

3 Características em Regime Permanente dos Dispositivos de Controle de Tensão

3.1 Descrição e Importância do Problema

A avaliação do carregamento da rede de transmissão contempla dois aspectos distintos: a distância do ponto de operação em análise ao máximo e a região de operação. Neste capítulo é tratado o segundo aspecto.

O índice angular β indica a região de operação na curva $V \times P, Q$: positivo (entre 0° e 180°) na parte superior, e negativo (entre 0° e -180°) na parte inferior da curva. Portanto, tem o mesmo significado do sinal do determinante da matriz $[D']$.

A matriz $[D']$ de dimensão (2×2) relaciona (linearmente) as potências ativa e reativa injetadas com o ângulo e o módulo da tensão na barra i . Na parte superior da curva $V \times P, Q$ um incremento (infinitesimal) de carga implica em diminuição do ângulo da tensão e diminuição do módulo da tensão. Isso é normal: um aumento de carga implica em aumento da defasagem angular entre a barra i e uma barra de referência, assim como implica em um aumento da queda de tensão entre a barra i e uma barra de tensão controlada. Entretanto, na parte inferior da curva, um incremento de carga implica em diminuição do ângulo da tensão e em um acréscimo no valor do módulo da tensão.

Quando a barra i tem a ela conectada um compensador de potência reativa somente, e portanto não há variações de potência ativa, a matriz $[D']$ agora com dimensão (1×1) , relaciona a potência reativa injetada com o módulo da tensão na barra i . Na parte superior da curva $V \times Q$ um incremento da potência reativa gerada implica em acréscimo do módulo da tensão. Na parte inferior da curva, há um decréscimo do módulo da tensão. Embora a primeira situação seja normal (Q_g e V crescem), ela não garante que o controle de tensão funcione de forma adequada nesta barra (a seguir um exemplo numérico). Da mesma forma, embora a segunda situação não seja normal (Q_g cresce e V decresce), ela não garante que o controle de tensão funcione de forma inversa.

3.1.1 Exemplo Numérico

Este exemplo mostra um caso onde Q_g e V crescem, mas o controle de tensão não funciona de forma adequada nesta barra. Utiliza-se o sistema N/NE com carga pesada de junho de 1992. A barra 450 tem sua tensão controlada por SVC.

A Tabela 3.1 mostra, para vários valores de tensão controlada, a admitância do SVC necessária para manter a tensão especificada, a correspondente potência reativa gerada, e o índice $\det [D'] * V$.

Tabela 3.1 – Módulo da Tensão Controlada, Potência Reativa Gerada, Admitância do SVC e Índice $\det [D'] * V$

V	Q_g	Y_c	$\det[D'] * V$
0,89	1,717	2,168	-19,50
0,90	1,649	2,036	-18,00
0,91	1,588	1,918	-16,60
0,92	1,535	1,814	-15,30
0,93	1,489	1,722	-14,00
0,94	1,448	1,639	-12,80
0,95	1,413	1,566	-11,60
0,96	1,382	1,500	-10,40
0,97	1,355	1,440	-9,20
0,98	1,332	1,387	-8,10
0,99	1,313	1,340	-6,90
1,00	1,299	1,299	-5,70
1,01	1,286	1,261	-4,50
1,02	1,276	1,226	-3,40
1,03	1,270	1,197	-2,20
1,04	1,267	1,171	-1,00
1,05	1,267	1,149	0,20
1,06	1,268	1,129	1,50
1,07	1,272	1,111	2,70
1,08	1,279	1,097	4,00

Na Tabela 3.1 e na Figura 3.1.a observa-se que o determinante de $[D']$ é nulo quando o valor da potência reativa gerada é mínimo, ao redor de 126,7 MVar (tensão entre 1,04 e 1,05 pu). Por este resultado poderia se supor que todos os pontos de operação da curva $Q_g \times V$, mostrada na Figura 3.1.b, à direita de Q_g mínimo apresentariam controle de tensão normal. Entretanto, neste exemplo, $\det [D'] > 0$ não implica em controle adequado de tensão. De fato, observando-se na Tabela 3.1 e na Figura 3.1.c os valores da admitância do SVC, nota-se que seria necessário diminuir-se a admitância shunt para que a tensão aumentasse (mesmo nos pontos de operação considerados normais, à direita de Q_g mínimo quando $\det [D'] > 0$). Isso é oposto ao usual.

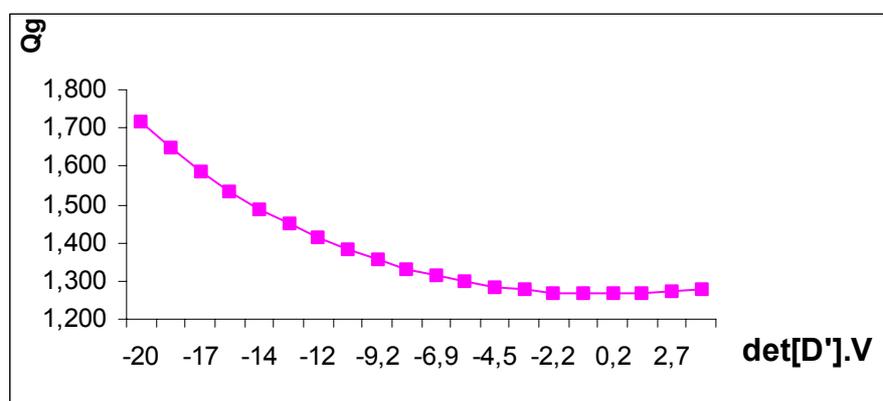


Figura 3.1.a – Potência Reativa Gerada x Índice $\det [D'] \cdot V$

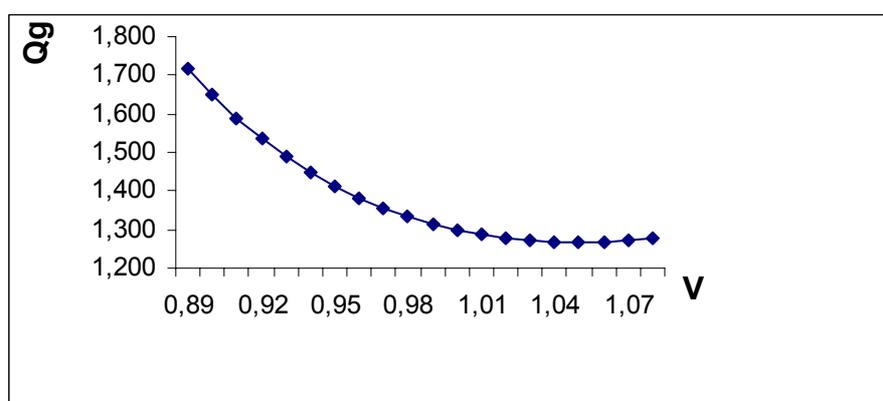


Figura 3.1.b – Potência Reativa Gerada x Tensão Controlada

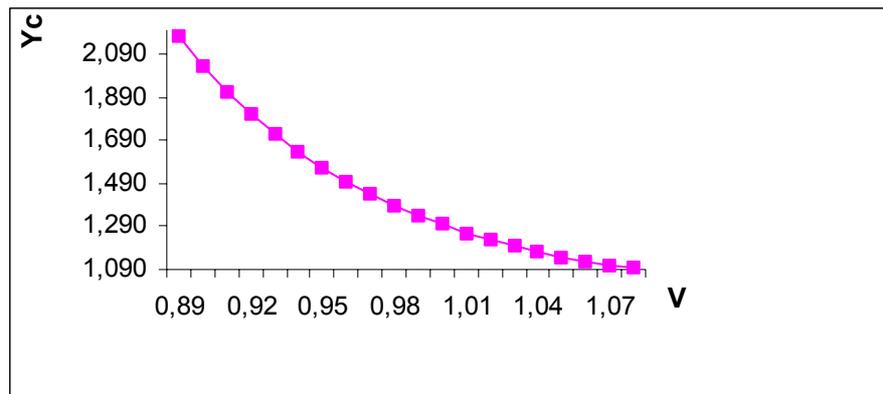


Figura 3.1.c – Admitância do SVC x Tensão Controlada

O exemplo numérico anterior mostrou um caso onde o ponto de operação está à direita do mínimo Q_g (o que é normal) na curva $Q_g \times V$ e a sensibilidade entre a tensão terminal e a admitância do SVC é oposta a desejada. Existem casos onde o ponto de operação está à esquerda do mínimo Q_g (o que é anormal) e a sensibilidade entre Y_c e V é a usual. O índice $\det [D'] \cdot V$ não é capaz de detectar tais fatos. Não é propriamente uma limitação do índice já que, como explicado, não relaciona a admitância do SVC e sua tensão controlada.

O mesmo tipo de exercício numérico pode ser feito com outros tipos de equipamentos além do SVC: geradores e compensadores síncronos, capacitores e reatores e LTCs.

3.2 Variáveis a Serem Consideradas no Controle de Tensão

O interesse então é avaliar o efeito em regime permanente de ações de controle. Para tal deve-se conhecer as características em regime permanente dos dispositivos de controle de tensão. Na verdade, o interesse é puramente qualitativo: deseja-se determinar se a ação de controle produz o efeito esperado ou contrário. Não há interesse quantitativo: bandas mortas, ganhos e constantes de tempo dos dispositivos de controle não tem influência no tipo de avaliação proposto.

Um SVC, em última análise, é uma admitância variável. Portanto, deve-se determinar se um acréscimo de admitância capacitiva aumenta a tensão terminal conforme desejado.

Mais uma vez, essa sensibilidade deve ser determinada de forma que todas as equações do problema e estratégias de controle sejam atendidas.

O modelo de gerador e compensadores síncronos em regime permanente é uma tensão interna atrás da reatância síncrona. Deve-se determinar se um acréscimo na tensão interna produz acréscimo na tensão terminal.

No caso de LTCs, deve-se avaliar se a troca de taps produz o efeito desejado na tensão da barra sob controle. O modelo de LTC nos programas ANAREDE e ESTABTEN (programa de avaliação das condições de estabilidade de tensão, acoplado ao ANAREDE) apresenta taps no primário do transformador. Se a tensão controlada for no secundário, uma diminuição no valor do tap deve produzir um acréscimo no valor de tensão.

Capacitores e reatores são admitâncias variáveis. Deve-se determinar o efeito do chaveamento, isto é, da variação da admitância na tensão da barra à qual estes equipamentos estão conectados.

Como mencionado na Seção 3.1 deste capítulo, inicia-se agora uma nova etapa a partir dos resultados desta seção: desenvolvimento de ferramenta computacional para simular as ações de controle e seus efeitos em regime permanente na correção do perfil de tensão.

Para deixar explícita a necessidade desta ferramenta, são apresentados a seguir exemplos numéricos onde ações de controle produzem o efeito oposto ao esperado em regime permanente. Uma sucessão de ações automáticas de controle de tensão mal sucedidas podem levar o sistema ao colapso por consequência de tensões excessivamente baixas (ou altas).

3.3 Instabilidade do Controle de Tensão: Sistemas Demonstrativos

3.3.1 Gerador

Os geradores síncronos são fontes primárias de potência reativa e são em grande parte responsáveis pela manutenção de um bom perfil de tensão nos sistemas de potência.

Nota-se que em muitos incidentes envolvendo estabilidade de tensão, um ou mais geradores cruciais estavam operando no limite da capacidade de potência reativa.

Um gerador síncrono suprindo potência para uma impedância de carga age como uma fonte de tensão cuja frequência é determinada pela velocidade da máquina primária. A corrente e o fator de potência são então determinados pelo campo de excitação do gerador e impedância do gerador e carga.

