

3

Análise do Efeito do Controle de Tensão em Geradores

O interesse é avaliar o efeito de ações de controle em regime permanente e no domínio do tempo. Para tal é necessário conhecer as características dos dispositivos de controle de tensão e das cargas. O interesse é puramente qualitativo: deseja-se determinar se a ação de controle produz o efeito esperado ou contrário.

Este capítulo tem o objetivo de definir as características dos equipamentos de controle de tensão (gerador e compensador síncrono) e das cargas para a análise do fenômeno de estabilidade de tensão. Para a definição dessas características foram efetuadas algumas simulações preliminares com o sistema-teste de 3 barras cujo diagrama unifilar é apresentado na Figura 3.1.

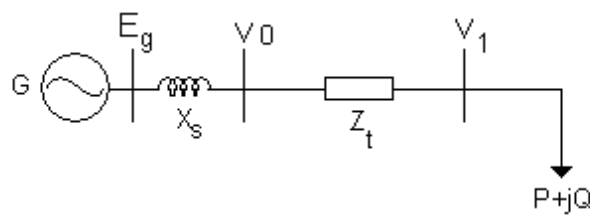


Figura 3.1 – Diagrama unifilar do sistema-teste de 3 barras

3.1

Modelagem do Gerador / Compensador Síncrono

O modelo de geradores e compensadores síncronos utilizados em regime permanente é uma tensão interna atrás da reatância síncrona. Para isso, é criada uma barra fictícia, conectada à barra do gerador pela reatância síncrona. Assim, pode ser analisada relação entre a tensão interna na barra fictícia e a tensão terminal. Para as simulações no domínio do tempo foi utilizado um modelo de pólos salientes com um enrolamento de campo e dois enrolamentos amortecedores, sendo um no eixo direto e um no eixo de quadratura (modelo

MD02 do ANATEM¹). O objetivo é determinar se, para provocar uma elevação na tensão terminal do gerador, a tensão interna se eleva ou se reduz.

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.

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.

É 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. Esses resultados serão simulados no domínio do tempo para comprovar o risco de colapso.

3.2

Modelagem da Carga

A modelagem da carga é de fundamental importância para o sucesso da simulação.

É observado que a modelagem da carga influencia consideravelmente nos resultados. Pontos de operação na região anormal podem apresentar resultados

¹ O programa ANATEM é de propriedade do CEPEL, uma empresa do Grupo ELETROBRÁS, e faz a simulação de estabilidade eletromecânica de sistemas multimáquinas de grande porte, usando o esquema de solução alternado implícito com método trapezoidal de integração. O ANATEM 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.

compatíveis com um ponto na região normal ou até mesmo não convergir, dependendo da configuração da carga utilizada.

É sabido que o ANAREDE² utiliza a carga modelo “potência constante” como padrão das simulações e o ANATEM utiliza o modelo “impedância constante”.

Para possibilitar uma comparação estática versus dinâmica confiável, é necessário que se utilize a mesma modelagem de carga para as duas simulações. Diante disso, alguns testes com cargas foram efetuados conforme segue.

3.2.1

Carga “Potência Constante”

A carga modelo “potência constante”, padrão no programa de fluxo de potência utilizado (ANAREDE), permanece inalterada independente do valor da tensão na barra onde está conectada. Este modelo de carga é considerado o mais severo para perturbações.

Este modelo de carga é o ideal para os estudos de estabilidade de tensão. Na região anormal de operação, as ações de controle de tensão podem provocar efeitos opostos ao esperado levando o sistema ao colapso.

Conforme mostrado no Capítulo 2, para este modelo de carga, quando se conecta um capacitor em paralelo com a carga, a tensão aumenta quando o ponto de operação está na parte superior da curva PV e diminui quando o ponto de operação está na parte inferior da curva.

Como é observado na Figura 3.2, no ponto de operação $A(k)$, na parte superior da curva, a tensão elevou com a inserção de um capacitor para $A(k+1)$

² O programa ANAREDE é de propriedade do CEPEL, uma empresa do Grupo ELETROBRÁS. Algumas das técnicas e métodos desenvolvidos para a análise de redes elétricas foram integrados em um conjunto de aplicações computacionais denominado Programa de Análise de Redes – ANAREDE, que consiste dos seguintes programas: fluxo de potência, equivalente de redes, análise de contingências, análise de sensibilidade de tensão, redespacho de potência ativa e fluxo de potência continuado.

enquanto o ponto de operação B(k), na parte inferior da curva, a tensão reduziu para B(k+1) com a inserção de um capacitor.

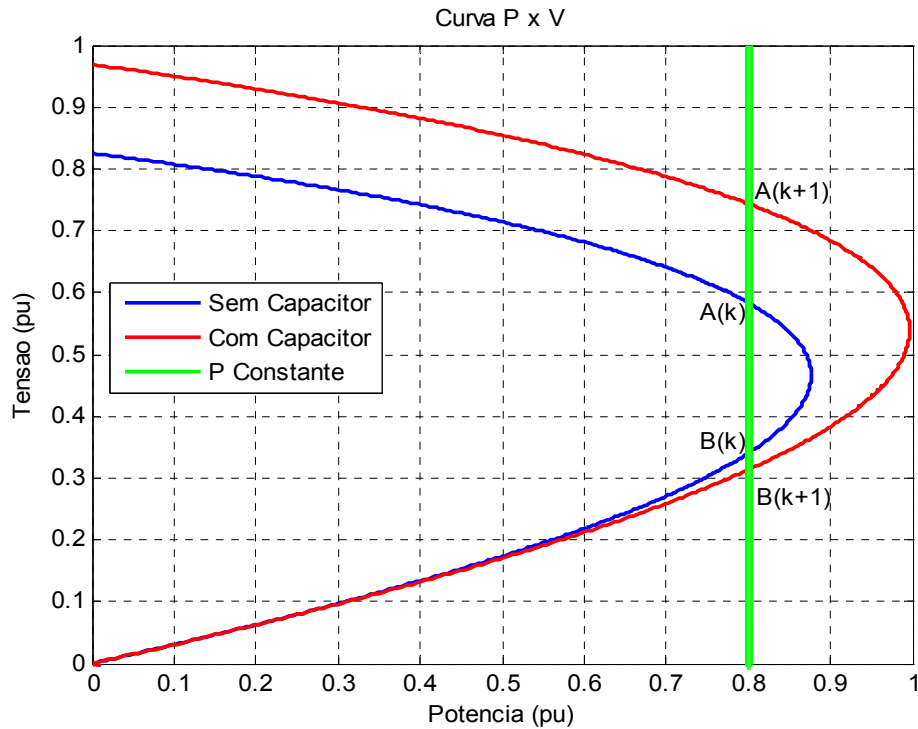


Figura 3.2 – Curva PV com carga tipo potência constante

3.2.1.1

Testes do Sistema de 3 Barras com a Carga “Potência Constante”

a) Região Normal de Operação

O ponto de operação inicial do sistema de 3 barras da Figura 3.1 é apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Ponto de operação inicial

Região Normal	
Eg (pu)	1,494∠0
V0 (pu)	1,000∠-25,1
V1 (pu)	0,995∠-25,3
P (MW)	600
Q (Mvar)	330
Zt (%)	0,0342 + j0,0939
Xs (%)	10,57

A simulação utilizando um programa de fluxo de carga consistiu em elevar/reduzir a tensão na barra terminal (V_0) e observar o sentido da variação da tensão na barra interna do gerador (E_g).

