)	
		Caso-Base	Novo Perfil de Tensão
G1	1	1,05	1,2
G2	2	1,01	1,1

A matriz [VCS], no caso-base, é apresentada em:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1217 & -0,3367 \\ -0,3545 & 0,1836 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_{g1} \\ \Delta E_{g2} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Os elementos diagonais positivos em (4.17) indicam relação usual entre E_g e V_k , e os elementos fora da diagonal negativos indicam conflito entre controles. Como os elementos fora da diagonal são maiores, em módulo, do que os elementos da diagonal deve-se promover variações negativas em E_g para obter variações positivas em V_k .

Para determinar a variação das grandezas controladoras para cada passo, utiliza-se (4.9). Para cada passo, a variação da tensão controlada é dada por:

$$\begin{vmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,009 \\ 0,009 \end{vmatrix} \quad (4.18)$$

Assim, na Tabela 4.21 são apresentadas a matriz [VCS] e a variação da tensão interna ΔE_g necessária para obter as variações da tensão terminal correspondente a cada passo.

Tabela 4.21. Matriz [VCS] e Variação da Tensão Interna para Cada Passo

Passo	[VCS]		ΔE_g
1	-0,1636	-0,5585	-0,0153
	-0,5884	0,0002	-0,0116
2	-0,4973	-0,8211	-0,009
	-0,8650	-0,2191	-0,0055
3	-0,9972	-1,2179	-0,0059
	-1,2826	-0,5523	-0,0025
4	-1,9075	-1,9449	-0,004
	-2,0470	-1,1645	-0,0007
5	-4,2193	-3,7980	-0,0026
	-3,9948	-2,7274	0,0006
6	-24,0586	-19,7312	-0,0016
	-20,7383	-16,1759	0,0015
7	9,8019	7,4722	-0,0008
	7,8475	6,7882	0,0022
8	4,6910	3,3698	-0,0001
	3,5363	3,3262	0,0028
9	3,3053	2,2597	0,0005
	2,3694	2,3900	0,0033
Passo	[VCS]		ΔE_g
10	2,6562	1,7411	0,0087
	1,8242	1,9531	-0,0082
11	2,4142	1,5531	0,0089
	1,6251	1,7970	-0,0081
12	2,2265	1,4076	0,0091
	1,4709	1,6763	-0,0080
13	2,0764	1,2916	0,0092
	1,3481	1,5801	-0,0079
14	1,9536	1,1970	0,0094
	1,2478	1,5016	-0,0078
15	1,8512	1,1182	0,0095
	1,1643	1,4363	-0,0077
16	1,7643	1,0517	0,0097
	1,0938	1,3812	-0,0077
17	1,7135	1,0127	0,0097
	1,0525	1,3489	-0,0076

Com os resultados da Tabela 4.21, é possível concluir que as ações de controle para incrementar a tensão na barra terminal 1 tem a lógica oposta até o ponto de inflexão no Passo 8 e, deste ponto em diante, as ações de controle para incrementar a tensão na barra terminal 1 tem a lógica usual. Assim, também, as

ações de controle para incrementar a tensão na barra terminal 2 tem a lógica oposta até o ponto de inflexão no Passo 4 e, deste ponto em diante, as ações de controle para incrementar a tensão na barra terminal 2 tem a lógica usual.

Foram construídas simultaneamente as curvas da relação entre a tensão nas barras internas dos geradores 1 e 2 e a tensão nas barras terminais correspondentes a cada passo. As curvas são mostradas nas Figuras 4.6 e 4.7.

Na Figura 4.6, o aumento da tensão na barra terminal 1 de 1,05 p.u. até 1,122 p.u., aproximadamente, ocorreu através da redução da tensão na barra interna do gerador 1, como mostrado nos valores negativos da variação da tensão interna do gerador 1 (ΔE_{g1}) do Passo 1 até o Passo 8 da Tabela 4.21. Deste ponto em adiante, isto é, de 1,131 p.u. até 1,2 p.u., o aumento de tensão na barra terminal 1 foi obtido aumentando-se o valor da tensão interna do gerador 1.

