

## **4**

# **Análise em Regime Permanente e no Domínio do Tempo de Problemas de Estabilidade de Tensão em Sistemas Reais**

### **4.1**

#### **Introdução**

O objetivo deste capítulo é o entendimento das situações operativas reais de funcionamento das ações de controle de tensão de geradores que estão conectados em linhas de transmissão onde às condições de carregamento são elevadas, estendendo os testes do Capítulo 3 com o sistema-teste de duas barras para um sistema real de grande porte em condições de operação reais.

Utilizou-se o gerador da unidade termoeletrica de Macaé Merchant, localizado na área Rio de Janeiro. Com o objetivo de se investigar situações operativas relacionadas ao fenômeno de estabilidade de tensão proposto.

A unidade geradora analisada está conectada na barra 3977 que se interliga à barra 3966 de 345 KV, através de um transformador elevador. Ambas as barras estão localizadas na área de Macaé.

No intuito de se analisar a influência dos equipamentos de controle de tensão localizados eletricamente próximos ao gerador, estendeu-se à fronteira de análise para as barras que compreendem as regiões de Campos, Adrianópolis e Vitória. Na Figura 4.19 isso pode ser observado.

### **4.2**

#### **Índices de Estabilidade de Tensão**

Nas Tabelas 4.1 e 4.2 são mostrados os índices de estabilidade de tensão do sistema para a região normal e anormal da curva SV, respectivamente.

Em relação à Tabela 4.1, para se conseguir o ponto de operação na região normal da curva SV foi necessário reduzir em 10% do valor de 5652,3 MVA da carga da área Rio de Janeiro, carga pesada de novembro de 2001. A partir daí identificou-se na unidade termoeletrica de Macaé Merchant, índices de estabilidade de tensão na região normal da curva SV.

Em relação à Tabela 4.2, carga pesada de novembro de 2001, identificou-se na unidade termoeletrica de Macaé Merchant, índices de estabilidade de tensão na região anormal da curva SV.

O ponto de operação na região anormal é devido ao excesso de carregamento do sistema. Os índices, como o ângulo  $\beta$  e a margem de potência, mostram claramente este fato.

Devido à condição extrema de geração de potência reativa imposta ao gerador, o índice  $\frac{\partial Q}{\partial V}$  que relaciona a variação entre a potência reativa gerada e o módulo da tensão é negativo, ou seja, oposto ao usual. O mesmo acontece com o índice  $\frac{\partial V_o}{\partial E_g}$  que relaciona a variação entre a tensão na barra terminal e a tensão de excitação.

Tabela 4.1 – Relatório do EstabTen para a Região Normal da Curva SV

Número da Barra	Módulo da Tensão (pu)	Potência Reativa Gerada (Mvar)	Ângulo $\beta$ (graus)	Margem de Potência (%)	Índice $\frac{\partial Q}{\partial V}$	Índice $\frac{\partial V_o}{\partial E_g}$
3977	1,057	96,70	179,6	0,2	2,3	1,66

Tabela 4.2 – Relatório do EstabTen para a Região Anormal da Curva SV

Número da Barra	Módulo da Tensão (pu)	Potência Reativa Gerada (Mvar)	Ângulo $\beta$ (graus)	Margem de Potência (%)	Índice $\frac{\partial Q}{\partial V}$	Índice $\frac{\partial V_o}{\partial E_g}$
3977	1,057	173,13	-136,4	-196,9	-6,8	-7,87

### 4.3

#### Análise Através de Algoritmo de Fluxo de Carga

Na Seção 4.2, utilizando-se índices de estabilidade de tensão, verificou-se a relação oposta ao esperado entre a potência reativa gerada e o módulo da tensão para a barra de geração 3977.

A utilização de um algoritmo de fluxo de carga pode confirmar esse resultado. Através de sucessivas variações no valor de referência do módulo da tensão na barra 3977, determina-se os respectivos valores dos fluxos de potência reativa. As Tabelas 4.3 e 4.4 mostram essas variações para as regiões normais e anormais da curva SV, respectivamente. A linha de dados com o símbolo (\*) corresponde o ponto de operação do caso-base do sistema.

Tabela 4.3 – Análise Através de Algoritmo de Fluxo de Carga na Região Normal de Operação

Módulo da Tensão na Barra 3977 (pu)	Fluxo de Potência Reativa na Barra 3977 (Mvar)
1,075	112,50
1,070	110,00
1,065	105,30
1,060	101,20
1,057*	96,70*
1,050	79,30
1,040	53,50

Tabela 4.4 – Análise Através de Algoritmo de Fluxo de Carga na Região Anormal de Operação

Módulo da Tensão na Barra 3977 (pu)	Fluxo de Potência Reativa na Barra 3977 (Mvar)
1,043	227,24
1,046	204,65
1,049	189,13
1,052	179,33
1,055	174,20
1,057*	173,13*
1,060	170,81
1,063	164,65

As curvas nas Figuras 4.1 e 4.2 correspondem aos pontos das Tabelas 4.3 e 4.4. Como já dito, a curva VQ é construída através de uma seqüência de soluções do problema de fluxo de potência, variando-se o valor da tensão controlada e anotando-se a potência reativa gerada, como na análise da seção anterior.

Através da curva VQ pode-se concluir que, para a região anormal de operação, com o acréscimo no módulo da tensão da barra terminal, o fluxo de potência reativa que deixa a barra tende a diminuir e com o decréscimo no módulo da tensão o fluxo de potência reativa tende a aumentar.

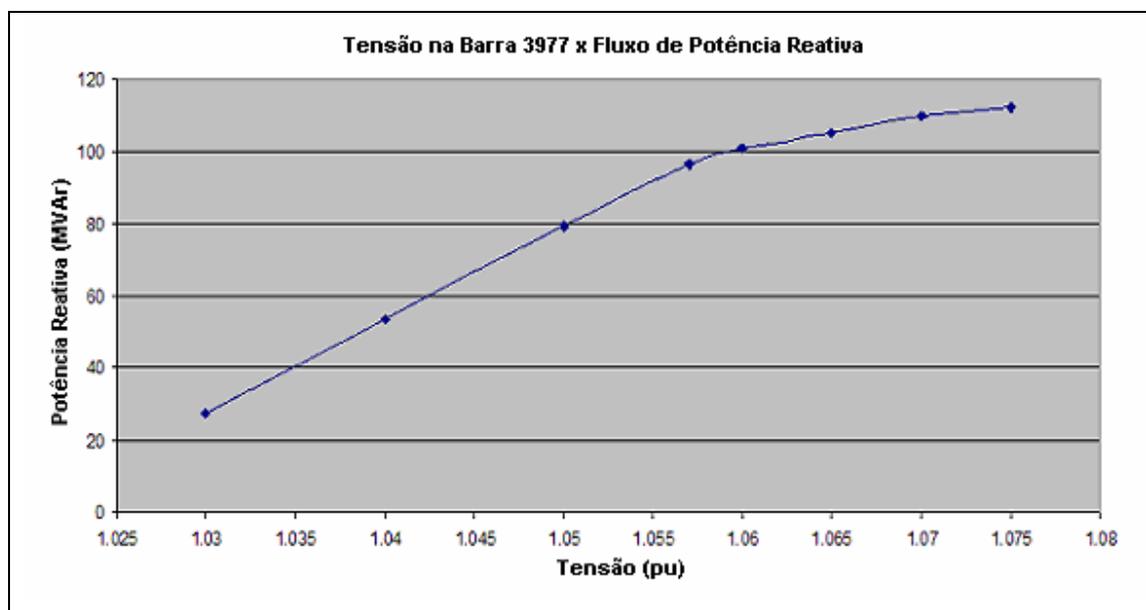


Figura 4.1- Tensão Terminal x Fluxo de Potência Reativa na Região Normal de Operação

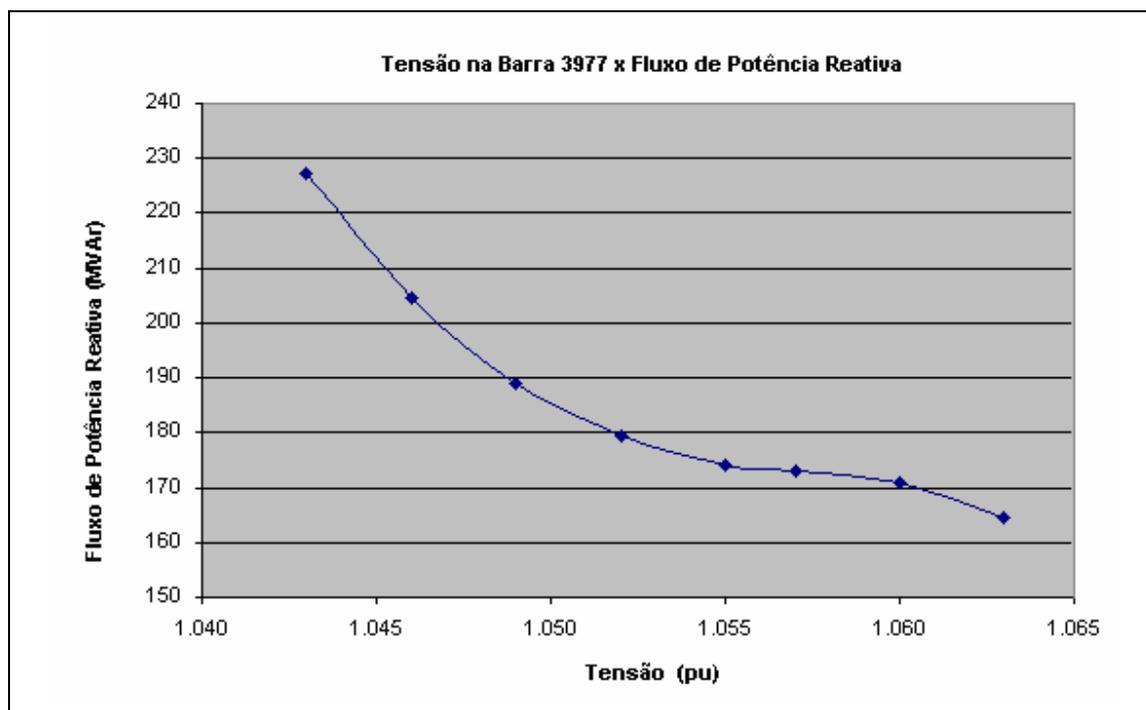


Figura 4.2- Tensão Terminal x Fluxo de Potência Reativa na Região Anormal de Operação

#### 4.4

##### **Análise da Tensão de Excitação x Tensão Terminal**

Nas Seções 4.2 e 4.3 estudou-se a relação entre a tensão e a potência reativa, através de índices de estabilidade de tensão e através de uma seqüência de soluções do problema do fluxo de carga.

Nesta seção estuda-se a relação entre as tensões de excitação e a terminal que são, respectivamente a grandeza controladora e a controlada. Portanto, através da análise dessa relação deve-se saber se a ação de controle tem o efeito esperado ou não.

