

5. Obtenção do Ponto de Operação a Partir do Novo Perfil de Tensão

5.1 Introdução

A definição de um novo ponto de operação envolve a utilização dos programas EstabTen, que faz a avaliação das condições nodais de carregamento; CaTrans, que determina os caminhos e ramos de transmissão críticos; e FLUPOT que diminui o fluxo de potência nos ramos de transmissão críticos através da mudança do perfil de tensão e, se necessário e adequado, do redespacho de potência ativa. No primeiro caso, o programa FLUPOT determina as novas tensões de referência nas barras de tensão controlada. No segundo caso, determina também as potências ativas injetadas por cada gerador. Essa metodologia foi descrita detalhadamente no Capítulo 2.

O problema é como chegar ao novo perfil de tensão, isto é, como ajustar as grandezas controladoras dos equipamentos de controle de tensão. Nesse ponto do procedimento, não se sabe em qual região de operação se encontra as barras com tensão controlada, isto é, não se conhece o sinal da relação de sensibilidade entre a grandeza controladora e a tensão controlada. Isto implica em como deverá ser definida a lógica de controle para cada equipamento nesse ponto de operação, se é o sentido usual ou o oposto. O objetivo do estudo a ser apresentado neste capítulo é propor uma metodologia para solucionar esse problema, complementando o procedimento descrito no parágrafo anterior.

A obtenção do valor das grandezas controladoras da tensão, para se chegar ao perfil de tensão determinado pelo programa FLUPOT, será realizada através da matriz de sensibilidade dos controles de tensão [VCS].

5.2 Sistema-Teste de 5 Barras

O sistema-teste de 5 barras a ser analisado nesta seção é o mesmo sistema mostrado na Figura 2.6. Na Figura 5.1, mostra-se o sistema a ser avaliado após a inclusão do modelo de regime permanente dos geradores do sistema.

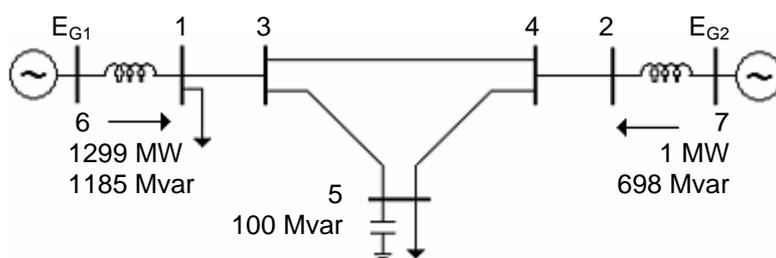


Figura 5.1 – Diagrama Unifilar do Sistema-Teste de 5 Barras com a Inclusão do Modelo de Regime Permanente

O ponto de operação considerado é o definido como o caso-base, já apresentado na Tabela 2.2, repetido aqui, Tabela 5.1, para apresentar as modificações realizadas para representação do modelo em regime permanente do sistema-teste de 5 barras.

Tabela 5.1 – Geração e Carga / Caso-Base

Barra	Tensão (pu)	Geração		Carga		Shunt
		P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	Q (Mvar)
1	1,050	–	–	500,0	200,0	–
2	1,010	–	–	–	–	–
3	0,876	–	–	–	–	–
4	0,872	–	–	–	–	–
5	0,618	–	–	800,0	700,0	38,2*
6	1,581	1299,0	2306,1	–	–	–
7	1,286	1,0	888,2	–	–	–

*Q nominal = 100 Mvar

O procedimento de reforço das condições de segurança de tensão, demonstrado na Seção 2.2.3, foi realizado considerando-se somente o redespacho de potência reativa por parte dos dois geradores. Não houve ajuste no valor da potência nominal do capacitor em derivação ligado à barra 5. Portanto, nesta análise, esta barra não será considerada como sendo uma barra com tensão controlada.

O novo ponto de operação, apresentado na Tabela 2.8, e aqui repetido para comodidade na Tabela 5.2, é resultante da aplicação da metodologia de reforço das condições de segurança de tensão, onde os programas computacionais EstabTen, CaTrans e FLUPOT foram utilizados.

Tabela 5.2 – Geração e Carga / Ponto de Operação Obtido

Barra	Tensão (pu)	Geração		Carga		Shunt
		P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	Q (Mvar)
1	1,200	–	–	500,0	200,0	–
2	1,100	–	–	–	–	–
3	1,077	–	–	–	–	–
4	1,043	–	–	–	–	–
5	0,908	–	–	800,0	700,0	82,4*
6	1,590	1299,0	1730,4	–	–	–
7	1,213	1,0	344,2	–	–	–

*Q nominal = 100 Mvar

Do ponto de vista operacional não é possível, e tão pouco seria viável do ponto de vista de segurança de tensão, realizar um aumento de tensão potencialmente elevado como, por exemplo, elevar a tensão da barra 1 de 1,05 para 1,20 pu, assim como de 1,01 para 1,10 pu na barra 2.

Uma barra com tensão controlada pode transitar de uma região de operação para outra. A possibilidade de transição aumenta na medida em que são definidos maiores incrementos para o valor da tensão controlada.

A idéia é fazer a variação da tensão interna das máquinas, E_G , em pequenos “passos”, e verificar o comportamento dos elementos de [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 [VCS] após cada “passo”, pois, obviamente, o ponto de operação muda.

Deve-se definir os valores do “passo” em conformidade com o incremento mínimo possível (de acordo com a realidade física dos equipamentos), no valor da tensão de referência de cada barra com tensão controlada da rede a ser avaliada. Assume-se, no caso de controle de tensão por geradores, 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 pertencentes ao sistema elétrico brasileiro. 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.

A matriz $[VCS]$, considerando o controle de tensão dos geradores conectados às barras 1 e 2, é dada por:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1078 & -0,3474 \\ -0,3657 & 0,1750 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta E_{G1} \\ \Delta E_{G2} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

A determinação da variação de controle necessária para cada iteração é feita através de (5.2):

$$[\Delta C] = [VCS]^{-1} * [\Delta V] \quad (5.2)$$

onde

$$[\Delta V] = \begin{bmatrix} 0,009 \\ 0,009 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

e

$$[\Delta C] = \begin{bmatrix} \Delta E_{G1} \\ \Delta E_{G2} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Os elementos diagonais positivos em (5.1) indicam relação usual entre E_G e V , 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, o determinante de $[VCS]$ é negativo. Assim, são desejadas variações positivas em V , deve-se promover variações negativas em E_G .