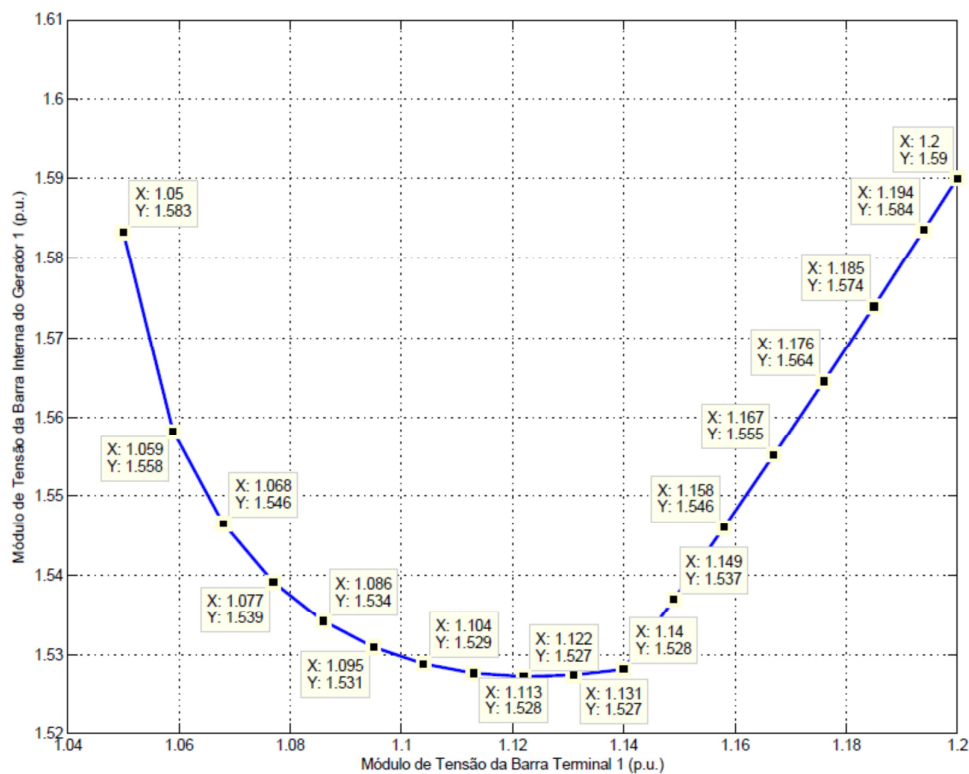


Figura 4.6. Relação Entre a Tensão Interna e a Tensão Terminal do Gerador 1

Na Figura 4.7, o aumento da tensão na barra terminal 2 de 1,01 p.u. até 1,046 p.u., aproximadamente, ocorreu através da redução da tensão na barra interna do gerador 2, como mostrado nos valores negativos da variação da tensão

interna do gerador 2 (ΔE_{g2}) do Passo 1 até o Passo 4 da Tabela 4.21. Deste ponto em diante, isto é, de 1,055 p.u. até 1,1 p.u., o aumento de tensão na barra terminal 2 foi obtido aumentando-se o valor da tensão interna do gerador 2 correspondente ao Passo 9. Deste ponto em diante, a tensão terminal deve ser mantida em 1,1 p.u. e, para isto, deve-se diminuir a tensão da barra interna em função do aumento da tensão na barra terminal do gerador 1. Como ambos geradores encontram-se na região normal de operação, o aumento da geração de potência reativa no gerador 1 permitiu redução da geração de potência reativa no gerador 2.

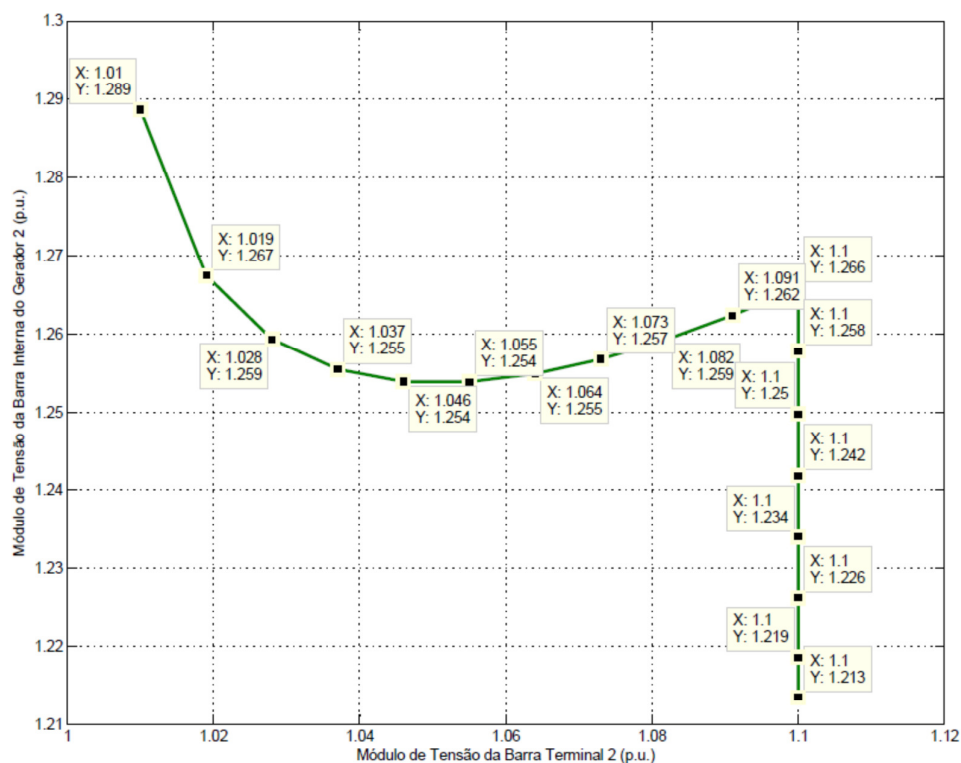


Figura 4.7. Relação Entre a Tensão Interna e a Tensão Terminal do Gerador 2

Após determinada a região de operação das barras controladas e definida a lógica de controle para cada equipamento até atingir o novo perfil de tensão, é necessário avaliar as condições de estabilidade de tensão calculando os índices no novo ponto de operação. O resultado de fluxo de potência no novo ponto de operação é apresentado na Tabela 4.22.