Porém, como já dito anteriormente, para se fazer esse tipo de estudo em programas de fluxo de carga é necessário que se agregue à barra 3977, uma barra interna e uma reatância síncrona para se representar o gerador. Ou seja, transformar a barra de geração 3977 em uma barra de tensão controlada. E introduzir uma barra fictícia representando a barra interna do gerador que é responsável pelo controle de tensão

da barra 3977. A reatância entre as barras 3978 e 3977 representa a reatância síncrona do gerador.

Os dados da máquina que representam o gerador são:

$X_d=142,6\%$  é a reatância de eixo direto,

$X_q=137,3\%$  é a reatância de eixo de quadratura, e

$S_b= 53,25\text{MVA}$  é a potência aparente na base da máquina.

Calculando-se a reatância síncrona usada nas simulações em regime permanente:

$$1- X_s = \sqrt{X_d^2 + X_q^2} \quad \therefore X_s = 197,95\% \quad \text{Reatância Real da Máquina}$$

$$2- X_{s_n} = X_a * \left( \frac{V_a}{V_n} \right)^2 * \frac{S_n}{S_a} \quad \therefore X_{s_n} = 1,9795 * \frac{100}{53,25} \quad \therefore$$

$X_{s_n} = 3,717 \text{ pu}$  é a reatância síncrona da máquina referida na base do sistema.

Nas Figuras 4.3 e 4.4 são mostrados os diagramas unifilares do sistema antes e depois da inserção da barra interna 3978.

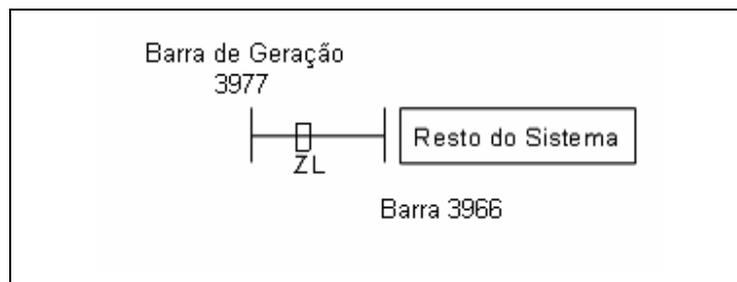


Figura 4.3- Diagrama Unifilar sem a Representação da Barra Interna 3978

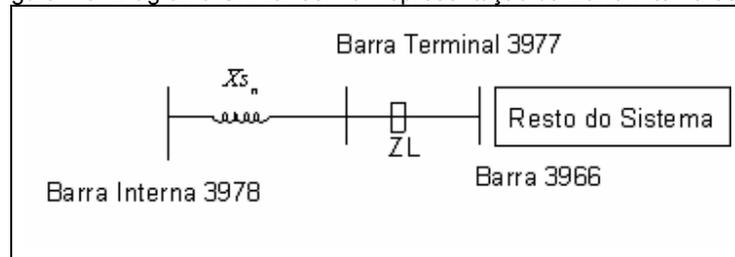


Figura 4.4- Diagrama Unifilar com a Representação da Barra Interna 3978

Nas Tabelas 4.5 e 4.6 estão as variações do módulo da tensão na barra interna e do módulo da tensão na barra terminal, respectivamente para pontos de operação na região normal e anormal da curva SV. A linha de dados com o símbolo (\*) corresponde o ponto de operação do caso-base do sistema.

Tabela 4.5– Tensão de Excitação e Tensão Terminal a partir de um Ponto na Região Normal de Operação

Módulo da Tensão na Barra Interna (pu)	Módulo da Tensão na Barra Terminal (pu)
1,120	1,070
1,115	1,065
1,110	1,060
1,107*	1,057*
1,094	1,050
1,057	1,030
1,037	1,020

Tabela 4.6– Tensão de Excitação e Tensão Terminal a partir de um Ponto na Região Anormal de Operação

Módulo da Tensão na Barra Interna (pu)	Módulo da Tensão na Barra Terminal (pu)
1,070	1,065
1,075	1,060
1,080	1,059
1,100	1,058
1,133*	1,057*
1,140	1,056
1,150	1,055

As curvas das Figuras 4.5 e 4.6 correspondem aos pontos de operação das Tabelas 4.5 e 4.6, respectivamente. Comprova-se a relação direta e oposta entre a tensão na barra interna e a tensão na barra terminal do gerador, respectivamente nas Figuras 4.5 e 4.6. No caso da relação oposta, seria equivalente a dizer que o acréscimo na tensão de excitação provocaria a redução na tensão terminal. Já no caso da relação direta, a tensão de excitação e a tensão terminal variam no mesmo sentido.

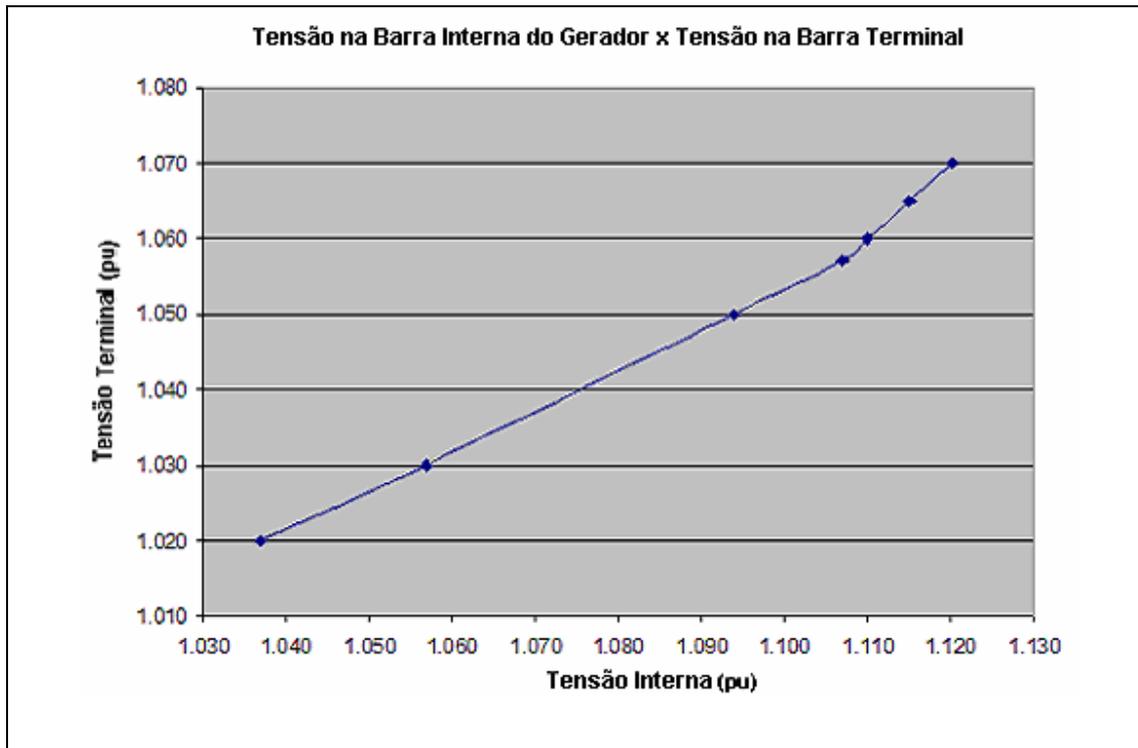


Figura 4.5- Tensão Interna x Tensão Terminal a partir de um Ponto na Região Normal de Operação

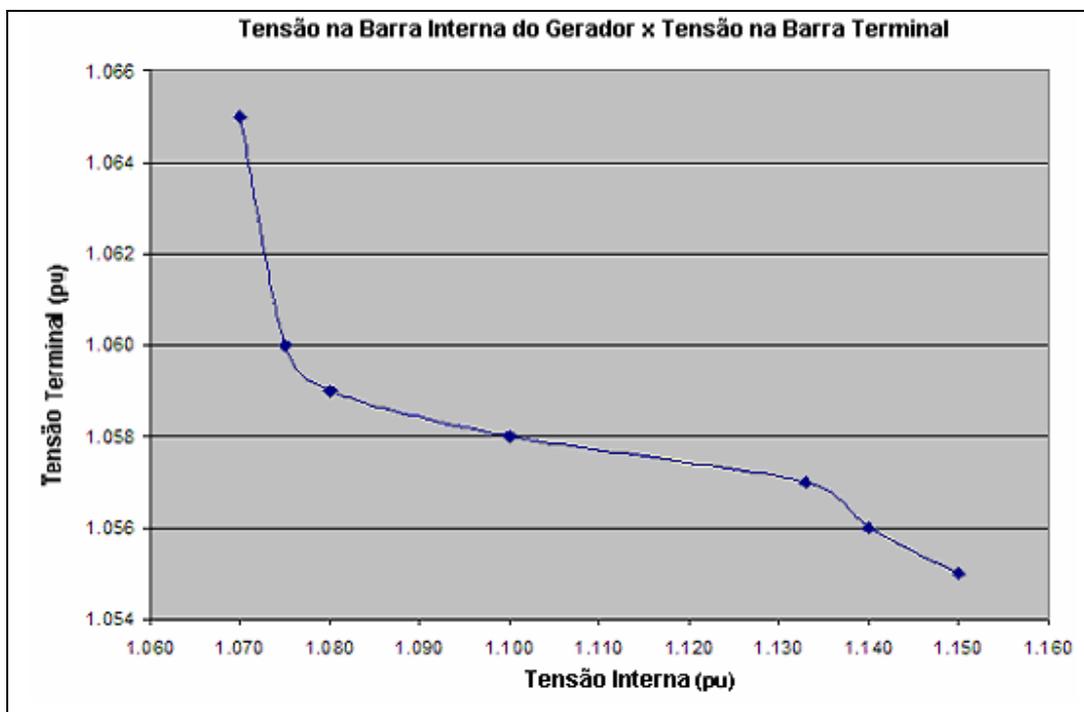


Figura 4.6- Tensão Interna x Tensão Terminal a partir de um Ponto na Região Anormal de Operação

## 4.5

### Análise Dinâmica

Será utilizado este tipo de análise para o entendimento do efeito de ações de controle de tensão no domínio do tempo, como já feito no capítulo anterior.

Deseja-se analisar a influência das ações de controle de tensão do gerador sobre a barra de tensão controlada. Será utilizado nesta análise o mesmo sistema dos itens anteriores. Como antes, deseja-se saber quais as relações entre a tensão terminal, a potência reativa e a tensão de excitação da máquina.

Para a realização da simulação numérica, utilizou-se o modelo clássico de gerador, o mesmo feito no capítulo anterior.

Simulou-se uma inserção de capacitor shunt na barra terminal do gerador para verificar o comportamento da tensão terminal, tensão de excitação e potência reativa gerada. Pois, sem a presença do regulador de tensão não é possível verificar o efeito do controle de tensão propriamente dito, como serial ideal. Isto por que não se pode alterar a tensão de referência do regulador de tensão.