As curvas mostradas nas Figuras 5.2 e 5.3 foram construídas simultaneamente para "passos" seqüenciais em ΔV com os valores dados em (5.3). Como afirmado, verifica-se que no primeiro "passo" (e nos subseqüentes) os valores de E_G diminuiram.

Se forem observados somente os valores de tensão antes e após a ação de reforço aplicada para a barra 1, se poderia concluir que para elevar a sua tensão terminal (V_1) de 1,05 para 1,20 pu, bastaria aumentar a sua tensão interna E_{G1} de 1,581 para 1,590 pu. Observando-se a curva $V_1 E_{G1}$ mostrada na Figura 5.2, pode-se comprovar que esta seria uma afirmação equivocada.

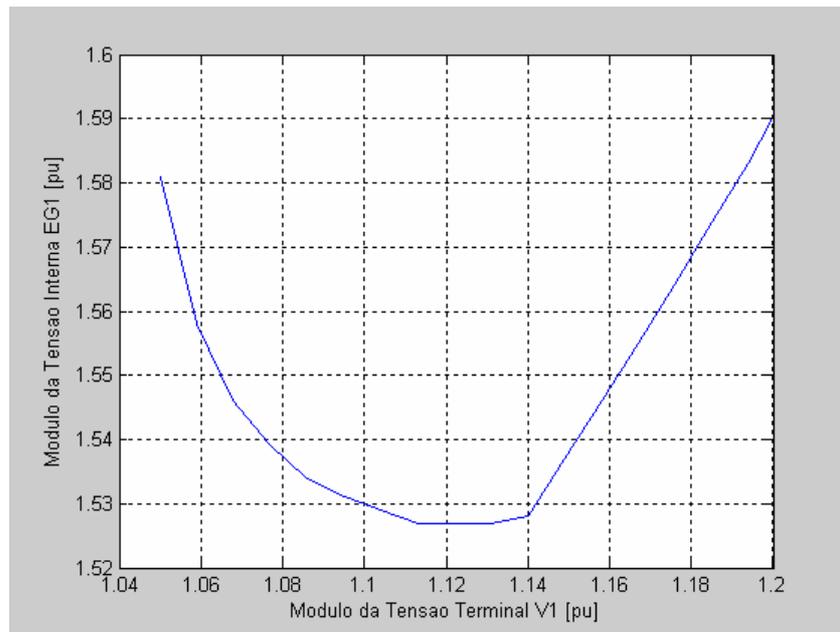


Figura 5.2 – Relação Entre a Tensão Interna e a Tensão Terminal do Gerador 1

A simulação deste procedimento através do programa de fluxo de carga constitui outra forma de se verificar o erro de procedimento. Para isto, bastaria realizar apenas um “passo”, $\Delta E_{G1} = 0,009$ pu, para se obter os 1,590 pu. Esta medida resultaria na variação da tensão de referência V_1 para 1,052 pu, aumento de 0,002 pu, muito inferior a 0,150 pu, valor esperado. Além disto, esta ação provocaria uma redução de 0,003 pu na tensão V_2 , que passaria a ser de 1,007 pu. Estes resultados podem ser estimados através da substituição de (5.1) em (4.9):

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1078 & -0,3474 \\ -0,3657 & 0,1750 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0,009 \\ 0,000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0010 \\ -0,0033 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Novamente na Figura 5.2, observa-se que o aumento do valor da tensão terminal V_1 , de 1,05 até 1,12 pu, aproximadamente, ocorreu através da redução de E_{G1} .

Logo, neste intervalo, seria necessário que o controle de tensão tivesse a lógica de controle oposta à usual. Deste ponto em diante, ou seja, de 1,14 até 1,20 pu, o acréscimo de tensão foi obtido aumentando-se o valor de E_{G1} , isto é, seria necessário que o controle de tensão tivesse a lógica usual.

A transição de região de operação também ocorreu na barra 2, como pode ser observado através da curva $V_2 E_{G2}$ mostrada na Figura 5.3. O aumento da tensão terminal do gerador 2 (V_2) de 1,01 até 1,05 pu, aproximadamente, foi conseguido através da redução sua tensão interna E_{G2} , de 1,286 até 1,254 pu, isto é, seria necessário que o controle de tensão, neste intervalo, tivesse a lógica contrária à usual. O aumento de tensão, partindo-se de 1,05 até 1,10 pu, foi obtido através do aumento de E_{G2} , de 1,254 até 1,266 pu, como usual.

O decréscimo da tensão E_{G2} de 1,266 até 1,213 pu, observado para o ponto em que a tensão terminal do gerador 2 permanece em 1,10 pu, ocorreu em função do aumento gradual da tensão de referência do gerador 1. Em outras palavras, nessa região normal de operação para ambos os geradores, o aumento da geração de potência reativa da máquina 1 permitiu uma redução da geração de potência reativa da máquina 2.

