Avaliação da Existência do Fenômeno

3.1 Descrição e Importância do Problema

Os geradores síncronos são fontes primárias de potência reativa e são em grande parte responsáveis pela manutenção de um adequado perfil de tensão nos sistemas de potência. Nota-se que em muitas ocorrências envolvendo estabilidade de tensão, um ou mais geradores estavam operando com a limitada capacidade de potência reativa esgotada.

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

Quando um gerador está conectado a um sistema interligado contendo outros geradores síncronos, a tensão e a freqüência 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.

A verificação do comportamento do gerador como dispositivo de controle de tensão torna-se necessária já que, se funcionar de forma inversa, poderá levar o sistema ao colapso por problemas de tensão. O interesse então é avaliar o efeito em regime permanente e no domínio do tempo para as ações de controle que envolve os geradores. Deve-se analisar se uma ação de controle produz o efeito esperado ou inverso.

3.2 Índices de Estabilidade de Tensão

Os índices associados à estabilidade de tensão descritos no Capítulo 2, serão utilizados neste trabalho como ferramenta analítica para identificar pontos de operação em que as ações de controle de tensão tenham efeitos opostos ao esperado.

O programa computacional EstabTen, implementado e acoplado ao programa ANAREDE¹, é adequado para a avaliação do carregamento da rede de transmissão através dos cálculos dos índices de estabilidade de tensão. Estes índices são calculados para todas as barras, incluindo as barras com geradores e compensadores síncronos.

Inicialmente será utilizado um sistema-teste de duas barras com pontos de operação na região normal e anormal, isto é, na parte superior e na inferior da curva SV.

Para as simulações numéricas, o gerador foi modelado por tensão constante atrás da reatância síncrona, como é adequado em estudos de regime permanente. O diagrama unifilar é mostrado na Figura 3.1. A barra G é a barra interna do gerador atrás de sua reatância síncrona X_s , a barra 0 é a barra terminal do gerador que esta ligada à barra 1 por uma linha com impedância Z_t e a barra 1 tem uma de carga com fator de potência constante.



Figura 3.1 – Sistema - Teste de 2 Barras

¹Ferramenta computacional de propriedade do CEPEL, cedida para fins de ensino e pesquisa

$V_0(pu) \angle \theta_0(graus)$	1,00∠-9.4 ⁰
$V_1(pu) \angle \theta_1(graus)$	0,995∠-9,7 ⁰
$E_{g}(pu)\angle \theta_{g}(graus)$	1,158∠2,6 ⁰
P ₁	6,0
Q ₁	3,3
Zt	0,001∠70 ⁰ pu
X _s	0,04∠90 ⁰ pu

Tabela 3.1 - Ponto de Operação na Região Normal da Curva SV

Tabela 3.2 – Ponto de Operação na Região Anormal da Curva SV

$V_0(pu) \angle \theta_0(graus)$	1,000∠0 ⁰
$V_1(pu) \angle \theta_1(graus)$	0,979∠-1 ⁰
$E_{g}(pu)\angle \theta_{g}(graus)$	1,816∠30,836 ⁰
P ₁	23,021
Q ₁	13,291
Zt	0,001∠70 ⁰ pu
X _s	0,04∠90 ⁰ pu

Nas Tabelas 3.3 e 3.4 são mostrados os índices de estabilidade de tensão do sistema de duas barras para a região normal e anormal da curva SV. O ponto de operação na região anormal é devido ao excesso de carregamento do sistema. Os índices, como o ângulo β e a margem de potência para as barras 0 e 1, mostram claramente este fato.

Na barra G, devido à condição extrema de geração de potência reativa imposta ao gerador, faz com que o índice $\frac{\partial Q}{\partial V}$ que relaciona a variação entre a potência reativa gerada e o módulo da tensão seja negativo, isto é, oposto ao usual. O mesmo

acontece com o índice $\frac{\partial\,V_{\,0}}{\partial\,Eg}\,$ que relaciona a variação entre a tensão na barra

terminal e a tensão de excitação.