Os resultados da simulação são apresentados numericamente na Tabela 3.2 e graficamente na Figura 3.3.

Tabela 3.2 – Variação tensão terminal controlada e respectiva variação da tensão interna controladora, carga “potência constante”

Região Normal		
Módulo da tensão na barra terminal do gerador (V_t)	Módulo da tensão na barra interna do gerador (E_g)	Módulo da tensão na barra de carga (V_c)
0,900	1,475	0,894
0,950	1,482	0,945
1,000	1,495	0,995
1,050	1,513	1,045
1,100	1,534	1,095

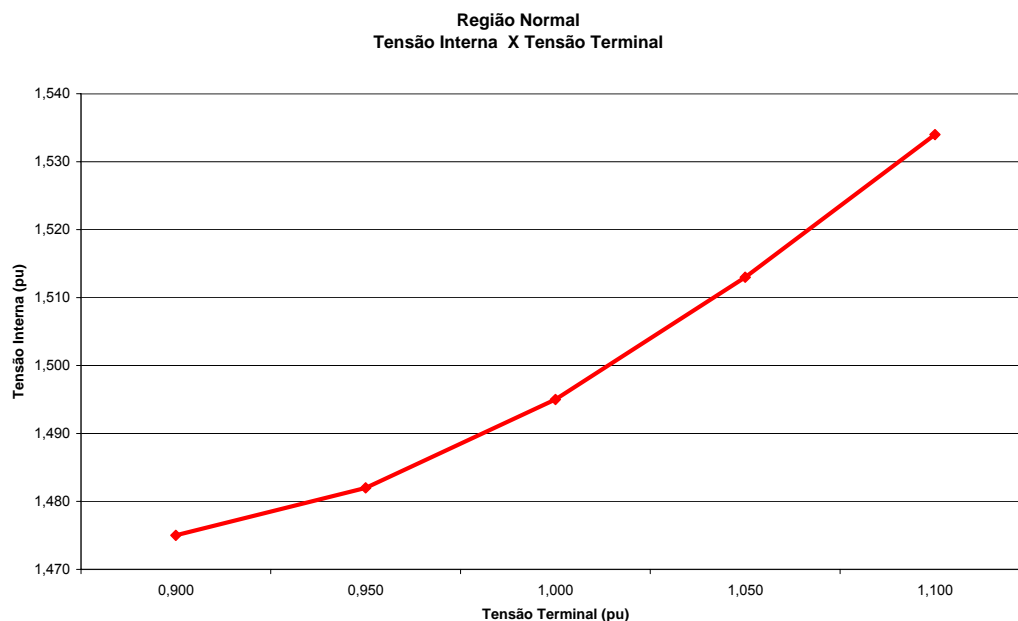


Figura 3.3 – Variação da tensão interna X tensão terminal, carga “potência constante”

Nos resultados do problema de fluxo de carga é observado que a variação das tensões interna e terminal ocorrem sempre no mesmo sentido. Este é o resultado esperado para um sistema operando normalmente e carga do tipo “potência constante”.

Utilizando o mesmo ponto de operação inicial da Tabela 3.1 para o sistema-teste da Figura 3.1, foi realizada a simulação no domínio do tempo. Foram efetuados dois comandos para elevar a tensão terminal do gerador, o primeiro em 5 s e o segundo em 30 s, e observado o sentido da variação da tensão interna do mesmo. Os resultados são apresentados na Figura 3.4.

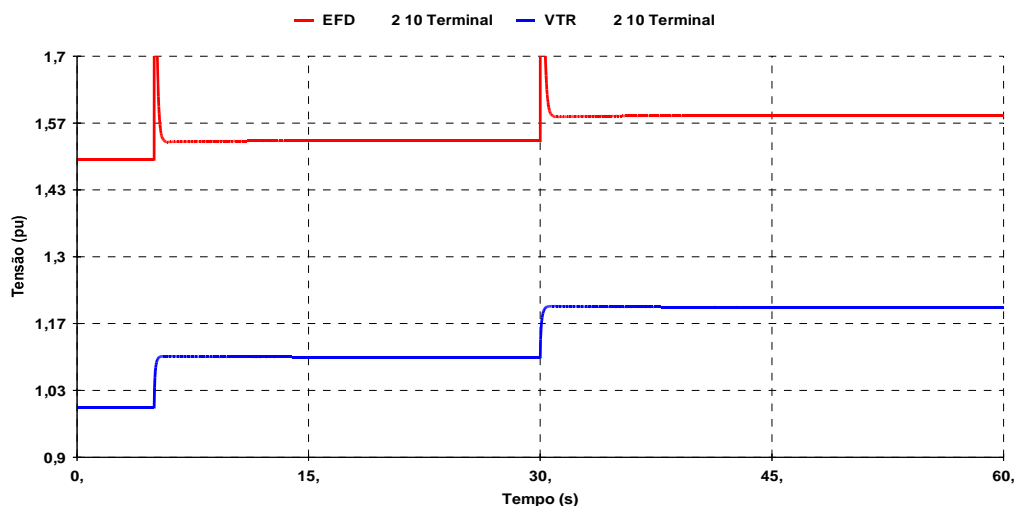


Figura 3.4 – Variação da tensão interna e tensão terminal, carga “potência constante”, no domínio do tempo

Na simulação no domínio do tempo, carga “potência constante”, é observado que as variações das tensões interna e terminal ocorrem no mesmo sentido. Este é o resultado esperado para um caso na região normal de operação.

b) Região Anormal de Operação

O ponto de operação inicial do sistema-teste de 3 barras da Figura 2.13 é apresentado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Ponto de operação inicial

Região Anormal	
Eg (pu)	3,456∠0
V0 (pu)	1,000∠-44,7
V1 (pu)	0,979∠-45,6
P (MW)	2302
Q (Mvar)	1329
Zt (%)	0,0342 + j0,0939
Xs (%)	10,57

Novamente foram efetuados alguns comandos para elevar/reduzir a tensão terminal (V_0) e observado o sentido da variação da tensão interna (E_g). Os resultados são apresentados na Tabela 3.4 e na Figura 3.5:

Tabela 3.4 – Variação da tensão interna e tensão terminal, carga “potência constante”

Região Anormal		
Módulo da tensão na barra terminal do gerador (V_t)	Módulo da tensão na barra interna do gerador (E_g)	Módulo da tensão na barra de carga (V_c)
0,900	3,752	0,877
0,950	3,611	0,928
1,000	3,492	0,979
1,050	3,389	1,030
1,100	3,301	1,081