Quando um gerador está conectado a um sistema interligado contendo outros geradores síncronos, a tensão e a frequência nos terminais da armadura são substancialmente dependentes do sistema. O gerador controla as tensões em barras do sistema eletricamente próximas, mas não afeta significativamente a tensão em barras afastadas.

Faz-se necessária a verificação do comportamento em regime permanente do gerador como dispositivo de controle já que, se funcionar de forma inversa, poderá levar o sistema ao colapso por problemas de tensão excessivamente baixas.

3.3.1.1 Controle Remoto de Tensão na Barra de Carga

Supõe-se o controle remoto de tensão na barra de carga do sistema de duas barras mostrado na Figura 3.2. Estando a barra de carga operando na Região B, parte inferior da curva $V \times P, Q$, deseja-se saber o efeito da variação da tensão terminal do gerador sobre a tensão da barra de carga.

A Tabela 3.2 fornece o ponto de operação do sistema (completamente fora da faixa normal de operação e usado então, para propósitos de demonstração somente) e a impedância série da linha.

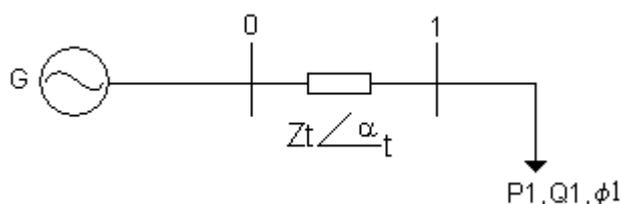


Figura 3.2 – Sistema-Teste de Duas Barras

Tabela 3.2 – Ponto de Operação do Sistema de Duas Barras

V_0	θ_0	V_1	θ_1	Z_t	α_t	P_1	Q_1
1,00	0	0,2781486	-30	0,2	70	-0,9099256	-0,5253458

Legenda:

V_0 - Módulo da tensão na barra 0 em pu

θ_0 - Ângulo da tensão na barra 0 em graus

V_1 - Módulo da tensão na barra 1 em pu

θ_1 - Ângulo da tensão na barra 1 em graus

Z_t - Módulo da impedância da linha entre as barra 0 e 1 em pu

α_t - Ângulo da impedância da linha entre as barra 0 e 1 em graus

P_1 - Carga ativa na barra 1 em pu

Q_1 - Carga reativa na barra 1 em pu

O ângulo do fator de potência da carga (ϕ_1) é constante e igual a 30 graus.

Foi adotado o seguinte procedimento para o estudo:

- i) escolhe-se um ponto cuja tensão na barra de carga encontra-se na região B de operação (mostrado na Tabela 3.2),
- ii) varia-se a tensão V_0 em torno de 1,00 pu,
- iii) determina-se o ponto de operação (V_1, θ_1) para a mesma carga.

A Tabela 3.3 mostra os resultados para variações do módulo da tensão na barra 0 para + / - 0,05 pu e + / - 0,01 pu. Os resultados mostram que, para o caso em que o ponto de operação da barra de carga se encontra na região B, um aumento (diminuição) no módulo da tensão do gerador causa uma diminuição (aumento) do módulo da tensão da barra de carga. Ou seja, a variação do módulo da tensão da barra de carga está na direção oposta à da barra terminal do gerador. Como o controle de tensão é automático, e entra em ação pela comparação da tensão na carga com o valor pré-fixado e desejado, haveria sucessivas atuações do controle de tensão até que, ou se esgota a capacidade de excitação do gerador, ou a tensão na carga fica fora da faixa normal de operação, com as conseqüências usuais, inclusive desligamento ou bloqueio de motores de indução.

Tabela 3.3 – Módulo e Ângulo da Tensão da Barra de Carga para Variações na Tensão Terminal do Gerador

V_0 (pu)	0,950	0,990	1,000	1,010	1,050
V_1 (pu)	0,300	0,275	0,270	0,265	0,248
θ_1 (graus)	-28,287	-29,700	-30,000	-30,283	-31,275

3.3.1.2 Controle Local de Tensão na Barra Terminal do Gerador

A Figura 3.3 mostra os módulos das tensões ao longo de toda a linha de transmissão iniciando no terminal do gerador e terminando na barra de carga.

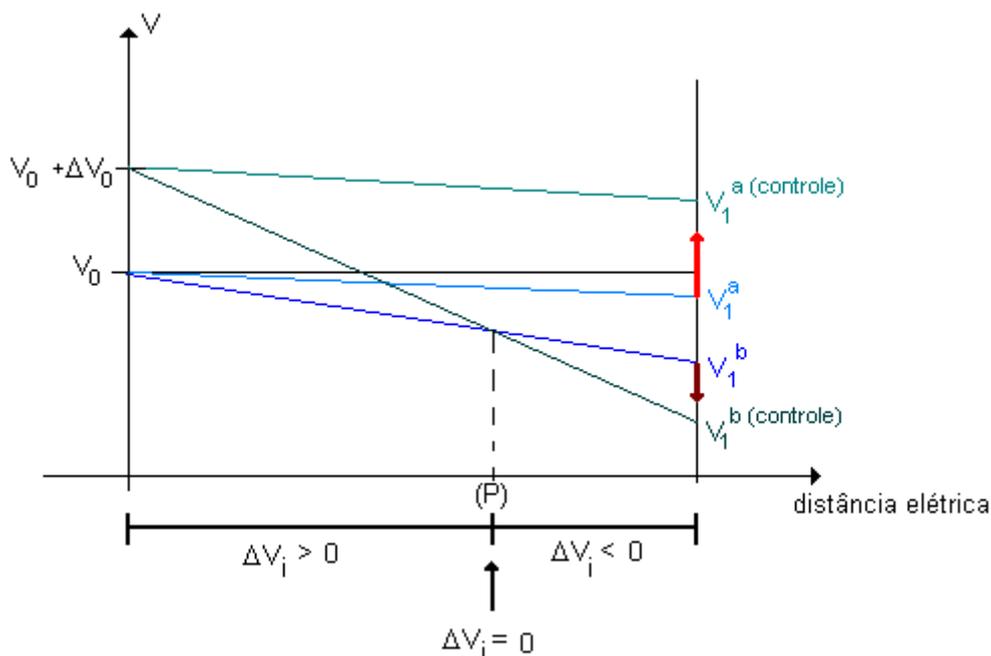


Figura 3.3 - Tensões na Linha de Transmissão

As tensões especificadas na Figura 3.3 são:

V_1^b tensão na barra 1 para um ponto de operação na região B.

V_1^a tensão na barra 1 para um ponto de operação na região A.

$V_1^{b(\text{controle})}$ tensão na barra 1 para um ponto de operação na região B após variação de tensão na barra 0.

$V_1^{a(\text{controle})}$ tensão na barra 1 para um ponto de operação na região A após variação de tensão na barra 0.

Baseado no gráfico da Figura 3.3, quando a barra de carga (barra 1) está na Região B de operação, pode-se dizer que:

i) à esquerda do ponto P, um incremento da tensão na barra 0 tem o efeito de elevar a tensão na barra de carga (barra 1),

- ii) à direita do ponto P, um incremento da tensão na barra 0 causou uma redução da tensão na barra 1,
- iii) no ponto P, um incremento da tensão na barra 0 não teve efeito sobre a tensão na barra 1.

Portanto, os pontos à esquerda de P operam na região A de operação, os pontos à direita de P operam na região B, e logicamente, o ponto P pertence à fronteira entre as duas regiões. De acordo com [Prada, 1992], é possível encontrar-se o valor da tensão crítica em algum ponto da linha de transmissão, e não necessariamente em barras.

Tendo em vista o que foi observado na Figura 3.3 e de acordo com [Prada, 1992], pode-se analisar a linha de transmissão na forma mostrada na Figura 3.4. A impedância total da linha é definida por $Z_t = Z_t' + Z_t''$.

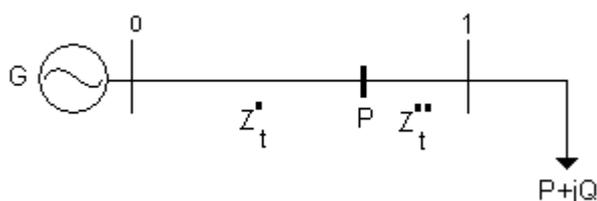


Figura 3.4 – Sistema de Duas Barras com a Linha de Transmissão Dividida em Dois Trechos

Nos programas de fluxo de carga atuais o controle de tensão nos terminais do gerador é feito fixando-se o valor desejado de tensão e calculando-se a potência reativa gerada necessária. O objetivo aqui é compreender a relação entre tensão terminal do gerador e tensão interna de excitação e os efeitos da variação destas tensões sobre a tensão na barra de carga.

Se o gerador for modelado por tensão constante atrás da reatância síncrona, como é adequado em estudos de regime permanente, cria-se um nó fictício e o sistema passa a ter três barras como mostrado na Figura 3.5.

A barra g é a barra interna do gerador atrás de uma reatância (com módulo de 0,04 pu), a barra 0 é a barra terminal do gerador cujo módulo da tensão é constante e igual a 1,00 pu e a barra 1 é a barra de carga com ângulo do fator de potência constante e igual a 30° , para este estudo.

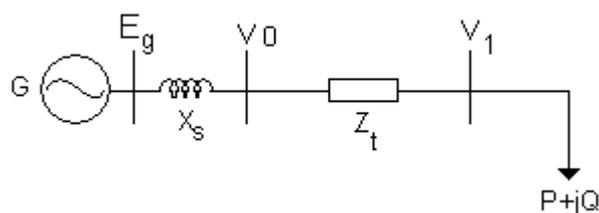


Figura 3.5 – Sistema de 3 Barras

Comparando as Figuras 3.4 e 3.5 conclui-se que elas podem representar o mesmo sistema elétrico se $Z'_t = X_s$ e $Z''_t = Z_t$. O ponto P pode estar à direita ou à esquerda da barra 0.

Portanto, um aumento na tensão interna do gerador E_g pode acarretar numa diminuição da tensão terminal V_0 . Isto dependerá de dois fatores:

- i) carregamento da linha,
- ii) valores relativos da reatância síncrona e da impedância da linha.

Para mostrar numericamente este fato, a Tabela 3.4 mostra o ponto de operação considerado. A impedância $Z'_t = X_s = 0,04 \angle 90^\circ$ e a impedância $Z''_t = Z_t = 0,001 \angle 70^\circ$.

Tabela 3.4 – Ponto de Operação do Sistema

$V_0(\text{pu}) \angle \theta_0(\text{graus})$	$1,000 \angle 0^\circ$
$V_1(\text{pu}) \angle \theta_1(\text{graus})$	$0,979 \angle -1^\circ$
$E_g(\text{pu}) \angle \theta_g(\text{graus})$	$1,816 \angle 30,836^\circ$
P_1	-23,021
Q_1	-13,291

A Figura 3.6 mostra a tensão ao longo da reatância síncrona e da linha de transmissão, começando na barra interna do gerador, passando pela barra terminal e terminando na barra de carga.

