

4

Análise em Regime Permanente e Dinâmico de um Gerador

4.1

Introdução

O objetivo é estender a análise em regime permanente e no domínio do tempo realizadas no Capítulo 3 para um sistema mais bem elaborado e comprovar a possibilidade da ocorrência de eventos associados à estabilidade de tensão.

Neste capítulo é utilizado o sistema-teste de 10 barras encontrado em [Kundur, 1994, pág. 980]. O diagrama unifilar do sistema é mostrado na Figura 4.1.

São observados os sentidos das variações das tensões interna e terminal do gerador G3 frente a situações normais de um sistema elétrico: variações de tensão e de carga.

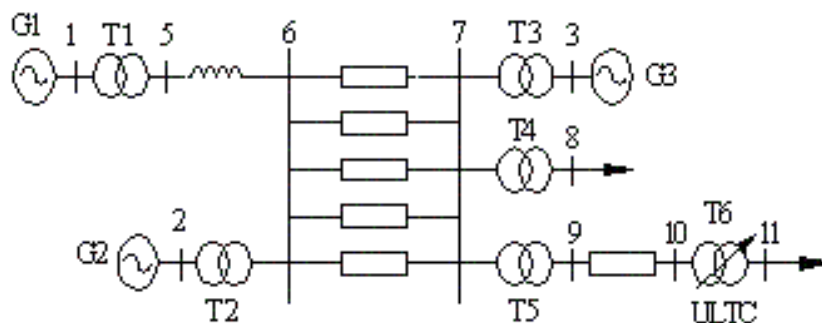


Figura 4.1 – Diagrama unifilar do sistema-teste de 10 barras

4.2

Análise em Regime Permanente

A análise em regime permanente tem o objetivo de coletar pontos de operação na região normal e anormal, verificar a relação existente entre as tensões interna e terminal do gerador em análise, G3, confirmar a região de

operação e salvar esses pontos para serem utilizados na análise no domínio do tempo.

Para simular a tensão interna do gerador G3 em regime permanente, que pretende-se estudar, é criada uma barra fictícia conectada à barra 3 do sistema por uma reatância síncrona. Nesta barra fictícia é conectado o gerador e esta barra controla a tensão na barra 3. Desta maneira, a tensão na barra 3 é considerada a tensão terminal do gerador e a tensão da barra fictícia é considerada a tensão interna.

4.2.1

Região Normal de Operação

O ponto de operação apresentado em [Kundur, 1994, pág. 980], definido como nível 02, apresentado na Tabela 4.1 é utilizado. Com o programa de fluxo de carga do pacote computacional ANAREDE, é traçada a curva VQ da barra 3 mostrada na Figura 4.2.

Tabela 4.1 – Ponto de operação na região normal

Região Normal	
Eg (pu)	1,172 $\angle$ 21,2
V0 (pu)	1,040 $\angle$ -7,0
Carga ativa do sistema	6755 MW
Carga reativa do sistema	2015 Mvar
Xs (%)	5,0

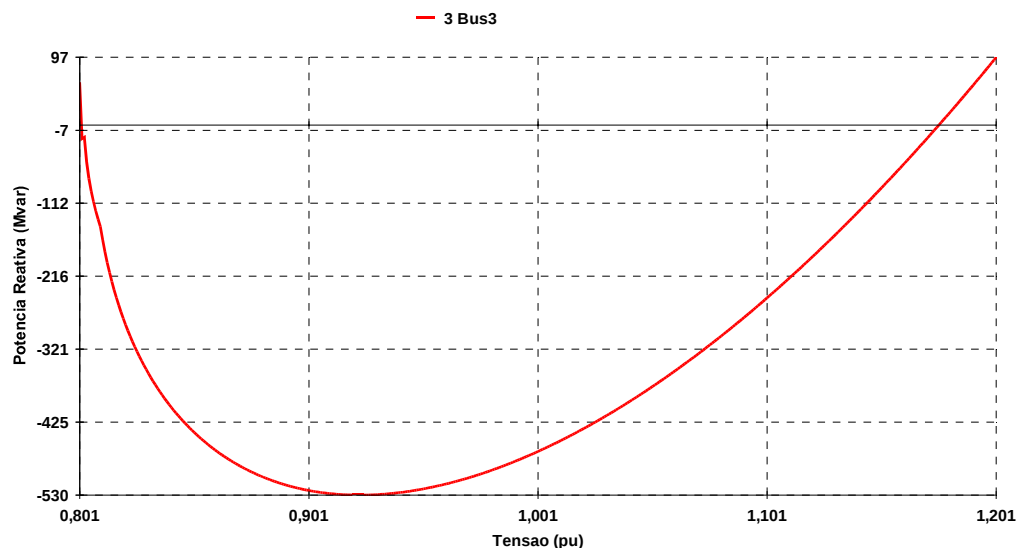


Figura 4.2 – Curva VQ da barra 3

Observando-se a curva VQ da barra 3 na Figura 4.2 é possível verificar que o ponto de operação da Tabela 4.1 se encontra na região normal.

Utilizando o ponto de operação na região normal da Tabela 4.1 para o sistema-teste de 10 barras da Figura 4.1 varia-se a tensão terminal (V_0) e observa-se o sentido da variação da tensão interna do gerador G3 (E_g).

Os resultados da simulação na região normal de operação são apresentados numericamente na Tabela 4.2 e graficamente na Figura 4.3.

Tabela 4.2 – Variação da tensão interna e da tensão terminal na região normal de operação

Região Normal	
Módulo da tensão na barra terminal do gerador 3 (V_0)	Módulo da tensão na barra interna do gerador 3 (E_g)
1,025	1,151
1,030	1,158
1,035	1,165
1,040	1,172
1,045	1,179
1,050	1,187
1,055	1,194

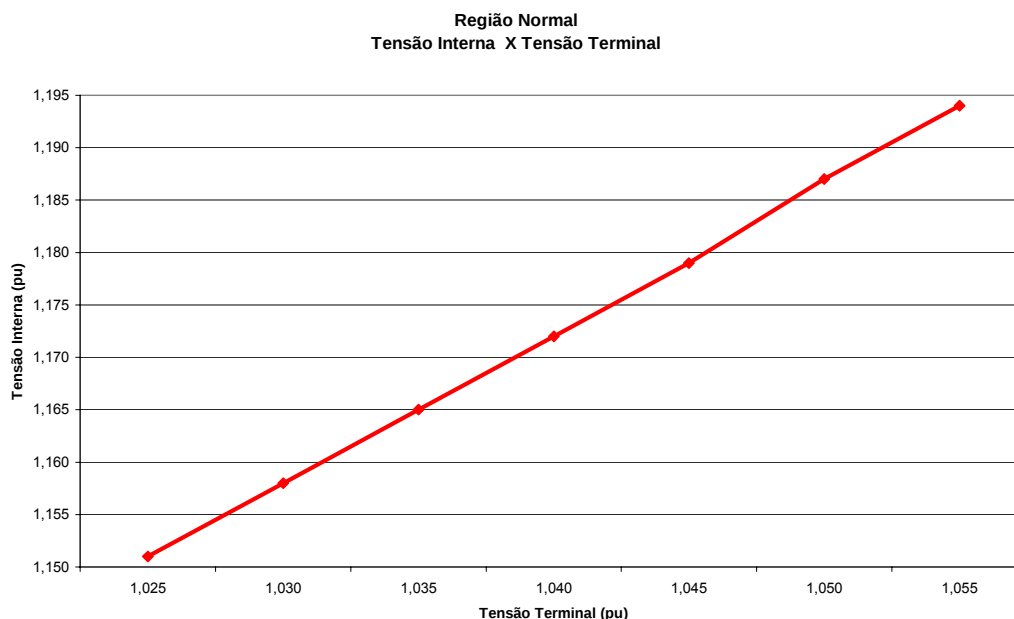


Figura 4.3 – Variação da tensão interna X tensão terminal na região normal de operação

Como pode ser observado, a simulação em regime permanente ocorre conforme o esperado para um ponto de operação na região normal: tensão interna e tensão terminal variando sempre no mesmo sentido.

4.2.2

Região Anormal de Operação

A partir do ponto de operação na parte direita da curva VQ da Figura 4.2, considerado como sendo da região normal, é definido um ponto de operação na parte esquerda da mesma curva, procurando manter a mesma potência reativa gerada. Este novo ponto de operação, considerado na região anormal, é apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Ponto de operação na região anormal

Região Anormal	
Eg (pu)	0,901 $\angle$ 27,7
V0 (pu)	0,850 $\angle$ -21,2
Carga ativa do sistema	6755 MW
Carga reativa do sistema	2015 Mvar
Xs (%)	5,0

Utilizando o ponto de operação na região anormal da Tabela 4.3 para o sistema-teste de 10 barras da Figura 4.1 é realizada a mesma simulação: elevação/redução da tensão terminal (V_0) e é observado o sentido da variação da tensão interna do gerador G3 (E_g).