Tabela 4.22. Resultado do Fluxo de Carga Após Mudança do Perfil de Tensão

Barra		Tensão		Geração		Carga		Shunt
No.	Tipo	V (pu)	θ (graus)	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	Q (Mvar)
1	PQV	1,2000	-15,8027	–	–	500,00	200,00	–
2	PQV	1,1000	-28,5383	–	–	–	–	–
3	PQ	1,0766	-22,9077	–	–	–	–	–
4	PQ	1,0433	-28,5483	–	–	–	–	–
5	PQ	0,9078	-35,2665	–	–	800,00	700,00	82,42
6	Θ	1,5900	0,00	1299,00	1730,55	–	–	–
7	P	1,2135	-28,5211	1,00	344,26	–	–	–

Os valores dos índices no caso-base e no novo ponto de operação são apresentados nas Tabelas 4.23 e 4.24.

Tabela 4.23. Índices de Estabilidade de Tensão Caso-Base

Barra	S_i	S_m	β (graus)	M (%)
2	0,00	-17,4987	-75,8110	100,00
3	0,00	27,5004	122,4906	100,00
4	0,00	16,3792	138,2916	100,00
5	10,6301	11,5557	169,0284	8,0103

Tabela 4.24. Índices de Estabilidade de Tensão no Novo Ponto de Operação

Barra	S_i	S_m	β (graus)	M (%)
2	0,00	26,4198	103,0118	100,00
3	0,00	66,8408	103,5419	100,00
4	0,00	40,1307	104,9531	100,00
5	10,6301	22,6232	125,3674	53,0123

Comparando os resultados dos índices no caso-base e após a mudança do perfil de tensão, pode-se observar que a ação de controle foi benéfica, e que os valores de S_m , β e M melhoraram consideravelmente. Particularmente, os índices S_m e β da barra 2 mudaram de sinal (região anormal de operação para região normal de operação) devido à mudança na região de operação como mostrado na

Figura 4.7. Isto se deve, principalmente, às tensões que aumentaram nas barras PQ, à tensão interna do gerador 1 que aumentou de 1,58 p.u. até 1,59 p.u. e à tensão interna do gerador 2 que diminuiu de 1,29 p.u. até 1,21. Assim, também, a ação de controle permitiu que as gerações de potência reativa nos geradores 1 e 2 diminuíssem, de 2138,97 Mvar até 1730,55 Mvar no gerador 1 e de 898 Mvar até 344,26 Mvar no gerador 2.

4.4.2. Sistema-Teste de 14 Barras

O ponto de operação considerado como o caso-base é o mesmo que foi apresentado na Tabela 4.8. O novo perfil de tensão considerando a mudança dos módulos de tensão nas barras de tensão controlada 8 e 14, como apresentada na Tabela 4.25.

Tabela 4.25. Mudança do Perfil de Tensão nas barras 8 e 14 do Sistema-Teste de 14 Barras

Equipamento de Controle	Barra Controlada	Tensão (p.u.)	
		Caso-Base	Novo Perfil de Tensão
G5	8	1,09	1,00
SVC	14	0,9985	0,98

Os limites operacionais dos módulos de tensão nas barras internas 18 e 19 dos geradores 4 e 5 respectivamente, são apresentados na Tabela 4.26. Outros limites não foram considerados neste caso de estudo.

Tabela 4.26. Limites Operacionais nas Barras Internas 18 e 19 do Sistema-Teste de 14 Barras

Equipamento de Controle	Barra Interna	Tensão (p.u.)	
		$E_{\max}$	$E_{\min}$
G4	18	1,15	-
G5	19	-	1,2

A matriz [VCS], no caso-base, apresentada em (4.16), é repetida para comodidade em (4.19).

$$[VCS] = \begin{bmatrix} -0,8961 & -0,3164 & -0,2585 & -0,2146 & -0,1879 & -0,5159 \\ -0,8851 & -0,2634 & -0,2198 & -0,1872 & -0,1629 & -0,4487 \\ -0,8574 & -0,2605 & -0,1194 & -0,1652 & -0,1409 & -0,3921 \\ -0,799 & -0,2493 & -0,1855 & -0,0178 & -0,0964 & -0,157 \\ -0,7126 & -0,2209 & -0,1608 & -0,0984 & 0,0949 & -0,1777 \\ -0,8371 & -0,2603 & -0,1916 & -0,0692 & -0,0757 & 0,1595 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Os elementos diagonais negativos indicam relação oposta ao esperado entre E_g e V_k nos geradores 1, 2, 3 e 4 e os elementos diagonais positivos indicam relação usual entre E_g e V_k no gerador 5 e entre α e V_k no SVC. Como são desejadas variações negativas nas barras controladas 8 e 14, deve-se promover variações negativas na tensão da barra interna do gerador 5 e no ângulo de disparo do SVC.

As tensões das barras terminais 1, 2, 3 e 6 devem manter-se constantes e, para isto, deve aumentar-se as tensões internas correspondentes dos geradores 1, 2, 3 e 4.

Para determinar a variação das grandezas controladoras para cada passo, utiliza-se (4.9). Para cada passo, a variação da tensão controlada é dada por:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_8 \\ \Delta V_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0,009 \\ -0,009 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

A variação das tensões das barras internas e do ângulo de disparo do SVC para o caso-base é:

$$\begin{bmatrix} \Delta E_{g1} \\ \Delta E_{g2} \\ \Delta E_{g3} \\ \Delta E_{g4} \\ \Delta E_{g5} \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0013 \\ 0,0117 \\ 0,0081 \\ 0,0423 \\ -0,0346 \\ -0,0186 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Assim, são apresentadas a matriz [VCS] e a variação da tensão interna ΔE_g e do ângulo de disparo do SVC $\Delta\alpha$ necessária para obter as variações de tensão nas barras controladas correspondente a cada passo.