Barra	Módulo da Tensão (pu)	Potência Reativa Gerada (Mvar)	Potência Ativa Gerada (MW)	Ângulo β (Graus)	Margem (%)	$\frac{\partial Q}{\partial V}$	$\frac{\partial V_0}{\partial Eg}$
G	1,158	5,2	6	0	20	1,0	1,22
0	1,00	0		117,6	100		
1	0,995	0		118,4	66		

Tabela 3.3 – Índices de Estabilidade de Tensão na Região Normal da Curva SV

Tabela 3.4 – Índices de Estabilidade de Tensão na Região Anormal da Curva SV

Barra	Módulo da Tensão (pu)	Potência Reativa Gerada (Mvar)	Potência Ativa Gerada (MW)	Ângulo β (Graus)	Margem (%)	$\frac{\partial Q}{\partial V}$	Índice ∂V₀ ∂Eg
G	1,816	43,5	23,2	-180	-1,4	-4,0	-2,95
0	1,00	0		-171,0	-100		
1	0,979	0		-171,6	-24,81		

3.3

Análise Através de Algoritmo de Fluxo de Carga

Na Seção 3.2, utilizando-se índices de estabilidade de tensão verificou-se a relação oposta ao esperado entre a potência reativa gerada e a tensão interna do gerador em um ponto de operação na região anormal da curva SV.

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 terminal do gerador, determina-se os respectivos valores dos fluxos de potência reativa. Nas Tabelas 3.5 e 3.6 estão mostradas essas variações para pontos de operação na região normal e anormal da curva SV, respectivamente. A linha de dados com o símbolo (*) corresponde aos pontos de operação do casobase do sistema.

Módulo da Tensão na Barra Terminal (pu)	Fluxo de Potência Reativa na Barra Terminal (Mvar)
0,90	4,50
0,92	4,60
0,94	4,80
0,96	4,90
0,98	5,10
1,00*	5,20*
1,04	5,30
1,07	5,40
1,10	5,50
1,15	5,60
1,20	5,70
1,25	5,90

Tabela 3.5 – Análise Através de Algoritmo de Fluxo de Carga na Região Normal de Operação

Tabela 3.6- Análise Através de Algoritmo de Fluxo de Carga na Região Anormal de Operação

Módulo da Tensão na Barra Terminal (pu)	Fluxo de Potência Reativa na Barra Terminal (Mvar)
0,82	15,30
0,84	15,20
0,86	15,00
0,88	14,90
0,90	14,80
0,92	14,70
0,94	14,50
0,96	14,40
0,98	14,20
1,00*	14,00*
1,03	13,90
1,04	13,80
1,05	13,70
1,06	13,60
1,08	13,50
1,10	13,40

As curvas nas Figuras 3.2 e 3.3 correspondem ao traçado dos pontos das Tabelas 3.5 e 3.6, respectivamente. 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. Usualmente essa curva é construída para as barras críticas do sistema, sejam barras de geração, de carga ou de passagem. Quando a barra crítica não possuir geração variável de potência reativa, assume-se uma fonte fictícia.

Pode ser levantada para qualquer ponto de operação do sistema, sendo obtida em geral, para o ponto de operação do caso-base e para o ponto de máximo carregamento.

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 sai da barra tende a diminuir e com o decréscimo no módulo da tensão o fluxo de potência reativa tende a aumentar. Já para a região normal de operação, a relação de variação entre o módulo da tensão e o fluxo de potência reativa é de forma esperada, ou seja, um acréscimo no módulo da tensão da barra terminal é seguido de um aumento do fluxo de potência reativa.



Figura 3.2- Tensão Terminal x Fluxo de Potência Reativa na Região Normal de Operação



Figura 3.3- Tensão Terminal x Fluxo de Potência Reativa na Região Anormal de Operação

3.4

Análise da Tensão de Excitação x Tensão Terminal

Nas Seções 3.2 e 3.3 estudou-se a relação entre a tensão e a potência reativa, respectivamente, 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.

Nas Tabelas 3.7 e 3.8 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.

Módulo da Tensão na Barra Interna (pu)	Módulo da Tensão na Barra Terminal (pu)
1,082	0,900
1,097	0,920
1,112	0,940
1,127	0,960
1,143	0,980
1,158*	1,000*
1,191	1,040
1,215	1,070
1,240	1,100
1,283	1,150
1,326	1,200
1,369	1,250

Tabela 3.7– Tensão de Excitação e Tensão Terminal a partir de um Ponto na Região Normal de Operação

Tabela 3.8-	Tensão de Excitação e	Tensão	Terminal a	a partir de	um Ponto	na Região	Anormal d	le
		(Operação					