Os resultados da simulação na região anormal de operação são apresentados numericamente na Tabela 4.4 e graficamente na Figura 4.4.

Tabela 4.4 – Variação da tensão interna e da tensão terminal na região normal de operação

Região Anormal	
Módulo da tensão na barra terminal do gerador 3 (V_0)	Módulo da tensão na barra interna do gerador 3 (E_g)
0,835	1,013
0,840	1,004
0,845	0,998
0,850	0,991
0,855	0,987
0,860	0,982
0,865	0,980

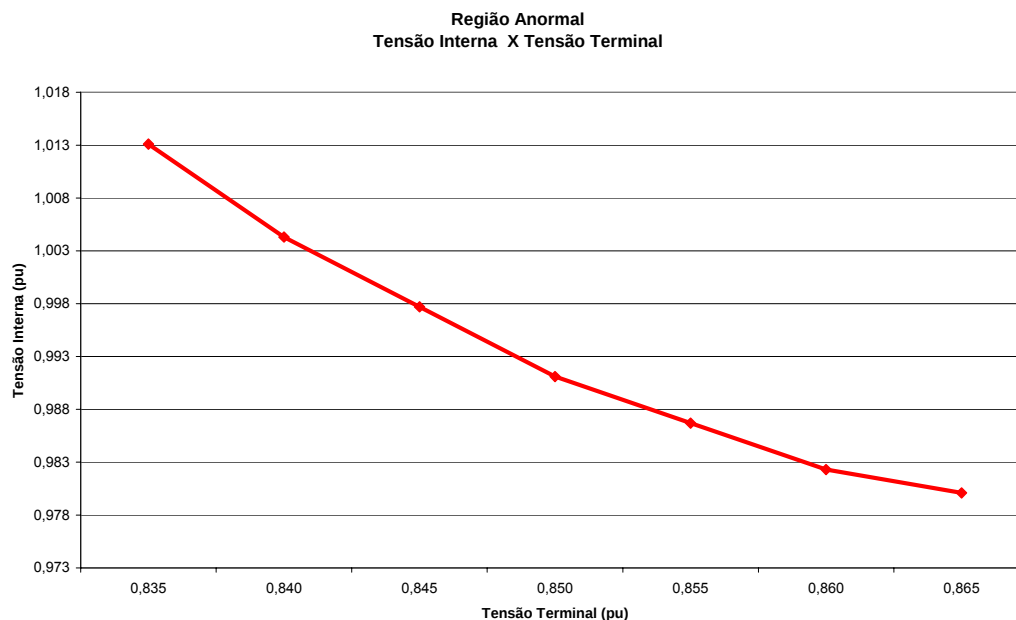


Figura 4.4 – Variação da tensão interna X tensão terminal na região anormal de operação

Como pode ser observado, a simulação em regime permanente ocorre conforme o esperado para um ponto de operação na região anormal: tensão interna e tensão terminal variando em sentidos opostos. Para elevar a tensão terminal, a tensão interna precisa ser reduzida e para reduzir a tensão terminal, a tensão interna precisa ser elevada.

Isto mostra que o ponto de operação está realmente na região anormal, parte inferior da curva PV, e parte esquerda da curva VQ, onde as manobras de controle de tensão podem ter o efeito oposto ao esperado e acabar levando o sistema ao colapso.

4.3

Análise no Domínio do Tempo

A análise no domínio do tempo tem objetivo de comprovar a relação existente entre as tensões interna e terminal do gerador em análise, G3, obtidas nas simulações em regime permanente e mostrar a mudança da região de operação.

As simulações no domínio do tempo são realizadas utilizando os casos convergidos da região normal e anormal da análise de regime permanente, mostrados na Tabela 4.1 e na Tabela 4.3, respectivamente.

Para esta simulação, a barra fictícia criada para simular a tensão interna do gerador G3 não é necessária.

4.3.1

Região Normal de Operação

Utilizando o ponto de operação na região normal da para o sistema-teste de 10 barras da Figura 4.1 é realizado um comando para elevar a tensão terminal em 0,015 pu e observado o sentido da variação da tensão interna do gerador G3.

Os resultados da simulação na região normal de operação são apresentados numericamente na Tabela 4.5 e graficamente na Figura 4.5..

Tabela 4.5 – Variação da tensão interna e da tensão terminal na região normal de operação – análise no domínio do tempo

Região Normal	
Módulo da tensão na barra terminal do gerador 3 (V0)	Módulo da tensão na barra interna do gerador 3 (Eg)
1,040	1,203
1,053	1,224

A diferença entre os valores obtidos na simulação de regime permanente e os obtidos na simulação no domínio do tempo são decorrentes da dinâmica das máquinas envolvidas nesta última simulação bem como de seus controladores.

No gráfico a seguir, da comparação entre a variação das tensões interna e terminal, o eixo vertical representa a variação da tensão onde 0% representa o valor inicial da tensão e o 100% representa o máximo valor atingido durante a simulação.

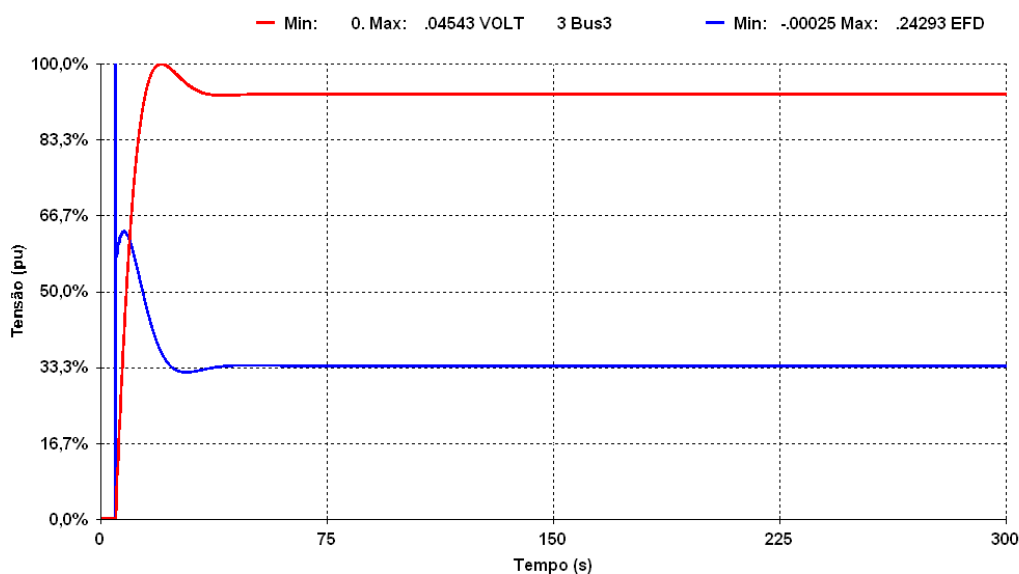


Figura 4.5 – Comparação entre a variação da tensão interna e da tensão terminal da região normal de operação no domínio do tempo

Como pode ser observado, a simulação no domínio do tempo comprova o que ocorre na análise de regime permanente e o resultado é o esperado para um

ponto de operação na região normal: tensão interna e tensão terminal variando no mesmo sentido.

Separando os gráficos da tensão interna e da tensão terminal, é possível observar com mais detalhes na Figura 4.6 e na Figura 4.7, respectivamente, o que ocorre com cada uma delas.

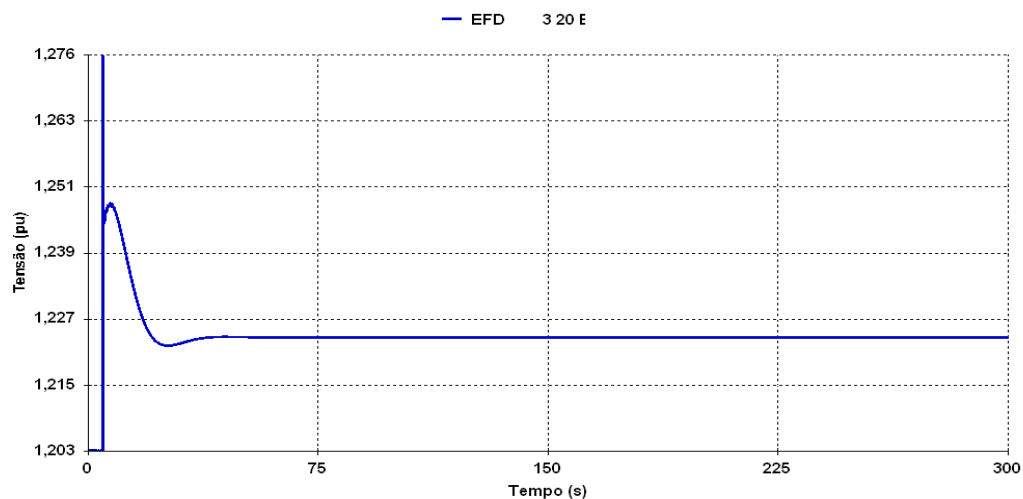


Figura 4.6 - Variação da tensão interna na região normal de operação no domínio do tempo