Com o sistema na região normal de operação, reduziu-se o módulo da tensão na barra terminal de 1,057 pu para 1,051 pu. Como consequência, a tensão da barra interna variou de 1,107 pu para 1,094 pu, enquanto que o fluxo de potência reativa chegando na barra terminal foi de 96,7 Mvar para 79,3 Mvar. Isso pode ser observado nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9.

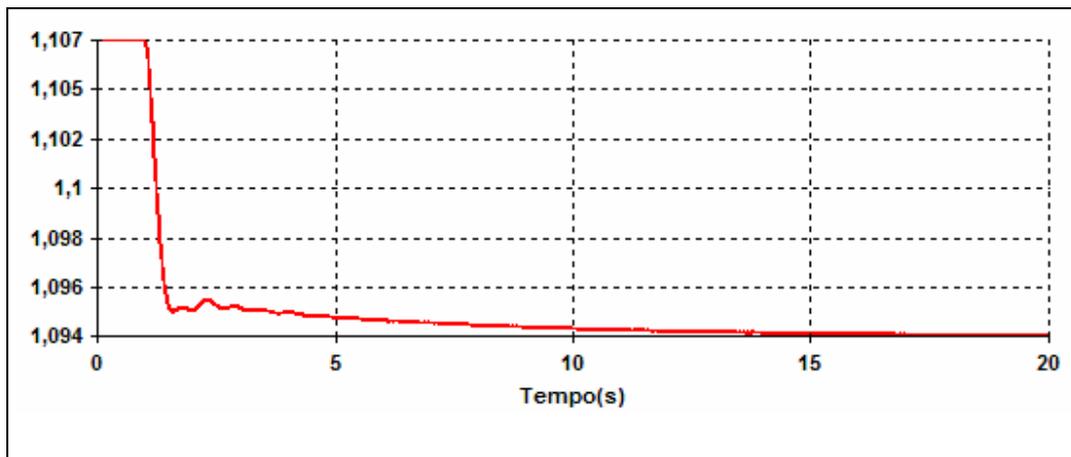


Figura 4.7- Tensão de Excitação da Máquina

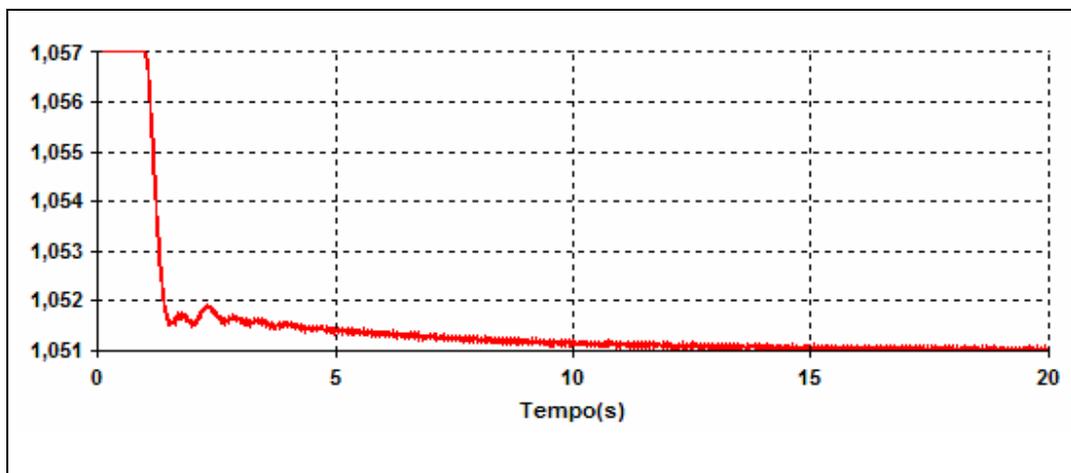


Figura 4.8- Tensão Terminal

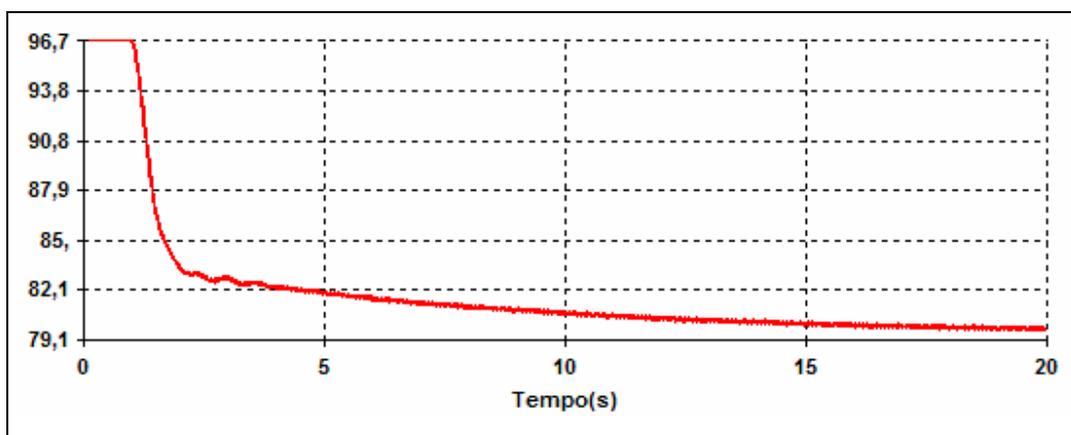


Figura 4.9- Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal

Com o sistema na região anormal de operação, aumentou-se o módulo da tensão na barra terminal do gerador de 1,057 pu para 1,058 pu. Como consequência, a tensão da barra interna variou de 1,133 pu para 1,10 pu, enquanto que o fluxo de potência reativa que chega na barra terminal foi de 173,13 Mvar para 170,06 Mvar. Isso pode ser observado nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12.

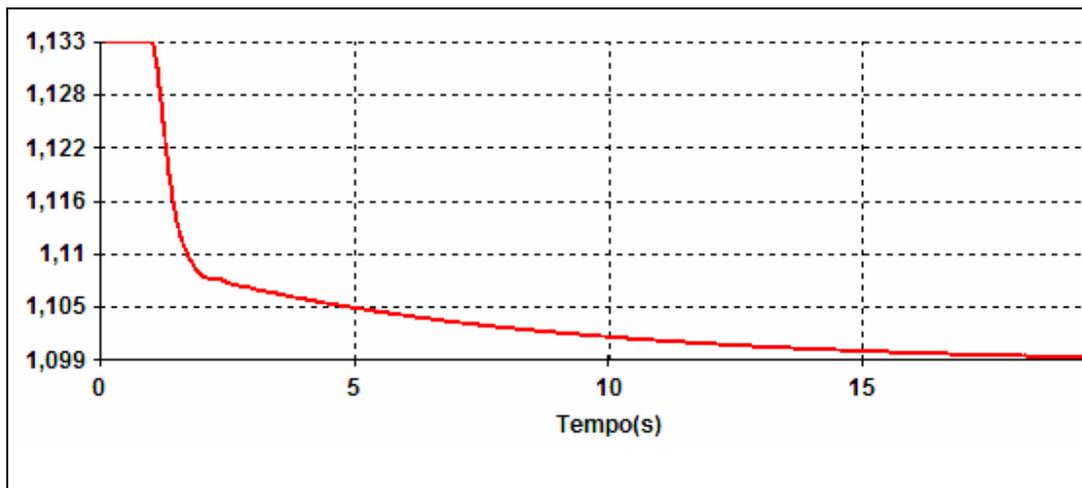


Figura 4.10- Tensão de Excitação da Máquina

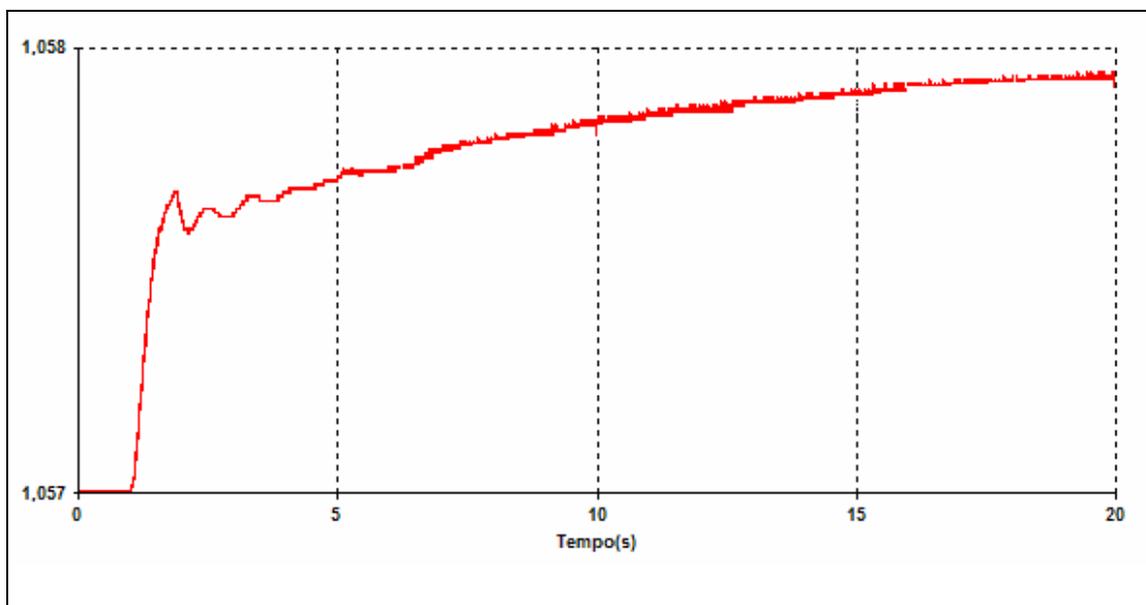


Figura 4.11- Tensão Terminal

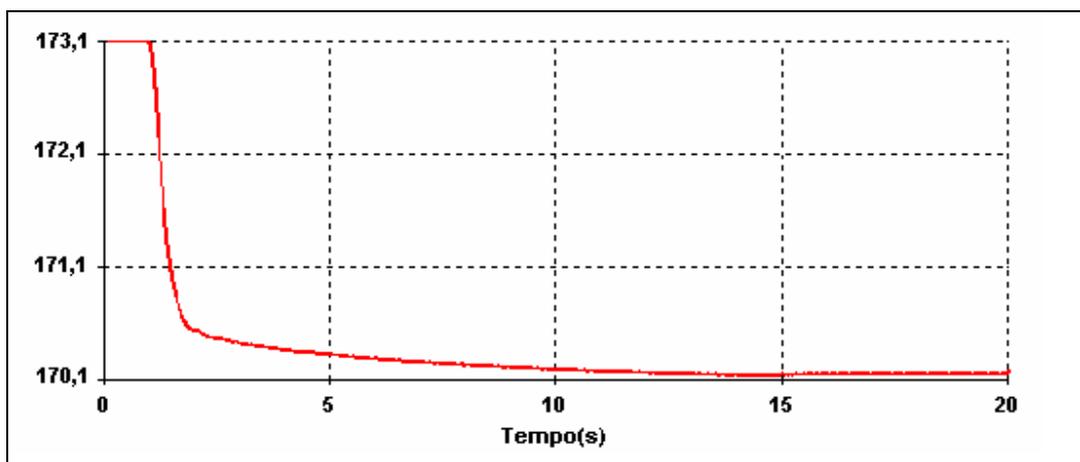


Figura 4.12- Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal

Observando as curvas correspondentes à região anormal de operação, Figuras 4.10, 4.11 e 4.12, respectivamente, da tensão na barra interna, da barra terminal e do fluxo de potência reativa, percebe-se que, após a ação de controle, o sistema respondeu de forma oposta ao esperado. Por outro lado, quando o sistema se encontra na região normal de operação isso não aconteceu.