Módulo da Tensão na Barra Interna do Gerador (pu)	Módulo da Tensão na Barra Terminal (pu)
1,900	0,820
1,884	0,840
1,870	0,860
1,858	0,880
1,847	0,900
1,840	0,920
1,830	0,940
1,824	0,960
1,820	0,980
1,816*	1,000*
1,812	1,030
1,811	1,040
1,810	1,050
1,809	1,060
1,807	1,080
1,805	1,100

As curvas das Figuras 3.4 e 3.5 correspondem ao traçado dos pontos das Tabelas 3.7 e 3.8, 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 3.4 e 3.5. 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 3.4- Tensão Interna x Tensão Terminal a partir de Um Ponto na Região Normal de Operação



Figura 3.5- Tensão Interna x Tensão Terminal a partir de Um Ponto na Região Anormal de Operação

3.5

Análise Dinâmica

Nos programas atuais de fluxo de carga 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. Nesse caso, pode-se estudar a relação entre as variações da potência reativa gerada e as de tensão já que a tensão de excitação não aparece no problema. Embora não seja usual, pode-se incluir a barra interna e a reatância síncrona do gerador, como feito na Seção 3.4. Assim, a eficácia do controle de tensão pode ser aferida com um programa de fluxo de carga.

Uma outra maneira para analisar o efeito de ações de controle de tensão seria a análise dinâmica através da simulação do comportamento do sistema no domínio do tempo.

Uma outra motivação importante é que a maioria das situações de colapso de tensão são associadas a fenômenos de longa duração e, quando se deseja analisar a influência das ações dos controles de tensão dos geradores em barras de tensão controlada, as não-linearidades não permitem que se utilizem somente métodos de análise baseados em um único ponto de operação.

Baseado nestas circunstâncias a utilização da análise dinâmica se faz necessária para a complementação final dos estudos relacionados à comprovação do fenômeno proposto. Para a exemplificação desta análise será usado o mesmo sistema-teste de duas barras. Como antes, deseja-se saber quais as relações entre a tensão terminal, a potência reativa e a tensão de excitação da máquina.

O programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos - ANATEM² tem como principal objetivo simular o comportamento dinâmico de sistemas de potência quando submetido a perturbações. Seu eficiente desempenho de estabilidade numérica para os estudos de simulação no domínio do tempo se deve ao fato do uso do método trapezoidal implícito na integração numérica para solucionar o sistema de equações algébrico-diferenciais não-lineares do sistema dinâmico. Permite a modelagem detalhada dos diversos equipamentos de um sistema de potência, incluindo seus respectivos controladores. Além de possuir vários modelos pré-definidos, o programa permite a utilização de controladores definidos pelo usuário, o que aumenta a sua flexibilidade.

Para a realização da simulação numérica inicial, a carga foi modelada como impedância constante. Utilizou-se o modelo clássico de gerador, ou seja, uma máquina como uma fonte de tensão constante atrás de sua reatância síncrona. As principais simplificações deste modelo são:

- Reguladores de Tensão não estão presentes e excitação manual é utilizada. Isto implica que em regime de operação, a magnitude da tensão da fonte do modelo seja determinada pela corrente de campo;
- A potência mecânica injetada da turbina é considerada constante;

² Ferramenta computacional de propriedade do CEPEL, cedida para fins de ensino e pesquisa.

 A saliência tem efeito pequeno e é desprezada para estudo da estabilidade transitória.

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, aumentou-se o módulo da tensão na barra terminal de 1,00 pu para 1,135 pu. Como conseqüência, a tensão da barra interna variou de 1,158 pu para 1,28 pu, enquanto que o fluxo de potência reativa chegando na barra terminal foi de 5,2 Mvar para 5,56 Mvar. Isso pode ser observado nas Figuras 3.6, 3.7 e 3.8.



Figura 3.6- Tensão na Barra Interna



Figura 3.7- Tensão Terminal do Gerador



Figura 3.8- Fluxo de Potência Reativa que Chega na Barra Terminal

Com o sistema na região anormal de operação, aumentou-se o módulo da tensão na barra terminal do gerador de 1,00 pu para 1,05 pu. Como conseqüência, a tensão da barra interna variou de 1,816 pu para 1,809 pu, enquanto que o fluxo de potência reativa que chega na barra terminal foi de 14 Mvar para 13,7 Mvar. Isso pode ser observado nas Figuras 3.9, 3.10 e 3.11.