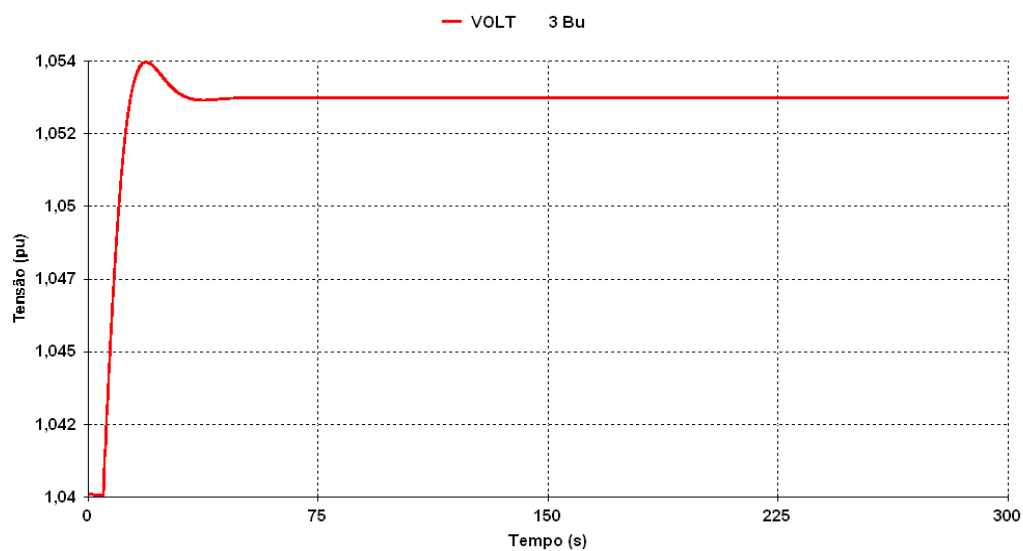


Figura 4.7 – Variação da tensão terminal na região anormal de operação no domínio do tempo

4.3.2

Região Anormal de Operação

Utilizando agora o ponto de operação na região anormal da Tabela 4.3 para o sistema-teste de 10 barras da Figura 4.1 é realizado um comando para elevar a tensão terminal em 0,015pu e observado o sentido da variação da tensão interna do gerador G3.

Os resultados da simulação na região anormal de operação podem ser observados numericamente na Tabela 4.6 e graficamente na Figura 4.8.

Tabela 4.6 – Variação da tensão interna e da tensão terminal na região anormal de operação – análise no domínio do tempo

Região Anormal	
Módulo da tensão na barra terminal do gerador 3 (V0)	Módulo da tensão na barra interna do gerador 3 (Eg)
0,850	1,061
0,866	1,049

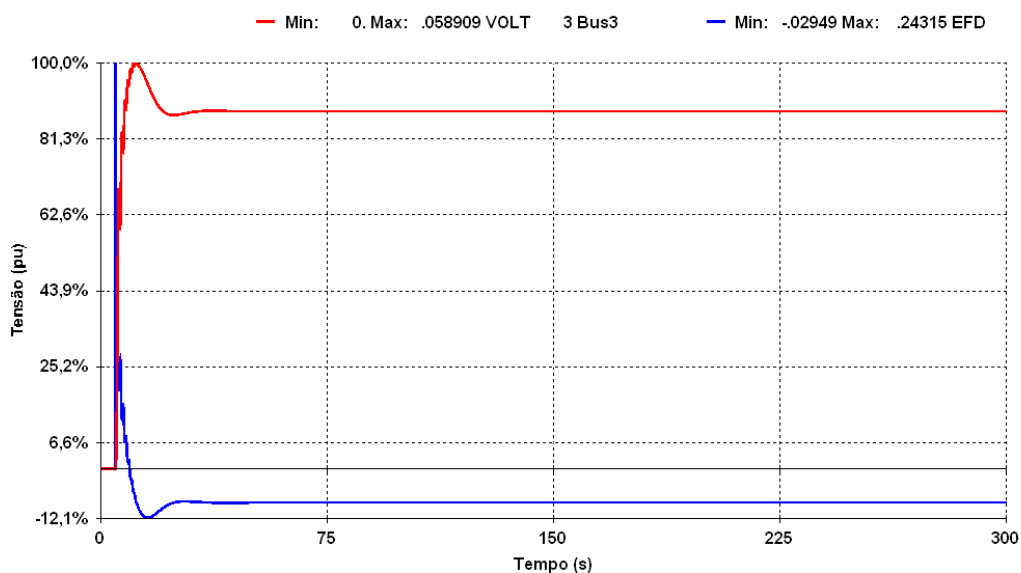


Figura 4.8 – Comparação entre a variação da tensão interna e da tensão terminal na região anormal de operação no domínio do tempo

Como pode ser observado, a simulação no domínio do tempo comprova o que ocorre na análise de regime permanente e o resultado é o esperado para um ponto de operação na região anormal: tensão interna e tensão terminal variando em sentidos opostos. Nesse ponto, não se sabe porque o controle de tensão funcionou com a lógica oposta à usual. Talvez a análise modal nesse ponto de operação forneça a resposta.

Outro ponto importante a ser observado é a diferença entre as tensões internas iniciais na simulação estática (Tabela 4.4) e dinâmica (Tabela 4.6). Acredita-se que os parâmetros da máquina estejam influenciando o resultado dinâmico, impossibilitando assim que as tensões internas iniciais coincidam, contudo, qualitativamente, os resultados das duas simulações são coerentes.

Separando os gráficos da tensão interna e da tensão terminal, é possível observar com mais detalhes na Figura 4.9 e na Figura 4.10, respectivamente, o que ocorre com cada uma delas.

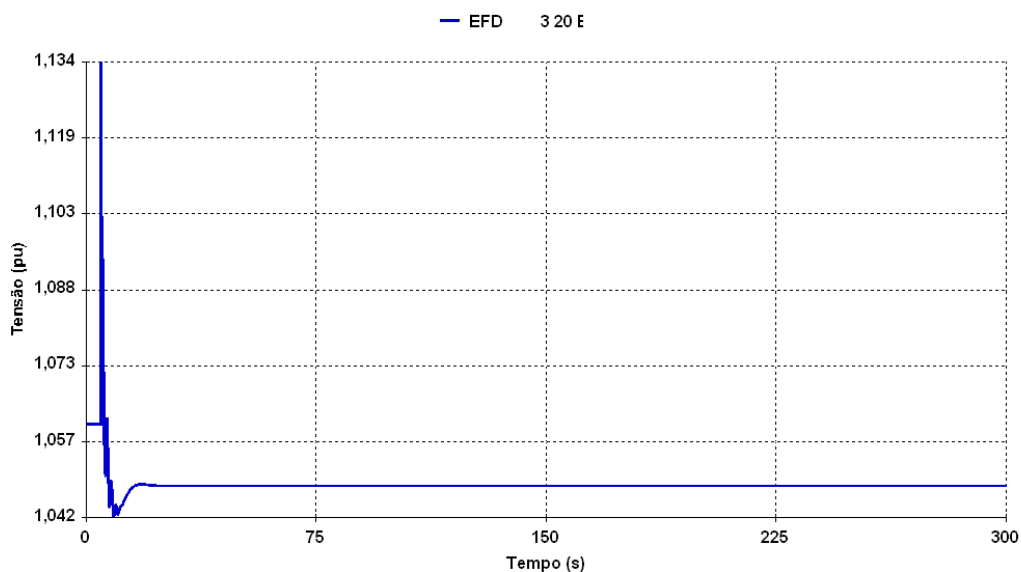


Figura 4.9 – Variação da tensão interna na região anormal de operação no domínio do tempo