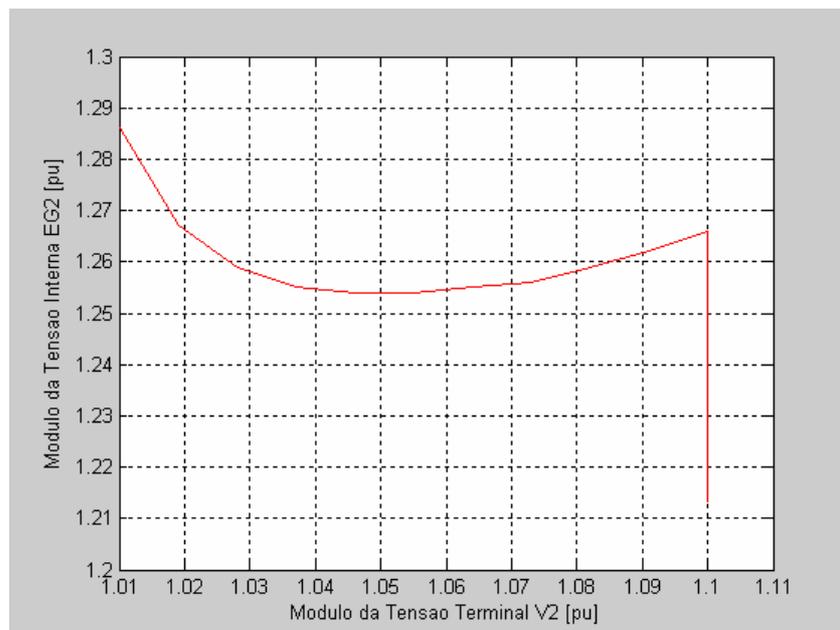


Figura 5.3 – Relação Entre a Tensão Interna e a Tensão Terminal do Gerador 2.

5.3 Sistema-Teste de 12 Barras

O sistema-teste desta seção é o mesmo sistema apresentado no Capítulo 4, Figura 4.3. Os módulos das tensões das barras com tensão controlada são mostrados na terceira coluna da Tabela 5.3. O ponto de operação levado em consideração nesta seção é o apresentado na Tabela 4.22, obtido após aumentar-se a carga do sistema em 50%. O exercício numérico realizado nesta seção consiste em se obter um novo perfil de tensão para o sistema, o qual é apresentado na quarta coluna da Tabela 5.3. A matriz de [VCS] calculada para esse ponto de operação e, portanto, usada para se calcular os valores de ΔV e ΔC , é dada por (4.45). As barras com tensão controlada 1 e 3 foram as que tiveram sua tensão de referência alterada.

Tabela 5.3 – Dados do Sistema-Teste de 12 Barras

N ^o	Barra	Tensão (pu)		ΔV		Tipo	ΔC	
		Inicial	Objetivo	F.Carga	Calculado		F.Carga	Calculado
1	PQV	1,040	1,050	0,0100	0,0092	E _{G1}	0,0060	0,0065
2	PQV	1,025	1,025	0,0000	-0,0009	E _{G2}	0,0000	-0,0000
3	PQV	1,025	1,050	0,0250	0,0239	E _{G3}	0,0230	0,0236
4	PQ	1,026	1,026	0,0000	-0,0015	t ₁₄	0,0100	0,0094
7	PQ	1,026	1,026	0,0000	-0,0011	t ₂₇	0,0000	-0,0000
9	PQ	1,032	1,032	0,0000	-0,0011	t ₃₉	0,0240	0,0241

Os resultados apresentados na Tabela 5.3 mostram que, através da matriz de sensibilidade dos controles de tensão [VCS], é possível estimar um novo perfil de tensão (ΔV) resultante de ajustes realizados nos parâmetros dos dispositivos de controle de tensão (ΔC), por meio de (4.9). De forma inversa, é possível determinar os ajustes necessários para cada equipamento de controle de tensão (ΔC), para se obter um novo perfil de tensão (ΔV) previamente definido, por meio de (5.2).