Passo 1

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_8 \\ \Delta V_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,8814 & -0,3127 & -0,2566 & -0,1882 & -0,5431 \\ -0,8726 & -0,2606 & -0,2184 & -0,1635 & -0,4729 \\ -0,8469 & -0,2582 & -0,1185 & -0,1415 & -0,4139 \\ -0,7093 & -0,2207 & -0,1613 & 0,0939 & -0,1909 \\ -0,8442 & -0,2635 & -0,1947 & -0,0779 & 0,1531 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_{g1} \\ \Delta E_{g2} \\ \Delta E_{g3} \\ \Delta E_{g5} \\ \Delta\alpha \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta E_{g1} \\ \Delta E_{g2} \\ \Delta E_{g3} \\ \Delta E_{g5} \\ \Delta\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0011 \\ 0,0089 \\ 0,0059 \\ -0,0448 \\ 0,0059 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Passo 2

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_8 \\ \Delta V_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,8855 & -0,3145 & -0,2584 & -0,1895 & -0,5414 \\ -0,8763 & -0,2623 & -0,2201 & -0,1646 & -0,4717 \\ -0,8505 & -0,2599 & -0,1201 & -0,1427 & -0,4132 \\ -0,7118 & -0,2219 & -0,1626 & 0,093 & -0,1914 \\ -0,8457 & -0,2645 & -0,1958 & -0,0789 & 0,1502 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_{g1} \\ \Delta E_{g2} \\ \Delta E_{g3} \\ \Delta E_{g5} \\ \Delta\alpha \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta E_{g1} \\ \Delta E_{g2} \\ \Delta E_{g3} \\ \Delta E_{g5} \\ \Delta\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0011 \\ 0,0089 \\ 0,0059 \\ -0,0448 \\ 0,0059 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

Passo 3

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_8 \\ \Delta V_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,8895 & -0,3162 & -0,2602 & -0,1907 & -0,5396 \\ -0,8801 & -0,264 & -0,2218 & -0,1658 & -0,4705 \\ -0,854 & -0,2615 & -0,1217 & -0,1438 & -0,4123 \\ -0,7143 & -0,2231 & -0,1638 & 0,0921 & -0,1919 \\ -0,8473 & -0,2655 & -0,1969 & -0,0798 & 0,1473 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_{g1} \\ \Delta E_{g2} \\ \Delta E_{g3} \\ \Delta E_{g5} \\ \Delta\alpha \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta E_{g1} \\ \Delta E_{g2} \\ \Delta E_{g3} \\ \Delta E_{g5} \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0011 \\ 0,009 \\ 0,0059 \\ -0,0448 \\ 0,006 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Passo 4

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_8 \\ \Delta V_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,8936 & -0,318 & -0,2619 & -0,192 & -0,5378 \\ -0,8838 & -0,2658 & -0,2234 & -0,167 & -0,4692 \\ -0,8576 & -0,2631 & -0,1233 & -0,145 & -0,4115 \\ -0,7168 & -0,2243 & -0,165 & 0,0912 & -0,1923 \\ -0,8488 & -0,2665 & -0,1981 & -0,0808 & 0,1445 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_{g1} \\ \Delta E_{g2} \\ \Delta E_{g3} \\ \Delta E_{g5} \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta E_{g1} \\ \Delta E_{g2} \\ \Delta E_{g3} \\ \Delta E_{g5} \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0011 \\ 0,009 \\ 0,0059 \\ -0,0448 \\ 0,006 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Passo 5

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_8 \\ \Delta V_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,8977 & -0,3198 & -0,2637 & -0,1932 & -0,5359 \\ -0,8876 & -0,2675 & -0,2251 & -0,1682 & -0,4678 \\ -0,8611 & -0,2648 & -0,125 & -0,1461 & -0,4106 \\ -0,7192 & -0,2256 & -0,1663 & 0,0903 & -0,1928 \\ -0,8504 & -0,2675 & -0,1992 & -0,0817 & 0,1417 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_{g1} \\ \Delta E_{g2} \\ \Delta E_{g3} \\ \Delta E_{g5} \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta E_{g1} \\ \Delta E_{g2} \\ \Delta E_{g3} \\ \Delta E_{g5} \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0011 \\ 0,009 \\ 0,0059 \\ -0,0448 \\ 0,006 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Passo 6

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,9013 & -0,3214 & -0,2653 & -0,5342 \\ -0,891 & -0,2691 & -0,2266 & -0,4666 \\ -0,8643 & -0,2663 & -0,1264 & -0,4097 \\ -0,8518 & -0,2684 & -0,2002 & 0,1392 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_{g1} \\ \Delta E_{g2} \\ \Delta E_{g3} \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta E_{g1} \\ \Delta E_{g2} \\ \Delta E_{g3} \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Com os resultados obtidos de (4.21) a (4.33), é possível concluir que a ação de controle para diminuir a tensão na barra controlada 8, tem a lógica usual, isto é, é necessário diminuir a tensão interna do gerador 5 até atingir o limite inferior $E_{\min} = 1,2$ p.u. no Passo 6, Deste ponto em diante, não tendo mais controle de tensão, a tensão da barra terminal 8 varia, sendo dependente das condições de carga do sistema.