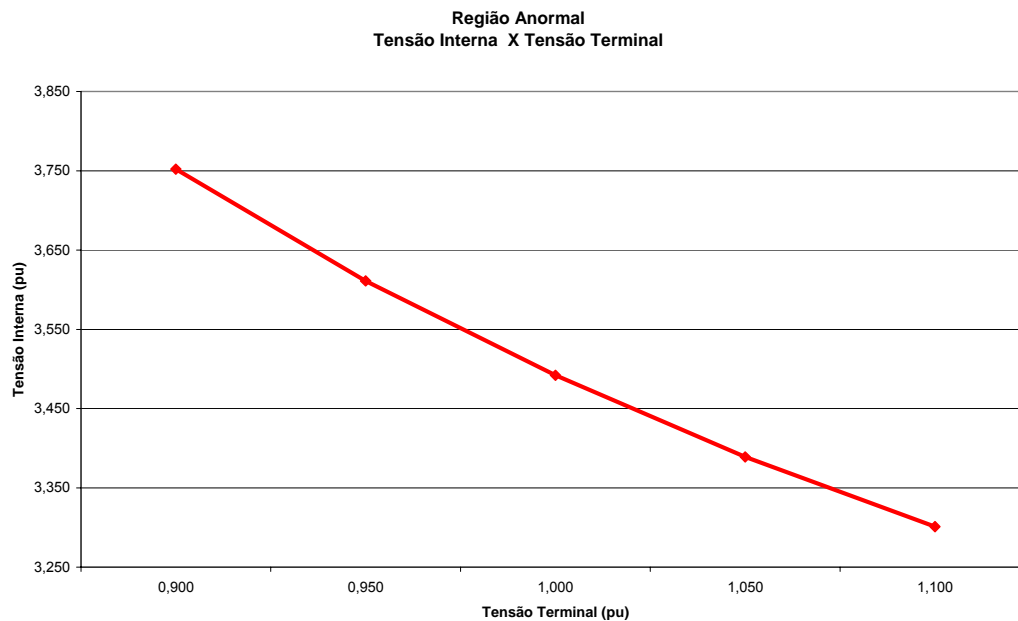


Figura 3.5 – Variação da tensão interna X tensão terminal e carga “potência constante”

Nos resultados do problema de fluxo de carga é observado que o sentido da variação da tensão interna é oposto ao sentido da variação da tensão terminal. A tensão interna se reduz para provocar uma elevação da tensão terminal. Essa variação é inesperada, significando que o sistema está operando na região anormal.

Utilizando o mesmo ponto de operação inicial da Tabela 3.3 para o sistema-teste da Figura 3.1, foi realizada a simulação no domínio do tempo.

Novamente foram efetuados dois comandos para elevar a tensão terminal do gerador e observado o sentido da variação da tensão interna do mesmo. Os resultados são apresentados na Figura 3.6.

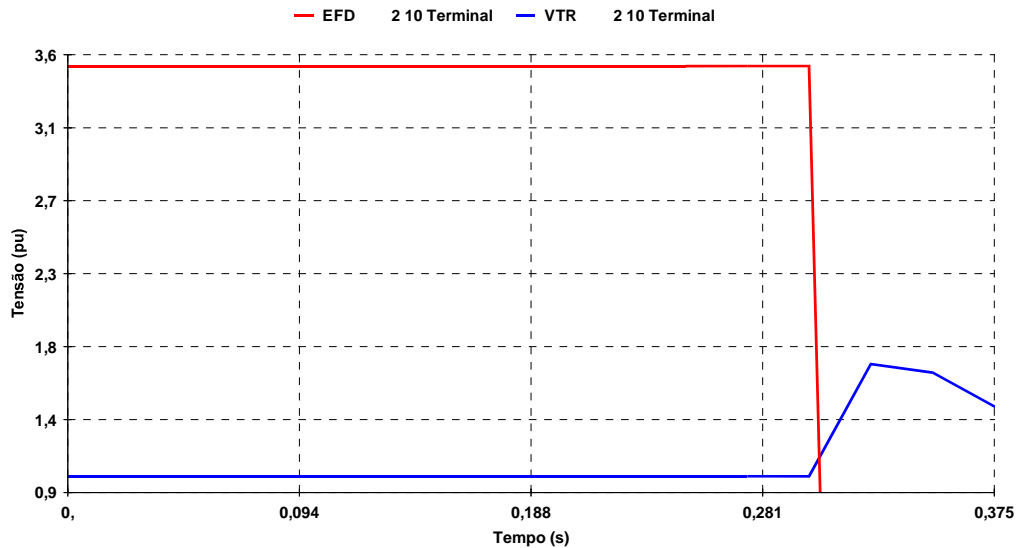


Figura 3.6 – Variação da tensão interna e tensão terminal, carga “potência constante”, no domínio do tempo

Na simulação no domínio do tempo, carga “potência constante”, foi observada a interrupção da simulação aos 0,375 s, tempo este anterior à primeira perturbação a ser aplicada, aos 5 s. Nada se pode concluir sobre esta simulação.

Este tipo de carga é utilizado com sucesso na simulação estática (ANAREDE), porém na simulação no domínio do tempo (ANATEM), apresenta problemas de convergência, provavelmente devido à instabilidade do algoritmo utilizado.

3.2.2

Carga “Impedância Constante”

A carga modelo “impedância constante”, padrão no programa de simulação no domínio do tempo utilizado (ANATEM), varia de acordo com o valor da tensão na barra onde está conectada, elevada ao quadrado. Este modelo de carga é considerado o menos severo para perturbações e não é utilizado para estudos de estabilidade de tensão. Todos os pontos de operação com esse tipo de carga,

tanto na região superior quanto na região inferior da curva PV, provocam elevações de tensão quando é inserido um capacitor em paralelo com a carga.

Graficamente é possível observar na Figura 3.7, que no ponto de operação $A(k)$ na parte superior da curva PV, a inserção de um capacitor provoca a elevação da tensão, $A(k+1)$.

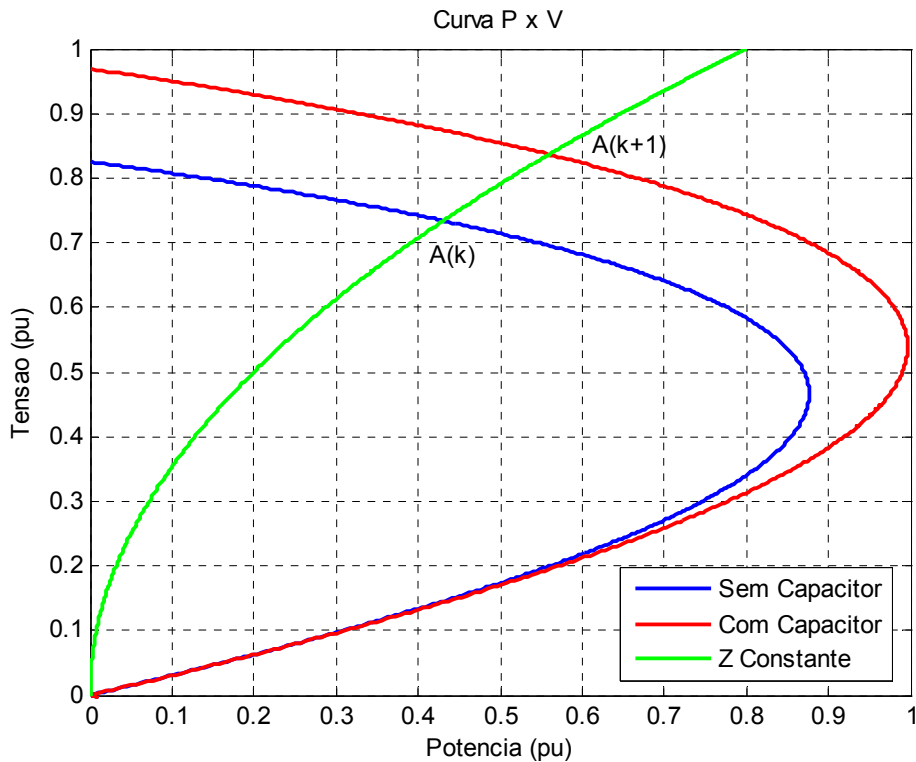


Figura 3.7 – Curva PV com carga tipo “impedância constante” e ponto de operação na parte superior da curva

É observado na Figura 3.8, que mesmo com um ponto de operação $B(k)$ na parte inferior da curva PV, a inserção de um capacitor provoca a elevação da tensão, $B(k+1)$.