As análises através da simulação no domínio do tempo apresentaram resultados coerentes com as análises em regime permanente através dos índices de estabilidade de tensão e da seqüência de soluções do fluxo de potência.

#### 4.5.1

##### Análise Dinâmica Agregada

O ensaio a seguir adota o mesmo sistema, porém tendo-se associado à barra de geração o modelo dinâmico 03 de gerador da biblioteca do ANATEM, e um regulador de tensão, modelo via CDU. São os modelos adotados pelo ONS para estudos de planejamento da operação para a usina Macaé Merchant.

Foi aplicado um degrau na tensão de referência da barra terminal do gerador com a finalidade de se verificar o comportamento da tensão terminal, tensão de excitação e potência reativa gerada.

Com o sistema na região normal de operação, reduziu-se o módulo da tensão na barra terminal de 1,057 pu para 1,040 pu. Como consequência, a tensão da barra interna variou de 1,107 pu para 1,075 pu, enquanto que o fluxo de potência reativa chegando na barra terminal foi de 96,7 Mvar para 53,5 Mvar. Isso pode ser observado nas Figuras 4.13, 4.14 e 4.15.

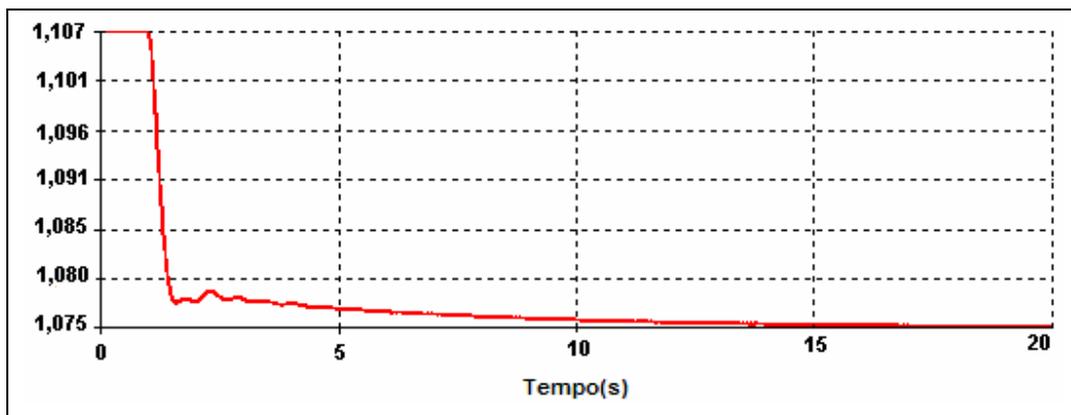


Figura 4.13- Tensão de Excitação da Máquina

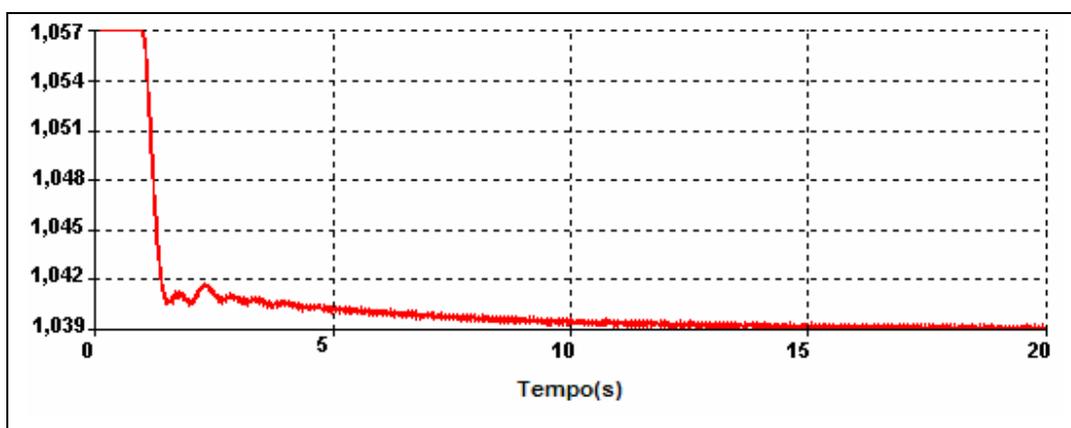


Figura 4.14- Tensão Terminal

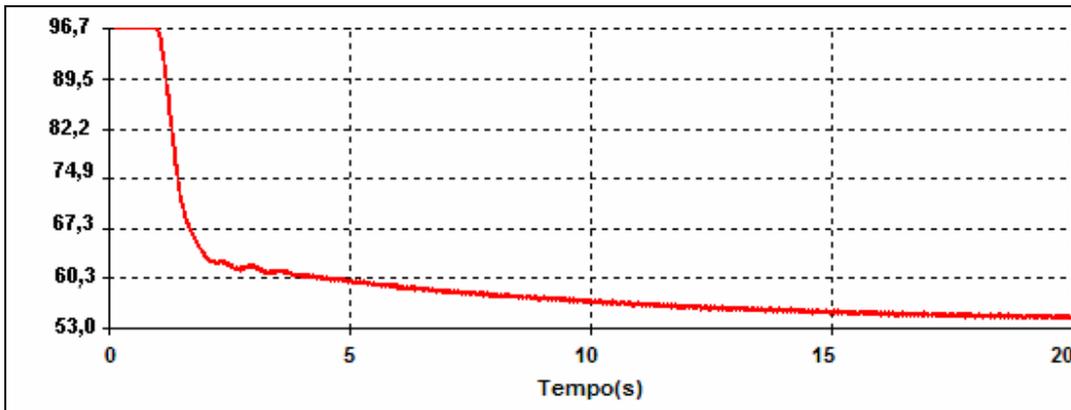


Figura 4.15- Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal

Com o sistema na região anormal de operação reduziu-se a tensão na barra terminal de 1,057 pu para 1,04 pu. Como conseqüência, a tensão de excitação variou de 1,133 pu para 1,01 pu, enquanto que o fluxo de potência reativa chegando na barra terminal foi de 173,13 Mvar para 118,1 Mvar. Isso pode ser observado nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18.

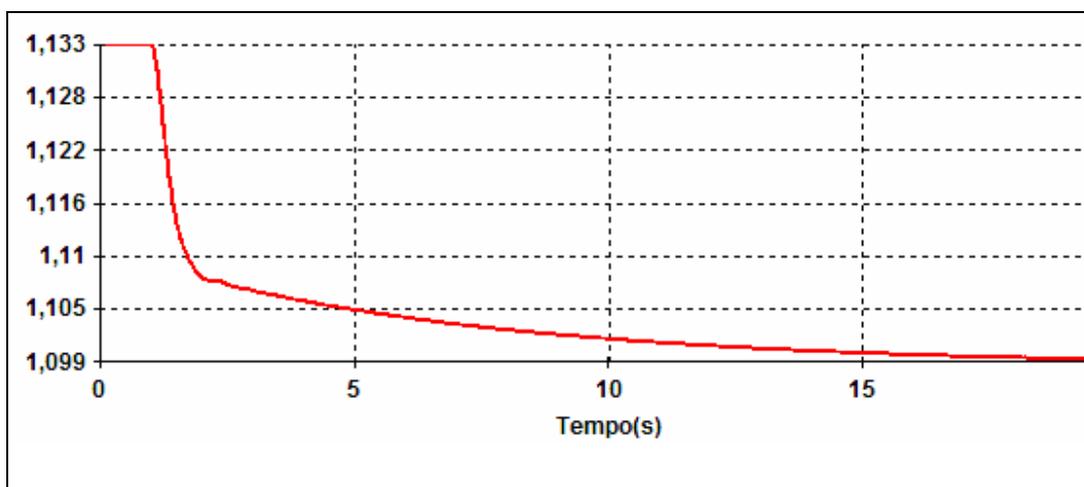


Figura 4.16- Tensão de Excitação da Máquina

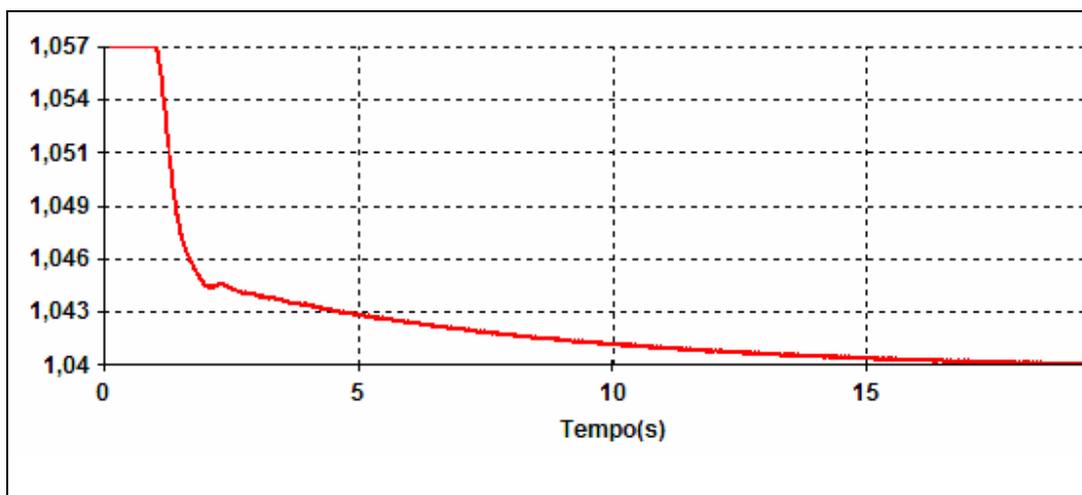


Figura 4.17- Tensão Terminal

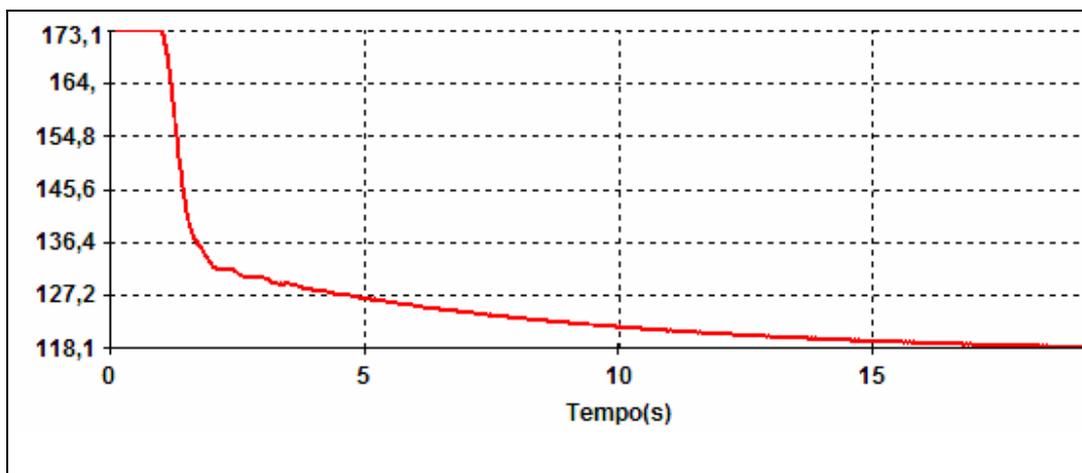


Figura 4.18- Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal

Observa-se que a ação de controle de tensão do gerador atuou de forma esperada, mesmo com o sistema estando na região anormal de operação da curva SV. Pode-se concluir então que na análise no domínio do tempo, utilizando a ferramenta computacional ANATEM, quando se tem agregado um modelo de gerador dinâmico e um modelo de regulador de tensão, existe a possibilidade de divergência de resultados comparando com as análises de regime permanente e com a análise dinâmica com modelo clássico de gerador. Nesse caso, o ponto de operação final na análise no domínio do tempo foi um outro ponto diferente daquele obtido por um algoritmo de fluxo de carga.