Assim, também, a ação de controle para diminuir a tensão na barra controlada 14, tem a lógica usual, isto é, é necessário diminuir o valor do ângulo de disparo do SVC até atingir o novo valor de 0,98 p.u. no Passo 1. Deste ponto em diante, o controle de tensão incrementa o valor do ângulo de disparo para manter o novo valor na barra 14 constante. No entanto, os elementos fora da diagonal da coluna correspondente a ΔE_{g5} indicam efeito oposto ao esperado nas outras barras internas, no sentido de incrementar seus valores para manter constantes os valores de suas barras controladas terminais correspondentes.

Foram construídas simultaneamente as curvas da relação entre a tensão nas barras internas dos geradores 1, 2, 3, 4 e 5 e do ângulo de disparo do SVC com as tensões nas barras controladas correspondentes a cada passo. As curvas são mostradas nas Figuras 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13.

Na Figura 4.8, a tensão interna do gerador 1 incrementa devido à ação de controle do gerador 5 e do SVC com efeito oposto. Assim, para manter constante o valor de tensão na barra terminal em 1,06 p.u. deve-se incrementar o valor de tensão na barra interna de 2,152 p.u. até 2,16 p.u.

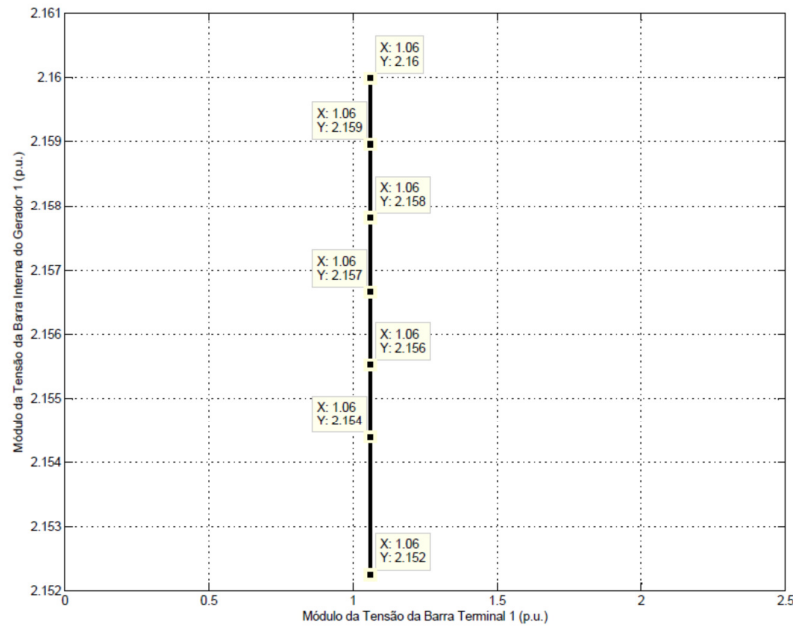


Figura 4.8. Relação entre a Tensão Interna e a Tensão Terminal do Gerador 1

Na Figura 4.9, a tensão interna do gerador 2 incrementa devido à ação de controle do gerador 5 e do SVC com efeito oposto. Assim, para manter constante o valor de tensão na barra terminal em 1,045 p.u. deve-se incrementar o valor de tensão na barra interna de 1,087 p.u. até 1,15 p.u.

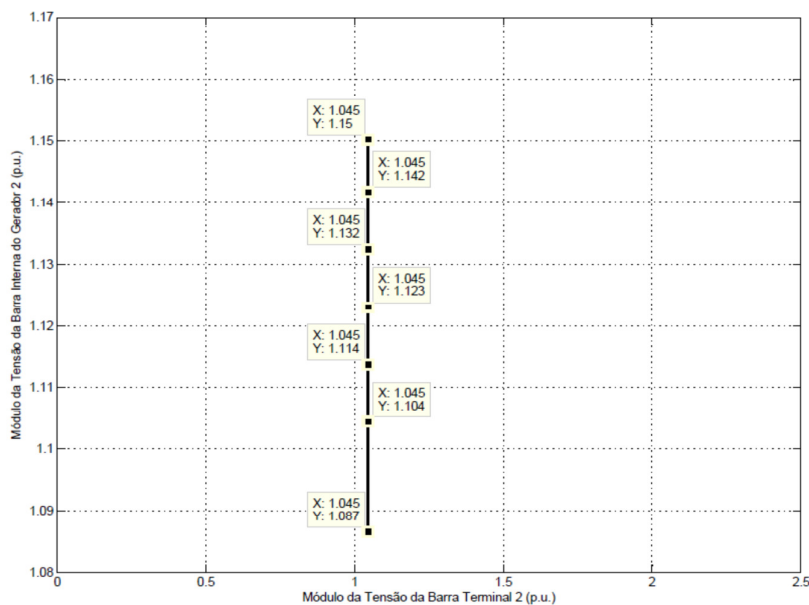


Figura 4.9. Relação entre a Tensão Interna e a Tensão Terminal do Gerador 2

Na Figura 4.10, a tensão interna do gerador 3 incrementa devido a ação de controle do gerador 5 e do SVC com efeito oposto. Assim, para manter constante o valor de tensão na barra terminal em 1,07 p.u. deve-se incrementar o valor de tensão na barra interna de 1,898 p.u. até 1,94 p.u.