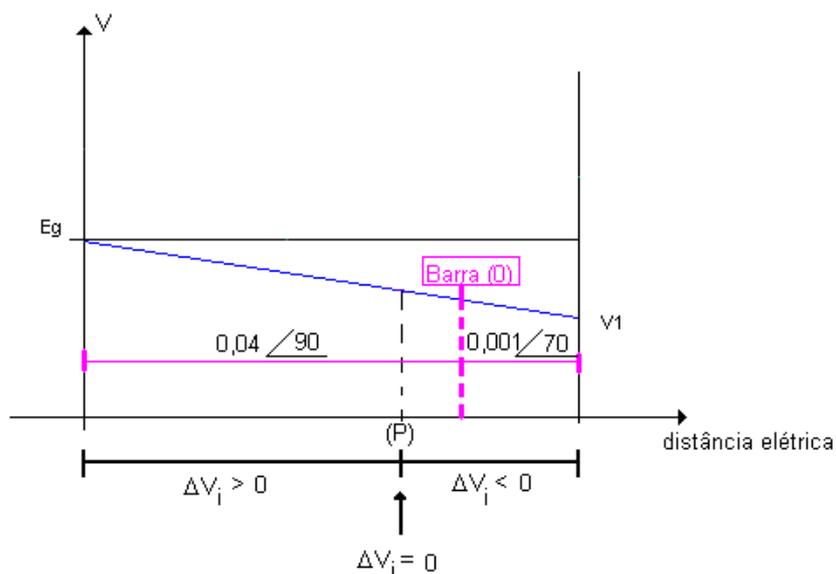


Figura 3.6 – Tensão ao Longo da Rede

É simulada uma ação de controle representada por um decréscimo na tensão interna do gerador, de 1,8160955 para 1,8159375. O original e o novo ponto de operação são apresentados na Tabela 3.5. Nota-se o efeito oposto ao esperado. Quando o módulo da tensão da barra interna do gerador E_g diminui, o módulo da tensão terminal V_0 aumenta, assim como o módulo da tensão na barra de carga V_1 . A Figura 3.7 ilustra o ocorrido: no caso considerado, o ponto P encontra-se à esquerda da barra 0 e portanto, a ação de controle teve efeito oposto ao esperado (na barra 0 e na barra 1).

Tabela 3.5 – Pontos de Operação Antes e Após Decréscimo na Tensão Interna

$E_g = 1,8160955 \text{ pu e } \theta_0 = 0^\circ$		$E_g = 1,8159375 \text{ pu e } \theta_0 = 0^\circ$	
P_1	-23,0209245 pu	P_1	-23,0209245 pu
Q_1	-13,29113695 pu	Q_1	-13,29113695 pu
V_0	1,000 pu	V_0	1,001 pu
θ_g	$30,8368656^\circ$	θ_g	$30,8048996^\circ$
V_1	0,9790487 pu	V_1	0,9899709 pu
θ_1	$-1,000^\circ$	θ_1	$-0,99795888^\circ$

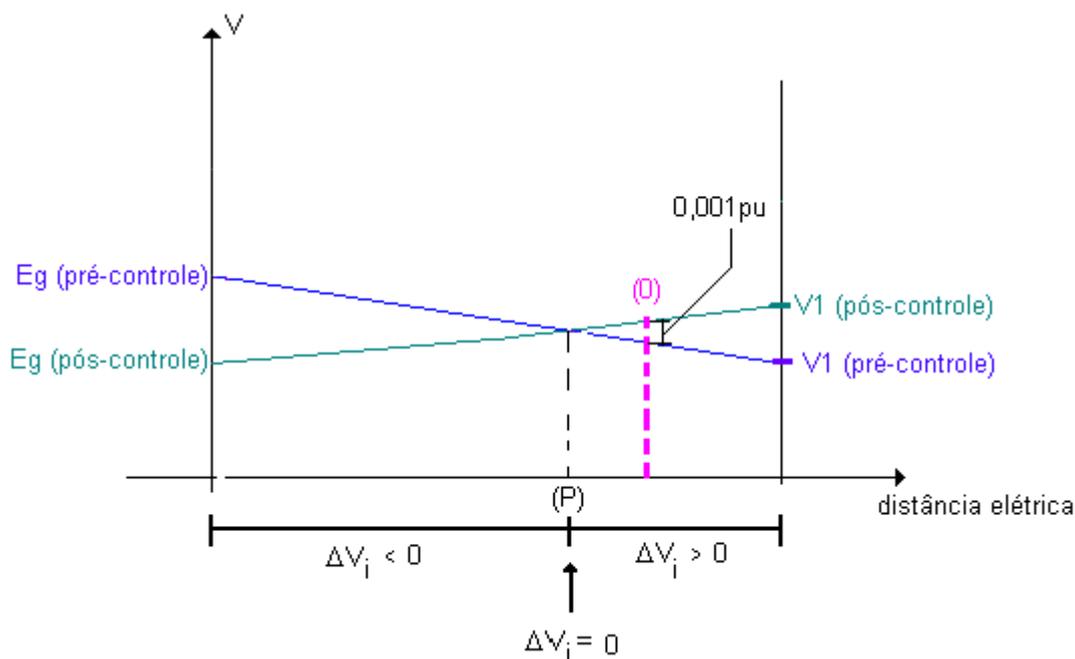


Figura 3.7 – Tensões ao Longo da Rede

3.3.2 LTC

O próximo dispositivo a ser analisado é o transformador de taps variáveis em carga. Em muitos casos reais de problemas de estabilidade de tensão foi dito que o LTC teve um papel importante, pois sua atuação agravou a situação do sistema levando-o ao colapso. Assim como no caso do gerador, deseja-se explorar como uma ação de controle feita pela variação de tap do LTC age sobre o sistema em termos de estabilidade de tensão.

O modelo do LTC utilizado para os testes tem variação de taps no lado primário (barra 0), conforme mostrado em [Prada, 2001].

3.3.2.1 Controle Local de Tensão na Barra do LTC

A Tabela 3.6 mostra os valores do circuito de 2 barras escolhido para o estudo, assim como a carga e a tensão no terminal do gerador. Inicialmente o valor do tap é 1,00 pu e a ação de controle consiste em diminuir o tap para 0,95 pu objetivando o aumento da tensão na barra 1 (secundário).

Tabela 3.6 – Valores do Circuito de 2 Barras, da Carga e da Tensão no Gerador

Z _{tnom}	αt	V ₀	θ_0	P ₁	Q ₁	ϕ
0,20 pu	90°	1,00 pu	0°	1,4000	0,8083	30°

A Tabela 3.7 apresenta os resultados numéricos. Existem dois pontos de operação: a ação de controle tem o efeito desejado para o ponto na Região A e indesejado para o ponto na Região B.

Tabela 3.7 - Tensões na Carga nas Regiões A e B para Dois Valores de Tap

	V ₁ ∠θ ₁	
	tap = 1,0 pu	tap = 0,95 pu
Região A	0,6618∠-25,028	0,7840∠-19,834
Região B	0,4885∠-34,973	0,4124∠-40,165

A curva apresentada na Figura 3.8 ilustra o exemplo numérico. Mostra o lugar geométrico das tensões para carga ativa constante, carga reativa constante e fator de potência constante para dois valores distintos de tap. As tensões especificadas na ordenada do gráfico são respectivamente:

VP(l,1) – tensões para carga ativa constante para tap = 0,95 (...)

VP(l,2) – tensões para carga ativa constante para tap = 1,0 (...)

VQ(l,1) – tensões para carga reativa constante para tap = 0,95 (...)

VQ(l,2) – tensões para carga reativa constante para tap = 1,0 (...)

V ϕ (1) – tensões para fator de potência constante para tap = 0,95 (_)

V ϕ (2) – tensões para fator de potência constante para tap = 1,0 (_)

Existem duas soluções para a tensão em cada um dos valores de tap. Uma das soluções está na Região A de operação e a outra na Região B. Percebe-se pelo gráfico que, para a Região A, a ação de controle teve o efeito esperado de aumentar a tensão na barra 1 enquanto que, para a Região B o efeito oposto é observado.

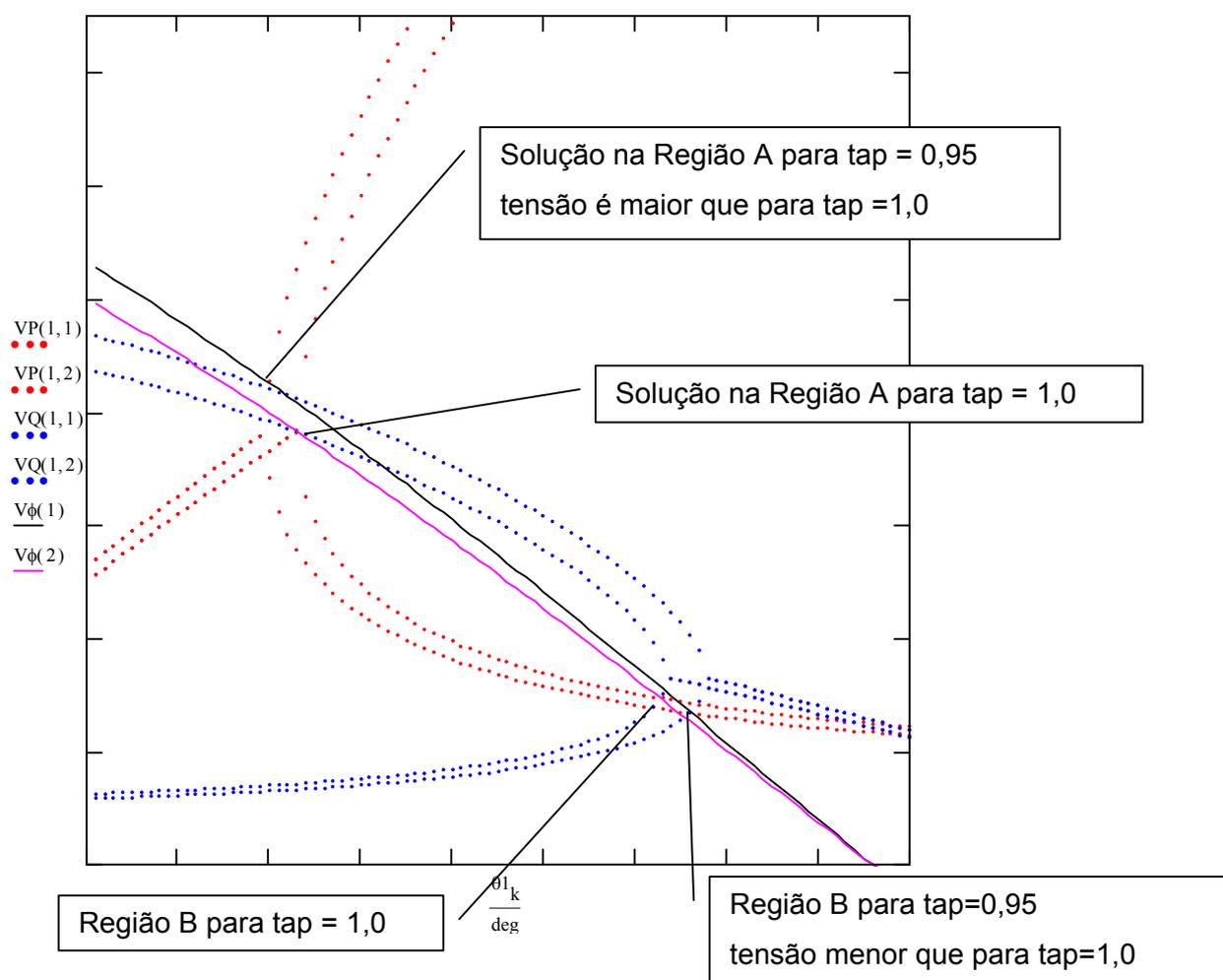


Figura 3.8 – Lugar Geométrico das Tensões para Carga Ativa Constante, Carga Reativa Constante e para Fator de Potência Constante para Taps de 0,95 e 1,0

3.3.2.2 Controle Remoto de Tensão

A análise agora é estendida para um sistema de 3 barras composto pelo gerador, LTC em série com uma linha de transmissão e a carga. A Figura 3.9 mostra o circuito equivalente. O LTC tem variação de taps no primário e a LT é representada por um circuito série.