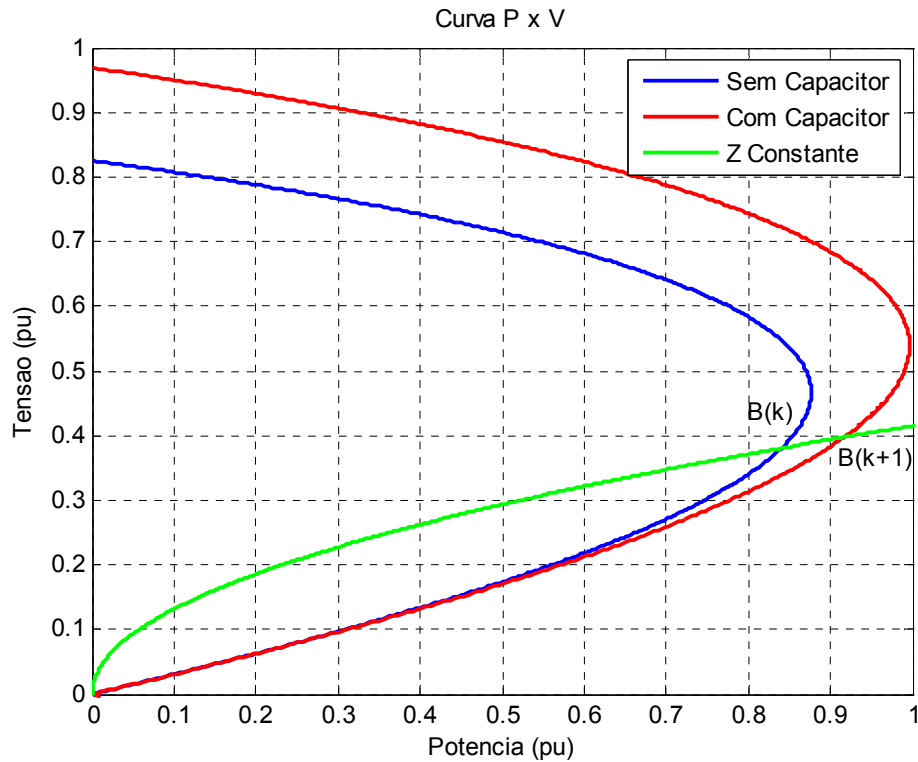


Figura 3.8 – Curva PV com carga tipo “impedância constante” e ponto de operação na parte inferior da curva

3.2.2.1

Testes do Sistema de 3 Barras com a Carga “Impedância Constante”

a) Região Normal de Operação

Utilizando o ponto de operação inicial da Tabela 3.3 para o sistema-teste da Figura 3.1 são realizados alguns comandos para elevar/reduzir a tensão terminal (V_0) e observar o sentido da variação da tensão interna do gerador (E_g). Os resultados da simulação são apresentados numericamente na Tabela 3.5 e graficamente na Figura 3.9.

Tabela 3.5 – Variação da tensão interna e tensão terminal, carga “impedância constante”

Região Normal		
Módulo da tensão na barra terminal do gerador (Vt)	Módulo da tensão na barra interna do gerador (Eg)	Módulo da tensão na barra de carga (Vc)
0,900	1,346	0,895
0,950	1,421	0,945
1,000	1,495	0,995
1,050	1,570	1,045
1,100	1,645	1,094

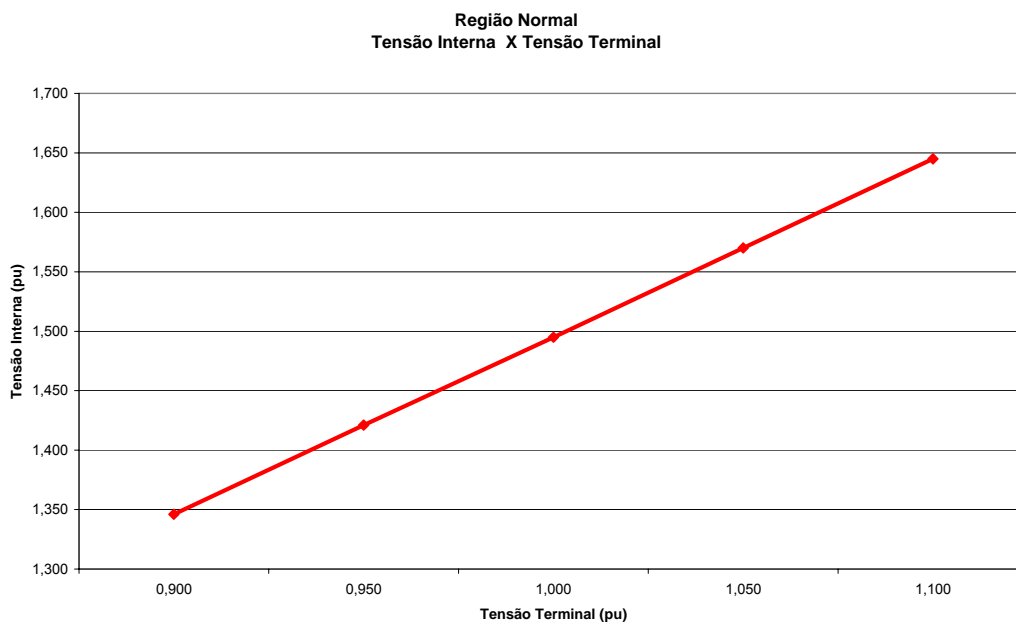


Figura 3.9 – Variação da tensão interna X tensão terminal, carga “impedância constante”

Nos resultados do problema de fluxo de carga é observado que a variação das tensões interna e terminal ocorrem sempre no mesmo sentido. Este é o resultado esperado para um sistema na região normal de operação e carga “impedância constante”.

Utilizando o mesmo ponto de operação inicial da Tabela 3.1 para o sistema-teste da Figura 3.1, foi realizada a simulação no domínio do tempo. Foram efetuados dois comandos para elevar a tensão terminal do gerador, o primeiro em 5 s e o segundo em 30 s, e observado o sentido da variação da tensão interna do mesmo. Os resultados são apresentados na Figura 3.10.