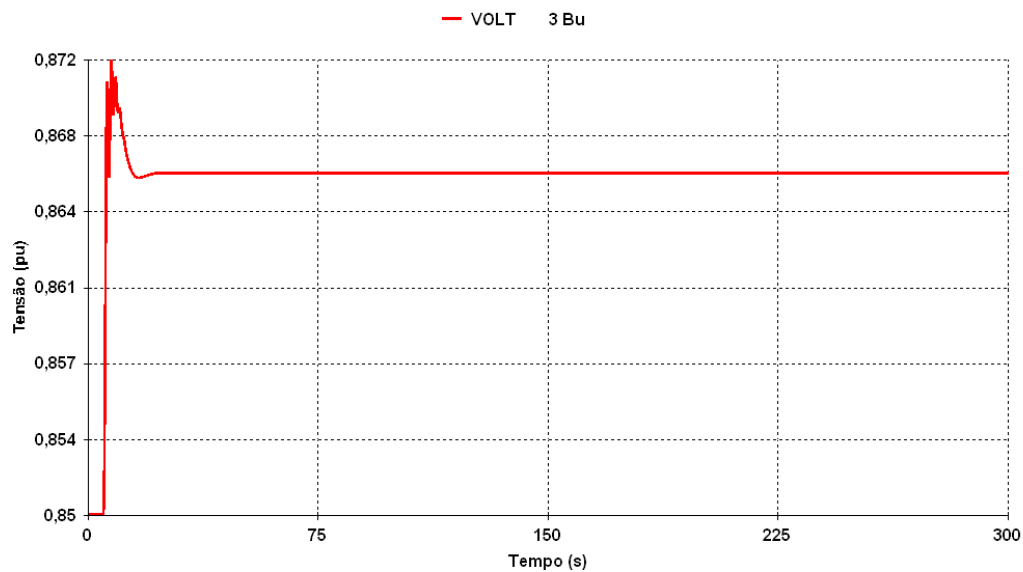


Figura 4.10 – Variação da tensão terminal na região anormal de operação no domínio do tempo

4.3.2.1

Seqüência de Comandos

Para comprovar a operação na região anormal, é efetuada uma seqüência de comandos de elevação da tensão terminal em 0,01pu, por comando, e é observado o sentido da variação da tensão interna.

Os resultados da simulação podem ser observados numericamente na Tabela 4.7 e graficamente na Figura 4.11.

Tabela 4.7 – Variação da tensão interna e da tensão terminal na região anormal de operação – seqüência de comandos

Seqüência de comandos	
Módulo da tensão na barra terminal do gerador 3 (V0)	Módulo da tensão na barra interna do gerador 3 (Eg)
0,850	1,061
0,860	1,050
0,871	1,039
0,881	1,032

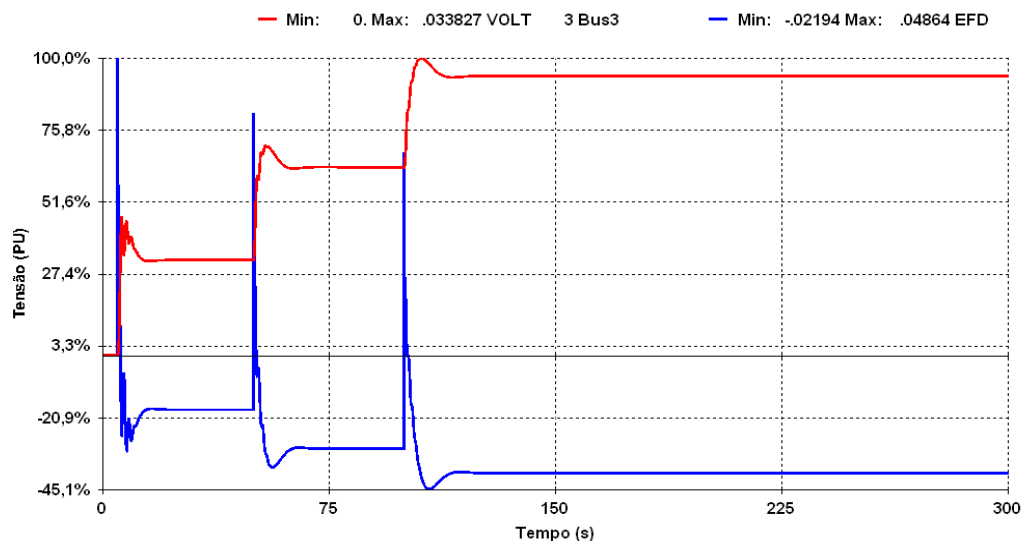


Figura 4.11 – Comparação entre a variação da tensão interna e da tensão terminal na região anormal de operação com uma sequência de comandos

Como pode ser observado na Figura 4.11, os resultados da sequência de comandos estão de acordo com o que ocorreu nas análises anteriores de regime permanente e no domínio do tempo, isto é, as variações de tensão ocorrem sempre em sentidos opostos na região anormal de operação.

Separando os gráficos da tensão interna na Figura 4.12 e a tensão terminal na Figura 4.13, é possível observar com mais detalhes o que ocorre.

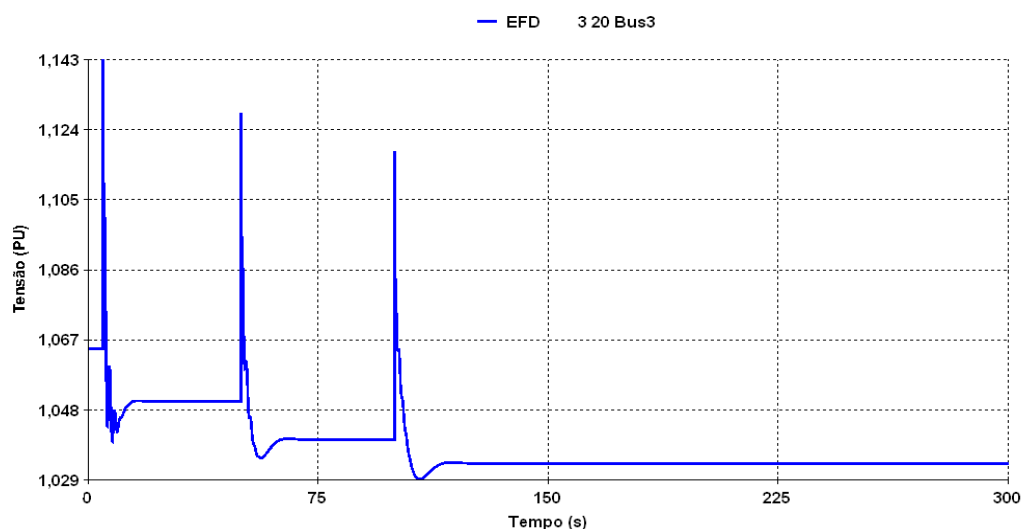


Figura 4.12 – Variação da tensão interna na região anormal de operação com uma sequência de comandos

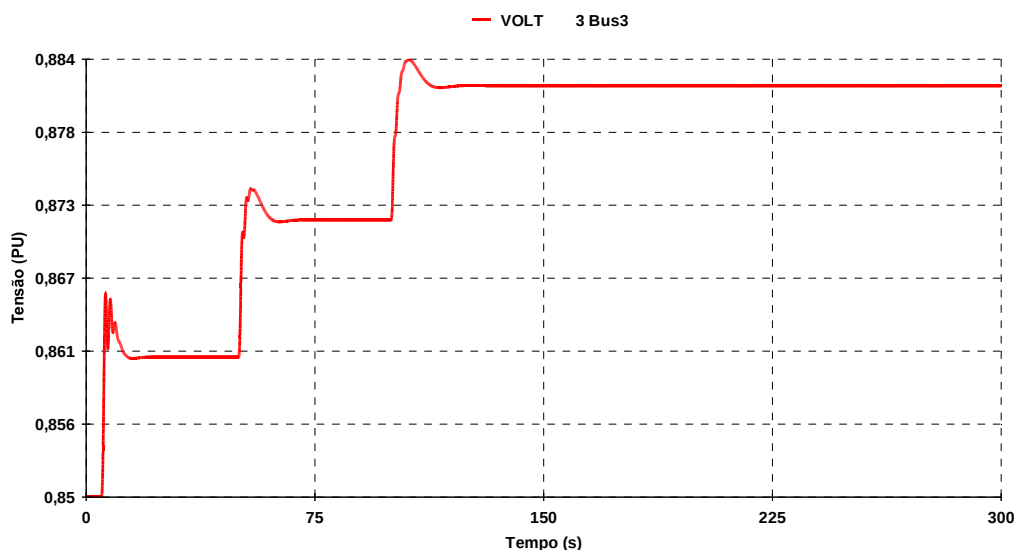


Figura 4.13 – Variação da tensão terminal na região anormal de operação com uma sequência de comandos

4.3.3

Mudança da Região de Operação

Considerando inicialmente o ponto de operação na região normal da Tabela 3.1 para o sistema-teste de 10 barras da Figura 4.1, a sucessão de comandos pode fazer com que o sistema passe para a região anormal e obtenha respostas inesperadas no controle de tensão. Para esta simulação foram efetuados 9 comandos para reduzir a tensão terminal em 0,01pu em cada um.

Os resultados da simulação são apresentados numericamente na Tabela 4.8 e graficamente na Figura 4.14. É bem nítida a mudança de sentido da tensão interna, a partir de determinado instante da simulação, enquanto a tensão terminal é movimentada sempre no mesmo sentido.