Deseja-se verificar agora o que acontece com a tensão na barra de carga controlada remotamente pelo LTC.

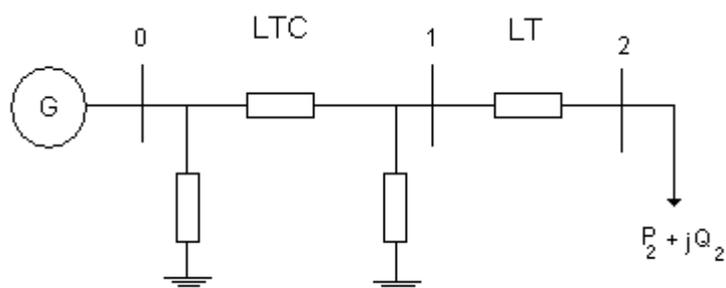


Figura 3.9 – Circuito de 3 Barras com LTC e Linha de Transmissão

A Tabela 3.8 mostra os valores do circuito de 3 barras escolhido para o estudo, assim como a carga e a tensão especificada no gerador. Inicialmente o valor do tap é 1,0 pu e a ação de controle consiste em diminuir o tap para 0,95 pu com o objetivo de aumentar a tensão na barra de carga (barra 2).

Tabela 3.8 – Valores do Circuito de 3 Barras, de Carga e da Tensão no Gerador

Z_{trafo}	α_{trafo}	Z_{12}	α_{12}	V_0	θ_0	P_2	Q_2	ϕ
0,20 pu	90°	0,01 pu	70°	1,00 pu	0°	1,400	0,8083	30°

A Tabela 3.9 mostra os valores das tensões nas barras 1 e 2. Percebe-se que, para um dos dois pontos de operação, a ação de controle surtiu o efeito desejado, aumentando a tensão na barra de carga (e também na barra 1). Para o outro ponto de operação, a ação de controle teve o efeito oposto ao esperado, diminuindo a tensão na barra de carga (e também na barra 1).

Tabela 3.9 – Tensões nas Regiões A e B para Dois Valores de Tap

	tap = 1,00 pu		tap = 0,95 pu	
	$V_1 \angle \theta_1$	$V_2 \angle \theta_2$	$V_1 \angle \theta_1$	$V_2 \angle \theta_2$
Região A	$0,6618 \angle -25,028$	$0,6433 \angle -26,423$	$0,7840 \angle -19,834$	$0,7683 \angle -20,822$
Região B	$0,4885 \angle -34,973$	$0,4636 \angle -37,602$	$0,4124 \angle -40,165$	$0,3832 \angle -43,936$

3.4 Instabilidade do Controle de Tensão: Sistemas Reais

3.4.1 Introdução

Na Seção 3.3 deste capítulo, foi mostrado que o controle de tensão (local ou remoto), feito por geradores, compensadores síncronos, LTCs, SVCs, capacitores e reatores pode levar o sistema ao colapso. Foram usados sistemas de pequeno porte para fins demonstrativos. Verificou-se então a necessidade da criação de uma ferramenta computacional, cuja idéia inicial será mostrada no Capítulo 4, capaz de determinar a eficácia ou não das ações de controle de tensão.

Para assegurar a necessidade desta ferramenta, é mostrado nesta seção o fenômeno do controle de tensão com efeito oposto ao esperado em sistemas reais de grande porte. Deve-se notar que o índice S_m mostrado nas tabelas desta seção foram obtidos com uma forma de cálculo diferente daquela mostrada no Capítulo 2. A diferença é que aqui S_m é sempre positivo e na nova forma de cálculo (Capítulo 2), S_m é negativo quase sempre que $\det [D'] < 0$. Os módulos de S_m são os mesmos nas duas formas de cálculo.

3.4.2 Controle de Tensão por Compensador Estático

3.4.2.1 Descrição da Barra em Análise

O sistema N/NE com carga pesada de junho de 1992 é utilizado. É analisado o controle de tensão na barra 450 pelo SVC a ela conectado conforme mostrado na Figura 3.10. A barra 450 está conectada à barra 452 através de um transformador elevador. Entre as barras 452 e 453 estão conectados quatro LTCs abaixadores em paralelo, controlando a tensão na barra 453. Praticamente toda a carga da cidade de Fortaleza passa pelos transformadores.

3.4.2.2 Testes

São mostrados 4 testes analisando a eficácia do controle de tensão da barra 450, onde é verificada a relação da admitância do SVC com a respectiva tensão controlada. O ponto de operação do caso-base, quando $V_{450} = 1,0$ pu, é o mesmo em todos os testes. O valor da potência reativa gerada é igual ao valor de S_i , potência aparente injetada, mostrada nas tabelas, pois a barra 450 não tem injeção de potência ativa.

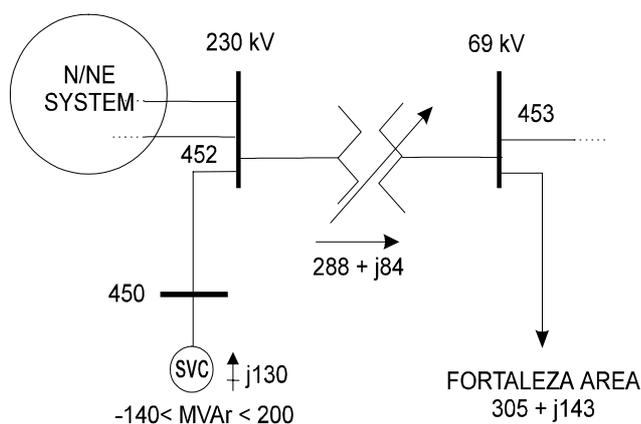


Figura 3.10 – Situação da Barra 450 no Sistema N/NE

a) Teste N° 1

Neste teste as opções QLIM, CTAP e CREM do ANAREDE e do ESTABTEN estão desativadas. Variando-se o valor especificado da tensão, obteve-se o valor correspondente de potência reativa gerada e conseqüentemente o valor da admitância do SVC.

A Tabela 3.10 mostra os valores da admitância do SVC, da tensão especificada, da potência injetada, da injeção máxima de potência e do ângulo entre os vetores gradientes ∇P e ∇Q . Nos pontos de operação entre $V = 0,90$ e $V = 1,15$ pu a admitância do SVC diminui enquanto a tensão aumenta. Este comportamento é oposto ao usual, pois para produzir elevação da tensão seria esperado um aumento no valor da admitância do SVC. Nos pontos de operação entre $V = 1,16$ e $V = 1,20$ pu, observa-se o comportamento usual, isto é, o aumento no valor da admitância resulta em elevação da tensão. O valor mínimo da admitância do SVC, quando $V = 1,16$ pu, é o valor no qual a relação da admitância com a tensão troca de sinal.

Tabela 3.10 – Admitância do SVC, Tensão, Potência Injetada, Injeção Máxima de Potência e Ângulo entre ∇P e ∇Q

Y_{sh}	V	S_i	S_m	β
2,0358	0,90	1,649	4,6	-131,3
1,9176	0,91	1,588	4,4	-136,0
1,8147	0,92	1,536	4,2	-140,5
1,7216	0,93	1,489	4,0	-144,6
1,6388	0,94	1,448	3,9	-148,5
1,5657	0,95	1,413	3,7	-152,2
1,4996	0,96	1,382	3,5	-155,7
1,4401	0,97	1,355	3,3	-159,0
1,3869	0,98	1,332	3,1	-162,2
1,3397	0,99	1,313	2,9	-165,2
1,2990	1,00	1,299	2,7	-168,0
1,2607	1,01	1,286	2,5	-170,7
1,2265	1,02	1,276	2,2	-173,3
1,1971	1,03	1,270	1,9	-175,8
1,1714	1,04	1,267	1,6	-178,2
1,1483	1,05	1,266	1,4	179,6
1,1285	1,06	1,268	1,8	177,4
1,1110	1,07	1,272	2,1	175,3
1,0965	1,08	1,279	2,4	173,3
1,0841	1,09	1,288	2,6	171,4
1,0736	1,10	1,299	2,9	169,5
1,0657	1,11	1,313	3,1	167,7
1,0587	1,12	1,328	3,3	166,0
1,0541	1,13	1,346	3,5	164,4
1,0511	1,14	1,366	3,7	162,8
1,0488	1,15	1,387	3,9	161,3
1,0486	1,16	1,411	4,1	159,8
1,0490	1,17	1,436	4,3	158,3
1,0514	1,18	1,464	4,5	157,0
1,0543	1,19	1,493	4,6	155,6
1,0583	1,20	1,524	4,8	154,3

Em princípio, o objetivo do teste foi cumprido: ações de controle de tensão com efeito oposto ao usual em sistemas de grande porte em um ponto de operação real.

Na tabela, verifica-se que o ponto de máxima transferência de potência está localizado entre $V = 1,04$ e $V = 1,05$, quando o ângulo $\beta \cong 180^\circ$. A parte superior da curva $V \times P, Q$ é caracterizada por $0^\circ < \beta < 180^\circ$ e a inferior por $0^\circ < \beta < -180^\circ$. A fronteira determinada pelo ângulo β está localizado em um ponto de operação diferente do ponto onde ocorre a troca de sinal da relação da admitância com a tensão. Conclui-se que através dos índices S_i , S_m e do ângulo β não é possível determinar o comportamento do controle de tensão. Isto é esperado, pois este índice relaciona a potência reativa injetada com o módulo da tensão e não a admitância do SVC com o módulo da tensão.

As Figuras 3.11 e 3.12 mostram graficamente o comportamento da admitância do SVC e da potência reativa gerada, respectivamente, em relação à tensão controlada.