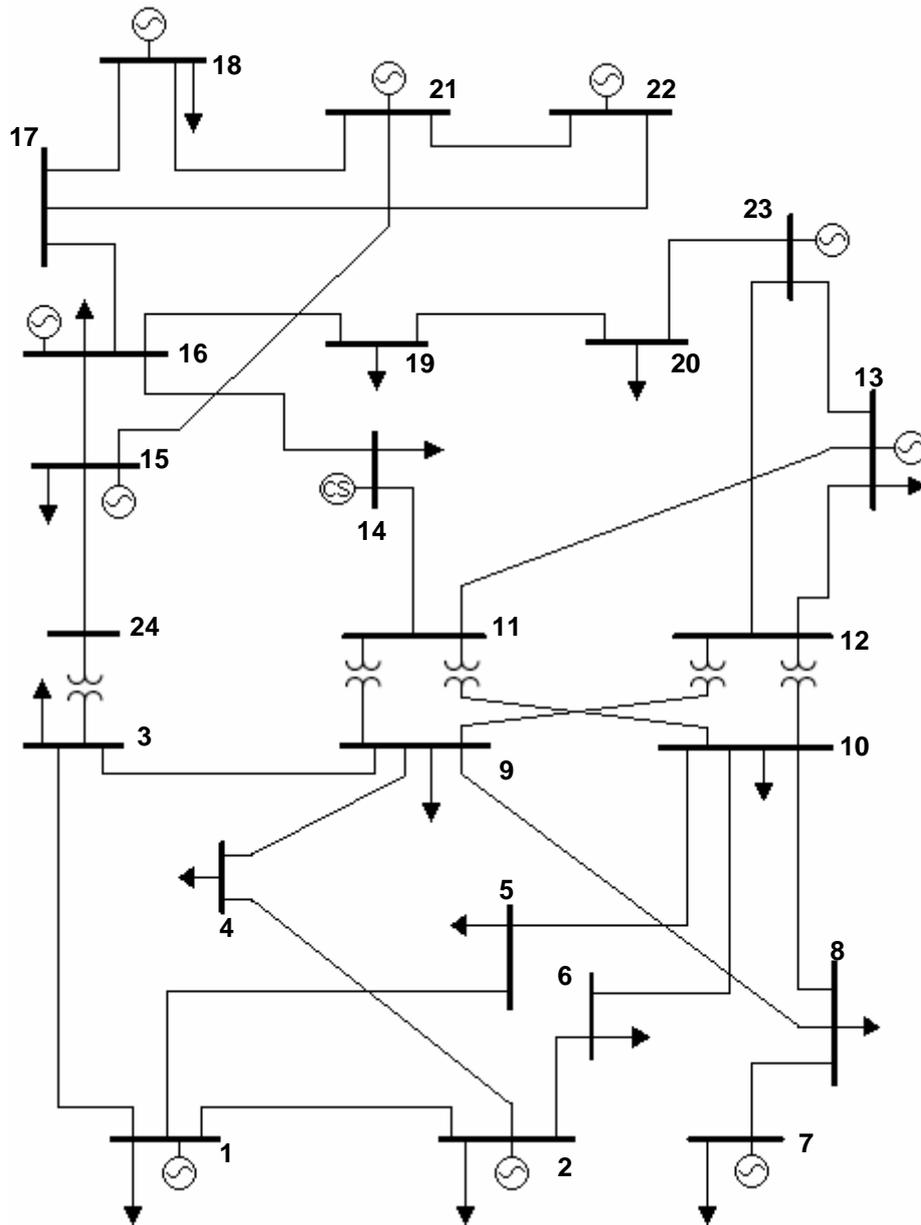


Figura 5.4 – Diagrama Unifilar do Sistema-Teste IEEE 24 Barras

5.4 Sistema-Teste IEEE-24 Barras

Os dados de barra e de linha para o sistema-teste IEEE 24 barras, a ser analisado nesta seção, são dados no Apêndice B. O diagrama unifilar desta rede é mostrado na Figura 5.4. Nesta figura, o modelo de regime permanente dos geradores não foi mostrado, apesar de ter sido incluído nos cálculos numéricos. O

o sistema é composto por 10 geradores, um compensador síncrono, 5 transformadores e 29 linhas de transmissão.

O resultado da avaliação das condições de segurança de tensão, obtido através da utilização do programa computacional EstabTen, no ponto de operação inicial, é apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Relatório de Segurança de Tensão para o Sistema-Teste IEEE-24 Barras no Ponto de Operação Inicial

<i>Bar n^o</i>	<i>V (pu)</i>	<i>Equip.</i>	<i>Tipo</i>	<i>S_i (pu)</i>	<i>S_m (pu)</i>	<i>β (graus)</i>	<i>M (%)</i>
1	1,089	L	0	1,102	3,2	174,1	65,4
2	1,089	L	0	0,990	3,1	174,0	68,3
3	0,988	L	0	1,838	3,0	174,1	39,4
4	1,022	L	0	0,755	2,3	173,6	66,5
5	1,053	L	0	0,724	2,4	174,1	69,9
6	1,035	LR	0	1,389	2,5	174,9	44,1
7	0,997	L	0	1,275	1,8	174,4	30,8
8	0,899	L	0	4,871	5,0	177,2	3,2
9	1,000	L	0	1,787	3,2	176,1	44,2
10	1,040	L	0	1,991	3,3	176,4	39,4
11	1,039	P	0	0,000	3,6	175,0	-
12	1,041	P	0	0,000	3,3	174,6	-
13	1,092	L	0	2,704	5,5	173,8	51,3
14	1,048	L	0	1,979	4,4	173,2	54,9
15	0,999	L	0	3,234	5,2	170,4	37,8
16	1,019	L	0	1,020	4,4	171,1	76,8
17	1,006	P	0	0,000	4,1	167,9	-
18	0,999	L	0	3,399	5,3	167,0	36,2
19	1,042	L	0	1,847	4,3	170,4	57,0
20	1,073	L	0	1,306	4,0	169,0	67,6
21	0,999	P	0	0,000	4,2	166,8	-
22	0,999	P	0	0,000	3,9	160,1	-
23	1,093	P	0	0,000	3,9	167,7	-
24	0,983	P	0	0,000	2,9	170,5	-
E _{G1}	1,266	G	1	2,160	-1,6	-121,2	-173,4
E _{G2}	1,236	G	1	2,039	-1,7	-114,3	-183,9
E _{G7}	1,407	G	1	4,360	2,2	-45,3	-49,6
E _{G13}	1,593	G	2	13,225	13,2	0,0	0,0
E _{G14}	1,373	Q	1	2,230	-2,2	-154,0	-197,5
E _{G15}	1,057	G	1	1,959	-2,3	-58,4	-215,4
E _{G16}	1,060	G	1	1,364	-2,5	-76,3	-285,4
E _{G18}	1,236	G	1	4,333	-1,5	-58,7	-133,7
E _{G21}	1,080	G	1	3,230	-2,2	-59,8	-167,0
E _{G22}	0,962	G	1	1,350	-1,3	-62,7	-193,5
E _{G23}	1,996	G	1	12,405	-8,7	-105,9	-170,1

Os valores de β com sinal negativo, para as barras internas das máquinas, indicam que a relação de sensibilidade entre a tensão interna e a potência reativa gerada é oposta à usual, ou seja, a solução de tensão para estas barras encontra-

se na parte inferior da curva SV. Entretanto, o objetivo desta aplicação é, a partir do ponto de operação inicial, obter um novo ponto de operação de forma a ampliar a margem de potência da barra de carga de número 8, conforme indicado em [27]. Esta barra é a que possui menor margem, 3,2%, e, dentre as barras de carga, é a que apresenta ângulo com valor mais elevado $\beta = 177,2^\circ$ (o valor máximo é 180°). Eventuais aumentos de carga nessa barra certamente a conduziriam para a região inferior da curva SV. Portanto, sua margem deve ser aumentada.

A matriz de sensibilidade dos controles de tensão, calculada para o primeiro ponto de operação, é apresentada em (5.6).