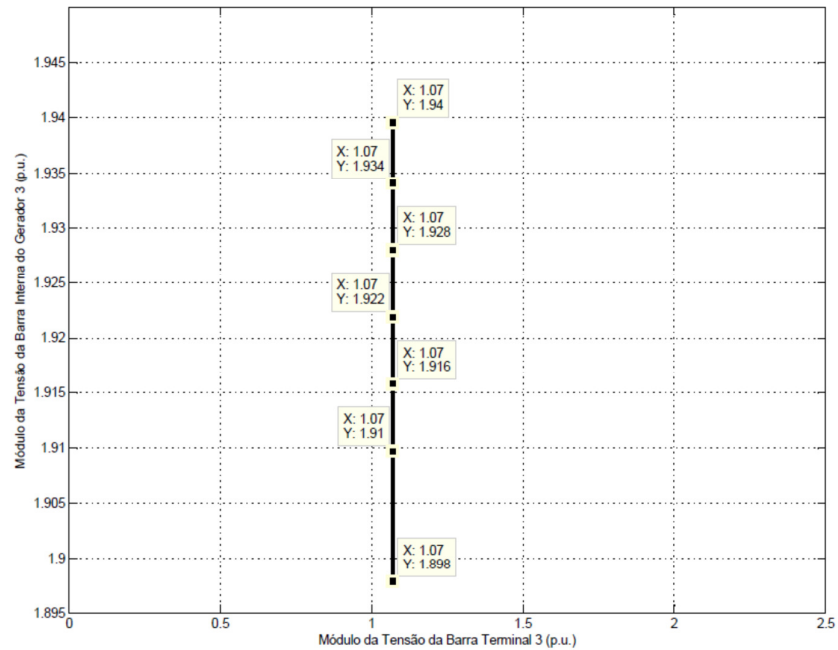


Figura 4.10. Relação entre a Tensão Interna e a Tensão Terminal do Gerador 3

Na Figura 4.11, a tensão interna do gerador 4 incrementa devido a ação de controle do gerador 5 e do SVC com efeito oposto no Passo 1 para manter constante o valor de tensão na barra terminal em 1,01 p.u. No entanto neste ponto é atingido o limite máximo da tensão interna $E_{\max} = 1,15$ p. u. perdendo assim o controle de tensão da barra terminal 6, a qual passa a variar em função das tensões no resto do sistema.

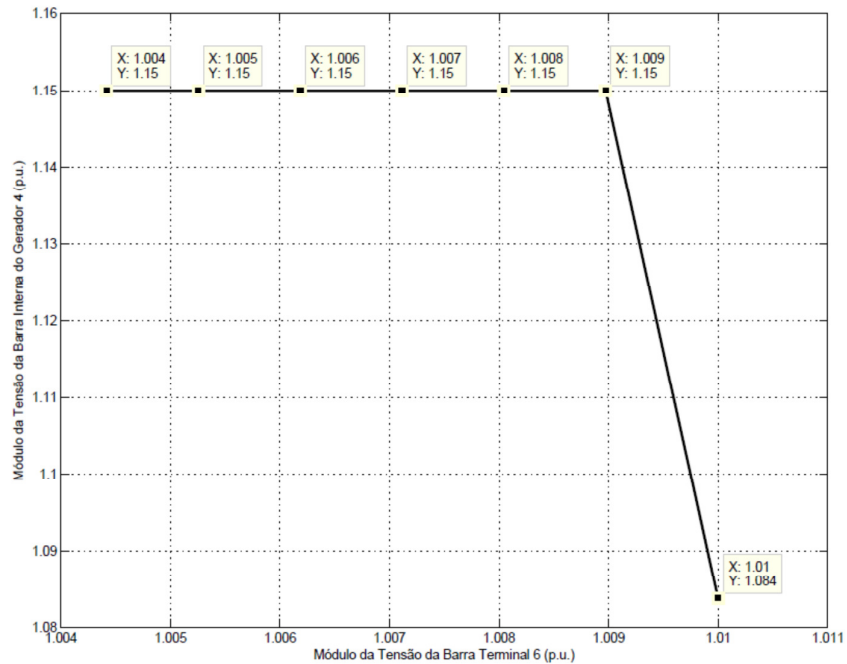


Figura 4.11. Relação entre a Tensão Interna e a Tensão Terminal do Gerador 4

Observando a curva V_8E_{19} mostrada na Figura 4.12, pode-se comprovar que para diminuir a tensão da barra terminal 8 de 1,09 p.u para 1,00 p.u. deve-se diminuir a tensão interna E_{19} . No entanto, o limite operacional $E_{\min} = 1,2$ p.u. é atingido no último ponto da curva V_8E_{19} . A partir daí, é perdido o controle de tensão da barra terminal mudando para o tipo PQ, e a barra interna muda para o tipo PV. Com a perda de controle, não é possível atingir o novo valor de tensão especificado para a barra terminal 8 e, por isto, o valor de tensão da barra terminal 8 é de 1,037 p.u. ao invés de 1,0 p.u.