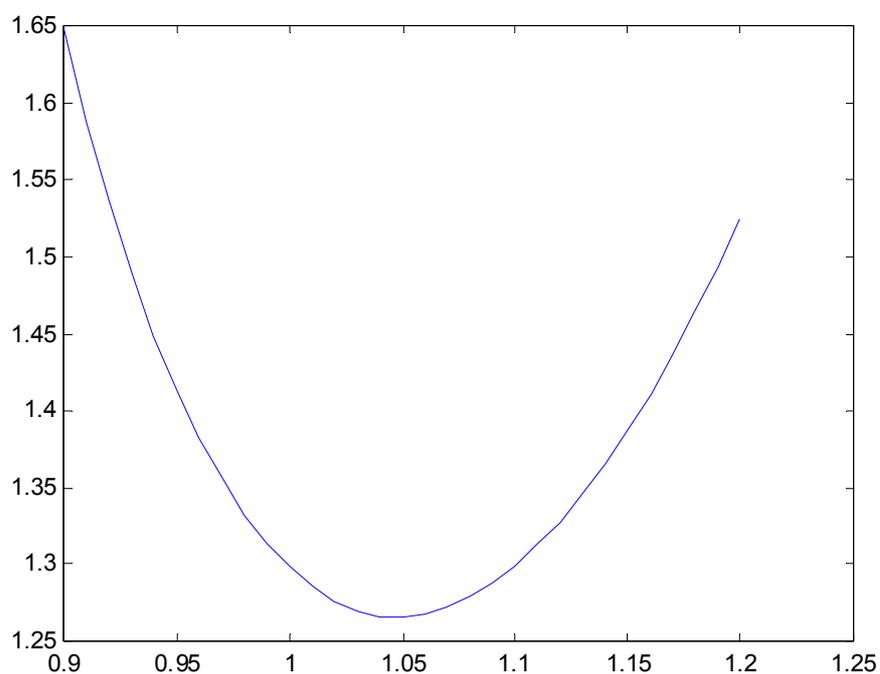


Figura 3.11 – Potência Reativa Gerada x Tensão Controlada

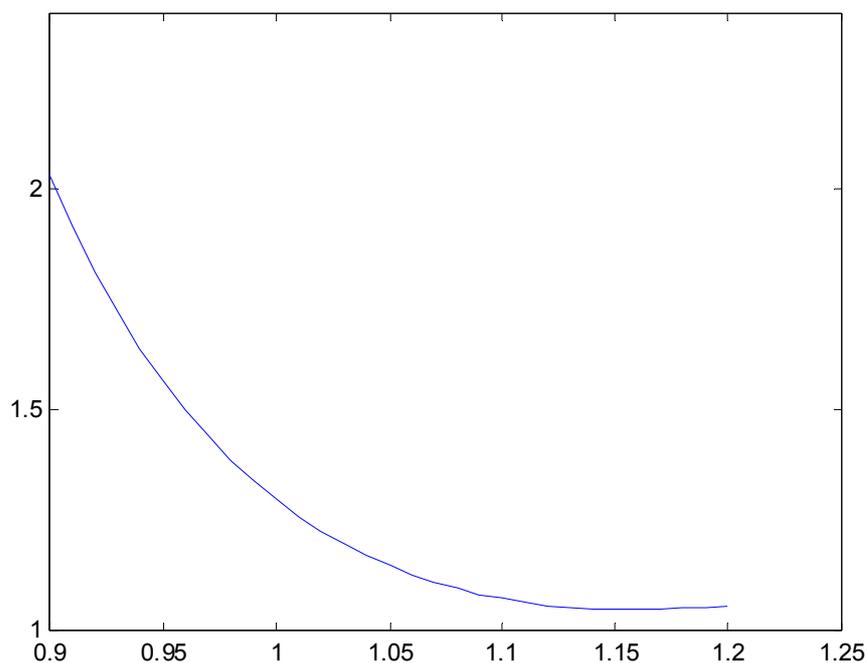


Figura 3.12 – Admitância do SVC x Tensão Controlada

b) Teste N° 2

Nesta simulação é ativada a opção CTAP do ANAREDE e do ESTABTEN. Variando-se o valor especificado da tensão, obteve-se o valor correspondente de potência reativa gerada e o valor da admitância do SVC.

A ação de aumentar ou diminuir o valor da tensão na barra 450 é refletida nas tensões das barra 452 e 453, com a conseqüente troca de taps dos LTCs que controlam a tensão na barra 453. Para anular a influência desta ação de controle que ocorre muito próximo à barra em estudo, os taps destes LTCs foram fixados no valor do caso base, $t=0,930$.

Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 3.11. Nos pontos de operação entre $V = 0,85$ e $V = 0,99$ pu da tabela, a admitância do SVC diminui enquanto a tensão aumenta. Este comportamento é oposto ao usual. Entre os pontos de operação $V = 0,99$ e $V = 1,05$ observa-se o comportamento usual, isto é, o aumento no valor da admitância resulta em aumento da tensão. A relação de sensibilidade entre a tensão e a admitância

troca de sinal quando $V = 0,99$, o que não pode ser detectado através de S_i , S_m e β , pois quando $\beta = 180^\circ$, $V \approx 0,89$. Novamente, o teste cumpriu seu objetivo.

Tabela 3.11 – Admitância do SVC, Tensão, Potência Injetada, Injeção Máxima de Potência e Ângulo entre ∇P e ∇Q

Y_{sh}	V	S_i	S_m	β
2,2422	0,85	1,620	4,4	-127,8
2,1065	0,86	1,558	4,2	-134,4
1,9712	0,87	1,492	4,0	-139,1
1,8685	0,88	1,447	3,8	-144,1
1,7611	0,89	1,395	1,8	177,0
1,6815	0,90	1,362	2,1	173,2
1,6000	0,91	1,325	2,5	169,5
1,5418	0,92	1,305	2,7	167,0
1,4776	0,93	1,278	2,9	164,7
1,4328	0,94	1,266	3,1	162,2
1,3806	0,95	1,246	3,3	160,1
1,3466	0,96	1,241	3,5	158,2
1,3094	0,97	1,232	4,4	150,5
1,2974	0,98	1,246	4,9	145,2
1,2876	0,99	1,262	5,4	140,8
1,3000	1,00	1,300	5,9	137,1
1,3126	1,01	1,339	6,3	133,8
1,3437	1,02	1,398	6,7	131,0
1,3724	1,03	1,456	7,0	128,4
1,4183	1,04	1,534	7,4	126,2
1,4621	1,05	1,612	7,7	124,1

Opção CTAP ativada/ Taps entre as barras 452 e 453 fixos ($t = 0,930$)

Verifica-se que houve um aumento da margem de estabilidade de tensão em relação ao caso anterior, devido à consideração da disponibilidade de controle através de LTCs na matriz Jacobiana utilizada para o cálculo dos índices mostrados nas Tabelas 3.10 e 3.11. Esse resultado é o esperado conforme mostrado em [Prada, 2001].

As Figuras 3.13 e 3.14 mostram graficamente o comportamento da admitância do SVC e da potência reativa gerada, respectivamente, em relação à tensão controlada.

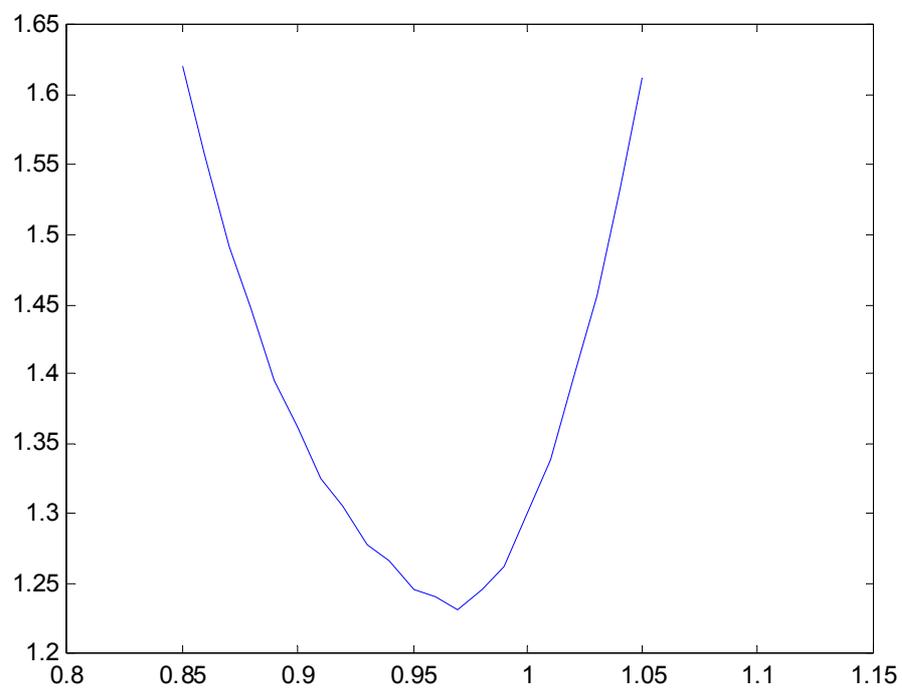


Figura 3.13 – Potência Reativa Gerada x Tensão Controlada

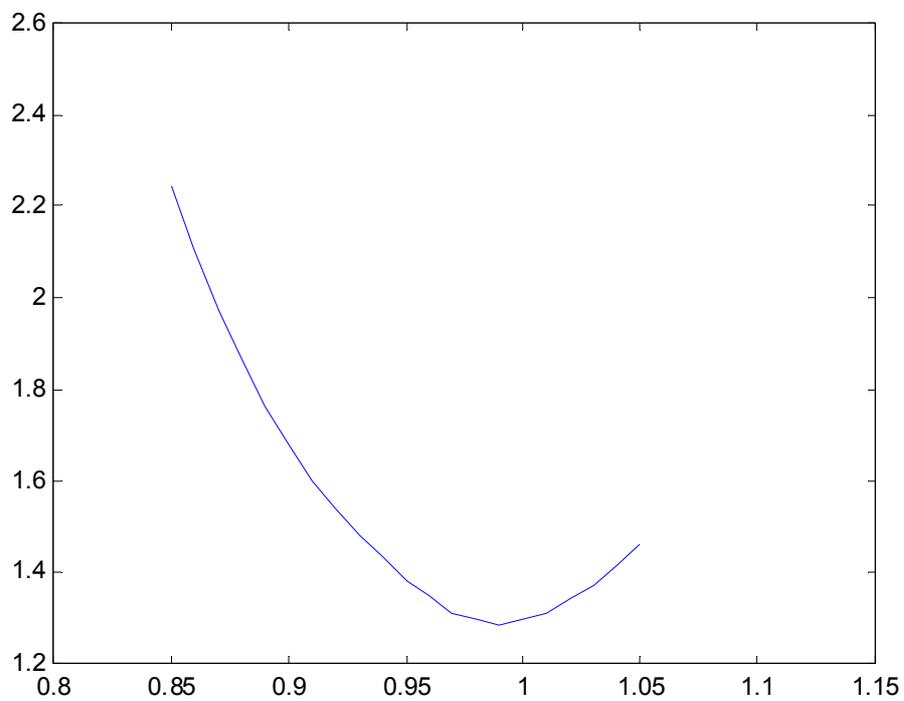


Figura 3.14 – Admitância do SVC x Tensão Controlada

c) Teste N° 3

Esta simulação é similar a anterior, com a diferença de que os LTCs entre as barras 452 e 453 estão livres para manter a tensão especificada na barra 453. Observa-se, nos resultados apresentados na Tabela 3.12, que nos pontos de operação entre $V = 0,85$ e $V = 0,93$ pu a admitância do SVC diminui enquanto a tensão aumenta. Entre $V = 0,93$ e $V = 1,05$ pu, um aumento no valor da admitância corresponde a um aumento no valor da tensão. Novamente, o teste cumpriu seu objetivo.

Tabela 3.12 – Admitância do SVC, Tensão, Potência Injetada, Injeção Máxima de Potência e Ângulo entre ∇P e ∇Q

Y_{sh}	V	S_i	S_m	β
1,8630	0,85	1,346	4,2	-129,0
1,7415	0,86	1,288	4,0	-135,0
1,6184	0,87	1,225	3,8	-140,0
1,5251	0,88	1,181	3,7	-144,1
1,4291	0,89	1,132	1,5	177,1
1,3580	0,90	1,100	1,9	173,5
1,2849	0,91	1,064	2,3	169,8
1,2335	0,92	1,044	2,5	167,5
1,2186	0,93	1,054	5,0	143,3
1,2302	0,94	1,087	5,2	142
1,2310	0,95	1,111	5,3	140,8
1,2467	0,96	1,149	5,5	139,7
1,2520	0,97	1,178	5,6	138,6
1,2703	0,98	1,220	5,8	137,5
1,2795	0,99	1,254	5,9	136,5
1,3000	1,00	1,300	6,0	135,5
1,3116	1,01	1,338	6,2	134,5
1,3351	1,02	1,389	6,3	133,6
1,3489	1,03	1,431	6,5	132,6
1,3739	1,04	1,486	6,6	131,8
1,3905	1,05	1,533	6,8	130,9

Opção CTAP ativada

O valor mínimo da admitância ocorre quando $V = 0,93$ pu, enquanto que o valor de máxima transferência de potência, quando $\beta = 180^\circ$, ocorre quando $V \approx 0,89$ pu, o que significa que não se pode determinar o comportamento do controle de tensão através dos índices S_i , S_m e β .