Figura 3.9- Tensão na Barra Interna



Figura 3.10- Tensão na Barra Terminal



Figura 3.11- Fluxo de Potência Reativa que Chega na Barra Terminal

Observando as curvas correspondentes à região anormal de operação, Figuras 3.9, 3.10 e 3.11, respectivamente, da tensão na barra interna, da barra terminal e do fluxo de potência reativa, percebe-se que, após a inserção do capacitor shunt, o sistema respondeu de forma oposta ao esperado. Por outro lado, quando o sistema se encontra na região normal de operação isso não aconteceu.

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

3.5.1

Análise Dinâmica Agregada

Nesta seção o mesmo sistema-teste de duas barras é utilizado com a mesma modelagem de carga, porém ao invés do modelo de gerador clássico, associou-se à barra de geração o modelo 02 da biblioteca do ANATEM e um regulador de tensão, o modelo 20 da biblioteca do ANATEM.

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, aumentou-se a tensão na barra terminal de 1,00 pu para 1,04 pu. Como conseqüência, a tensão de excitação da máquina variou de 1,159 pu para 1,195 pu, enquanto que o fluxo de potência reativa chegando na barra terminal foi de 5,24 Mvar para 5,38 Mvar. Portanto, a ação de controle de tensão atuou de forma esperada. Isso pode ser observado nas Figuras 3.12, 3.13 e 3.14.





Figura 3.13 - Tensão Terminal



Figura 3.14- Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal

Com o sistema na região anormal de operação aumentou-se a tensão na barra terminal de 1,00 pu para 1,01 pu. Como conseqüência, a tensão de excitação variou de 1,816 pu para 1,837 pu, enquanto que o fluxo de potência reativa chegando na barra terminal foi de 13,98 Mvar para 14,27 Mvar. Isso pode ser observado nas Figuras 3.15, 3.16 e 3.17.



Figura 3.15- Tensão de Excitação



Figura 3.16- Tensão Terminal



Figura 3.17- 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-teste estando na região anormal de operação da curva SV. Pode-se concluir então que, na análise no domínio do tempo, utilizando o ANATEM, quando se tem agregado um modelo de gerador dinâmico e um modelo de regulador de tensão, existe a possibilidade de divergência de resultados com os obtidos pela análise em 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. Essa ocorrência será explorada no item 3.6, a seguir.

3.6 Simulador Numérico para Análise no Domínio do Tempo

3.6.1

Introdução

A partir da constatação da existência de divergências nos resultados obtidos na análise dinâmica agregada, com os outros tipos de análise iniciou-se um processo de investigação da metodologia numérica computacional relacionada às técnicas de simulação no domínio do tempo, aplicadas em estudo de estabilidade de sistemas de energia elétrica.

3.6.2 Desenvolvimento

Um programa computacional para análise de estabilidade dinâmica capaz de simular fenômenos de curta-duração requer a solução de sistemas de equações diferenciais e algébricas (EDAs) não lineares e rígidas.

Partindo do princípio de se fazer uma separação do fenômeno dinâmico em análise por escala de tempo, utilizou-se um modelo computacional baseado em simulações de curta duração. Levou-se em consideração somente a representação dos modelos de regulador de tensão e da máquina síncrona, suficiente para atender as necessidades de simulação do sistema-teste de duas barras.

Assumindo-se que a representação do sistema de transmissão é dada por:

$$I = Y V$$
(3.1)

e que o comportamento dinâmico dos sistemas elétricos de potência podem ser representados por um conjunto de equações diferenciais ordinárias e algébricas, como [M. A. Pai – 1997]:

$$X = f(y, x, u)$$
, $x(0) = x_0$ (3.2)

$$0 = g(y, x, u)$$
 , $y(0) = y_0$ (3.3)

onde x é o vetor de variáveis de estado que representa os modelos dinâmicos dos elementos de controle da rede (máquina síncrona e regulador de tensão), y é o vetor das variáveis algébricas (variáveis algébricas do estator e da rede) e u é o vetor de entrada e parâmetros.