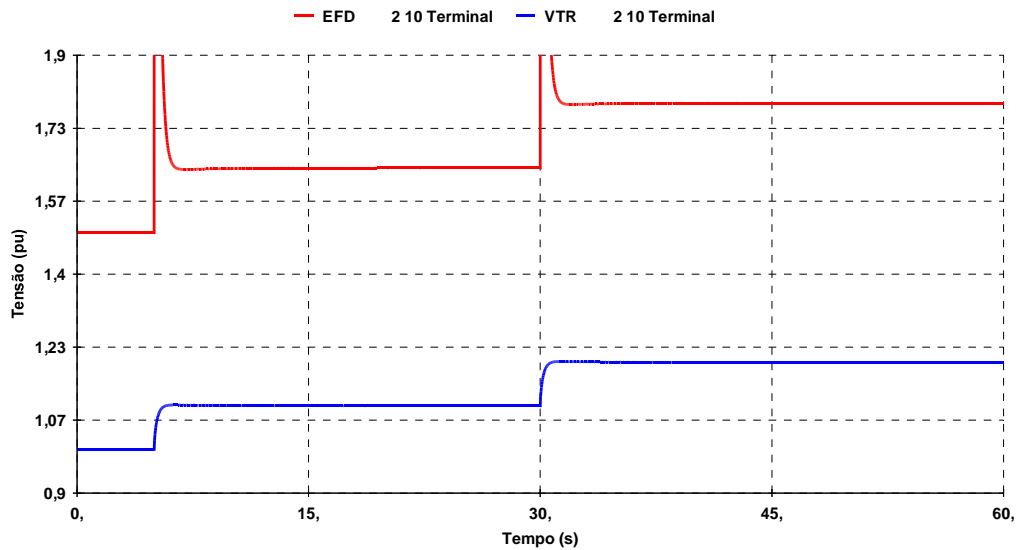


Figura 3.10 – Variação da tensão interna e tensão terminal, carga “impedância constante” no domínio do tempo

Na simulação no domínio do tempo, carga “impedância constante”, é observado que as variações das tensões interna e terminal ocorrem no mesmo sentido. Este é o resultado esperado para um caso na região normal de operação.

b) Região Anormal de Operação

Utilizando agora o ponto de operação inicial da Tabela 3.3 para o sistema da Figura 3.1, novamente foram efetuados alguns comandos para elevar/reduzir a tensão terminal (V_0) e observado o sentido da variação da tensão interna (E_g).

Os resultados são apresentados na Tabela 3.6 e na Figura 3.11:

Tabela 3.6 – Variação da tensão interna e tensão terminal, carga “impedância constante”

Região Anormal		
Módulo da tensão na barra terminal do gerador (V_t)	Módulo da tensão na barra interna do gerador (E_g)	Módulo da tensão na barra de carga (V_c)
0,900	3,040	0,882
0,950	3,209	0,931
1,000	3,378	0,980
1,050	3,547	1,029
1,100	3,716	1,078

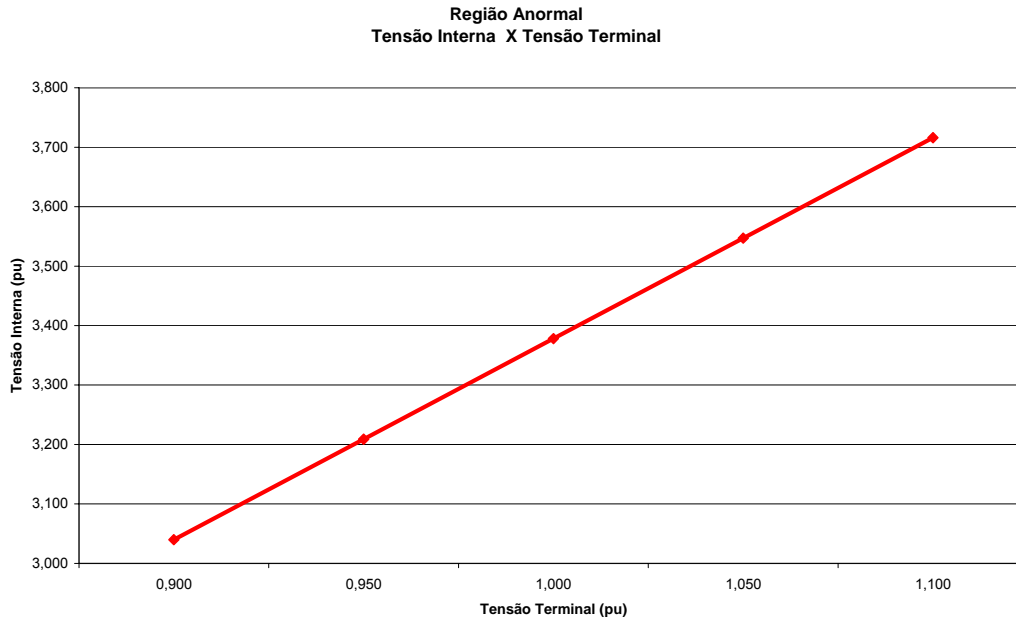


Figura 3.11 – Variação da tensão interna X tensão terminal, carga “impedância constante”

Nos resultados do problema de fluxo de carga, carga “impedância constante”, é observado que o sentido da variação da tensão interna é o mesmo sentido da variação da tensão terminal. A tensão interna se eleva para provocar uma elevação da tensão terminal. Essa variação é esperada para um caso na região normal de operação. Este efeito é provocado pela característica da carga “impedância constante” conforme mostrado na Figura 3.8.

Utilizando o mesmo ponto de operação inicial da Tabela 3.3 para o sistema-teste da Figura 3.1, foi realizada a simulação no domínio do tempo. Novamente foram efetuados dois comandos para elevar a tensão terminal do gerador e observado o sentido da variação da tensão interna do mesmo. Os resultados são apresentados na Figura 3.12.

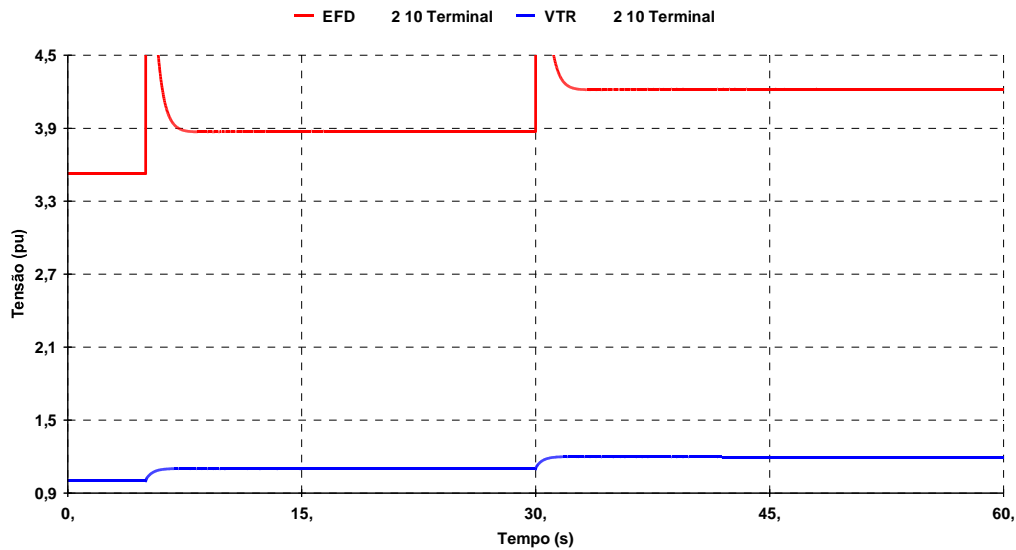


Figura 3.12 – Variação da tensão interna e tensão terminal, carga “impedância constante”, no domínio do tempo

Na simulação no domínio do tempo, carga “impedância constante”, é observado que as variações das tensões interna e terminal ocorrem no mesmo sentido. Este é o resultado esperado para um caso na região normal de operação.

Este tipo de carga faz com que casos com o ponto de operação na parte inferior da curva apresentem resultados esperados para a parte superior da curva.

3.2.3

Carga “ZIP” (20% Z, 20% I e 60% P)

Em virtude das características apresentados na modelagem das cargas nos itens anteriores, que impedia a realização com sucesso das simulações no domínio do tempo com carga "potência constante", e que a análise era inadequada para carga "impedância constante", optou-se por utilizar uma união dos três modelos de carga (“potência constante”, “impedância constante” e “corrente constante”) com a maior parte da carga, 60%, como “potência constante”.