## 4.5.2

### Análise Dinâmica Agregada sob Influência dos Equipamentos de Controle de Tensão

O ensaio a seguir adota o mesmo sistema e ponto de operação na região anormal da curva SV utilizado na análise dinâmica agregada, porém leva-se em consideração a influência dos demais equipamentos de controle de tensão eletricamente próximos ao gerador.

Analisou-se o sistema somente na região anormal da curva SV por que os resultados das várias análises anteriores foram coerentes no ponto da região normal de operação.

Na Figura 4.19 está detalhada a região onde se encontra o gerador e todos os equipamentos de controle de tensão que podem causar alguma influência em seu funcionamento.

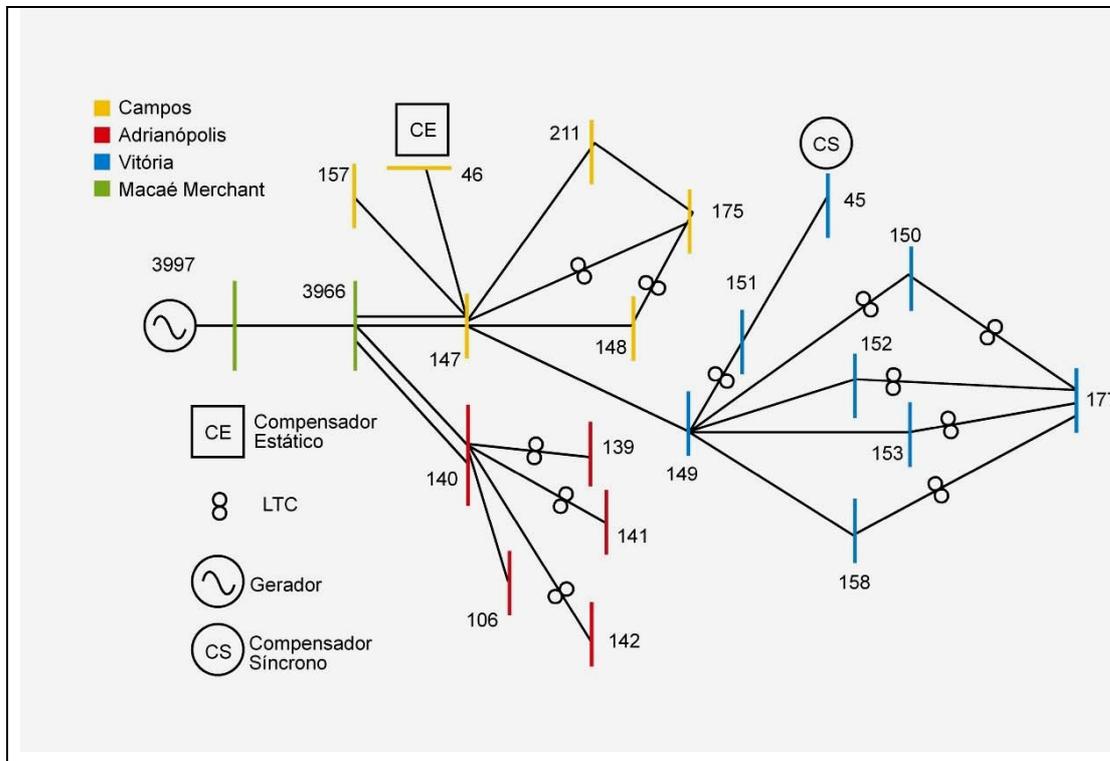


Figura 4.19 – Região de Análise

Os equipamentos de controle de tensão são:

- transformador de tap variável controlando a tensão na barra 175 da área Campos;
- transformador de tap variável controlando a tensão na barra 151 da área Vitória;
- transformador de tap variável controlando a tensão na barra 140 da área Adrianópolis;
- transformador de tap variável controlando a tensão na barra 177 da área de Vitória;
- compensador síncrono controlando a tensão na barra 45 da área de Vitória ;
- compensador estático controlando a tensão na barra 46 da área de Campos ;

Como nas seções anteriores, será aplicado um degrau na tensão de referência da barra terminal, com a finalidade de se observar o comportamento dinâmico do gerador e dos demais equipamentos de controle de tensão.

Reduziu-se o módulo da tensão na barra terminal de 1,057 pu para 1,037 pu. Como consequência, a tensão de excitação variou de 1,133 pu para 1,035 pu, enquanto que o fluxo de potência reativa chegando na barra terminal foi de 173,13 Mvar para 107,45 Mvar. Isso pode ser observado nos 15 segundos iniciais de simulação.

Em decorrência da ação dos LTCs, com tempo de comutação próximo dos 15 segundos, percebeu-se que a tensão na barra terminal variou de 1,037 pu para 1,035 pu. Como consequência, a tensão de excitação variou de 1,035 pu para 1,044 pu, enquanto que o fluxo de potência reativa chegando na barra terminal foi de 107,45 Mvar para 115 Mvar. Isso pode ser observado nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22.

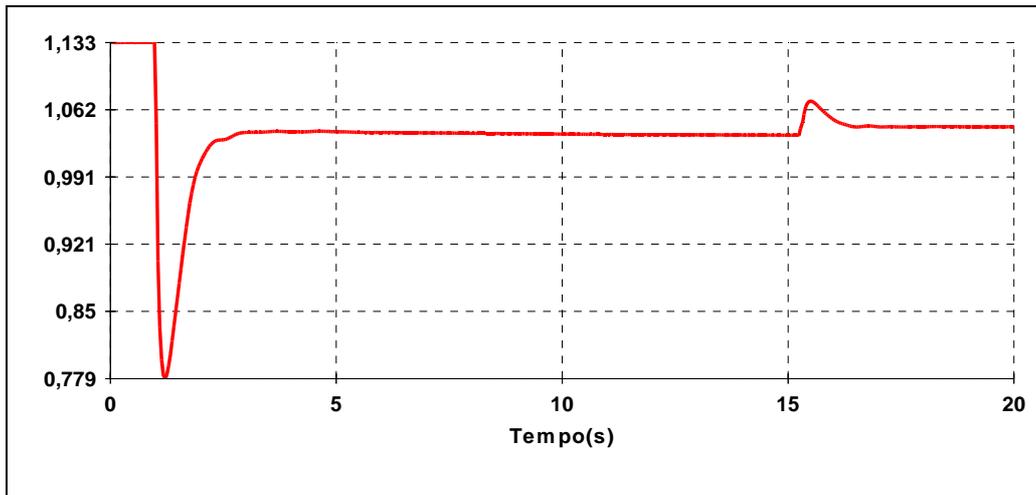


Figura 4.20- Tensão de Excitação da Máquina

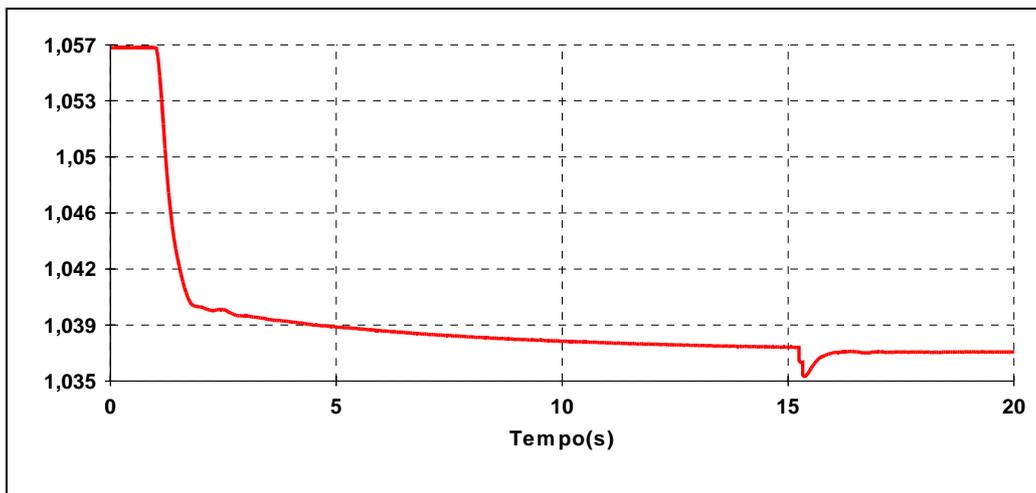


Figura 4.21- Tensão na Barra Terminal 3977

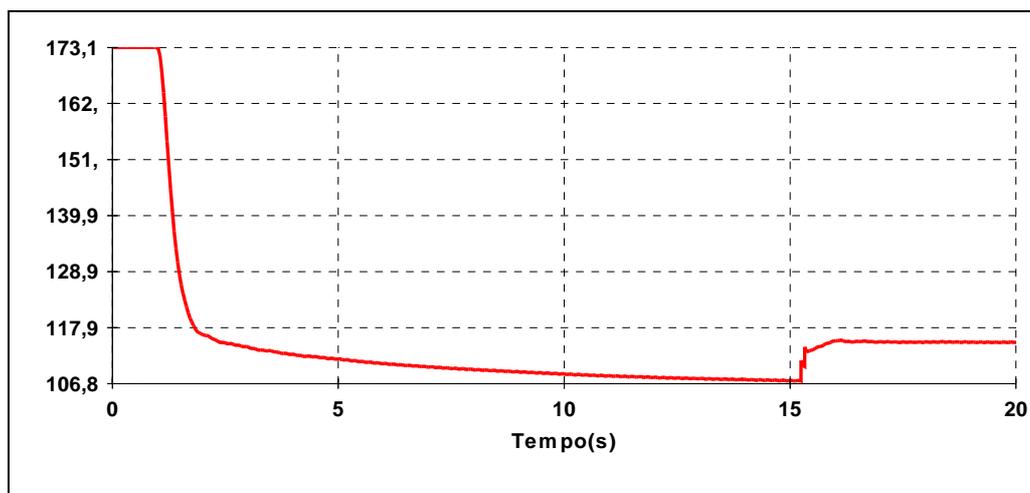


Figura 4.22- Fluxo de Potência Reativa na Barra Terminal 3977

Observa-se que a ação de controle de tensão do gerador atuou de forma esperada, mesmo com o sistema estando na região anormal de operação da curva SV, da mesma forma que na seção anterior, quando os controles de tensão dos equipamentos próximos ao gerador em análise estavam bloqueados.