$$\mathbf{x}^{\mathrm{T}} = \left[\Delta \omega_{i}, \delta_{i}, E^{"}_{di}, E^{'}_{qi}, R^{"}_{qi}, R_{1i}, R_{2i}, R_{3i}, E_{fdi} \right]$$
(3.4)

$$\mathbf{y}^{\mathrm{T}} = \left[\mathbf{I}_{\mathrm{di}}, \mathbf{I}_{\mathrm{qi}}, \mathbf{V}_{\mathrm{j}}, \mathbf{\theta}_{\mathrm{j}}\right]$$
(3.5)

$$\mathbf{u}^{\mathrm{T}} = \left[\mathbf{T}_{\mathrm{Mi}}, \mathbf{V}_{\mathrm{REF}\,\mathrm{i}}, \mathbf{P}_{\mathrm{Lj}}, \mathbf{Q}_{\mathrm{Lj}} \right]$$
(3.6)

i = 1,...,m; j =1,...,n dado que m é o número de máquinas e n é o número barras do sistema analisado.

A técnica numérica utilizada foi o método de integração trapezoidal implícito, e neste caso, as equações diferenciais e algébricas são resolvidas simultaneamente, como em (3.7).

$$F_{1} = x_{n+1} - x_{n} - \frac{h}{2} [f(x_{n+1}, y_{n+1}) + f(x_{n}, y_{n})] = 0$$

$$F_{2} = g(x_{n+1}, y_{n+1}) = 0$$
(3.7)

onde h é o passo da integração.

As equações algébricas não lineares resultantes são resolvidas usando-se o método de Newton Raphson para cada instante t_{n+1} :

$$F^{(K)} = -J_{n+1}^{(K)} \Delta X_{n+1}$$
(3.8)

$$X_{n+1}^{(K+1)} = X_{n+1}^{(K)} + \Delta X_{n+1}$$
(3.9)

onde $F^{T} = \begin{bmatrix} F_{1}^{T} F_{2}^{T} \end{bmatrix}$, $X^{T} = \begin{bmatrix} x^{T} y^{T} \end{bmatrix}$ e J é a matriz Jacobiana de (3.8).

Em (3.7) e (3.9), o sub-escrito (n) refere-se ao tempo e o sobre-escrito (k) refere-se ao passo de iteração. A equação (3.8) representa um sistema linear de equações na forma $A \cdot x = b$.

A escolha adequada dos métodos de integração e de solução das equações algébricas possibilita uma maior eficiência computacional. No presente trabalho utiliza-se uma técnica numérica de comprimento de passo de integração variável, na solução simultânea das equações algébricas e diferenciais.

3.6.3

Resultados

Para testar o comportamento da ferramenta computacional desenvolvida utilizou-se o mesmo sistema-teste de duas barras das análises anteriores. Associou-se à barra de geração os mesmos dados referentes ao modelo de gerador e regulador de tensão, utilizados na análise dinâmica agregada.

O algoritmo foi testado através da comparação entre seus resultados e os provindos do ANATEM para cada teste realizado.

No primeiro teste simulou-se uma inserção de capacitor shunt na barra terminal do gerador, com o sistema na região anormal de operação.

Como conseqüência da inserção, o fluxo de potência reativa que chega na barra terminal variou de 13,98 Mvar para 23,84 Mvar. E o módulo da tensão na barra terminal do gerador variou de 1,00 pu para 0,997 pu. Enquanto que a tensão de excitação variou de 1,816 pu para 2,373 pu. Percebeu-se também que os resultados do ANATEM são equivalentes aos resultados da ferramenta computacional desenvolvida. Isso pode ser observado nas Figuras 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.22 e 3.23.

Os gráficos em vermelho e azul correspondem aos testes realizados no ANATEM e na ferramenta computacional, respectivamente.



Figura 3.18- Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal - ANATEM



Figura 3.19- Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal - Ferramenta Desenvolvida









5

10

Tempo(s)

15

20

1,911 1,816

0



Figura 3.23- Tensão de Excitação da Máquina - Ferramenta Desenvolvida

Observa-se que a ação de controle de tensão do gerador atuou de forma esperada, mesmo com o sistema-teste estando na região anormal de operação da curva SV. Pode-se concluir então que na análise no domínio do tempo, utilizando a ferramenta computacional e o ANATEM com um modelo de gerador dinâmico e um modelo de regulador de tensão, os resultados são coerentes. A existência da divergência de resultados é constatada em se fazendo uma comparação com a análise dos índices de estabilidade de tensão, da seqüência de soluções de algoritmo de fluxo de carga, e da análise dinâmica com modelo de gerador clássico.