Tabela 4.8 – Variação da tensão interna e da tensão terminal mudando da região normal para anormal

Mudança de região Normal - Anormal	
Módulo da tensão na barra terminal do gerador 3 (V0)	Módulo da tensão na barra interna do gerador 3 (Eg)
1,040	1,145
1,031	1,133
1,022	1,123
1,012	1,115
1,003	1,109
0,993	1,105
0,983	1,104
0,973	1,106
0,963	1,110
0,952	1,117

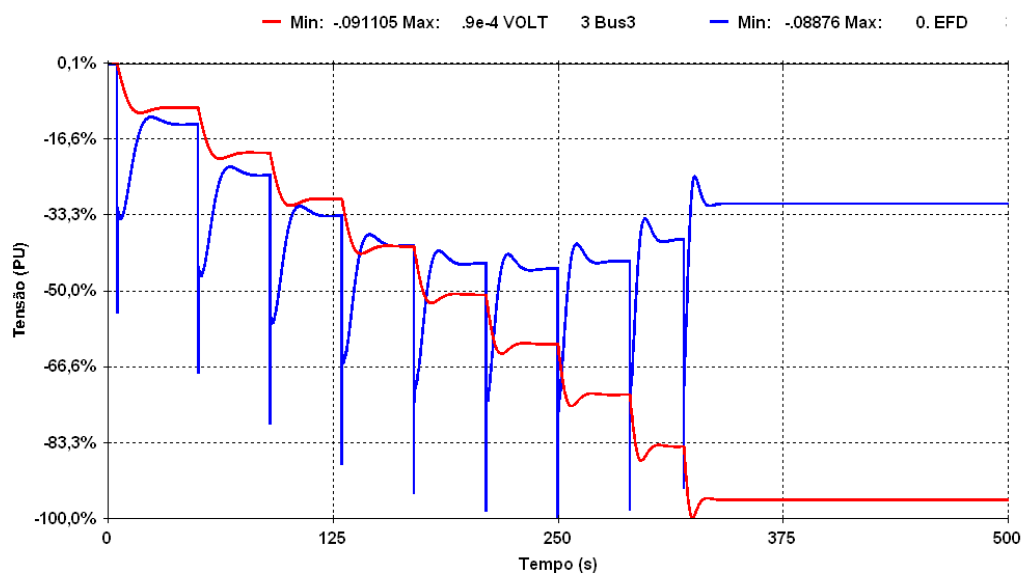


Figura 4.14 – Comparação entre a variação da tensão interna e da tensão terminal mudando de sentido

Separando os gráficos da tensão interna na Figura 4.15 e da tensão terminal na Figura 4.16 é possível observar com detalhes o que ocorre com cada uma delas.

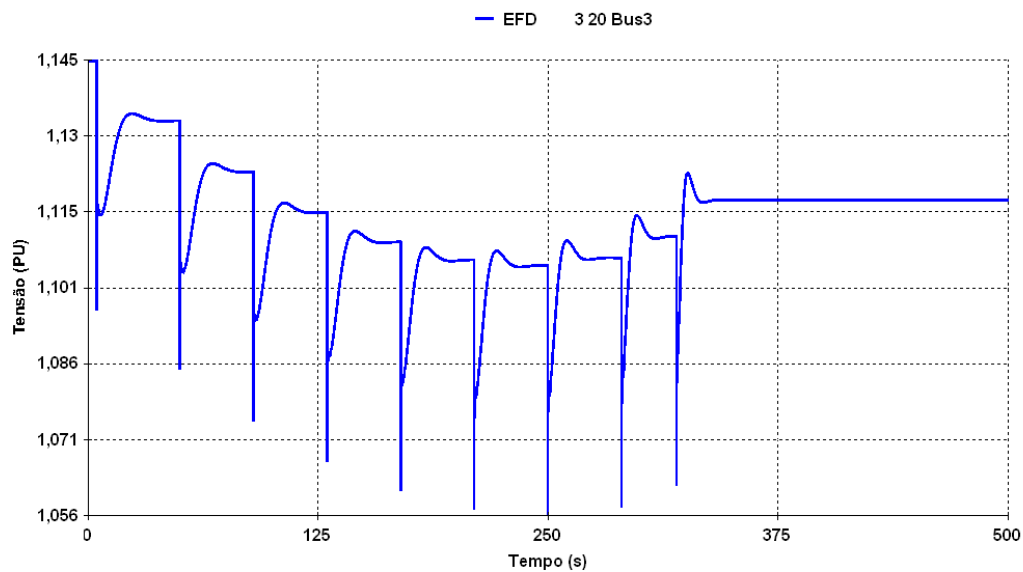


Figura 4.15 – Variação da tensão interna mudando de sentido

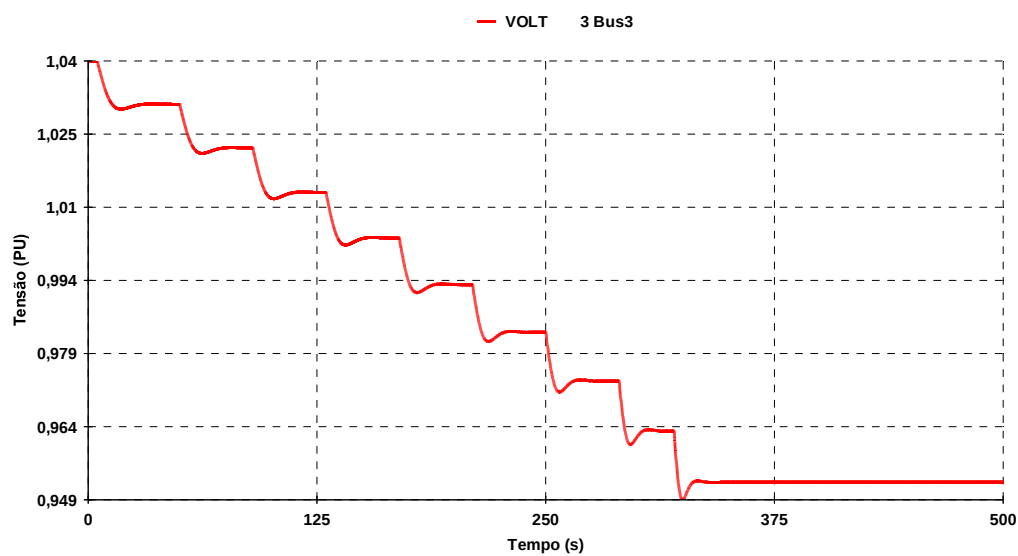


Figura 4.16 – Variação da tensão terminal sempre no mesmo sentido

Como pode ser observado, a simulação mostra que para reduzir a tensão terminal, inicialmente, a tensão interna do gerador precisa ser reduzida. A partir de determinado instante, para continuar reduzindo a tensão terminal, a tensão interna do gerador precisa ser elevada. Esta simulação leva a acreditar que o sistema está inicialmente operando na região normal e a partir de determinado instante passa a operar na região anormal.

Considerando agora o ponto de operação na região anormal da Tabela 4.3 para o sistema-teste de 10 barras da Figura 4.1, a sucessão de comandos pode fazer com que o sistema passe para a região normal e as respostas do controle de tensão passem a ser as esperadas. Para esta simulação foram efetuados 6 comandos para elevar a tensão terminal em 0,01pu em cada um.

Os resultados da simulação são apresentados numericamente na **Tabela 4.9** e graficamente na Figura 4.17. É possível observar a mudança de sentido da tensão interna, a partir de determinado instante da simulação, enquanto a tensão terminal é movimentada sempre no mesmo sentido.

Tabela 4.9 – Variação da tensão interna e da tensão terminal mudando da região anormal para normal

Mudança de região Anormal - Normal	
Módulo da tensão na barra terminal do gerador 3 (V0)	Módulo da tensão na barra interna do gerador 3 (Eg)
0,850	1,061
0,860	1,050
0,871	1,044
0,881	1,040
0,891	1,038
0,902	1,039
0,911	1,042

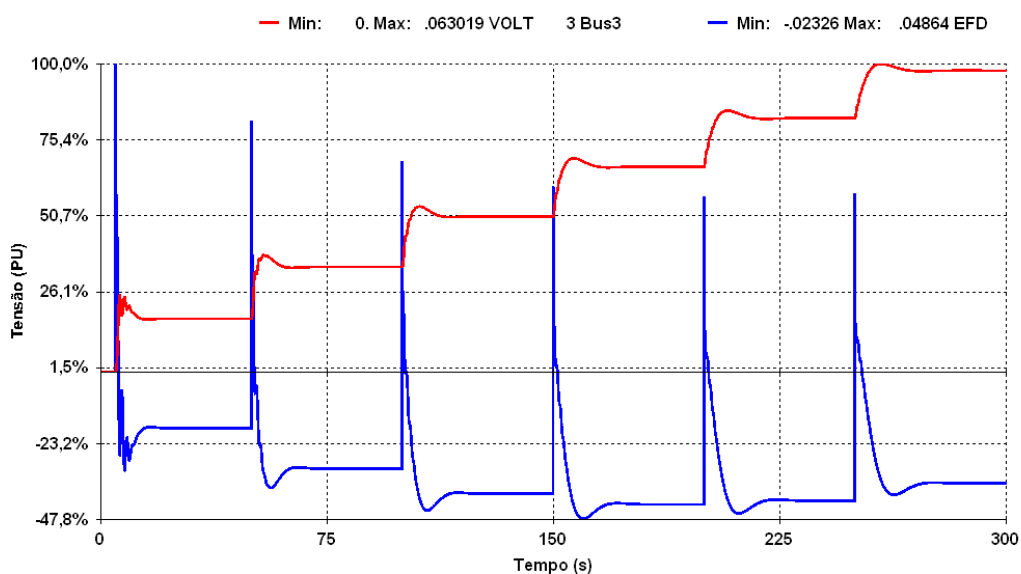


Figura 4.17 – Comparação entre a variação da tensão interna e terminal mudando de sentido

Separando os gráficos da tensão interna na Figura 4.18 e da tensão terminal na Figura 4.19 é possível observar com detalhes o que ocorre com cada uma delas.