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_7 \\ \Delta V_{13} \\ \Delta V_{14} \\ \Delta V_{15} \\ \Delta V_{16} \\ \Delta V_{18} \\ \Delta V_{21} \\ \Delta V_{22} \\ \Delta V_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,161 & 2,136 & 2,663 & 5,434 & 1,946 & 1,839 & 1,846 & 1,945 & 1,901 & 1,444 & 2,876 \\ 2,133 & 2,174 & 2,669 & 5,444 & 1,949 & 1,840 & 1,848 & 1,947 & 1,903 & 1,445 & 2,880 \\ 2,732 & 2,741 & 4,322 & 7,621 & 2,725 & 2,563 & 2,578 & 2,714 & 2,653 & 2,015 & 4,028 \\ 2,497 & 2,506 & 3,422 & 7,341 & 2,552 & 2,400 & 2,419 & 2,545 & 2,486 & 1,889 & 3,809 \\ 1,975 & 1,982 & 2,701 & 5,637 & 2,142 & 1,943 & 1,965 & 2,063 & 2,014 & 1,531 & 3,003 \\ 1,685 & 1,689 & 2,294 & 4,785 & 1,755 & 1,763 & 1,721 & 1,839 & 1,806 & 1,366 & 2,582 \\ 1,762 & 1,766 & 2,403 & 5,024 & 1,848 & 1,792 & 1,819 & 1,906 & 1,860 & 1,414 & 2,717 \\ 1,543 & 1,547 & 2,102 & 4,390 & 1,613 & 1,592 & 1,584 & 1,785 & 1,709 & 1,295 & 2,371 \\ 1,528 & 1,532 & 2,081 & 4,345 & 1,595 & 1,584 & 1,566 & 1,731 & 1,719 & 1,288 & 2,346 \\ 1,312 & 1,316 & 1,789 & 3,734 & 1,372 & 1,355 & 1,347 & 1,485 & 1,457 & 1,285 & 2,017 \\ 2,336 & 2,343 & 3,195 & 6,733 & 2,403 & 2,288 & 2,311 & 2,428 & 2,371 & 1,802 & 3,723 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta E_{G1} \\ \Delta E_{G2} \\ \Delta E_{G7} \\ \Delta E_{G13} \\ \Delta E_{G14} \\ \Delta E_{G15} \\ \Delta E_{G16} \\ \Delta E_{G18} \\ \Delta E_{G21} \\ \Delta E_{G22} \\ \Delta E_{G23} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Na segunda coluna da Tabela 5.5, apresenta-se os valores do módulo da tensão terminal das máquinas para o ponto de operação original. Na terceira coluna estão os valores correspondentes para o ponto de operação desejado calculados pelo programa FLUPOT. O vetor ΔV representa a diferença de tensão entre os valores desejados e os valores do ponto de operação inicial.

Tabela 5.5 – Perfil de Tensão do Sistema-Teste IEEE-24 Barras Antes e Após Reforço

Barra N ^o	V (pu)		ΔV (pu)	ΔE_G (pu)	
	Inicial	Objetivo		F. Carga	Calculado
1	1,089	1,100	0,011	0,0030	0,0030
2	1,089	1,100	0,011	-0,0010	-0,0005
7	0,997	1,050	0,053	0,0680	0,0645
13	1,092	1,100	0,008	0,0020	-0,0010
14	1,048	1,050	0,002	-0,0320	-0,0276
15	0,999	1,000	0,001	-0,0120	-0,0128
16	1,019	1,020	0,001	0,0000	-0,0084
18	0,999	1,000	0,001	0,0000	0,0003
21	0,999	1,000	0,001	0,0000	0,0004
22	0,999	1,000	0,001	0,0000	0,0009
23	1,093	1,095	0,002	-0,0260	-0,0245

A diferença existente entre os valores de ΔE_G , obtidos após a convergência do programa de fluxo de carga, e os obtidos através da matriz de sensibilidade dos controles de tensão, barras 13 e 16, ocorre em consequência da transição de região de operação descrita na Seção 5.2. Portanto, fica evidenciada a necessidade de se efetuar menores variações no valor do módulo das tensões internas dos geradores e, conseqüentemente, deve-se também reduzir as variações no valor das tensões especificadas. Assim, o novo perfil de tensão deve ser alcançado em duas ou mais etapas. Os resultados da aplicação deste procedimento são mostrados na Tabela 5.6. Os subscritos 1 e 2 de ΔC e ΔV , correspondem a primeira e segunda variação nos valores do controle e da tensão, respectivamente.

Tabela 5.6 – Sistema-Teste IEEE 24 Barras / Ajuste em ΔC Passo a Passo

<i>Bar</i>	ΔV_1		ΔC_1		ΔV_2		ΔC_2	
	<i>N^o</i>	<i>F. Carga</i>	<i>F. Carga</i>	<i>Calculado</i>	<i>F. Carga</i>	<i>F. Carga</i>	<i>Calculado</i>	
1	0,0060	-0,0010	-0,0004	0,0050	0,0040	0,0035		
2	0,0060	-0,0030	-0,0022	0,0050	0,0020	0,0019		
7	0,0260	0,0290	0,0282	0,0270	0,0390	0,0381		
13	0,0080	0,0110	0,0094	0,0000	-0,0100	-0,0102		
14	0,0020	-0,0220	-0,0167	0,0000	-0,0100	-0,0106		
15	0,0010	-0,0060	-0,0073	0,0000	-0,0060	-0,0054		
16	0,0010	0,0000	-0,0083	0,0000	0,0000	-0,0001		
18	0,0010	0,0000	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000		
21	0,0010	0,0000	0,0005	0,0000	0,0000	-0,0000		
22	0,0010	0,0000	0,0009	0,0000	0,0000	0,0000		
23	0,0020	-0,0210	-0,0197	0,0000	-0,0050	-0,0047		

A matriz de sensibilidade dos controles de tensão, calculada para o ponto de operação após o primeiro ajuste e, portanto, utilizada para a determinação do segundo ajuste nas variáveis de controle de tensão, é dada em (5.7).