Em um segundo teste simulou-se um degrau na tensão de referência da barra terminal do gerador, ainda com o sistema na região anormal de operação.

Aumentou-se a tensão na barra terminal de 1,00 pu para 1,052 pu. Como conseqüência, a tensão de excitação variou de 1,816 pu para 1,91 pu, enquanto que o fluxo de potência reativa chegando na barra terminal foi de 13,98 Mvar para 15,46 Mvar. Isso pode ser observado nas Figuras 3.24, 3.26 e 3.28. Este teste foi realizado com o ANATEM.

Porém, quando se utilizou à ferramenta computacional desenvolvida, com o aumento da tensão na barra terminal de 1,00 pu para 1,052 pu, a tensão de excitação variou de 1,816 pu para 1,820 pu, enquanto que o fluxo de potência

reativa chegando na barra terminal foi de 13,98 Mvar para 13,86 Mvar. Isso pode ser observado nas Figuras 3.25, 3.27 e 3.29.

Os gráficos em vermelho e azul correspondem aos testes realizados no ANATEM e na ferramenta computacional, respectivamente.





Figura 3.24- Tensão de Excitação da Máquina - ANATEM





Figura 3.26- Tensão Terminal - ANATEM



Figura 3.27- Tensão Terminal - Ferramenta Desenvolvida



Figura 3.28- Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal - ANATEM



Figura 3.29- Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal - Ferramenta Desenvolvida

Para o teste realizado no ANATEM, observou-se que a ação de controle de tensão do gerador atuou de forma esperada, mesmo com o sistema-teste estando na região anormal de operação da curva SV.

Porém, para o teste realizado com a ferramenta computacional desenvolvida, a ação de controle de tensão do gerador atuou de forma oposta ao esperado com relação à potência reativa: o acréscimo da tensão resultou em um decréscimo na potência reativa gerada. Contudo, não se verificou uma relação oposta entre a tensão de excitação e a tensão terminal.

No terceiro teste simulou-se um degrau na tensão de referência da barra terminal do gerador, com o sistema na região normal de operação.

Variou-se a tensão na barra terminal de 1,00 pu para 0,95 pu. Como conseqüência, a tensão de excitação variou de 1,16 pu para 1,09 pu, enquanto que o fluxo de potência reativa chegando na barra terminal foi de 5,24 Mvar para 4,76 Mvar. Percebeu-se que os resultados do ANATEM são equivalentes com os resultados da ferramenta computacional desenvolvida. Isso pode ser observado nas Figuras 3.30, 3.31, 3.32, 3.33, 3.34 e 3.35.

Os gráficos em vermelho e azul correspondem aos testes realizados no ANATEM e na ferramenta computacional desenvolvida, respectivamente.



Figura 3.30- Tensão de Excitação da Máquina - ANATEM





Figura 3.31- Tensão de Excitação da Máquina - Ferramenta Desenvolvida

Figura 3.33- Tensão Terminal - Ferramenta Desenvolvida



Figura 3.34- Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal - ANATEM



Figura 3.35- Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal - Ferramenta Desenvolvida

Pode-se concluir então que, neste terceiro teste, também há concordância de resultados utilizando-se a ferramenta computacional desenvolvida e o ANATEM. Também não há divergência com as outras análises pois o sistema se encontra na região normal de operação da curva SV.

No quarto e último teste simulou-se uma inserção de capacitor *shunt* na barra terminal do gerador, com o sistema na região normal de operação.

Como conseqüência da inserção, o fluxo de potência reativa que chega na barra terminal variou de 5,24 Mvar para 5,30 Mvar. E o módulo da tensão na barra

terminal do gerador variou de 1,00 pu para 0,99 pu. Enquanto que a tensão da barra interna variou de 1,159 pu para 1,255 pu. Neste caso os resultados do ANATEM são equivalentes com o da ferramenta computacional. Isso pode ser observado nas Figuras 3.36, 3.37, 3.38, 3.39, 3.40 e 3.41.

Os gráficos em vermelho e azul correspondem aos testes realizados no ANATEM e na ferramenta computacional, respectivamente.