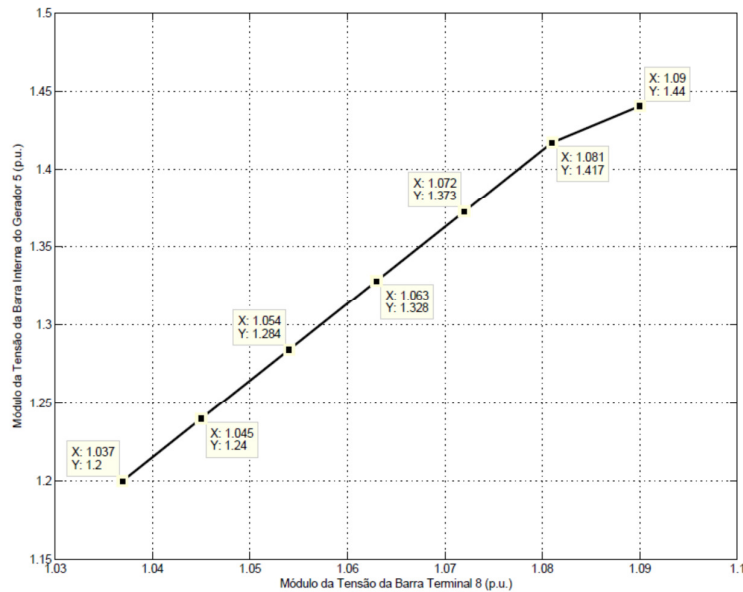


Figura 4.12. Relação entre a Tensão Interna e a Tensão Terminal do Gerador 5

Observando a curva $V_{14}\alpha$ mostrada na Figura 4.13, pode-se comprovar que, para diminuir a tensão da barra controlada 14 de 1,0 p.u para 0,98 p.u., deve-se diminuir o valor do ângulo de disparo α . No entanto, uma vez atingido o novo valor de tensão da barra 14 que é 0,98 p.u. no Passo 1, o ângulo de disparo aumenta para manter fixo o valor de tensão da barra 14.

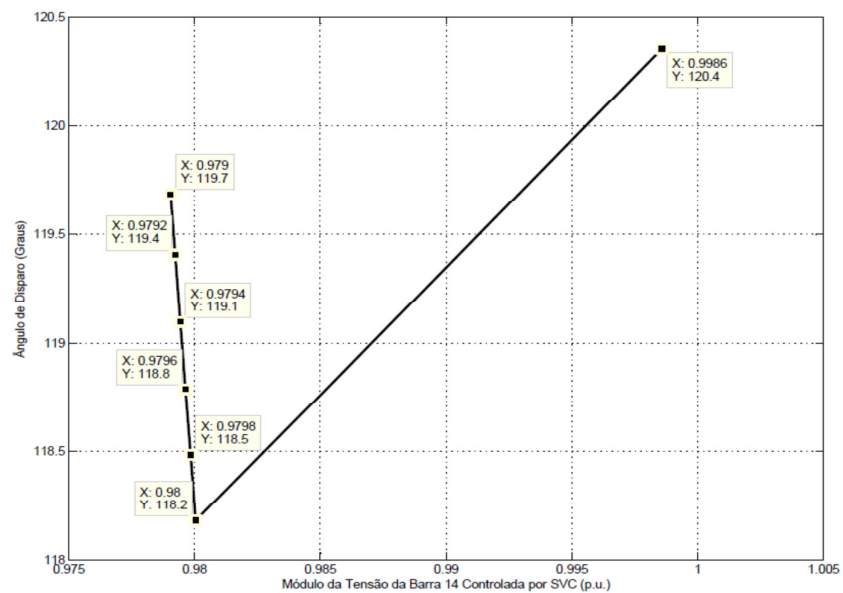


Figura 4.13. Relação entre o Ângulo de Disparo e a Tensão Controlada da Barra 14

O efeito oposto das ações de controle do gerador 5 e do SVC nas outras grandezas controladoras do sistema (barras internas 15, 16, 17 e 18) produzem incremento nos valores das tensões nessas barras para manter fixos os valores das correspondentes tensões nas barras controladas (barras 1, 2, 3 e 6). Com o incremento das tensões internas dos geradores 1, 2, 3 e 6, como mostrado nas Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11, diminuem os valores das tensões das barras não controladas do sistema. O valor de tensão da barra 14 é mantido constante no novo valor de tensão pelo incremento no valor do ângulo de disparo, como mostrado na Figura 4.13.

Após determinada a região de operação das barras controladas e definida a lógica de controle para cada equipamento até atingir o novo perfil de tensão, é necessário avaliar as condições de estabilidade de tensão calculando os índices no novo ponto de operação. O resultado de fluxo de potência no novo ponto de operação é apresentado na Tabela 4.27.