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_7 \\ \Delta V_{13} \\ \Delta V_{14} \\ \Delta V_{15} \\ \Delta V_{16} \\ \Delta V_{18} \\ \Delta V_{21} \\ \Delta V_{22} \\ \Delta V_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,237 & 1,209 & 1,316 & 2,803 & 1,018 & 0,965 & 0,966 & 1,019 & 0,996 & 0,756 & 1,515 \\ 1,207 & 1,245 & 1,319 & 2,808 & 1,019 & 0,965 & 0,967 & 1,019 & 0,996 & 0,756 & 1,517 \\ 1,382 & 1,387 & 2,344 & 3,785 & 1,370 & 1,288 & 1,295 & 1,362 & 1,331 & 1,011 & 2,041 \\ 1,296 & 1,300 & 1,671 & 3,915 & 1,344 & 1,264 & 1,276 & 1,339 & 1,308 & 0,994 & 2,040 \\ 1,032 & 1,035 & 1,326 & 2,950 & 1,195 & 1,052 & 1,067 & 1,117 & 1,090 & 0,829 & 1,615 \\ 0,884 & 0,885 & 1,126 & 2,502 & 0,950 & 1,006 & 0,959 & 1,035 & 1,021 & 0,770 & 1,403 \\ 0,922 & 0,924 & 1,179 & 2,632 & 1,004 & 0,998 & 1,020 & 1,064 & 1,037 & 0,789 & 1,482 \\ 0,808 & 0,810 & 1,032 & 2,297 & 0,874 & 0,897 & 0,885 & 1,048 & 0,988 & 0,748 & 1,290 \\ 0,800 & 0,802 & 1,021 & 2,273 & 0,864 & 0,896 & 0,874 & 1,002 & 1,006 & 0,747 & 1,276 \\ 0,687 & 0,689 & 0,878 & 1,954 & 0,744 & 0,764 & 0,753 & 0,858 & 0,845 & 0,820 & 1,098 \\ 1,220 & 1,223 & 1,568 & 3,553 & 1,281 & 1,232 & 1,249 & 1,308 & 1,277 & 0,971 & 2,083 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta E_{G1} \\ \Delta E_{G2} \\ \Delta E_{G7} \\ \Delta E_{G13} \\ \Delta E_{G14} \\ \Delta E_{G15} \\ \Delta E_{G16} \\ \Delta E_{G18} \\ \Delta E_{G21} \\ \Delta E_{G22} \\ \Delta E_{G23} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

A comparação entre os resultados fornecidos pelo programa de fluxo de carga e pelo programa AdeConT, mostra que a matriz de [VCS] pode ser utilizada com eficácia para a adequação das ações de controle de tensão, mesmo quando a rede em questão apresenta problemas de estabilidade de tensão.

Os resultados da avaliação das condições de segurança de tensão, feita pelo programa EstabTen, para o ponto de operação obtido após mudança no perfil de tensão, são mostrados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Relatório de Segurança de Tensão para o Sistema-Teste IEEE-24 Barras no Ponto de Operação Obtido Após Mudança no Perfil de Tensão

<i>Bar nº</i>	<i>V (pu)</i>	<i>Equip.</i>	<i>Tipo</i>	<i>S_i (pu)</i>	<i>S_m (pu)</i>	<i>β (graus)</i>	<i>M (%)</i>
1	1,100	L	0	1,102	4,7	166,5	76,4
2	1,100	L	0	0,990	4,6	166,4	78,6
3	0,997	L	0	1,838	4,1	166,8	54,9
4	1,036	L	0	0,755	3,3	165,6	77,2
5	1,066	L	0	0,724	3,6	166,7	79,8
6	1,051	LR	0	1,389	3,5	168,4	59,9
7	1,050	L	0	1,275	2,6	166,4	50,4
8	0,942	L	0	4,871	5,3	173,0	8,4
9	1,015	L	0	1,787	4,5	171,2	60,5
10	1,057	L	0	1,991	4,5	171,7	56,2
11	1,048	P	0	0,000	5,5	169,0	-
12	1,052	P	0	0,000	5,1	168,2	-
13	1,100	L	0	2,704	7,8	167,0	65,5
14	1,050	L	0	1,979	6,2	165,4	67,9
15	1,000	L	0	3,234	6,8	160,2	52,6
16	1,020	L	0	1,020	6,4	161,7	84,1
17	1,007	P	0	0,000	6,0	155,7	-
18	1,000	L	0	3,399	6,9	154,1	50,5
19	1,044	L	0	1,847	6,0	160,3	69,4
20	1,074	L	0	1,306	5,8	157,8	77,5
21	1,000	P	0	0,000	6,1	153,7	-
22	1,000	P	0	0,000	5,5	142,3	-
23	1,095	P	0	0,000	5,7	155,4	-
24	0,988	P	0	0,000	4,2	160,0	-
E _{G1}	1,269	G	1	2,128	2,2	177,0	3,7
E _{G2}	1,235	G	1	2,000	2,0	-179,5	-0,6
E _{G7}	1,475	G	1	4,519	3,7	-97,0	-17,7
E _{G13}	1,595	G	2	13,115	13,1	0,0	0,0
E _{G14}	1,341	Q	1	1,950	2,7	168,9	28,8
E _{G15}	1,045	G	1	1,937	2,1	109,8	9,5
E _{G16}	1,060	G	1	1,351	1,9	149,8	27,3
E _{G18}	1,236	G	1	4,327	4,2	-14,2	-4,0
E _{G21}	1,080	G	1	3,227	2,9	-26,3	-9,7
E _{G22}	0,962	G	1	1,350	1,8	72,6	26,8
E _{G23}	1,970	G	1	12,146	8,9	-65,7	-26,7

Os resultados, apresentados na Tabela 5.7, mostram que houve um acréscimo da margem de potência da barra 8 de 3,2 para 8,4%, o que representa um aumento de 162,5%. O ângulo β foi reduzido para 173,0°, o que significa dizer que houve afastamento dessa barra da região de máximo carregamento.

Um outro exercício numérico tem origem na observação das novas tensões de referência calculadas pelo programa FLUPOT, já mostradas na terceira coluna da Tabela 5.5. As barras com tensão controlada por gerador que tiveram sua tensão de referência mais modificada foram: 1, 2, 7 e 13. Observam-se variações pequenas de tensão nas demais barras, 14 a 23. Provavelmente, foram determinadas pelo programa em função da mudança do fluxo de potência nas linhas de transmissão do sistema. Nesse novo ponto de operação também há variação no valor dos ângulos da tensão E_{Gi} , proporcionando maior / menor geração de potência reativa. A idéia do exercício é ignorar o controle de tensão das barras para as quais não é necessário realizar variações substanciais na tensão de referência, e comparar os resultados obtidos com aqueles onde todos os controles são considerados.