As Figuras 3.15 e 3.16 mostram graficamente o comportamento da admitância do SVC e da potência reativa gerada, respectivamente, em relação à tensão controlada.

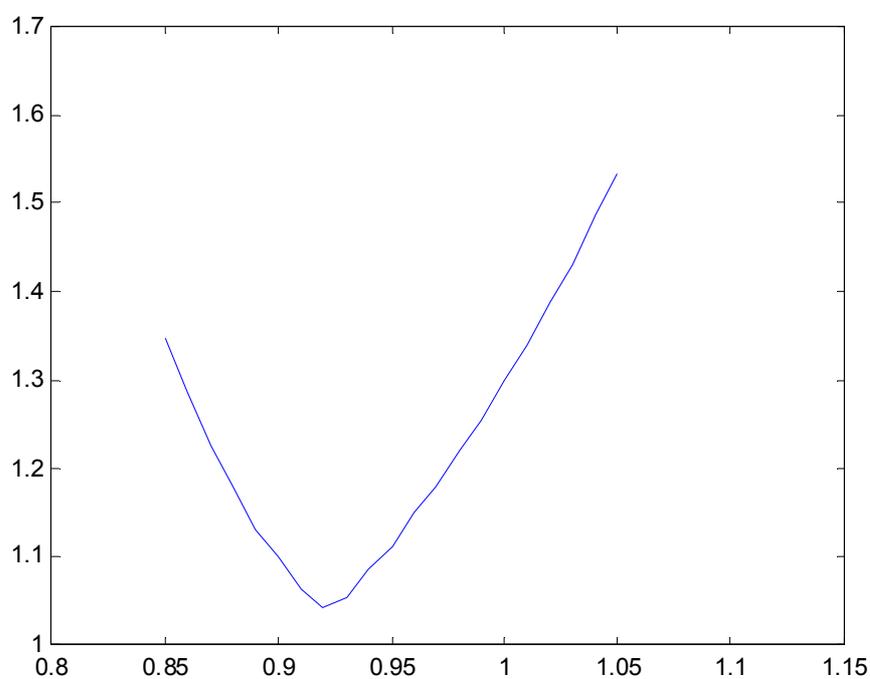


Figura 3.15 – Potência Reativa Gerada x Tensão Controlada

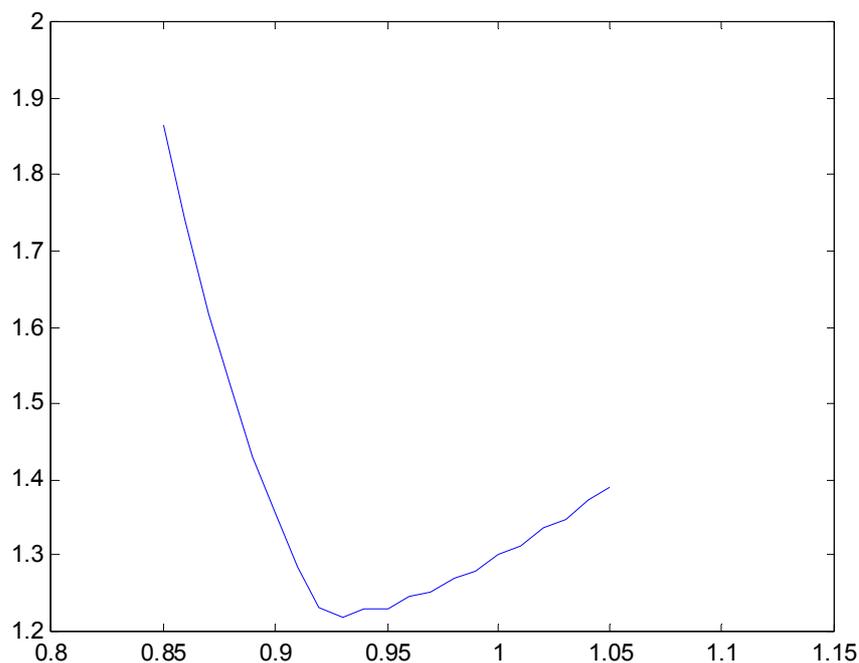


Figura 3.16 – Admitância do SVC x Tensão Controlada

d) Teste N° 4

Nesta simulação é ativada a opção CTAP do ANAREDE e do ESTABTEN. Além de se variar o valor especificado da tensão da barra 450, variou-se na mesma proporção o valor da tensão controlada da barra 453, conforme é mostrado na Tabela 3.13.

A Figura 3.17 mostra o comportamento da potência reativa gerada em relação à tensão controlada das barras 450 e 453, e a Figura 3.18 mostra o comportamento da admitância em relação à tensão controlada da barra 450. Observa-se em todos os pontos de operação mostrados na tabela que $0^\circ < \beta < 180^\circ$, e também que a relação da admitância com a tensão troca de sinal quando $V = 1$ pu. Novamente, o teste cumpriu seu objetivo.

Como nos outros casos, não se conhece o funcionamento da ação de controle através dos índices S_i , S_m e β , ou seja, estes índices não indicam o efeito que uma variação da admitância do SVC causará no valor da tensão da barra 450.

Tabela 3.13 – Admitância do SVC, Tensão da Barra 450, Potência Injetada, Injeção Máxima de Potência, Ângulo entre ∇P e ∇Q e Tensão da Barra 453

Y_{sh}	V_{450}	S_i	S_m	β	V_{453}
1,7160	0,90	1,390	5,1	143,8	0,929
1,6834	0,91	1,394	5,2	142,0	0,936
1,6080	0,92	1,361	5,4	140,1	0,949
1,5863	0,93	1,372	5,6	138,4	0,956
1,5256	0,94	1,348	5,8	137,0	0,969
1,5114	0,95	1,364	5,9	135,5	0,976
1,4627	0,96	1,348	6,1	134,3	0,989
1,4603	0,97	1,374	6,3	132,9	0,996
1,4025	0,98	1,347	5,7	138,2	1,008
1,3182	0,99	1,292	5,9	136,6	1,020
1,3000	1,00	1,300	6,0	135,5	1,032
1,3146	1,01	1,341	6,2	134,6	1,039
1,3822	1,02	1,438	6,3	133,9	1,051
1,4884	1,03	1,579	6,4	133,5	1,063
1,5745	1,04	1,703	6,5	133,0	1,069
1,5710	1,05	1,732	5,1	146,3	1,081
1,5655	1,06	1,759	5,2	145,3	1,093
1,5477	1,07	1,772	5,4	143,6	1,099
1,5424	1,08	1,799	5,2	146,1	1,111
1,5268	1,09	1,814	5,3	145,1	1,122
1,5223	1,10	1,842	5,5	144,1	1,134

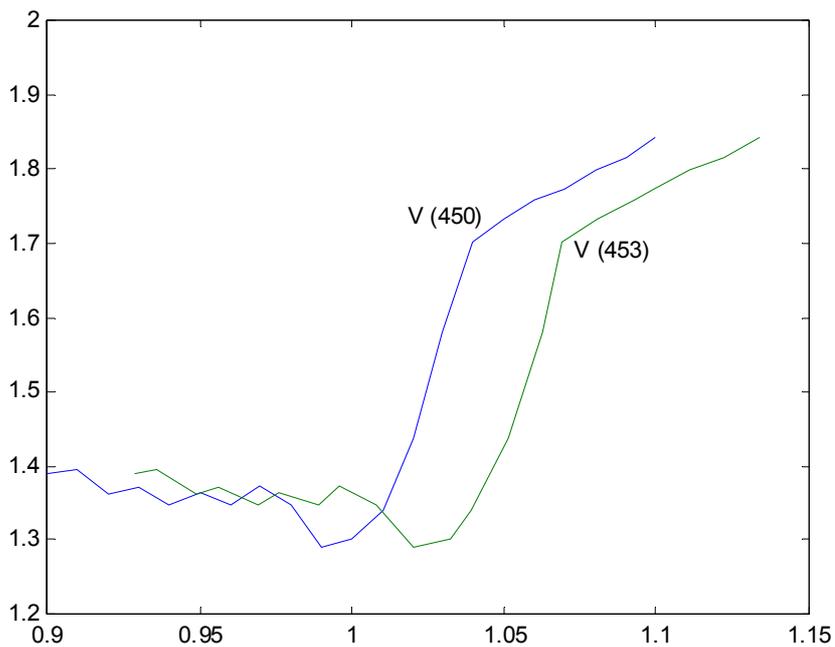


Figura 3.17 – Potência Reativa Gerada x Tensão Controlada, Tensão-Base na Barra 453 Variável com a Tensão-Base da Barra 450

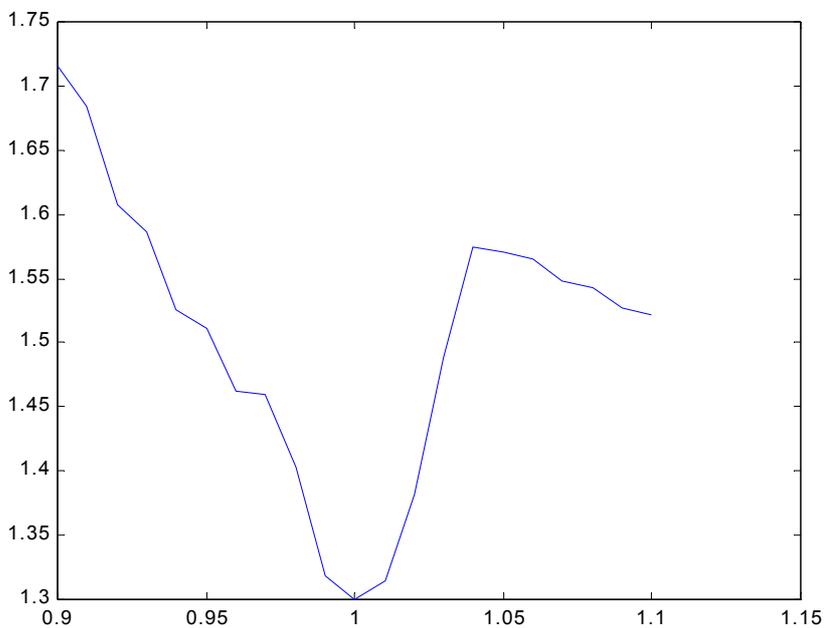


Figura 3.18 – Admitância do SVC x Tensão Controlada

3.4.2.3 Conclusões

Usando-se o sistema N/NE com carga pesada de junho de 1992, foi mostrada a existência de casos onde a sensibilidade entre a tensão terminal e a admitância do SVC é oposta à desejada e casos onde a sensibilidade entre estas duas grandezas é a usual. A ocorrência de um ou outro caso depende da tensão-base na barra 450 e das opções de controle de tensão consideradas.

De fato, em um sistema real, um acréscimo de admitância capacitiva pode produzir o efeito esperado na tensão controlada ou o efeito contrário.

Os índices S_i , S_m e β não são capazes de detectar esta sensibilidade, pois não relacionam a admitância do SVC e sua tensão controlada e sim a potência reativa injetada com o módulo da tensão.

