



Bruno do Carmo Pontes

Simulação Estática e Dinâmica do Controle de Tensão por LTC e Compensador Estático

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Ricardo Bernardo Prada
Co-orientador: José Eduardo Onoda Pessanha

Rio de Janeiro
Agosto de 2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



Bruno do Carmo Pontes

**Simulação Estática e Dinâmica do Controle de
Tensão por Gerador e Compensador Síncrono**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Ricardo Bernardo Prada
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica/PUC-Rio

Prof. José Eduardo Onoda Pessanha
Co-Orientador
UFMA

Prof. Ricardo Diniz Rangel
CEPEL

Prof. Glauco Nery Taranto
COPPE/UFRJ

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de agosto de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Bruno do Carmo Pontes

Técnico em Eletrotécnica pelo CEFET-RJ e graduado Engenheiro Eletricista pela UERJ em 2004. De 1999 a junho de 2006 trabalhou no Centro de Operação do Sistema Elétrico de Furnas Centrais Elétricas S.A. como técnico, na operação do sistema elétrico, nas atividades de tempo real. Em julho de 2006 foi aprovado como Engenheiro Eletricista em concurso público para a Eletrobrás Centrais Elétricas S.A.. Desde então trabalha no Departamento de Comercialização da empresa, assumindo a atividade de operação e comercialização da UHE Itaipu, do Proinfa - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia e ainda das conversoras internacionais de Rivera (Uruguai) e Uruguiana (Argentina).

Ficha catalográfica

Pontes, Bruno do Carmo

Simulação estática e dinâmica do controle de tensão por LTC e compensador estático / Bruno do Carmo Pontes ; orientador: Ricardo Bernardo Prada ; co-orientador: José Eduardo Onoda Pessanha. – 2008.

194 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Estabilidade de tensão. 3. Instabilidade de tensão 4. LTC. 5. Transformadores. 6. Simulação estática. 7. Simulação dinâmica. 8. Compensador estático de reativos. I. Prada, Ricardo Bernardo. II. Pessanha, José Eduardo Onoda. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD 621.3

Este trabalho é dedicado a memória de Diogo do Carmo Pontes
por ter me ensinado a nunca desistir, por maior que seja a dificuldade.
Sua lembrança nos remete à verdadeira alegria de viver.
Em 2008 faz 10 anos que ele nos deixou.

Agradecimentos

Ao Prof. Ricardo Prada pela orientação.

Ao Prof. José Pessanha e aos doutorandos Alex Ricardo Arquiñego Paz e Carlos Enrique Portugal Poma, todos da UFMA, pela colaboração nas horas de dificuldade.

Ao CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, empresa do Grupo Eletrobras, pela cessão dos programas ANAREDE e ANATEM, utilizados nesta dissertação.

Ao também mestrando Armando Gonçalves Leite, da PUC-Rio, pela bem sucedida parceria de 13 anos (CEFET-RJ, UERJ, PUC-Rio, Furnas e Eletrobrás).

À minha mãe Sonia, por tudo que ela sempre foi, pelo que ela é e pelo que ela sempre representará para mim.

Aos meus pais, pais “emprestados” e minha família, pelo apoio.

À minha namorada Sissi, por ter sido compreensiva e me apoiado nas horas difíceis.

Aos amigos do CTB LIII, de Furnas, pela cumplicidade, pelas trocas, pela ajuda e principalmente pela amizade.

Aos meus amigos, pelo apoio, pela compreensão nesse tempo que estive "ausente".

À vida.

A Deus.

Resumo

Pontes, Bruno do Carmo; Prada, Ricardo Bernardo. **Simulação Estática e Dinâmica do Controle de Tensão por LTC e Compensador Estático**. Rio de Janeiro, 2008. 194 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O tema abordado neste trabalho é a observação e análise, em regime permanente e dinâmico, da ocorrência de um fenômeno que já foi observado em condições reais de operação do sistema elétrico brasileiro, que é a relação oposta à usual entre a grandeza controlada e a grandeza controladora. Nestes caso, mesmo que haja margem de recursos para manter a tensão controlada, ela não é útil. Por exemplo, uma diminuição na relação de transformação num transformador de tapes variáveis, com intuito de aumentar a tensão controlada acaba por reduzi-la, até que os limites de troca de tapes sejam atingidos ou o sistema entre em colapso. Para demonstrar a existência do problema, foram executadas simulações, em regime permanente e dinâmico, e verificado o efeito do controle de tensão por um transformador com tapes variáveis e por compensadores estáticos de potência reativa, situações corriqueiras de um sistema de potência. Foram demonstradas situações em que foi possível verificar a mudança da região de operação. Para a análise em regime permanente foi utilizado um algoritmo de fluxo de carga, e para a análise dinâmica, uma simulação no domínio do tempo. Nas simulações envolvendo transformadores de tapes variáveis, foi possível verificar a existência o efeito reverso da ação de controle de tensão nas análises estática e dinâmica. Nas simulações utilizando o compensador estático de potência reativa houve divergência entre os resultados das duas análises.