A matriz $[VCS]$ de (5.8) é uma submatriz da matriz de (5.6), calculada para se determinar o primeiro ajuste de tensão. Os seus elementos representam os índices correspondentes aos geradores ligados às barras 1, 2, 7 e 13 respectivamente, que são as barras com tensão controlada com maior variação na tensão de referência, como determinado pelo programa FLUPOT e já observado na Tabela 5.5.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_7 \\ \Delta V_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,1609 & 2,1362 & 2,6635 & 5,4342 \\ 2,1330 & 2,1742 & 2,6687 & 5,4437 \\ 2,7316 & 2,7413 & 4,3221 & 7,6213 \\ 2,4974 & 2,5056 & 3,4224 & 7,3410 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta E_{G1} \\ \Delta E_{G2} \\ \Delta E_{G7} \\ \Delta E_{G13} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Observa-se que os valores dos elementos da última coluna são os maiores da matriz. Isto ocorre porque esses valores são correspondentes à barra de referência, que absorve toda a demanda de potência ativa adicional do sistema. Portanto, qualquer variação no módulo da tensão interna desta barra, implicará em significativas variações de tensão nas demais barras do sistema.

Os valores dos elementos das duas primeiras colunas de (5.8) são bastante próximos – característica também presente em (5.6) e (5.7) –, o que sugere que exista uma redundância das ações de controle provocada provavelmente pela proximidade física entre as duas barras. A matriz dos fatores de participação foi determinada com o intuito de investigar essa suspeita. Os resultados são apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Autovalores e FPs para a Matriz $[VCS]$ de (5.8)

Bar/Tipo	Autovalores (λ_i)*	FP_1	FP_2	FP_3	FP_4
E_{G1}	$\lambda_1 = 15,0472$	0,1325	0,5035	0,0617	0,3022
E_{G2}	$\lambda_2 = \mathbf{0,0330}$	0,1333	0,4965	0,0621	0,3081
E_{G7}	$\lambda_3 = 0,5301$	0,2612	0,0000	0,7366	0,0022
E_{G13}	$\lambda_4 = 0,3880$	0,4730	0,0000	0,1395	0,3875

*det $[VCS] = 0,1020$

A análise dos resultados apresentados na Tabela 5.8 mostra que há participação praticamente idêntica dos dois primeiros geradores em todos os modos, onde a mais significativa ocorre para o menor autovalor λ_2 .

Os resultados da análise modal considerando a atuação de todos os 11 geradores, ou seja, calculados para a matriz de $[VCS]$ dada em (5.6), são apresentados na Tabela 5.9, onde também são mostrados os fatores de participação determinados para os dois menores autovalores.

Tabela 5.9 – Resultados da Análise Modal Aplicada à Matriz $[VCS]$ de (5.6)

Bar/Tipo	Autovalores (λ_i)*	FP_8	ϕ_8	FP_9	ϕ_9
E_{G1}	$\lambda_1 = 28,0707$	0,0001	0,0130	0,5033	0,7098
E_{G2}	$\lambda_2 = 0,7161$	0,0000	-0,0039	0,4942	-0,7030
E_{G7}	$\lambda_3 = 0,4778$	0,0000	0,0023	0,0000	0,0005
E_{G13}	$\lambda_4 = 0,3902$	0,0001	0,0065	0,0000	0,0007
E_{G14}	$\lambda_5 = 0,1684$	0,0078	-0,0942	0,0000	-0,0035
E_{G15}	$\lambda_6 = 0,1399$	0,2448	-0,5062	0,0002	-0,0146
E_{G16}	$\lambda_7 = 0,1163$	0,3025	0,5725	0,0003	0,0165
E_{G18}	$\lambda_8 = 0,0252$	0,1656	-0,3876	0,0008	0,0243
E_{G21}	$\lambda_9 = \mathbf{0,0329}$	0,2747	0,5025	0,0011	-0,0289
E_{G22}	$\lambda_{10} = 0,0342$	0,0015	-0,0389	0,0000	0,0018
E_{G23}	$\lambda_{11} = 0,0627$	0,0030	-0,0519	0,0000	-0,0019

*det $[VCS] = 1,8272E-08$

A análise modal apresentada na Tabela 5.9 mostra que o fator de participação calculado para o menor autovalor λ_8 , indica que a maior participação para este modo é do gerador ligado à barra 16, também com significativa participação dos geradores ligados às barras 15, 18 e 21, como é mostrado nas Figuras 5.5 e 5.6.

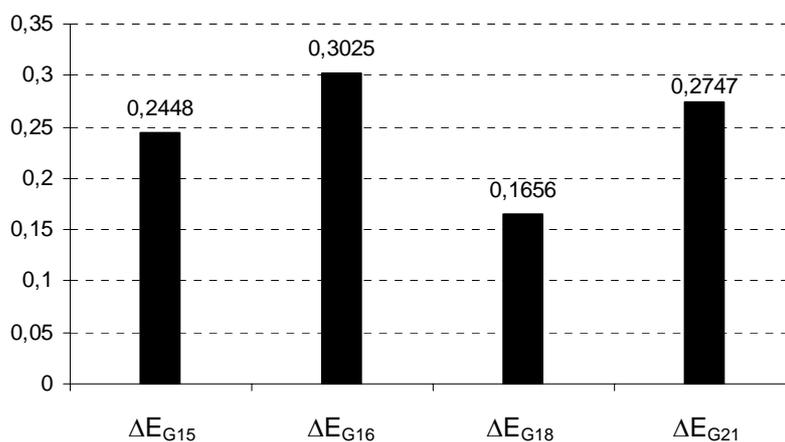


Figura 5.5 – Fator de Participação Calculado para o Autovalor λ_8 da Matriz de [VCS] Dada em (5.6)