Figura 3.36- Tensão de Excitação da Máquina - ANATEM



Figura 3.37- Tensão de Excitação da Máquina - Ferramenta Desenvolvida



Figura 3.38- Tensão Terminal - ANATEM



Figura 3.39- Tensão Terminal - Ferramenta Desenvolvida



Figura 3.40- Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal - ANATEM



Figura 3.41- Fluxo de Potência Reativa Chegando na Barra Terminal - Ferramenta Desenvolvida

Após a análise deste teste conclui-se que a ação de controle de tensão do gerador foi à esperada, ou seja, o aumento da tensão de excitação resultou nos aumentos da tensão na barra terminal e da potência reativa gerada. Também não há divergência entre esses resultados e os obtidos pelas outras ferramentas já que o sistema está na região normal de operação da curva SV.

3.7 Conclusões

Os resultados das ações de controle de tensão em barras de geração (em especial as de tensão controlada) foram analisados 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 simulações no domínio do tempo. Essas análises foram realizadas considerando-se dois cenários: quando o gerador está a um sistema levemente e extremamente carregado.

Na Tabela 3.9 é mostrado um resumo dos 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.

	Índices de Estabilidade de Tensão	Algoritmo Fluxo de Carga	Tensão de Excitação x Tensão Terminal	Análise Dinâmica	Análise Dinâmica Agregada
Ponto de Operação na Região Normal	1	1	V	1	1
Ponto de Operação na Região Anormal	1	1	u	V	×

Foram calculados os índices de estabilidade de tensão para pontos-base de operação na região normal e anormal. Os índices, como o ângulo β e a margem de potência para a barra terminal do gerador e a barra de carga, mostram que um ponto de operação na região anormal é devido ao excesso de carregamento do sistema. Na barra de geração, devido ao excesso de geração de potência reativa, o índice $\frac{\partial Q}{\partial V}$ 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 $\frac{\partial V_o}{\partial Eg}$ que relaciona a variação entre a tensão na barra terminal e a tensão de excitação.

Depois, 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. Comprovou-se também na análise da tensão de excitação e a tensão terminal, que para pontos de operação na região anormal, tem-se a relação oposta entre estas grandezas. Já para pontos de operação na região normal tem-se a relação esperada.

A análise dinâmica apresentou o mesmo resultado qualitativo das análises em regime permanente. 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 para a região anormal. Já na região normal de operação, isso não aconteceu. Nesta simulação o gerador foi representado pelo modelo clássico.

Na análise dinâmica agregada, 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. Concluiu-se então que, quando se usa um modelo dinâmico de gerador e um regulador de tensão agregado, existe a possibilidade de divergência de resultados entre os índices de estabilidade de tensão, a análise soluções do algoritmo de fluxo de carga e a análise dinâmica com modelo clássico de gerador.

Na Tabela 3.10 é mostrado um resumo comparativo entre os testes realizados na ferramenta computacional desenvolvida e o ANATEM. Os símbolos de aprovação e reprovação indicam somente se os testes são concordantes entre si ou não.

	Região Normal da Cura SV- Teste de Inserção de Shunt	Região Anormal da Cura SV- Teste de Inserção de Shunt	Região Normal da Cura SV- Teste de Degrau na Tensão	Região Anormal da Cura SV- Teste de Degrau na Tensão
Análise Dinâmica Agregada - ANATEM	1	V	1	\times
Ferramenta Computacional Desenvolvida	1	1	1	X

Tabela 3.10- Análise Comparativa dos Testes

Foi desenvolvido um programa computacional para simulação no domínio do tempo envolvendo o sistema-teste de duas barras. Com base nos testes realizados para pontos de operação na região anormal da curva SV, concluiu-se que a ferramenta computacional desenvolvida respondeu de forma equivalente ao ANATEM para o teste de inserção de capacitor shunt. Porém, para o teste de degrau na tensão de referência da barra terminal do gerador, utilizando-se a ferramenta computacional desenvolvida, percebeu-se que a variação entre o fluxo de potência reativa e a tensão na barra terminal era oposta a usual. Essa situação não foi observada no mesmo teste utilizando-se o programa ANATEM.

Para os dois testes realizados com o sistema na região normal da curva SV, a ferramenta computacional desenvolvida respondeu de forma equivalente ao ANATEM.

A divergência observada entre o ANATEM e a ferramenta computacional desenvolvida, na aplicação de degrau na tensão de referência da barra terminal do gerador em um ponto de operação na região anormal da curva SV. E a concordância entre o ANATEM e a ferramenta computacional desenvolvida, no teste da inserção do shunt capacitor na região anormal, indica que novos estudos são necessários.