Palavras - chave

Estabilidade de tensão; instabilidade de tensão; LTC; transformadores; simulação estática; simulação dinâmica; compensador estático de reativos.

Abstract

Pontes, Bruno do Carmo; Prada, Ricardo Bernardo. **Static and Dynamic Simulation for the Voltage Control by LTC and Static Voltage Compensator.** Rio de Janeiro, 2008. 194p. Master Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents the observation and analysis, in steady state and dynamic performance, of the phenomenon already observed in real operation conditions of the Brazilian Electric System, which is the opposite relationship between the controlled value and the target value. In this case, even if the resources have margin to keep the voltage controlled, this is not useful. For example, the reduction in the turn ratio on load tap changer transformer, with the aim of increase in the controlled voltage, result in its reduction, until the tap changer limit is reached or the system is led to the collapse. To demonstrate the existence of this problem, steady state and dynamic performance simulations were done, and the voltage control effect by on load tap changer transformer and static var compensator , current situations in a power system. Several situations where is possible verify the operation region changing was demonstrated. For steady state analysis was used a load flow algorithm and, for the dynamic analysis, a time domain simulation. In the simulations with on load tap changer transformer, it was possible to verify the existence of the reverse effect of the voltage control action in the static and dynamic analysis. In the simulations using static var compensator, a divergence was found between the results in the two analyses.

Key-Words

Voltage stability, voltage instability, LTC, transformers, static simulation, dynamic simulation, static voltage compensator.

Sumário

1	Introdução	26
1.1	O Problema da Estabilidade de Tensão	28
1.2	Casos de Instabilidade de Tensão no Sistema Brasileiro	29
1.3	Instabilidade de Tensão em 24/04/1997 às 18:15 h	30
1.4	Instabilidade de Tensão em 25/04/1997 às 18:17 h	31
1.5	Instabilidade de Tensão em 13/11/1997 às 9:25 h	32
1.6	Organização do Trabalho	33
2	Estabilidade de Tensão [6]	34
2.1	Introdução	34
2.2	Equações de Fluxo de Potência Ativa e Reativa Injetada na Barra de Carga	34
2.3	Curvas P, Q e ϕ Constantes	36
2.4	O Limite de Estabilidade de Tensão (LET)	38
2.5	A Existência da Potência Transmitida "Maximum Maximorum"	42
2.6	O Porquê da Potência Transmitida Máxima para a Carga	46
2.7	Ponto de operação na parte superior da curva	48
2.8	Ponto de operação na parte inferior da curva	49
2.9	O Porquê da Introdução de um Capacitor Diminui a Tensão	50
2.9.1	Ponto de operação na parte superior da curva	52
2.9.2	Ponto de operação na parte inferior da curva	53
2.10	Análise dos resultados	53
3	<i>LTC – Load Tap Change</i>	54
3.1	Introdução	54
3.2	Modelagem dos LTCs para Análises de Regime Permanente [8]	54
3.2.1	LTCs com Variação de Tapes no Primário	54
3.2.2	LTCs com Variação de Tapes no Secundário	58
3.3	Modelagem de um LTC nos Programa de Fluxo de Carga [9]	61
3.4	Representação dos Controles e Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão [7,9]	62