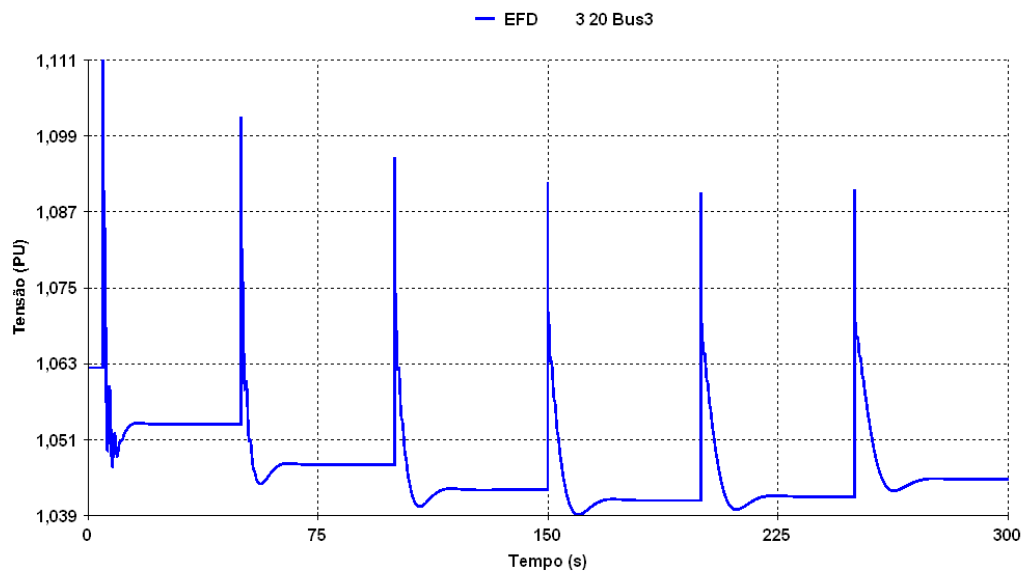


Figura 4.18 – Variação da tensão interna mudando de sentido

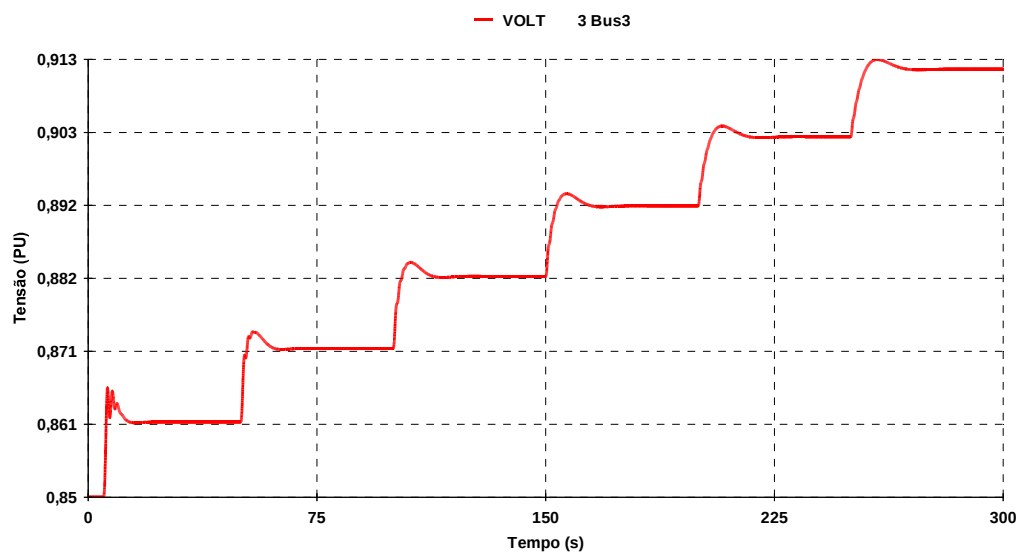


Figura 4.19 – Variação da tensão terminal sempre no mesmo sentido

Como pode ser observado, a simulação mostra que para elevar a tensão terminal, inicialmente, a tensão interna do gerador precisa ser reduzida. A partir de determinado instante, para continuar elevando a tensão terminal, a tensão

interna do gerador precisa ser elevada. Esta simulação leva a acreditar que o sistema estava inicialmente operando na região anormal e a partir de determinado instante passou a operar na região normal.

Uma sucessão de comandos, mesmo na região normal de operação, pode, além de levar o ponto de operação para a região anormal, levar o sistema ao colapso.

Na Tabela 4.10 e na Figura 4.20 pode ser observada que a seqüência de comandos faz o caso divergir após levar o sistema para a região anormal.

Tabela 4.10 – Variação da tensão interna e da tensão terminal mudando da região normal para anormal até a divergência do caso

Normal - Anormal - Divergência	
Módulo da tensão na barra terminal do gerador 3 (V0)	Módulo da tensão na barra interna do gerador 3 (Eg)
1,040	1,145
1,031	1,133
1,022	1,123
1,012	1,116
1,003	1,110
0,993	1,106
0,983	1,105
0,973	1,107
0,963	1,111
0,952	1,118
0,941	1,128
*	*

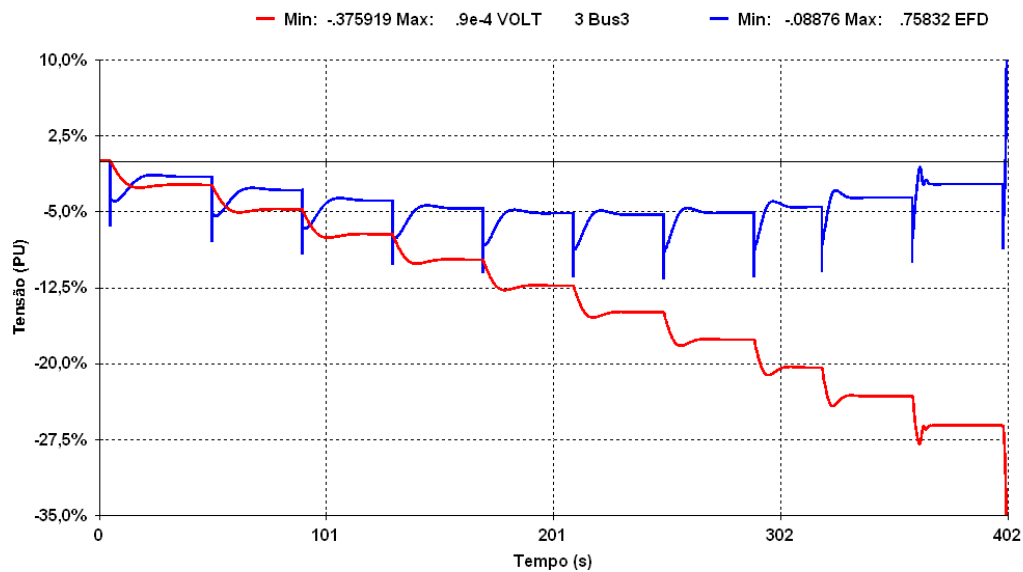


Figura 4.20 – Comparação entre a variação da tensão interna e tensão terminal até a divergência do caso

Separando os gráficos da tensão interna na Figura 4.21 e da tensão terminal na Figura 4.22 é possível observar com detalhes o que ocorre.