A união desses três tipos de carga, nesta proporção, pode ser observada na Figura 3.13 e na Figura 3.14.

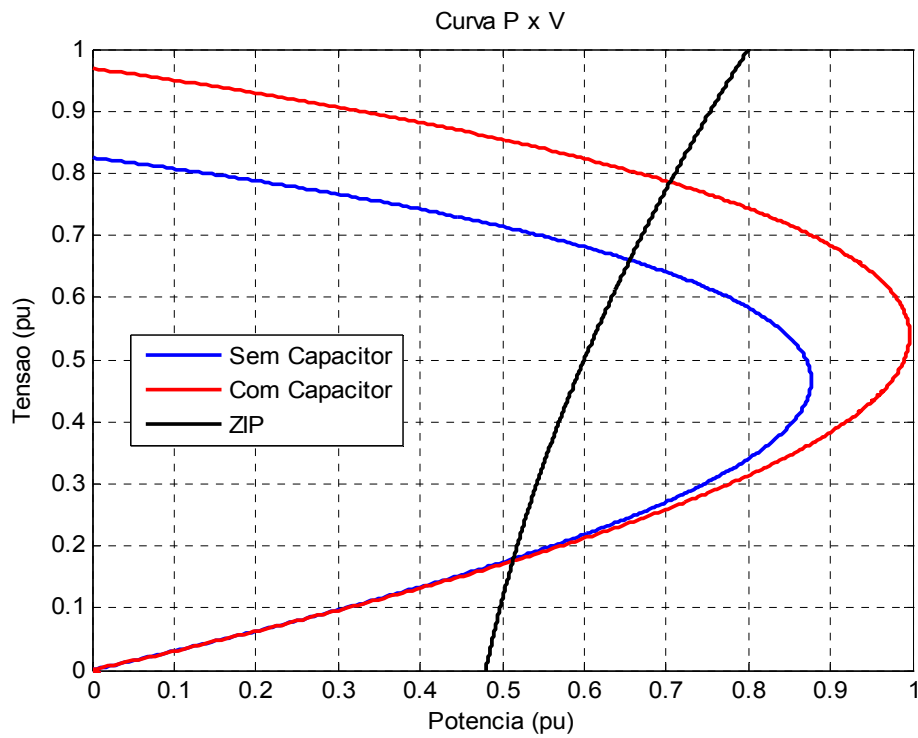


Figura 3.13 - Curva PV com carga tipo "ZIP"

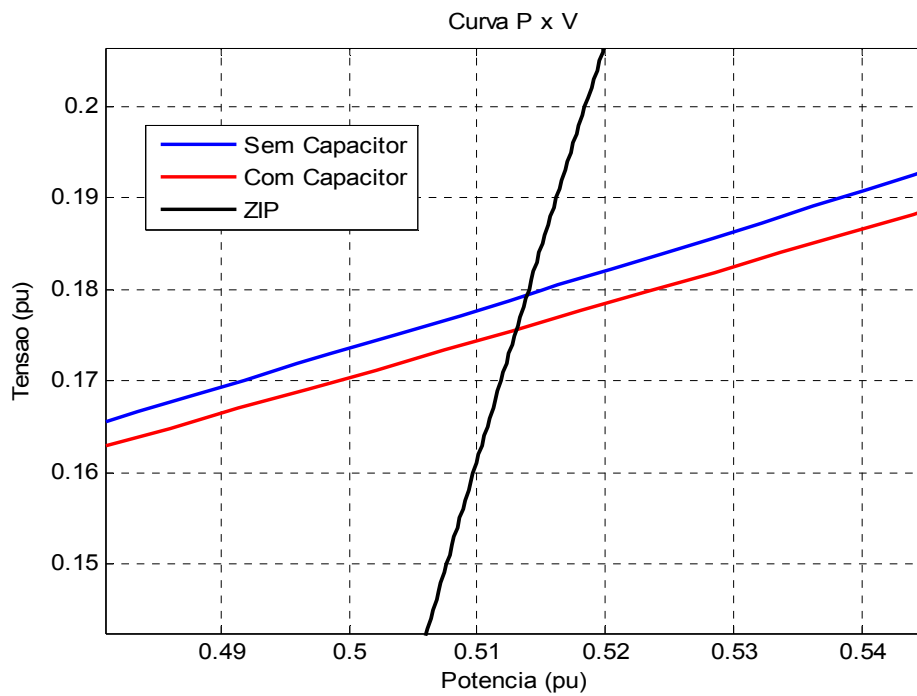


Figura 3.14 – Detalhe do ponto de operação na região anormal da curva PV com carga tipo "ZIP"

Graficamente é possível observar que a variação de tensão interna versus terminal pode ocorrer em sentidos opostos tendo em vista que a curva da carga “corta” a curva PV em dois pontos.

3.2.3.1

Testes do Sistema de 3 Barras com a Carga “ZIP (20% Z, 20% I e 60% P)”.

a) Região Normal de Operação

Utilizando o ponto de operação inicial da Tabela 3.1 para o sistema-teste da Figura 3.1, agora com a carga “ZIP” proposta, são realizados alguns comandos para elevar/reduzir a tensão terminal (V_0) e observar o sentido da variação da tensão interna do gerador (E_g).

Os resultados da simulação são apresentados numericamente na Tabela 3.7 e graficamente na Figura 3.15.

Tabela 3.7 – Variação da tensão interna e tensão terminal, carga “ZIP”

Região Normal		
Módulo da tensão na barra terminal do gerador (V_t)	Módulo da tensão na barra interna do gerador (E_g)	Módulo da tensão na barra de carga (V_c)
0,900	1,434	0,895
0,950	1,463	0,945
1,000	1,495	0,995
1,050	1,530	1,045
1,100	1,566	1,095

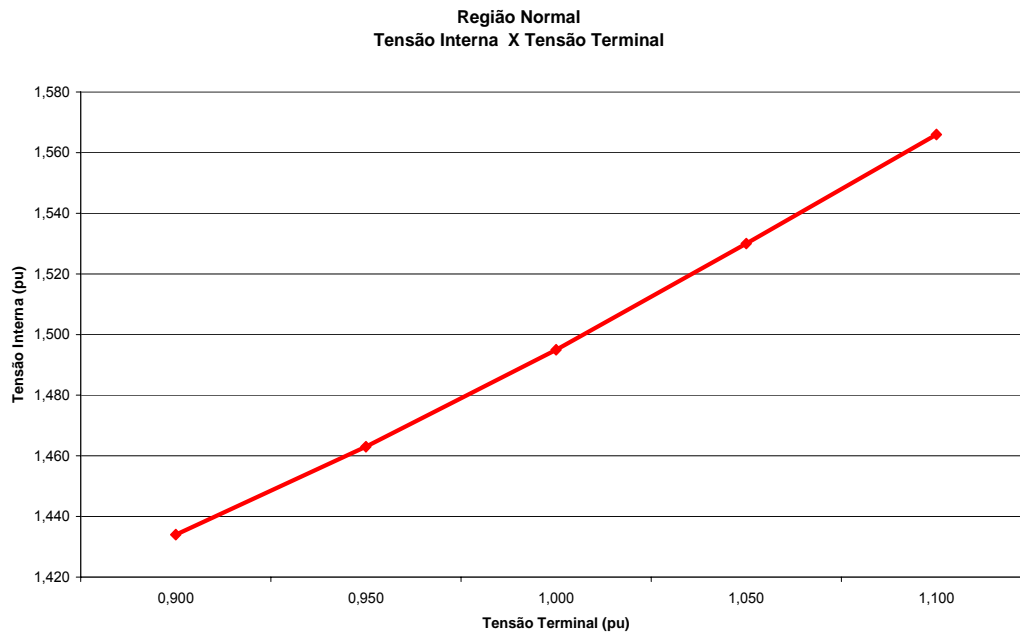


Figura 3.15 – Variação da tensão interna X tensão terminal, carga ZIP

Nos resultados do problema de fluxo de carga é observado que a variação das tensões interna e terminal ocorrem sempre no mesmo sentido. Este é o resultado esperado para um sistema na região normal de operação e carga “ZIP”.