3.4.1	Índice Tape do LTC x Tensão da Barra Controlada Localmente	62
3.4.2	Índice Tape do LTC x Tensão da Barra Controlada Remotamente	65
3.5	Equações da Matriz Jacobiana	66
3.6	Análise dos Resultados	67
4	CER – Compensador Estático de Potência Reativa	68
4.1	Introdução	68
4.2	Reatância e Susceptância do CER[9]	68
4.3	Modelagem do CER nos Programas de Fluxo de Potência	71
4.4	Equações de Controle para o Cálculo dos Índices	75
4.5	Estrutura da Matriz Jacobiana e Cálculo dos Índices	76
4.5.1	Índice Susceptância x Tensão Terminal (ou Remota)	76
4.5.1.1	Modelo de injeção de corrente - Controle de Tensão Local ($V_{cont}=V_t$)	77
4.5.1.2	Modelo de injeção de corrente - Controle de Tensão Remoto ($V_{cont}\neq V_t$)	77
4.5.1.3	Modelo de injeção de potência - Controle de Tensão Local ($V_{cont}=V_t$)	78
4.5.1.4	Modelo de injeção de potência - Controle de Tensão Remoto ($V_{cont}\neq V_t$)	78
4.5.2	Índice Ângulo de Disparo dos Tiristores x Tensão Terminal (ou Remota)	79
4.5.2.1	Modelo de injeção de corrente - Controle de Tensão Local ($V_{cont}=V_t$)	80
4.5.2.2	Modelo de injeção de corrente - Controle de Tensão Remoto ($V_{cont}\neq V_t$)	80
4.5.2.3	Modelo de injeção de potência - Controle de Tensão Local ($V_{cont}=V_t$)	81
4.5.2.4	Modelo de injeção de potência - Controle de Tensão Remoto ($V_{cont}\neq V_t$)	81
4.6	Exemplo Numérico [9]	83
4.6.1	Cálculo do Índice Susceptância x Tensão Terminal	85
4.6.2	Cálculo do Índice Ângulo de Disparo dos Tiristores x Tensão Terminal	86
4.6.3	Resultados de 4.6.1 e 4.6.2	88

4.7	Análise dos Resultados	91
5	Análise do Efeito do Controle de Tensão com LTCs	92
5.1	Introdução	92
5.2	Modelagem do LTC	92
5.3	Modelagem dos Reguladores de Tensão	95
5.4	Modelagem da Carga	96
5.5	Carga “Potência Constante”	96
5.5.1	Testes no Sistema de 3 Barras com a Carga “Potência Constante”	97
5.5.1.1	Região Normal de Operação	97
5.5.1.2	Região Anormal de Operação	102
5.6	Carga “Impedância Constante”	107
5.6.1	Testes do Sistema de 3 Barras com a Carga “Impedância Constante”	108
5.6.1.1	Região Normal de Operação	108
5.7	Carga “Corrente Constante”	113
5.8	Carga “ZIP”	114
5.8.1	Testes do Sistema de 3 Barras com a Carga “ZIP”	115
5.8.1.1	Região Normal de Operação	115
5.8.1.2	Região Anormal de Operação	121
5.9	Análise dos Resultados	127
6	Análise do Efeito do Controle de Tensão com LTCs em um Sistema-Teste de 10 barras, em Regime Permanente e Dinâmico	129
6.1	Introdução	129
6.2	Controle de Tensão por LTC Automático	130
6.3	Análise em Regime Permanente	130
6.3.1	Região Normal de Operação	131
6.3.2	Região Anormal de Operação	132
6.4	Análise no Domínio do Tempo	134
6.4.1	Região Normal de Operação	134
6.4.2	Região Anormal de Operação	137
6.5	Controle de Tensão por LTC Manual	140
6.5.1	Análise em Regime Permanente	140
6.5.1.1	Regiões Normal e Anormal de Operação	140
6.5.2	Análise no Domínio do Tempo	143