Tabela 4.27. Resultado de Fluxo de Carga do Novo Perfil de Tensão do Sistema-Teste de 14 Barras

Barra		Tensão		Geração		Carga		Shunt
No.	Tipo	V (pu)	θ (graus)	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	Q (Mvar)
1	PQV	1,0600	4,9822	0,00	0,00	0,00	0,00	-
2	PQV	1,0450	0,00	0,00	0,00	21,7	12,7	-
3	PQV	1,0700	-8,4238	0,00	0,00	94,2	19,00	-
4	PQ	1,0251	-5,3175	-	-	47,8	0,00	-
5	PQ	1,0256	-3,7741	-	-	7,6	1,6	-
6	PQ	1,0044	-9,7826	0,00	0,00	11,2	7,5	-
7	PQ	1,0139	-8,6614	-	-	0,00	0,00	-
8	PQ	1,0369	-8,6614	0,00	0,00	0,00	0,00	-
9	PQ	0,9944	-10,4741	-	-	29,5	16,6	-
10	PQ	0,9883	-10,6775	-	-	9,00	5,8	-
11	PQ	0,9926	-10,3811	-	-	3,5	1,8	-
12	PQ	0,9899	-10,7573	-	-	6,1	1,6	-
13	PQ	0,9861	-10,8838	-	-	13,5	5,8	-
14	PVB	0,9790	-11,9824	-	4,75	14,9	5,00	-
15	P	2,1600	70,4633	232,00	413,79	0,00	0,00	-
16	Θ	1,1502	21,2101	41,42	19,28	0,00	0,00	-
17	P	1,9396	-8,4238	0,00	160,63	0,00	0,00	-
18	PE	1,1500	-9,7826	0,00	13,39	0,00	0,00	-
19	PE	1,2000	-8,6614	0,00	15,66	0,00	0,00	-

Os valores dos índices no caso-base, apresentada na Tabela 4.14, é repetida para comodidade na Tabela 4.28.

Tabela 4.28. Índices de Estabilidade de Tensão do Sistema-Teste de 14 Barras - Caso-Base

Barra	S_i	S_m	β (graus)	M (%)
1	0,00	19,7346	96,5143	100,00
3	0,961	10,1507	99,6272	90,533
4	0,478	19,3309	90,6669	97,5273
5	0,0777	19,2934	90,4602	99,5974
6	0,1348	5,8832	94,566	97,7089
7	0,00	8,677	90,7049	100,00
8	0,00	3,7265	91,6335	100,00
9	0,3385	7,6279	90,8494	95,5624
10	0,1071	5,5107	93,091	98,0571
11	0,0394	5,0246	99,3481	99,2167
12	0,0631	4,1227	107,3394	98,4703
13	0,1469	6,3475	108,4419	97,6852
14	0,1506	3,4861	92,6424	95,6798

Os índices no novo ponto de operação são apresentados na Tabela 4.29.

Tabela 4.29. Índices de Estabilidade de Tensão Após Mudança do Perfil de Tensão

Barra	S_i	S_m	β (graus)	M (%)
1	0,00	19,7121	96,5709	100,00
3	0,9610	10,0456	100,2106	90,4339
4	0,4780	18,0864	92,8238	97,3571
5	0,0777	17,9582	92,2746	99,5675
6	0,1348	5,8008	94,6923	97,6763
7	0,00	6,4644	94,3759	100,00
8	0,00	3,4376	92,1289	100,00
9	0,3385	6,5897	95,5209	94,8632
10	0,1071	4,8430	92,6049	97,7892
11	0,0394	4,0496	90,8437	99,0281
12	0,0631	3,1390	91,2880	97,9910
13	0,1469	4,4677	90,2233	96,7112
14	0,1490	2,7710	101,0431	94,6221

Comparando os resultados dos índices no caso-base e após a mudança do perfil de tensão, verifica-se que as ações de controle para chegar ao novo perfil de tensão foram prejudiciais. Isto se deve, principalmente, aos limites operacionais nas tensões internas dos geradores 4 e 5, os quais foram atingidos durante o

processo iterativo da mudança do perfil de tensão. É sabido que a perda de controle de tensão piora as condições de estabilidade de tensão. Além disso, as tensões diminuíram nas barras PQ, as tensões internas aumentaram em vários geradores e os fluxos de potência reativa aumentaram.

No cálculo da matriz de sensibilidade [VCS] é detectada a região de operação das barras de tensão controlada através do sinal da relação entre as grandezas controladoras e a tensão das barras controladas. Assim, o sinal negativo indica que a barra controlada se encontra na região anormal de operação, onde as ações de controle de tensão terão o efeito oposto ao esperado.

Para determinar as variações nas grandezas controladoras de várias ações de controle, pode-se calcular os efeitos com as ações simultâneas ou com cada ação de controle separadamente e somá-las para obter as variações totais. Assim, comprovou-se a propriedade de superposição devido à linearização das equações em (4.7). Isto é válido para pequenas variações quando, então, os resultados obtidos como a matriz [VCS] e com o algoritmo de fluxo de carga são os mesmos.

O novo perfil de tensão é atingido através do ajuste das grandezas controladoras dos equipamentos de controle de tensão. A lógica de controle é definida para um ponto de operação, isto é, sentido usual ou oposto. O valor das grandezas controladoras de tensão, para se chegar ao novo perfil de tensão, é definido pela matriz [VCS]. Deve-se verificar os elementos da matriz [VCS] em pequenos passos de variação de tensão das barras controladas para se estabelecer se a ação de controle deverá ser executada de maneira usual ou não (após cada passo). A importância deste procedimento é verificar se existe transição da barra controlada de uma região de operação para outra.

Nos casos com ação de controle inadequada, independe da relação inversa entre grandeza controladora e tensão controlada, um aumento da tensão na barra controlada teve um impacto positivo sobre as condições de estabilidade de tensão, e uma diminuição da tensão na barra controlada teve um impacto negativo sobre as condições de estabilidade de tensão. Esse é o resultado esperado também quando a ação de controle é adequada.