Utilizando o mesmo ponto de operação inicial da Tabela 3.1 para o sistema-teste da Figura 3.1, foi realizada a simulação no domínio do tempo com carga “ZIP”. Foram efetuados dois comandos para elevar a tensão terminal do gerador, o primeiro em 5 s e o segundo em 30 s, e observado o sentido da variação da tensão interna do mesmo. Os resultados são apresentados na Figura 3.16.

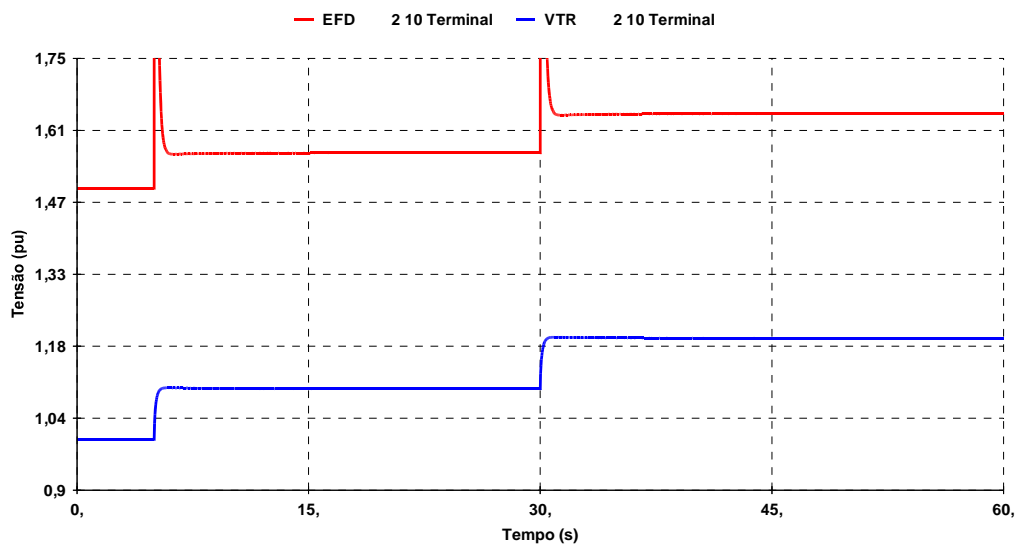


Figura 3.16 – Variação da tensão interna e tensão terminal, carga “ZIP”, no domínio do tempo

Na simulação no domínio do tempo é observado que as variações das tensões interna e terminal ocorrem no mesmo sentido. Este é o resultado esperado para um caso na região normal de operação.

b) Região Anormal de Operação

Utilizando agora o ponto de operação inicial na região anormal da Tabela 3.3 para o sistema da Figura 3.1, novamente foram efetuados alguns comandos para elevar/reduzir a tensão terminal (V_0) e observado o sentido da variação da tensão interna (E_g). Os resultados são apresentados na Tabela 3.8 e na Figura 3.17.

Tabela 3.8 – Variação da tensão interna e tensão terminal, carga “ZIP”

Região Anormal		
Módulo da tensão na barra terminal do gerador (V_t)	Módulo da tensão na barra interna do gerador (E_g)	Módulo da tensão na barra de carga (V_c)
0,900	3,559	0,878
0,950	3,519	0,929
1,000	3,492	0,979
1,050	3,474	1,029
1,100	3,464	1,080

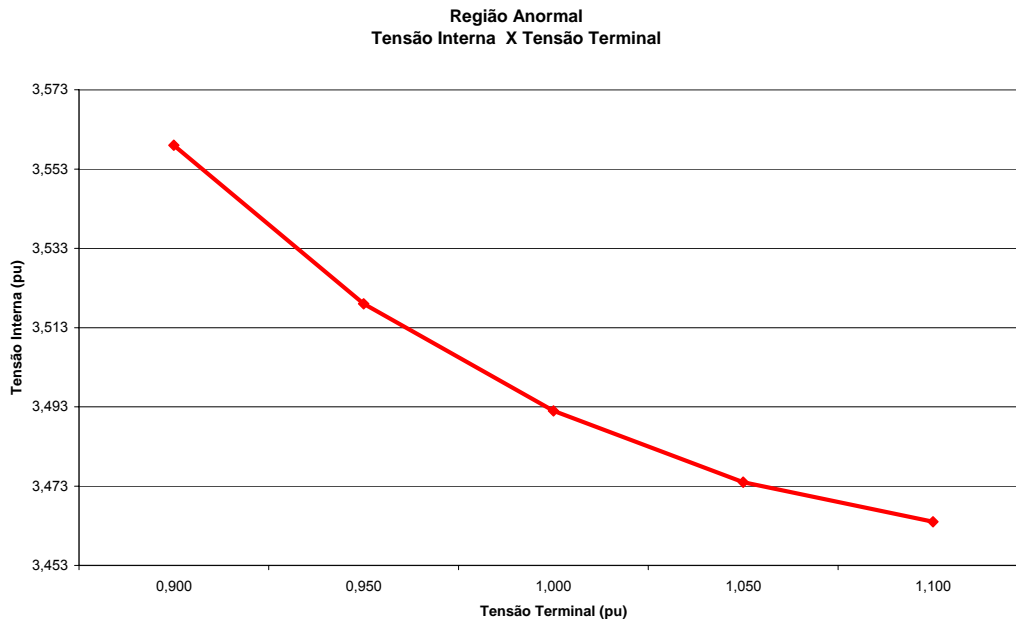


Figura 3.17 – Variação da tensão interna X tensão terminal, carga “ZIP”

Nos resultados do problema de fluxo de carga é observado que o sentido da variação da tensão interna é oposto ao sentido da variação da tensão terminal. A tensão interna se reduz para provocar uma elevação da tensão terminal. Essa variação é inesperada, significando que o sistema está operando na região anormal.

Utilizando o mesmo ponto de operação inicial da Tabela 3.3 para o sistema-teste da Figura 3.1, foi realizada a simulação no domínio do tempo com carga “ZIP”. Novamente foram efetuados dois comandos para elevar a tensão terminal do gerador e observado o sentido da variação da tensão interna do mesmo. Os resultados são apresentados na Figura 3.18.