Uma ferramenta computacional capaz de determinar a eficácia ou não das ações de controle de tensão por compensadores estáticos, assim como por capacitores em paralelo, é necessária para evitar que uma sucessão de ações de controle de tensão automáticas mal sucedidas resultem em tensões excessivamente baixas (ou altas), o que pode levar o sistema ao colapso.

3.4.3 Controle de Tensão por Compensador Síncrono

3.4.3.1 Descrição da Barra em Análise

O sistema S/SE com a configuração do dia 24 de abril de 1997 é usado nestes testes. Dois pontos de operação são usados: o das 18:00 hs, minutos antes do blackout, e o das 15 hs. Esses pontos de operação já foram previamente usados em [Prada, 2001].

A Tabela 4.1 de [Prada, 2001] mostra o resultado da avaliação das condições de estabilidade de tensão para o ponto de operação das 18:00 hs. A barra 44 GRAJAU---2CS, barra a qual estão conectados dois compensadores síncronos, como o próprio nome da barra indica, e que controla remotamente a tensão na barra 178

GRAJAU---138, apresenta um ângulo β negativo. Isso indica que a sensibilidade entre a potência reativa gerada e o módulo da tensão na barra 44 é negativa, o que é oposto ao usual. Como dito e repetido na Seção 3.2 deste capítulo, sensibilidade entre a potência reativa gerada e o módulo da tensão negativa não indica que o controle de tensão tem efeito oposto ao esperado.

A Tabela 3.14 mostra o resultado da avaliação das condições de estabilidade de tensão para o ponto de operação das 18:00 hs. Nessa tabela a barra 44 GRAJAU---2CS apresenta um ângulo β positivo, diferentemente da Tabela 4.1 de [Prada, 2001]. Isto por que o programa ESTABTEN agora modela a capacidade de controle remoto de tensão (opção CREM ao lado de EXET).

Tabela 3.14 – Relatório de Estabilidade de Tensão, Sistema S/SE, abril 97, 18:00 hs
(Opções ativadas: ANAREDE: EXLF NEWT QLIM CREM FILE; ESTABTEN: EXET CREM FILE)

Barra	Numero-Nome	Tensao	Equip	Tipo	Sinj	Smax	Beta	dQV
10	ANGRA----1MQ	1.035	G	1	6.782	9.9	-154.6	3.4
44	GRAJAU---2CS	0.976	L	0	0.026	16.8	158.4	
48	IBIUNA---3CS	1.039	Q	1	1.566	73.6	-37.8	200.7
50	T.PRETO--1CS	1.000	LQ	1	2.825	27.8	98.2	37.9
60	F.IGUACU-765	0.970	R	0	6.402	74.5	42.3	212.3
61	FOZ-500-60HZ	1.025	P	0	0.0	89.5	39.8	
65	IVAIPORA-765	0.995	P	0	0.0	63.8	64.3	
66	IVAIPORA-525	0.976	P	0	0.0	62.3	74.2	
67	IVAIPORA--69	1.029	L	0	0.002	28.5	83.6	
72	ITABERA--765	0.977	R	0	6.449	59.0	80.5	98.1
76	T.PRETO--765	0.915	R	0	3.019	64.9	109.6	114.4
77	T.PRETO--500	1.055	P	0	0.0	52.8	115.2	
78	T.PRETO--345	1.026	C	0	6.154	97.4	124.3	208.8
79	T.PRETO---69	0.902	P	0	0.0	23.8	102.1	
86	IBIUNA---345	1.038	LC	0	53.165	75.8	-71.0	-67.2
87	IBIUNA---500	1.072	P	0	0.0	67.8	100.1	
104	C.PAULIS-500	1.025	P	0	0.0	39.7	140.7	
105	ANGRA----500	1.031	P	0	0.0	33.0	140.4	
106	ADRIANO--500	1.002	P	0	0.0	24.3	158.3	
107	GRAJAU---500	1.007	P	0	0.0	21.4	160.6	
108	S.JOSE---500	1.002	P	0	0.0	21.8	159.8	
140	ADRIANO--345	0.970	C	0	3.152	19.6	160.1	18.9
173	ADRIANO--138	1.027	P	0	0.0	13.2	155.7	
178	GRAJAU---138	1.000	P	0	0.0	20.5	163.6	
183	C.PAULIS-138	0.997	P	0	0.0	20.9	129.1	
185	ANGRA----138	1.033	LC	0	0.380	6.0	119.8	7.7
1106	ITAIPIU60-500	1.028	P	0	0.0	93.3	39.3	
1107	ITAIPIU60-7MQ	1.030	GL	1	54.321	59.2	-22.4	-26.0
4444	BAR_INT--2CS	0.973	Q	1	0.008	2.2	103.0	2.4

Legenda:

S_{inj} - potência aparente injetada na barra no ponto de operação em análise,

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

Beta - ângulo que define a região de operação e a proximidade angular do ponto de operação em análise à fronteira,

dQV - índice que relaciona o módulo da tensão com a injeção de potência reativa em barras PV,

G gerador, L carga, P passagem, Q compensador, C capacitor, L reator,

2 swing, 1 PV, 0 PQ.

A Tabela 3.15 mostra o resultado da avaliação das condições de estabilidade de tensão para o ponto de operação das 15:00 hs. A barra 44 GRAJAU---2CS apresenta um ângulo β positivo. Isso indica que a sensibilidade entre a potência reativa gerada e o módulo da tensão na barra 44 é positivo, o que é o usual. Como visto na Seção 3.2, sensibilidade entre a potência reativa gerada e o módulo da tensão positiva não indica que o controle de tensão tem o efeito esperado.

Nas Tabelas 3.14 e 3.15, a barra 4444 é a barra interna do CS conectado à barra 44.

Tabela 3.15 – Relatório de Estabilidade de Tensão, Sistema S/SE, abril 97, 15:00 hs
(Opções ativadas: ANAREDE: EXLF NEWT QLIM CREM FILE; ESTABTEN: EXET CREM FILE)

Barra	Numero-Nome	Tensao	Equip	Tipo	Sinj	Smax	Beta	
10	ANGRA----1MQ	1.020	G	1	6.041	9.3	151.4	3.0
44	GRAJAU---2CS	0.981	L	0	0.026	19.4	150.2	
48	IBIUNA---3CS	1.022	Q	1	1.023	13.1	-128.4	-5.3
50	T.PRETO--1CS	1.050	LQ	1	2.806	30.7	95.4	39.8
60	F.IGUACU-765	0.965	R	0	6.371	73.6	37.2	207.3
61	FOZ-500-60HZ	1.022	P	0	0.0	88.1	35.2	
65	IVAIPORA-765	0.990	P	0	0.0	64.2	56.0	
66	IVAIPORA-525	1.018	P	0	0.0	62.4	66.2	
67	IVAIPORA--69	1.015	L	0	0.002	28.1	80.3	
72	ITABERA--765	0.983	R	0	6.490	60.9	71.9	98.0
76	T.PRETO--765	0.943	R	0	3.111	70.6	99.2	123.2
77	T.PRETO--500	1.083	P	0	0.0	58.8	105.8	
78	T.PRETO--345	1.032	C	0	8.253	109.0	114.4	243.5
79	T.PRETO---69	0.934	P	0	0.0	26.0	97.2	
86	IBIUNA---345	1.045	LC	0	52.264	54.7	-138.6	-5.6
87	IBIUNA---500	1.091	P	0	0.0	71.8	95.3	
104	C.PAULIS-500	1.065	P	0	0.0	47.2	130.4	
105	ANGRA----500	1.064	P	0	0.0	38.8	129.3	
106	ADRIANO--500	1.058	P	0	0.0	29.5	149.1	
107	GRAJAU---500	1.046	P	0	0.0	25.7	152.2	
108	S.JOSE---500	1.058	P	0	0.0	26.3	151.0	
140	ADRIANO--345	1.029	C	0	3.343	24.2	151.4	24.1
173	ADRIANO--138	1.049	P	0	0.0	16.7	146.5	
178	GRAJAU---138	1.010	P	0	0.0	24.0	156.4	
183	C.PAULIS-138	1.047	P	0	0.0	24.0	118.7	
185	ANGRA----138	1.028	LC	0	0.419	6.4	114.9	8.1
1106	ITAIPU60-500	1.024	P	0	0.0	91.9	34.8	
1107	ITAIPU60-8MQ	1.030	GL	1	56.059	61.5	-21.6	-31.2
4444	BAR_INT--2CS	0.743	Q	1	0.496	1.3	99.8	1.2

3.4.3.2 Testes

O objetivo dos testes é verificar o sinal da relação de sensibilidade entre a tensão interna do compensador síncrono conectado à barra 44 e a tensão controlada na barra 178. Desse modo avalia-se a eficácia ou não do controle de tensão.

Os testes consistem em variar o valor da tensão-base na barra 178 e calcular o valor da tensão necessária na barra interna 4444 executando um algoritmo de fluxo de carga.

a) Teste N° 1

Utilizando-se como caso-base o ponto de operação das 18:00 hs, a Tabela 3.16 apresenta os valores de tensão na barra interna 4444 e na barra terminal 44 do CS para vários valores de tensão-base na barra 178, cuja tensão é controlada pelo equipamento.

Observando-se as colunas referentes às tensões nas barras interna e 178 nota-se que a relação de sensibilidade é a usual quando a tensão-base na barra 178 varia de 0,96 a 1,08 pu (V_{178} cresce e V_{interna} também). No entanto, nota-se que a relação de sensibilidade é oposta ao usual quando a tensão-base na barra 178 varia de 0,91 a 0,96 pu (V_{178} cresce e V_{interna} decresce). A Figura 3.19 mostra esse comportamento.

O teste cumpriu o objetivo de mostrar que, em um sistema real, o controle de tensão por compensador síncrono pode ter o efeito oposto ao desejado.

A Tabela 3.16 também mostra os valores da potência injetada S_i , da máxima potência que poderia ser injetada S_m , e do ângulo β nas barras 44 e 178. Embora essas grandezas não possam ser usadas para determinar o efeito de ações de controle de tensão, nota-se uma mudança da região de operação quando a tensão-base na barra 178 está entre 0,95 e 0,96 pu.

Não há convergência do algoritmo de fluxo de carga para tensão-base na barra 178 menor do que 0,91 pu.