### 4.5.3

#### Comportamento dos Equipamentos de Controle de Tensão

O problema de estabilidade de tensão envolve fenômenos rápidos e/ou fenômenos lentos. A velocidade destes fenômenos está relacionada com a rapidez das respostas dos dispositivos de controle. Os dispositivos de controle relevantes ao desenvolvimento do fenômeno da estabilidade de tensão de longo termo são os sistemas de controle de troca automática de taps dos transformadores, e de compensadores síncronos e estáticos. Nas próximas seções será mostrado o comportamento dinâmico de cada equipamento de controle de tensão da região, mediante a ação de controle realizada na barra 3977.

#### 4.5.3.1

##### Funcionamento dos LTCs

Nas figuras a seguir mostra-se o funcionamento dos LTCs localizados nas regiões de Campos, Vitória e Adrianópolis. Na Figura 4.23 é mostrado o comportamento do

módulo da tensão na barra 175 de Campos, variando de 1,05 pu para 1,044. Após a ação de controle do LTC percebe-se que o valor da tensão tendeu para o valor inicial.

A atuação do LTC é vista na Figura 4.24, em que o tap do transformador é acionado após o período de 15 segundos no sentido de aumentar o módulo da tensão na barra 175. O valor do tap variou de 1,041 pu a 1,050 pu.

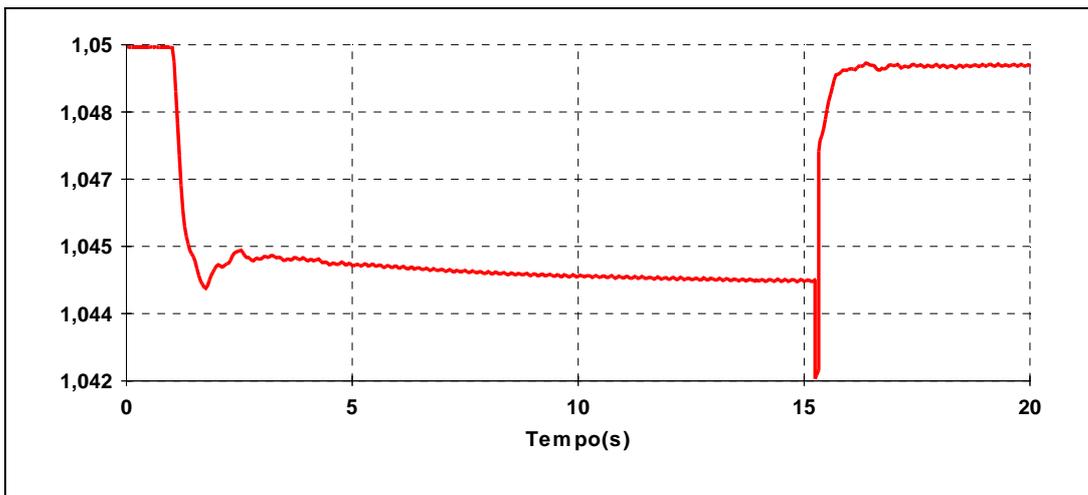


Figura 4.23- Tensão na Barra 175 de Campos

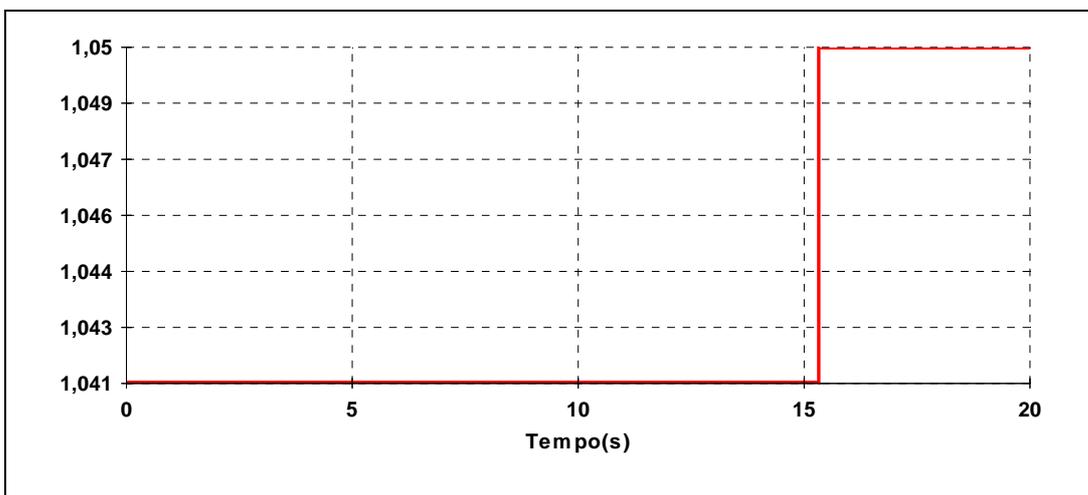


Figura 4.24- Variação do Tap na Barra 175 de Campos

Na Figura 4.25 é mostrado o comportamento do módulo da tensão na barra 177 de Vitória, variando de 1,024 pu para 1,019 pu. Após a ação de controle do LTC, o valor da tensão tendeu para 1,022 pu. Neste caso, o módulo da tensão na barra 177 sofre uma pequena redução em relação ao seu valor inicial.

A atuação do LTC é vista na Figura 4.26, em que o tap do transformador é acionado após o período de 15 segundos no sentido de aumentar o módulo da tensão na barra 177. O valor do tap variou de 1,041 pu a 1,045 pu.

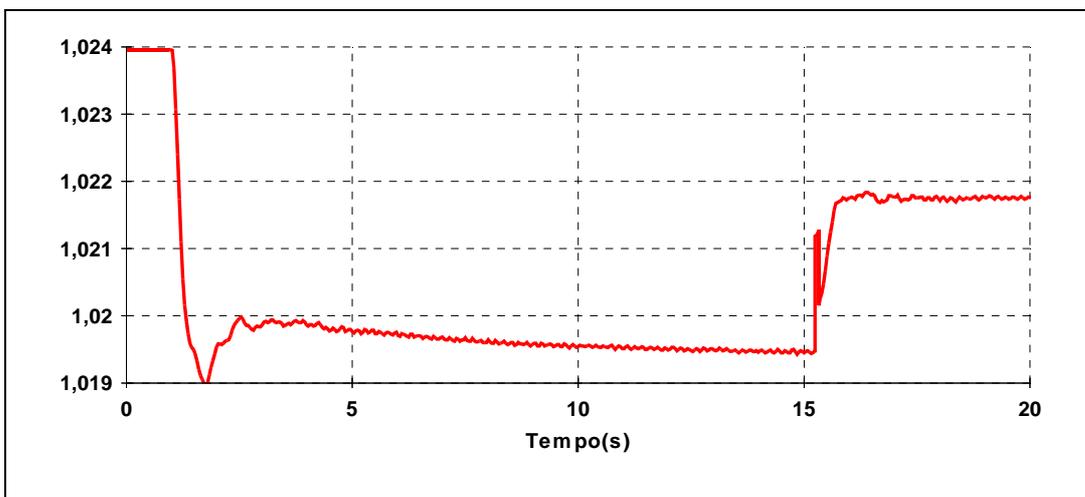


Figura 4.25- Tensão na Barra 177 de Vitória

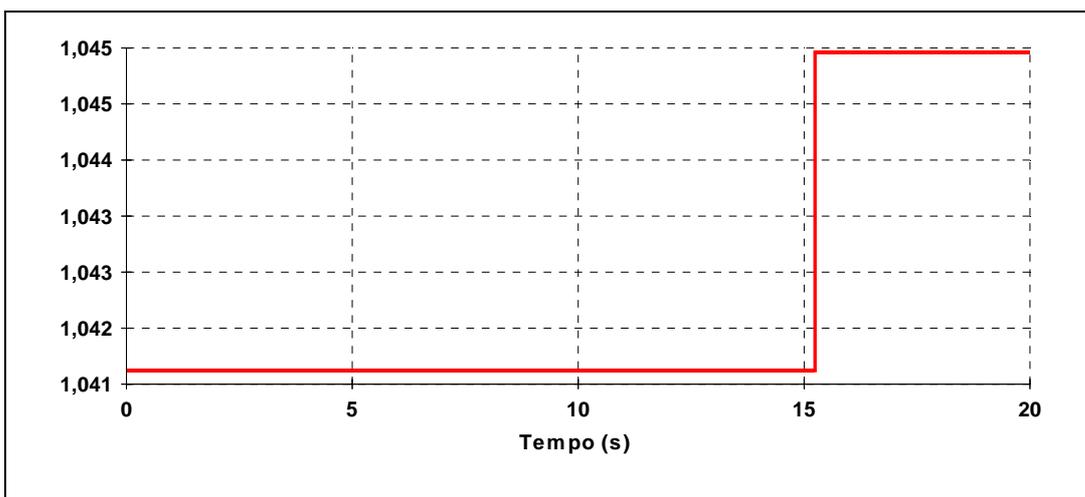


Figura 4.26- Variação do Tap na Barra 177 de Vitória

Na Figura 4.27 é mostrado o comportamento do módulo da tensão na barra 3966 de Macaé Merchant, variando de 1,035 pu para 1,025 pu. E após a ação de controle dos LTCs da região, o valor da tensão chegou a 1,023 pu.