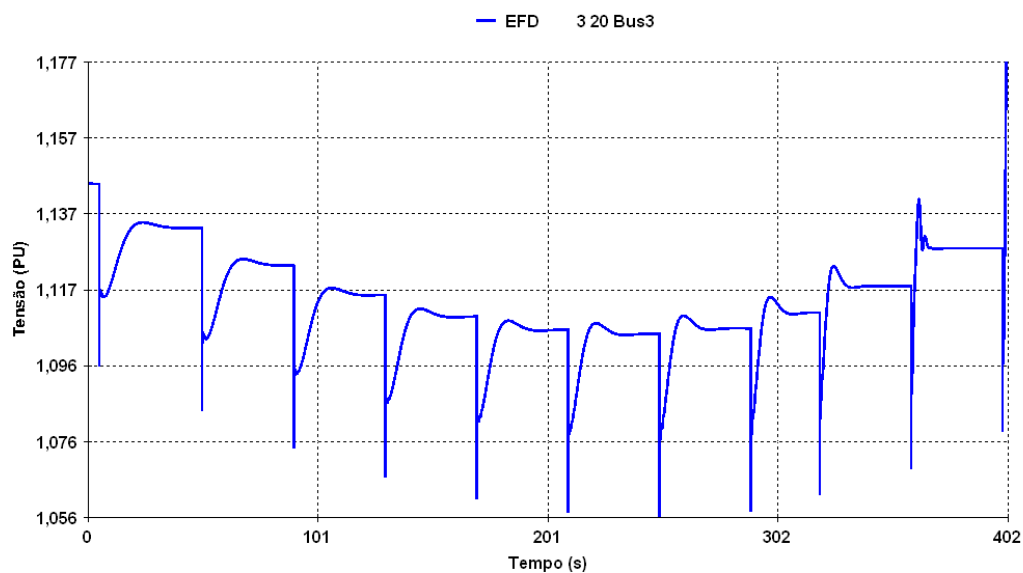


Figura 4.21 – Variação da tensão interna até a divergência do caso

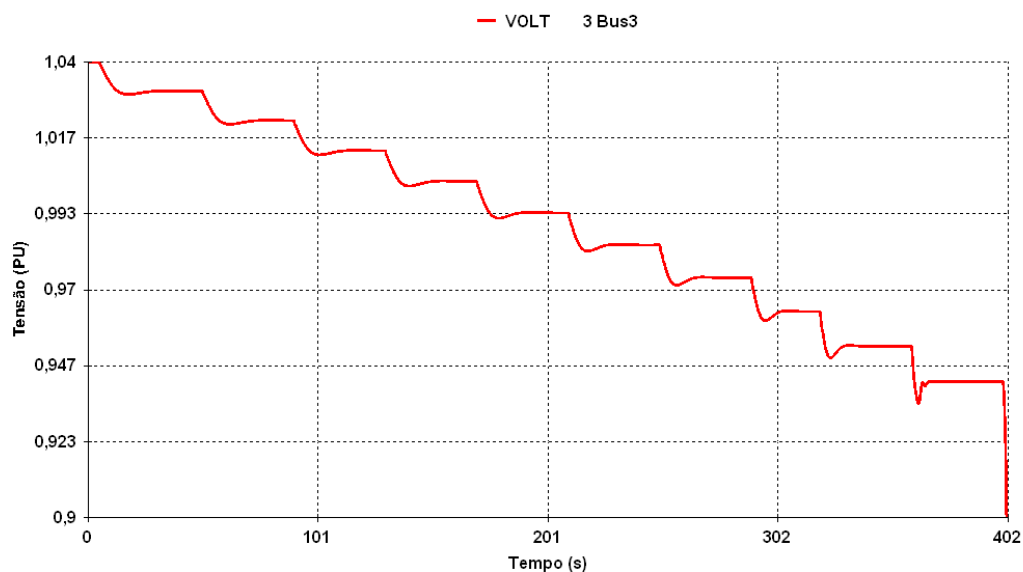


Figura 4.22 – Variação da tensão terminal até a divergência do caso

Como pode ser observado, após a mudança da região de operação, a manutenção da sequência de comandos para reduzir a tensão leva o caso a divergir.

4.3.4

Aumento da Carga do Sistema

Produzindo um aumento de carga na região normal de operação é observado o sentido das tensões interna e terminal do gerador em análise, G3.

Na Figura 4.23 é apresentada a elevação da carga ativa do sistema, enquanto que na Figura 4.24 é apresentada a elevação de carga reativa do sistema. Estas figuras representam o somatório das cargas das barras 8 e 11. Cada degrau de carga corresponde a 0,5 % de aumento. Tanto a carga ativa quanto a carga reativa foram elevadas com este percentual.

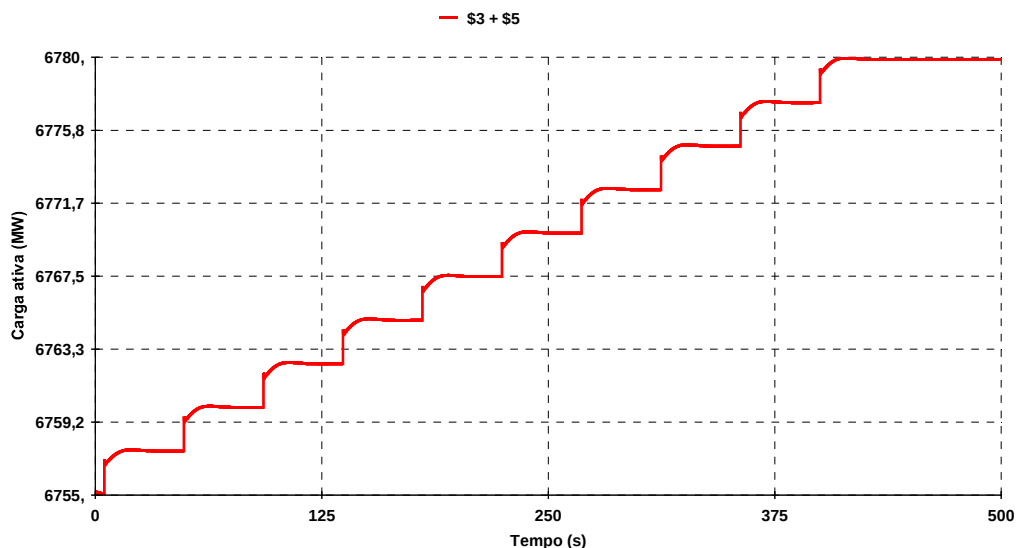


Figura 4.23 – Acréscimo da carga ativa no sistema

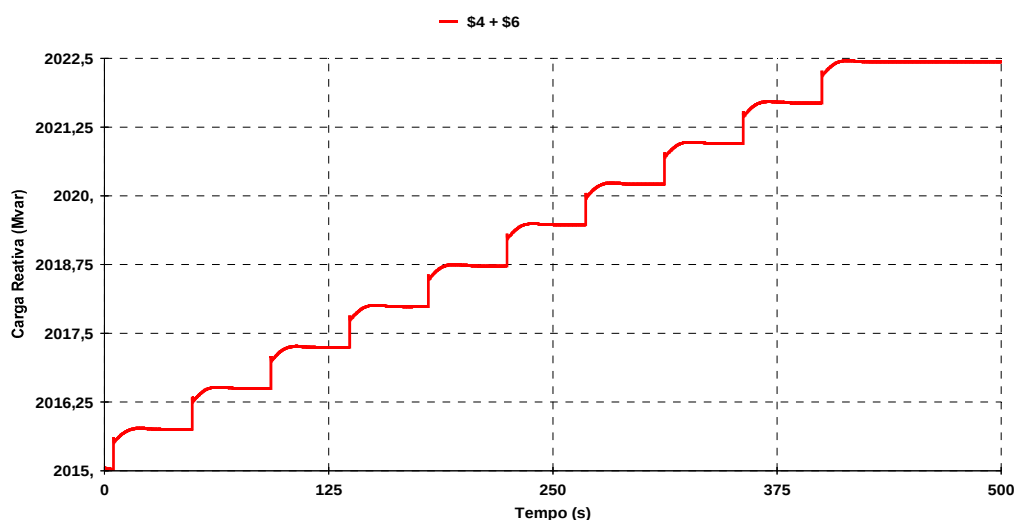


Figura 4.24 – Acréscimo da carga reativa no sistema

É possível observar, em virtude da modelagem de carga utilizada (ZIP) que além da elevação de carga proposta de 0,5% ocorre uma elevação da carga pela elevação da tensão quando esta volta ao valor pré-estabelecido. A elevação da carga tende a provocar uma redução da tensão e esta, quando retorna ao valor inicial, eleva a carga novamente.

Numericamente na Tabela 4.11 e graficamente na Figura 4.25 é mostrado o que ocorre com a tensão terminal e com a tensão interna do gerador durante o acréscimo de carga no sistema.