Tabela 3.16 – Avaliação do Comportamento do Controle de Tensão da Barra 178, Sistema S/SE, abril 97, 18:00 hs

V_{interna}	V_{44}	V_{178}	$S_{i(44)}$ $S_{i(178)}$	$S_{m(44)}$ $S_{m(178)}$	β_{44} β_{178}
1,558	0,901	0,910	0,026 0,000	36,9 35,5	-60,3 -93,3
1,153	0,903	0,920	0,026 0,000	24,2 26,1	-120,7 -139,6
0,952	0,909	0,930	0,026 0,000	17,7 20,0	-149,8 -158,9
0,824	0,916	0,940	0,026 0,000	12,5 14,6	-165,4 -169,6
0,792	0,925	0,950	0,026 0,000	8,3 9,8	-173,8 -175,5
0,762	0,934	0,960	0,026 0,000	5,7 6,8	177,2 177,9
0,793	0,944	0,970	0,026 0,000	9,8 11,8	171,8 174,0
0,834	0,955	0,980	0,026 0,000	12,5 15,2	167,1 170,4
0,888	0,965	0,990	0,026 0,000	15,1 18,4	161,9 166,3
0,973	0,976	1,000	0,026 0,000	16,8 20,5	158,4 163,6
1,065	0,988	1,010	0,026 0,000	18,2 22,3	155,4 161,1
1,169	0,999	1,020	0,026 0,000	19,5 23,9	152,6 158,8
1,290	1,011	1,030	0,026 0,000	20,4 25,0	150,8 157,2
1,409	1,023	1,040	0,026 0,000	21,6 26,4	148,4 155,2
1,539	1,035	1,050	0,026 0,000	22,7 27,7	146,2 153,3
1,678	1,047	1,060	0,026 0,000	23,5 28,7	144,5 151,8
1,816	1,059	1,070	0,026 0,000	24,5 29,9	142,6 150,1
1,964	1,071	1,080	0,026 0,000	25,4 30,9	141,0 148,6

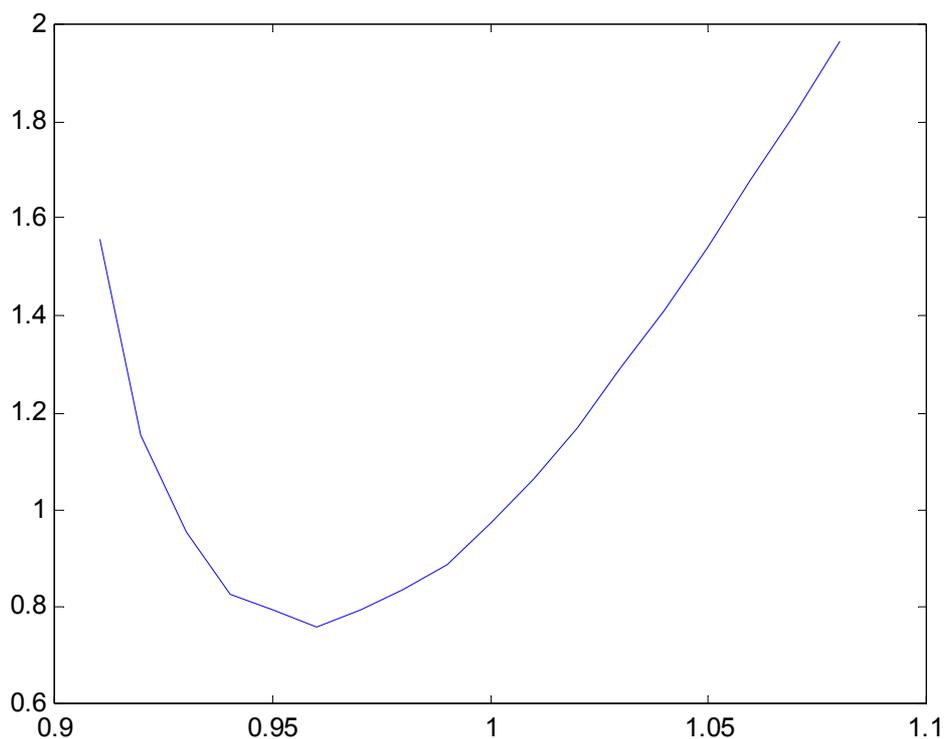


Figura 3.19 – Comportamento da Tensão Interna do Compensador Síncrono e da Tensão Controlada Remotamente na Barra 178, Sistema S/SE, abril/97, 18h

b) Teste N° 2

Utilizando-se como caso-base o ponto de operação das 15:00 hs, a Tabela 3.17 apresenta os valores de tensão na barra interna 4444 e na barra terminal 44 do CS para vários valores de tensão-base na barra 178, cuja tensão é controlada pelo equipamento.

Observando-se as colunas referentes às tensões nas barras interna e 178 nota-se que a relação de sensibilidade é sempre a usual (V_{178} cresce e $V_{interna}$ também). Não há, na faixa de tensão mostrada, relação de sensibilidade oposta à usual. A Figura 3.20 mostra esse comportamento.

Tabela 3.17 – Avaliação do Comportamento do Controle de Tensão da Barra 178, Sistema S/SE, abril 97, 15:00 hs

V_{interna}	V_{44}	V_{178}	$S_{i(44)}$ $S_{i(178)}$	$S_{m(44)}$ $S_{m(178)}$	β_{44} β_{178}
0,454	0,947	0,980	0,026 0,000	27,8 30,6	145,3 152,9
0,533	0,958	0,990	0,026 0,000	11,9 15,2	164,3 167,7
0,636	0,969	1,000	0,026 0,000	17,4 21,7	154,0 159,6
0,743	0,981	1,010	0,026 0,000	19,4 24,0	150,2 156,4
0,855	0,992	1,020	0,026 0,000	20,8 25,7	147,4 154,0
0,978	1,004	1,030	0,026 0,000	22,0 27,1	145,1 152,0
1,107	1,016	1,040	0,026 0,000	23,0 28,4	143,0 150,1
1,243	1,028	1,050	0,026 0,000	24,0 29,6	141,0 148,4
1,384	1,040	1,060	0,026 0,000	25,0 30,8	139,3 146,7
1,530	1,053	1,070	0,026 0,000	25,9 31,9	137,6 145,2
1,681	1,065	1,080	0,026 0,000	26,8 32,9	136,1 143,7
1,837	1,077	1,090	0,026 0,000	27,7 33,9	134,6 142,3
1,998	1,090	1,100	0,026 0,000	28,5 34,9	133,2 140,9

A Tabela 3.17 também mostra os valores de S_i , de S_m , e de β nas barras 44 e 178. Embora essas grandezas não possam ser usadas para determinar o efeito de ações de controle de tensão, nota-se que não há mudança na região de operação.

Não há convergência do algoritmo de fluxo de carga para tensão-base na barra 178 menor do que 0,98 pu.

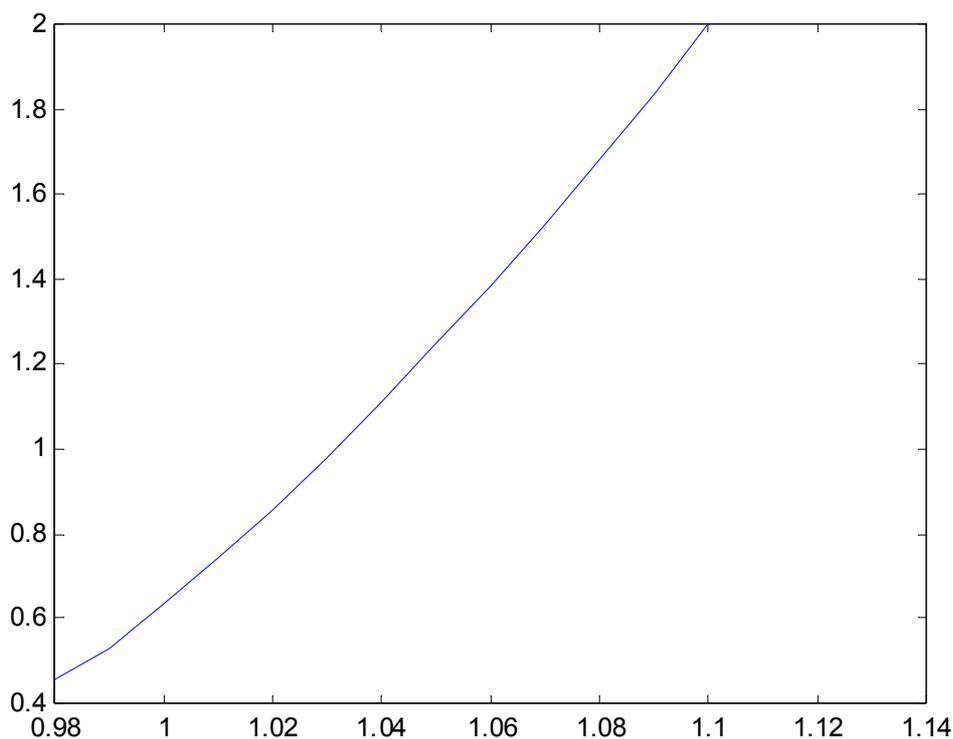


Figura 3.20 – Comportamento da Tensão Interna do Compensador Síncrono e da Tensão Controlada Remotamente na Barra 178, Sistema S/SE, abril/97, 15h

3.4.3.3 Conclusões

Usando-se o sistema S/SE com pontos de operação de abril de 1997, foi mostrada a existência de um caso (18:00 hs) onde a sensibilidade entre a tensão interna do compensador síncrono e a tensão controlada é oposta à desejada. Também foi mostrado um caso (15:00 hs) onde a sensibilidade entre estas duas grandezas é a usual.

Mostrou-se de fato que, em um sistema real, um acréscimo na tensão interna de um CS pode produzir um acréscimo na tensão controlada, como esperado, ou o efeito contrário.

Os índices S_i , S_m e β não são capazes de detectar esta sensibilidade, pois não relacionam a tensão interna do CS e a tensão controlada, e sim a potência reativa injetada e o módulo da tensão.

Uma ferramenta computacional capaz de determinar a eficácia ou não das ações de controle de tensão por compensadores síncronos é necessária para evitar que uma sucessão de ações de controle de tensão automáticas mal sucedidas resultem em tensões excessivamente baixas (ou altas), o que pode levar o sistema ao colapso.

3.4.4 Controle de Tensão por Geradores e LTCs

Em todas as centenas de testes realizados com sistemas reais, somente duas vezes foi observado barras com geradores apresentando ângulo β negativo ($\det [D'] < 0$). O sistema foi o S/SE com os pontos de operação das 15:00 e das 18:00 hs de abril de 1997 utilizados neste capítulo. A barra de geração foi a barra 1107 ITAIPU60. Obviamente esta é uma barra onde os efeitos da ação de controle devem ser verificados.

Considerando a existência de 8 máquinas em paralelo, criou-se uma barra interna do gerador e entre esta e a barra terminal 1107, foi introduzida a reatância síncrona com o valor de 1,39%. Variando-se a tensão-base na barra 1107 calculou-se a tensão necessária na barra interna através de um algoritmo de fluxo de potência. Observou-se relações de sensibilidade usuais entre a tensão interna e a tensão terminal em toda a faixa de tensão testada. Foi feito este único teste.

Quanto ao controle de tensão por LTC, utilizou-se o sistema N/NE com carga pesada de junho de 1992 já visto neste capítulo. Verificou-se a sensibilidade do tap do LTC entre as barras 452 e 453 com a tensão controlada na barra 453. O controle de tensão teve sempre o efeito desejado. Foi feito este único teste.

3.4.5 Controle da Tensão por Corte de Carga

O corte de carga é uma medida emergencial sempre com o objetivo de evitar o desligamento de uma parcela muito maior da carga. Às vezes o corte de carga é recomendado quando a tensão se encontra excessivamente baixa.

É interessante notar que não é necessária a criação de um novo índice para relacionar a tensão na barra com o corte de carga. Os índices S_m e β , derivados da matriz $[D']$ que relaciona as injeções de potência ativa e reativa com o módulo e ângulo da tensão, são adequados.

3.5 Conclusões

Foi mostrado que o controle de tensão local e remoto por geradores, compensadores síncronos, LTCs, SVCs, capacitores e reatores pode levar o sistema ao colapso. A instabilidade do controle de tensão, devido ao efeito oposto esperado na lógica do projeto do dispositivo de controle, pode causar tensões excessivamente baixas (ou altas) para a operação normal do sistema, acarretando, p.ex. o desligamento e/ou bloqueio de motores de indução. Foram usados sistemas de pequeno porte para fins demonstrativos, assim como sistemas reais de grande porte em pontos de operação reais.

Concluiu-se que se faz necessária uma ferramenta computacional capaz de relacionar as grandezas usadas para controle de tensão, tais como, tensão de excitação, taps e admitâncias, com a tensão controlada. A ferramenta deverá determinar a eficácia ou não da ação de controle.