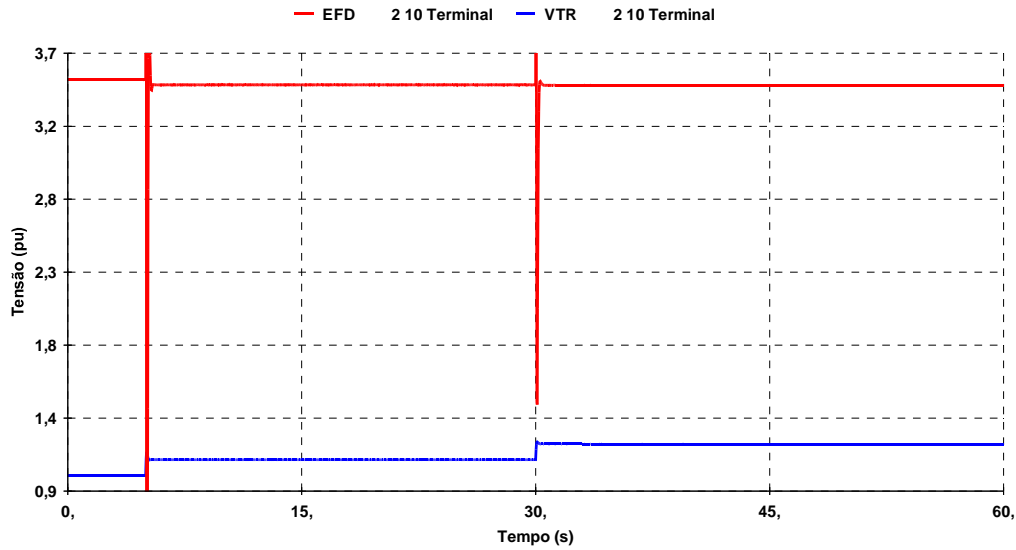


Figura 3.18 – Variação da tensão interna e tensão terminal, carga “ZIP”, no domínio do tempo

Na simulação no domínio do tempo, é observado que as variações das tensões interna e terminal ocorrem em sentidos opostos.

As variações podem ser mais bem observadas na Figura 3.19, tensão interna reduzindo, e na Figura 3.20, tensão terminal elevando.

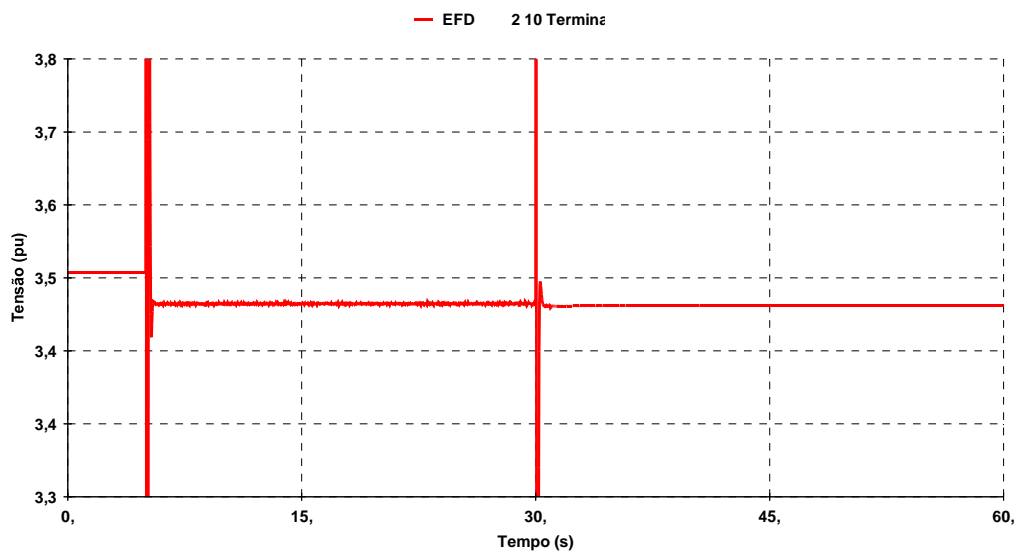


Figura 3.19 – Variação da tensão interna para o comando de elevar a tensão terminal com carga “ZIP”

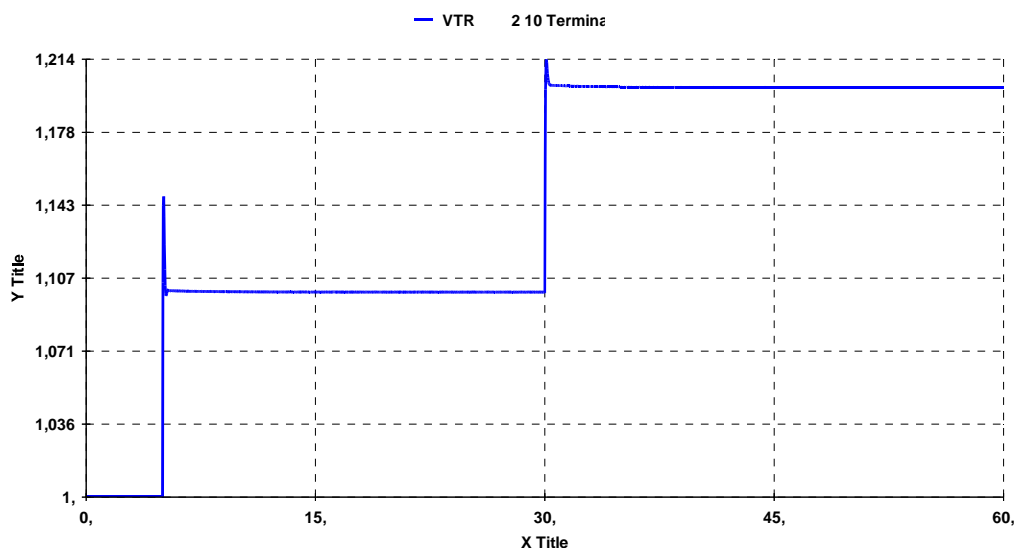


Figura 3.20 – Variação da tensão terminal para o comando de elevação com carga “ZIP”

Neste teste e com esta modelagem de carga, é possível observar o controle de tensão atuando de maneira oposta ao esperado, levando a tensão terminal para os valores desejados. Neste momento, não há uma explicação para isso. Talvez a análise modal nesse ponto de operação forneça uma explicação.

3.3

Conclusões

Para as simulações em regime permanente é necessária a criação de uma barra fictícia, conectada à barra terminal do gerador / compensador síncrono por uma reatância síncrona, para que se possa observar os valores de tensão interna e tensão terminal. Nas simulações no domínio do tempo, essa barra fictícia não é necessária, pois o software já fornece a tensão de excitação (tensão interna) da máquina.

O uso da carga tipo "potência constante" possibilitou análises compatíveis, através da solução de problemas de fluxo de potência, tanto na região normal quanto na anormal. Porém, na simulação no domínio do tempo, o caso da região anormal apresentou problemas de convergência. Logo, com esta modelagem de carga não se alcançou o objetivo das simulações.

O uso da carga tipo "impedância constante" possibilitou a obtenção de resultados corretos na região normal de operação, tanto na solução de problemas de fluxo de carga quanto na simulação no domínio do tempo. Porém, na região anormal, os casos convergiram como se estivessem na região normal de operação, o que já era esperado. Logo, com esta modelagem de carga não se alcançou o objetivo das simulações.

O uso da carga "ZIP" (20%, 20% e 60%) possibilitou a obtenção de resultados corretos na região normal e anormal para as simulações através do algoritmo de fluxo de potência e no domínio do tempo. Com esta modelagem de carga o objetivo das simulações foi alcançado. Assim, este modelo será utilizado nas simulações dos próximos capítulos.