Tabela 4.11 – Variação da tensão interna e terminal em decorrência da elevação de carga do sistema

Aumento de carga	
Módulo da tensão na barra terminal do gerador 3 (V0)	Módulo da tensão na barra interna do gerador 3 (Eg)
1,040	1,145
1,040	1,146
1,040	1,147
1,039	1,147
1,039	1,148
1,039	1,149
1,039	1,150
1,039	1,150
1,039	1,151
1,039	1,152
1,039	1,153

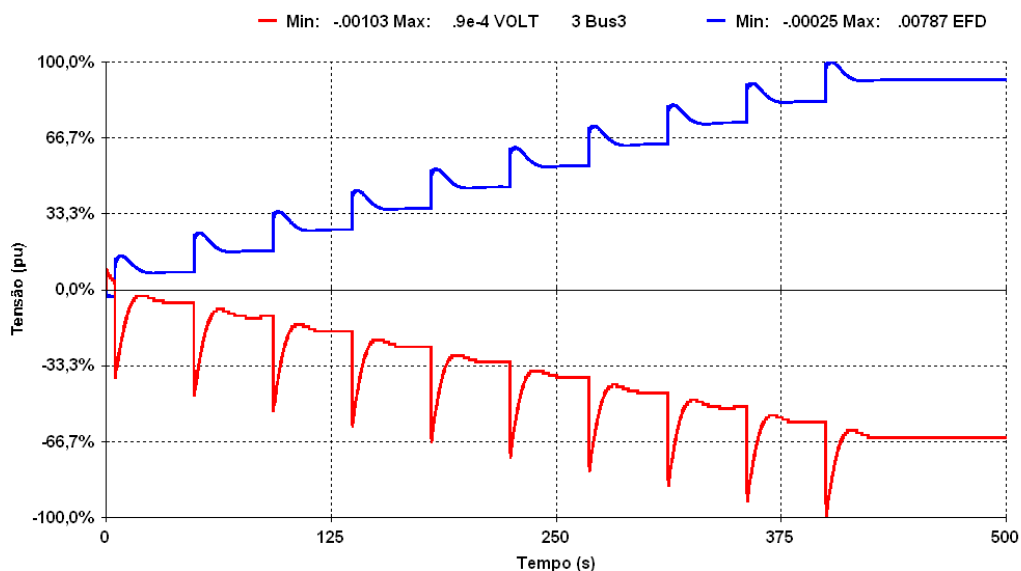


Figura 4.25 – Comparação entre a variação da tensão interna e da tensão terminal em decorrência do acréscimo de carga no sistema

Separando os gráficos da tensão interna na Figura 4.26 e da tensão terminal na Figura 4.27 é possível observar com detalhes o que ocorre com cada uma delas.

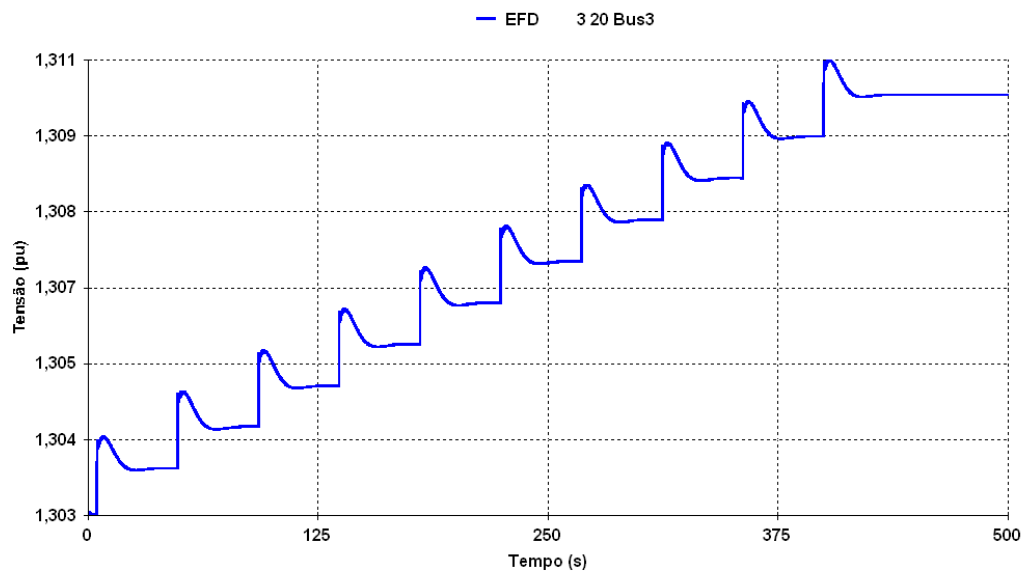


Figura 4.26 – Variação da tensão interna em decorrência do acréscimo de carga no sistema

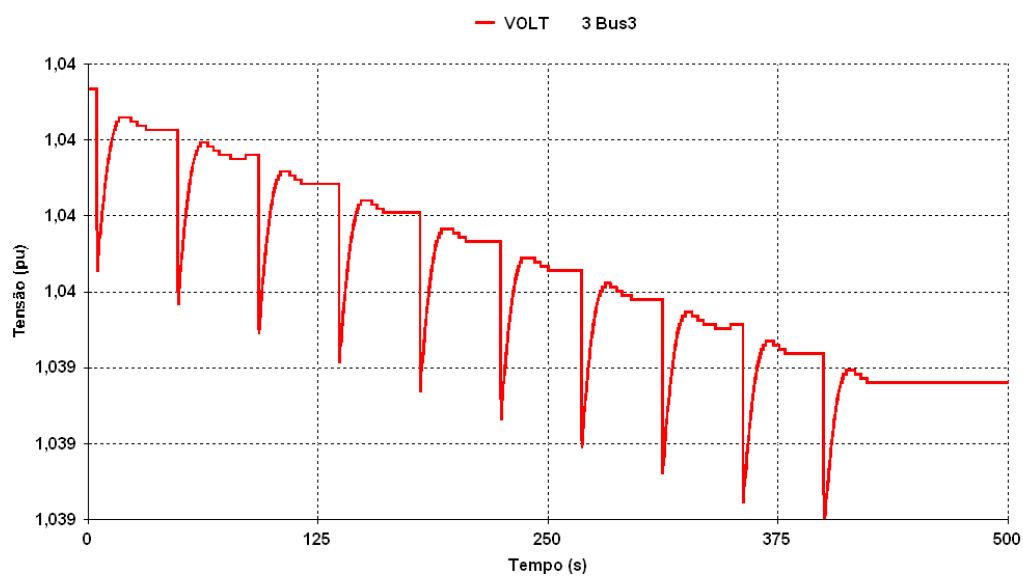


Figura 4.27 – Variação da tensão terminal em decorrência do acréscimo de carga no sistema

O acréscimo de carga no sistema faz com que o perfil de tensão caia. As barras de tensão controlada, incluindo a barra do gerador G3, procuram corrigir esse desvio da tensão inicial elevando novamente a tensão.

Analizando o que ocorre na barra de tensão controlada 3, do gerador em análise, constata-se que a tensão terminal é reduzida pelo acréscimo de carga e em seguida elevada pelo regulador de tensão do gerador G3. Essa elevação de tensão provoca mais uma elevação da carga. No novo ponto de equilíbrio, é possível observar que a tensão terminal sofreu uma leve redução (desprezível) e a tensão interna uma elevação. Apesar de uma aparente oposição nos sentidos das tensões interna e terminal, o sistema continua operando na região normal, dado que a tensão terminal permaneceu no valor desejado e a tensão interna aumentou para lidar com o acréscimo de carga.

4.4

Conclusões

Das análises em regime permanente é possível concluir que pode-se ter pontos de operação na região normal, onde as manobras de controle de tensão têm o efeito esperado, e pontos de operação na região anormal, onde as manobras usuais de controle de tensão têm efeito oposto ao esperado.

Das análises iniciais no domínio do tempo conclui-se que é possível verificar os fenômenos de estabilidade de tensão na região anormal de operação em simulações dinâmicas. Pode-se concluir também que as simulações em regime permanente são perfeitamente coerentes já que os resultados foram confirmados tanto para o ponto de operação na região normal quanto na anormal.

Com uma seqüência de comandos para aumento / redução da tensão terminal, é possível concluir que o sistema apresenta respostas diferentes para o mesmo comando em pontos de operação diferentes: é observado que o controle de tensão opera da forma esperada em alguns instantes, indicando a região normal de operação, e de forma inesperada em outros instantes, indicando a região anormal de operação. No entanto, o controle sempre opera para obter a tensão terminal desejada.

Por último é observada a atuação do controle de tensão frente à elevação de carga do sistema. Dessa simulação é possível concluir que apesar da aparente oposição entre a tensão interna, subindo, e a tensão terminal, descendo, isto não significa que o sistema esteja operando na região anormal.

Isto porque o controle atua no sentido de manter a tensão no valor de referência, pré-determinado.

Diante de todas essas simulações, é possível concluir que os fenômenos de estabilidade de tensão podem levar o sistema ao colapso, por tensão excessivamente baixa ou alta, devido a uma sucessão de ações de controle de tensão automáticas agindo de maneira inversa para obter o efeito esperado conforme as simulações das Seções 4.3.2 e 4.3.3.