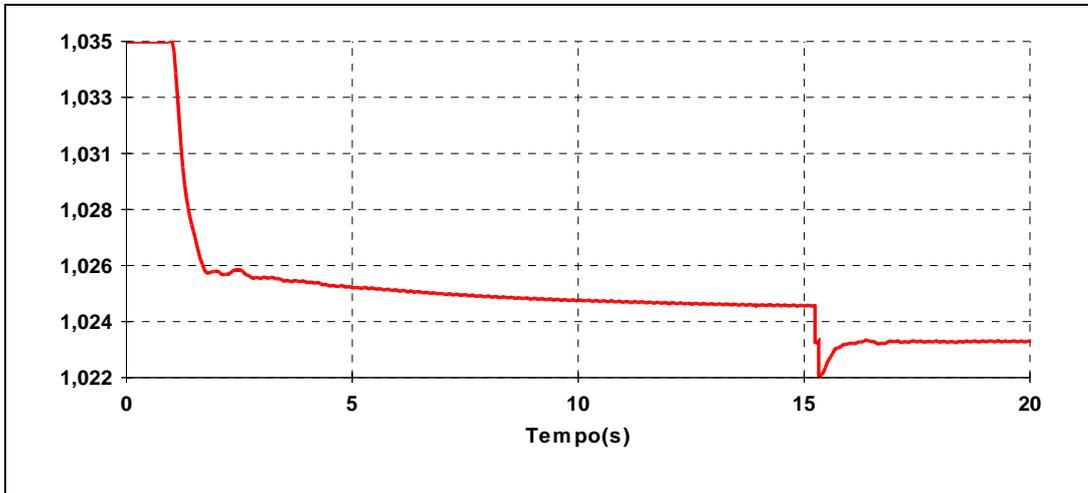


Figura 4.27- Tensão na Barra 3966 de Macaé Merchant

Na Figura 4.28 é mostrado o comportamento do módulo da tensão na barra 140 de Adrianópolis, variando de 1,025 pu para 1,022 pu. E após a ação de controle dos LTCs da região, o valor da tensão chegou a 1,021 pu.

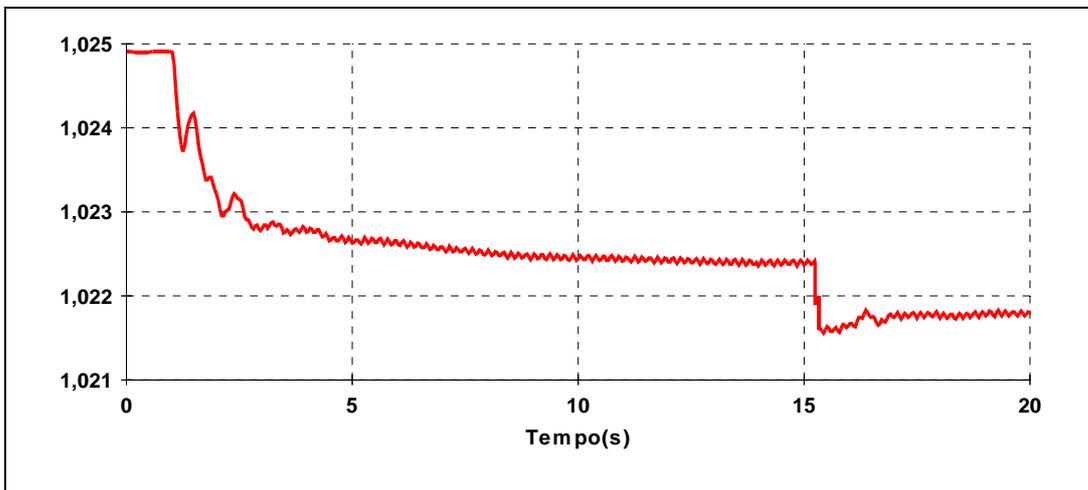


Figura 4.28- Tensão na Barra 140 de Adrianópolis

Na Figura 4.29 é mostrado o comportamento do módulo da tensão na barra 147 de Campos, variando de 1,017 pu para 1,011 pu. E após a ação de controle dos LTCs da região, o valor da tensão chegou a 1,009 pu.

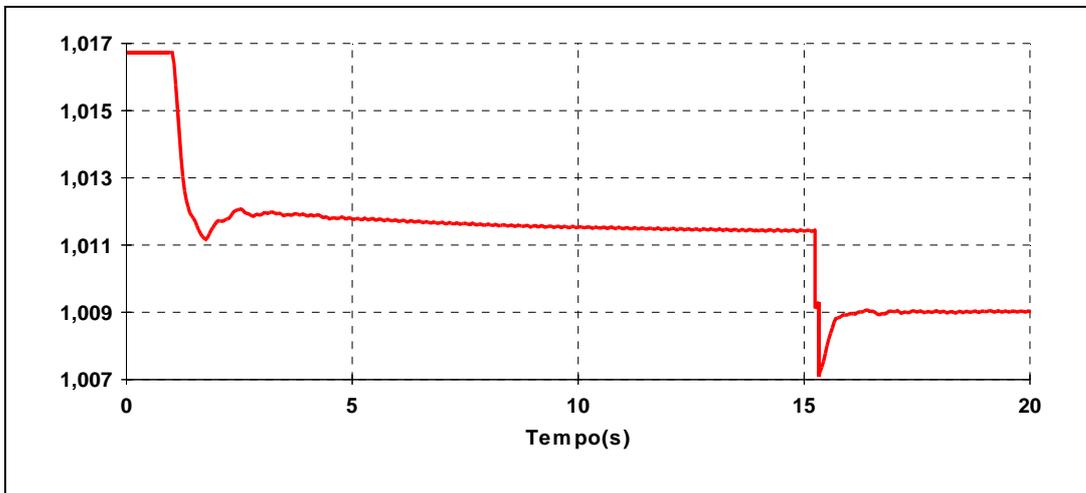


Figura 4.29- Tensão na Barra 147 de Campos

Na Figura 4.30 é mostrado o comportamento do módulo da tensão na barra 149 de Vitória, variando de 0,990 pu para 0,985 pu. E após a ação de controle dos LTCs da região, o valor da tensão chegou a 0,980 pu.

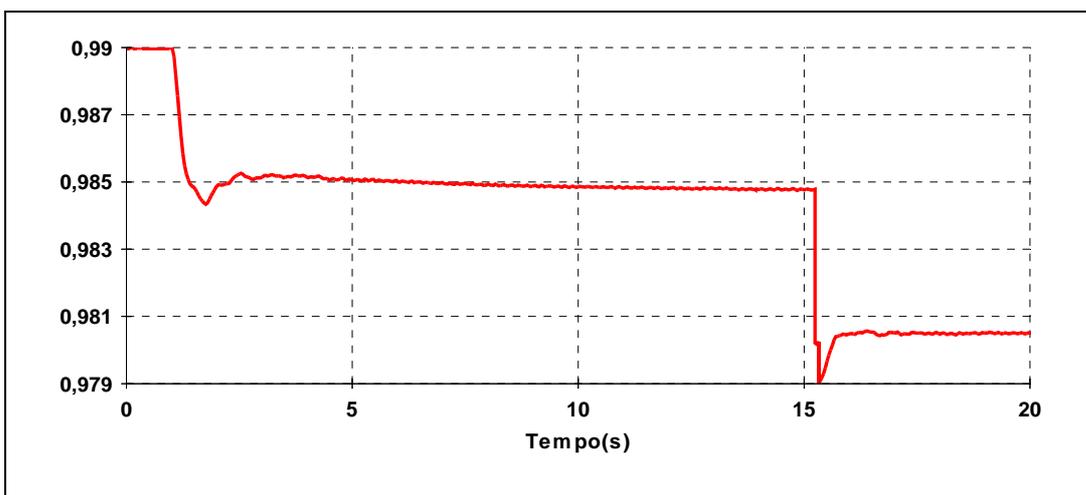


Figura 4.30- Tensão na Barra 149 de Vitória

A explicação para a redução do módulo da tensão nestas barras, após a ação de controle dos LTCs, é baseada no fato de que a configuração do circuito do transformador é do tipo pi-equivalente, e quando a troca de tap tem a finalidade de elevar o módulo da tensão nas barras de tensão controlada 175 e 177, no lado secundário do transformador, faz com que os elementos shunt representem um reator no lado do primário e um capacitor no lado do secundário. Então, quando o LTC atua para elevar a tensão no lado do secundário, o elemento shunt do primário é um reator, o que explica a redução no módulo da tensão das barras da região.

#### **4.5.3.2**

##### **Funcionamento do Compensador Síncrono**

Com a ação de controle realizada na barra 3977, o módulo da tensão na barra 45 variou de 0,96 pu para 0,957 pu, mas a medida que o regulador de tensão do compensador percebe essa redução, sua ação é imediata através da elevação da tensão de excitação da máquina de 2,79 pu para 2,88 pu. Há um conseqüente aumento da potência reativa gerada de 51,6 Mvar para 56,55 Mvar, fazendo com que haja o restabelecimento no módulo da tensão na barra.

Porém, no instante em que os controles dos LTCs começam a funcionar, percebe-se uma outra redução no módulo da tensão na barra 45 para 0,956 pu. Mas, neste caso, o controle de tensão do compensador síncrono não atua, pois o limite máximo de 2,88 pu da tensão de excitação da máquina foi alcançado, tornando assim impossível uma ação de controle de tensão por parte do compensador. Estas conclusões foram tiradas a partir das Figuras 4.31, 4.32 e 4.33.