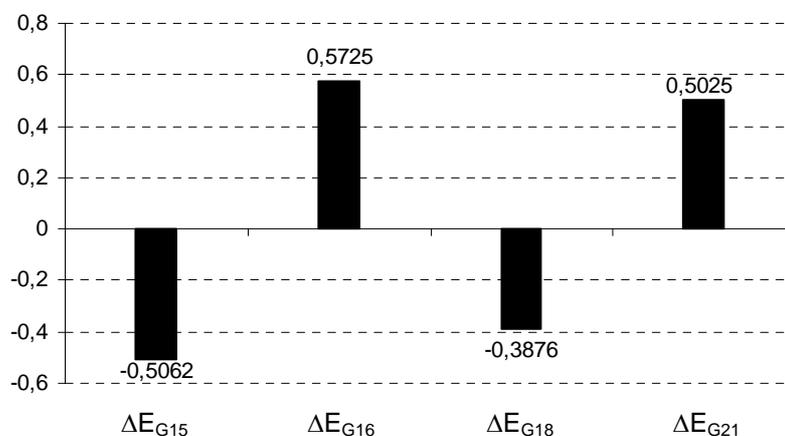


Figura 5.6 – *Mode-Shape* do Autovalor λ_8 da Matriz de [VCS] Dada em (5.6)

O resultado da análise do autovetor à direita, calculado para o autovalor λ_8 da matriz de [VCS] dada em (5.6), mostra que as variáveis de estado associadas aos geradores 15 e 18 têm comportamento contrário ao do gerador 16, quando o modo em questão é perturbado. Um aumento de E_{G16} será acompanhado de redução de E_{G15} e E_{G18} , e aumento de E_{G21} . Este aumento deve ocorrer em função do decréscimo da tensão de excitação das barras 15 e 18, uma vez que todos os elementos da matriz [VCS] de (5.6) são positivos.

O fator de participação FP_9 , calculado para o autovalor λ_9 , apresenta a redundância entre os geradores conectados às barras 1 e 2, apontada anteriormente, conforme se pode observar nas Figuras 5.7 e 5.8.

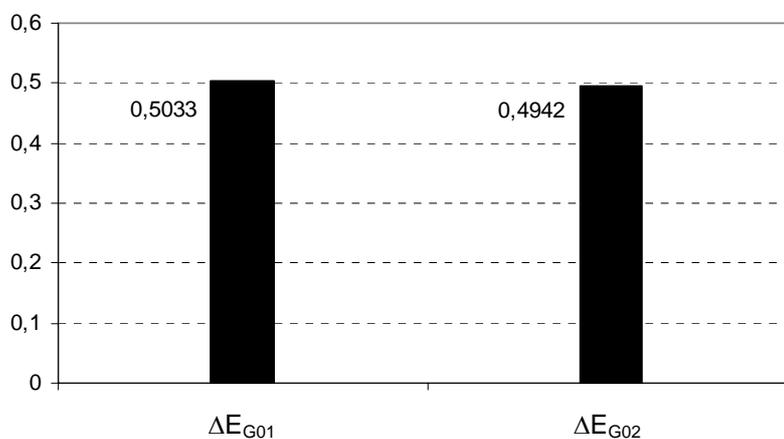


Figura 5.7 – Fator de Participação Calculado para o Autovalor λ_9 da Matriz de [VCS] Dada em (5.6)

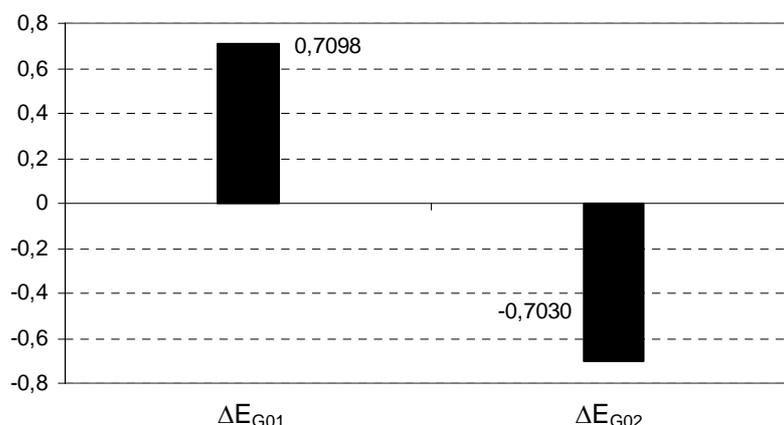


Figura 5.8 – *Mode-Shape* do Autovalor λ_9 da Matriz de [VCS] Dada em (5.6)

A comparação entre os resultados da análise realizada com todos os geradores e só com aqueles com expressiva variação na tensão de referência mostra diferenças muito importantes. Logo, o critério baseado em eliminar de [VCS] as linhas e colunas referentes às barras cuja variação de tensão de referência seja “pequena” pode não ser adequado. A barra 16, por exemplo, não foi relacionada entre os resultados apresentados na Tabela 5.8, já que não foi representada na matriz de (5.8). Entretanto, quando incluída na avaliação em (5.6) e (5.7), apareceu nos resultados da Tabela 5.9. Observa-se também a importância dessa

barra nos resultados apresentados na Tabela 5.5: para ela ocorreu a maior diferença ΔE_G quando calculado pelo algoritmo de fluxo de carga e por [VCS]. Portanto, o ajuste da variação de ΔV para as barras pertencentes ao pior modo, deve ser monitorado com maior cautela, não importando o quão pequena seja esta variação.

Outra justificativa para se manter as barras cuja variação da tensão de referência é nula no sistema de equações de [VCS], é saber como ocorrerá a variação da tensão de excitação da máquina para manter esta tensão no valor especificado, quando há variação de fluxo de potência nos ramos do sistema em análise.

5.5 Conclusões

Foi apresentada uma metodologia que permite chegar a um novo perfil de tensão através do ajuste correto das grandezas controladoras dos equipamentos de controle de tensão. O procedimento detecta corretamente a região de operação em que se encontram as barras com tensão controlada. O sinal da relação de sensibilidade entre a grandeza controladora e a tensão controlada, foi definido corretamente. Portanto, o método é capaz de identificar a lógica de controle dos equipamentos usados para controlar a tensão para um determinado ponto de operação, isto é, sentido usual ou reverso.

O valor das grandezas controladoras da tensão para se chegar a um novo perfil de tensão determinado pelo programa FLUPOT, é definido pela matriz de sensibilidade dos controles de tensão [VCS].

A análise modal foi novamente utilizada para complementar a análise dos resultados obtidos da aplicação da metodologia proposta neste capítulo.