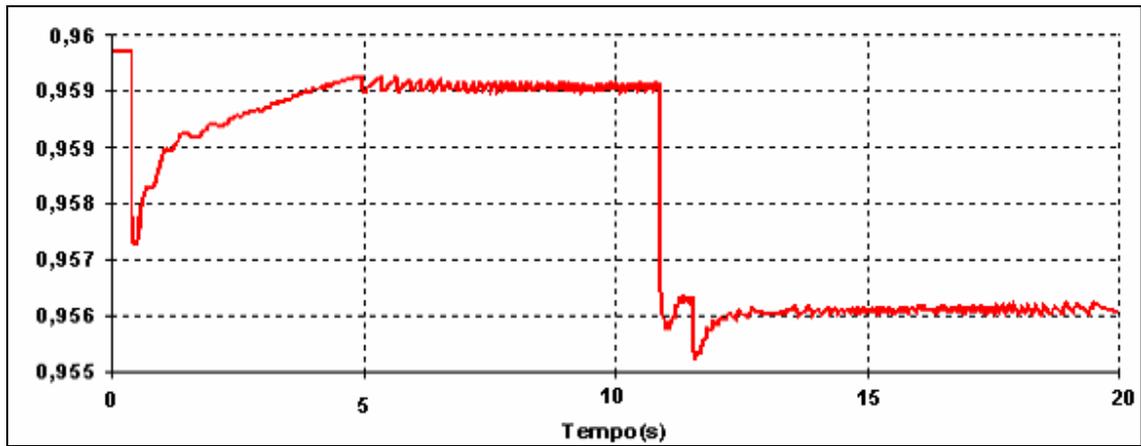


Figura 4.31- Tensão na Barra 45 de Vitória

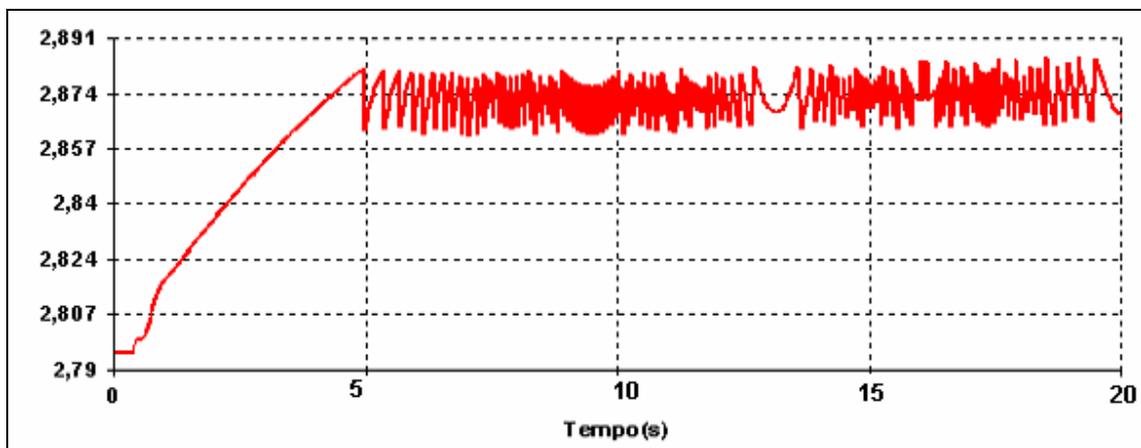


Figura 4.32- Tensão de Excitação da Máquina

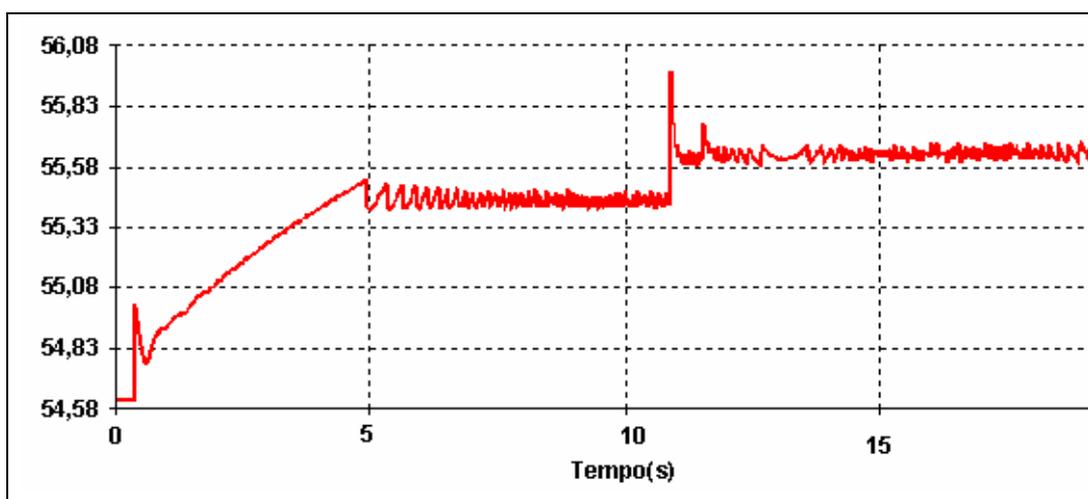


Figura 4.33- Potência Reativa na Barra 45 de Vitória

### 4.5.3.3

#### Funcionamento do Compensador Estático

Inicialmente, devido às conseqüências da ação de controle na barra 3977, o módulo da tensão na barra 46 sofre uma pequena redução de 1,103 pu para 1,098 pu. Contudo, a atuação do compensador estático é imediata e há um aumento da potência reativa gerada de 71,1 Mvar para 90 Mvar.

Porém, após a ação de controle dos LTCs, o módulo da tensão na barra 46 novamente começa a aumentar chegando a 1,033 pu, certamente devido a uma outra atuação do compensador com um aumento da potência reativa para 106 Mvar. Estas conclusões foram feitas a partir das Figuras 4.33 e 4.34.

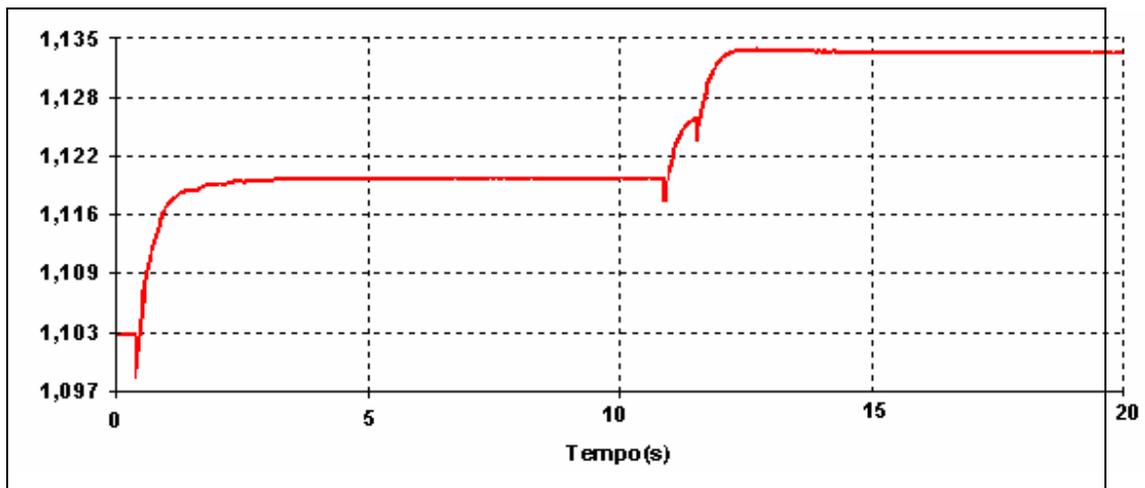


Figura 4.34- Tensão na Barra 46 de Campos

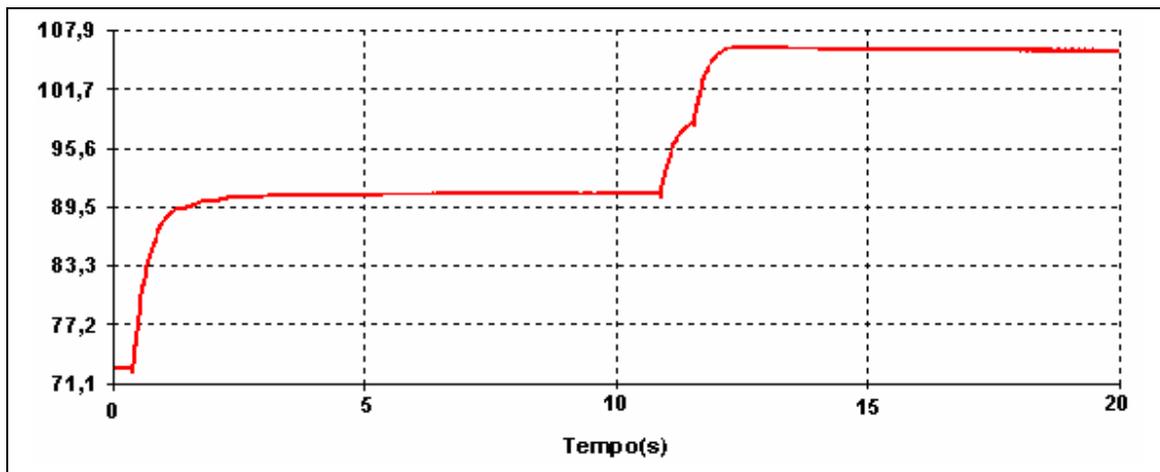


Figura 4.35- Potência Reativa na Barra 46 de Campos

## 4.6

### Conclusões

O resultado de ações de controle de tensão em barras de tensão controlada por gerador foi analisado de três formas diferentes: através de índices de estabilidade de tensão, de uma seqüência de soluções do problema do fluxo de potência, e através de simulação no domínio do tempo. Essas análises foram realizadas considerando-se dois cenários: quando o gerador está conectado a um sistema decrescido de 10% da carga pesada e em carga pesada.

Na Tabela 4.7 encontra-se um resumo dos resultados qualitativos de todos os testes analisados neste capítulo. Os símbolos de aprovação e reprovação indicam se os testes representam de forma correta ou não as respostas esperadas para a região normal e anormal da curva SV.

Tabela 4.7- Análise Qualitativa dos Testes Realizados

	Índices de Estabilidade de Tensão	Algoritmo Fluxo de Carga	Tensão de Excitação x Tensão Terminal	Análise Dinâmica	Análise Dinâmica Agregada	Análise Dinâmica Agregada sob Influência de Controles
Ponto de Operação na Região Normal	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ponto de Operação na Região Anormal	✓	✓	✓	✓	✗	✗

Foram calculados os índices de estabilidade de tensão para dois pontos-base de operação. Os sinais dos índices, como o ângulo  $\beta$  e a margem de potência para a barra terminal do gerador 3977, determinaram a região de operação na curva SV. Índices positivos indicaram o ponto de operação do caso com o sistema menos carregado na região normal de operação. Índices negativos indicaram o ponto de operação do caso mais carregado na região anormal.

Com o sistema mais carregado, o índice  $\frac{\partial Q}{\partial V}$  da barra de geração, que relaciona a variação entre a potência reativa gerada e o módulo da tensão tem sinal oposto ao usual. O mesmo acontece com o índice  $\frac{\partial V_o}{\partial E_g}$  que relaciona a variação entre a tensão na barra terminal e a tensão de excitação.

Através da análise de uma seqüência de soluções do algoritmo de fluxo de carga, pôde-se concluir que a barra terminal do gerador, quando se encontra na região anormal de operação, tem relação entre a tensão terminal e a potência reativa gerada oposta ao usual. Para a região normal isso não acontece.

Comprovou-se também que a tensão de excitação e a tensão terminal, para pontos de operação na região anormal, tem relação oposta ao usual. Já para pontos de operação na região normal tem-se a relação esperada.

A análise dinâmica apresenta o mesmo resultado qualitativo. Observaram-se as relações opostas entre a tensão na barra interna e a tensão na barra terminal do gerador e também entre o fluxo de potência reativa e o módulo da tensão na barra terminal. Já na região normal de operação, isso não aconteceu. Nesta simulação o gerador foi representado pelo modelo clássico.

Na análise dinâmica agregada, utilizando-se um modelo dinâmico de gerador e um regulador de tensão agregado, observou-se que na região anormal de operação, a ação de controle de tensão do gerador atuou de forma esperada, ou seja, com o acréscimo da tensão na barra terminal do gerador, a tensão de excitação da máquina aumenta e o fluxo de potência reativa também. Pôde-se concluir então que, quando se utiliza um modelo dinâmico de gerador e um regulador de tensão agregado, existe a possibilidade de divergência entre os resultados e os obtidos com os índices de estabilidade de tensão, com a análise de soluções do algoritmo de fluxo de carga e com a análise dinâmica com modelo clássico de gerador. Para a região normal de operação, todas as análises levaram ao mesmo resultado qualitativo.

Na análise dinâmica agregada sob influência dos equipamentos de controle de tensão, observou-se que as únicas ações de controle que influenciaram de modo significativo no comportamento dinâmico do gerador foram as dos LTCs.

O comportamento das ações de controle do gerador para esta análise foi semelhante com o comportamento da análise dinâmica agregada, ou seja, a ação de controle de tensão do gerador atuou de forma esperada, mesmo com o sistema na região anormal da curva SV.