6.5.2.1	Regiões Normal e Anormal de Operação	143
6.6	Análise dos resultados	144
7	Análise do Efeito do Controle de Tensão com Compensadores Estáticos de Reativos (CER) em um Sistema-Teste de 39 Barras, em Regime Permanente e Dinâmico	146
7.1	Introdução	146
7.2	Análise em Regime Permanente	151
7.2.1	Regiões Normal e Anormal de Operação	151
7.3	Análise no Domínio do Tempo	154
7.3.1	Região Normal de Operação	154
7.3.2	Região Anormal de Operação	161
7.4	Análise dos resultados	174
8	Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros	175
8.1	Sugestões para trabalhos futuros	177
9	Referências Bibliográficas	178
10	Apêndice	180
10.1	Arquivo base do ANATEM das simulações do Capítulo 5	181
10.2	Complemento de 10.1 para a simulação da Figura 3.26 e Figura 3.27	181
10.3	Complemento de 10.1 para a simulação da Figura 3.28, Figura 3.29, Figura 3.30 e Figura 3.31	181
10.4	Complemento de 10.2 para a simulação da Figura 3.33 e Figura 3.34	182
10.5	Complemento de 10.3 para a simulação da Figura 3.35, Figura 3.36, Figura 3.37 e Figura 3.38	182
10.6	Complemento de 10.1 para a simulação da Figura 3.41 e Figura 3.42	182
10.7	Complemento de 10.6 para a simulação da Figura 3.43, Figura 3.44, Figura 3.45 e Figura 3.46	183
10.8	Complemento de 10.1 para a simulação da Figura 3.50 e Figura 3.51	183
10.9	Complemento de 10.8 para a simulação da Figura 3.52, Figura 3.53, Figura 3.54 e Figura 3.55	184

10.10	Complemento de 10.8 para a simulação da Figura 3.56 e Figura 3.57	184
10.11	Complemento de 10.8 para a simulação da Figura 3.59 e Figura 3.60	185
10.12	Complemento de 10.9 para a simulação da Figura 3.61, Figura 3.62, Figura 3.63 e Figura 3.64	185
10.13	Complemento de 10.10 para a simulação da Figura 3.65 e Figura 3.66	185
10.14	Arquivo base do ANATEM das simulações da Figura 6.4 a Figura 6.9	186
10.15	Complemento de 10.14 para a simulação da Figura 6.4	186
10.16	Complemento de 10.15 para a simulação da Figura 6.5	186
10.17	Complemento de 10.15 para a simulação da Figura 6.6	186
10.18	Complemento de 10.15 para a simulação da Figura 6.7	187
10.19	Complemento de 10.16 para a simulação da Figura 6.8	187
10.20	Complemento de 10.17 para a simulação da Figura 6.9	187
10.21	Arquivo completo do ANATEM para a simulação da Figura 6.11 e Figura 6.12	187
10.22	Arquivo base do ANATEM das simulações do Capítulo 7	189
10.23	Complemento de 10.22 para a simulação da Figura 7.5 a Figura 7.8 e Figura 7.17 a Figura 7.20 (alteração apenas do caso base de regime permanente)	189
10.24	Complemento de 10.22 para a simulação da Figura 7.9 a Figura 7.12 e Figura 7.21 a Figura 7.24 (alteração apenas do caso base de regime permanente)	190
10.25	Complemento de 10.22 para a simulação da Figura 7.13 a Figura 7.16 e Figura 7.25 a Figura 7.28 (alteração apenas do caso base de regime permanente)	190
10.26	Complemento de 10.22 para a simulação da Figura 7.29 e Figura 7.30	191
10.27	Complemento de 10.22 para a simulação da Figura 7.31 e Figura 7.32	192
10.28	Complemento de 10.22 para a simulação da Figura 7.33 a Figura 7.36	193

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Três Possibilidades de Solução para a Tensão na Carga com Mesmo Fator de Potência	37
Tabela 2.2 - Variações de Tensão, Corrente e Potência na Barra de Carga	48
Tabela 2.3 - Pontos de Operação para Avaliar o Aumento ou Decréscimo da Tensão com a Introdução de um Capacitor	52
Tabela 3.1 - Ponto de operação com a barra controlada na região anormal de operação	64
Tabela 3.2 - Ponto de operação com a barra controlada na região normal de operação	65
Tabela 4.1 – Dados de Linha do Sistema de 5 Barras	84
Tabela 4.2 – Ponto de operação inicial na região normal de operação	88
Tabela 4.3 – Efeito do aumento de V_{esp} no ponto de operação da Tabela 4.2	89
Tabela 4.4 – Ponto de operação inicial na região anormal de operação	90
Tabela 4.5 – Efeito do Aumento de V_{esp} no ponto de Operação da Tabela 4.4	90
Tabela 5.1 – Ponto de operação inicial	98
Tabela 5.2 – Resultado da variação do tape para variações na tensão controlada, carga “potência constante”	98
Tabela 5.3 – Ponto de operação inicial	103
Tabela 5.4 – Resultado da variação do tape para variações na tensão controlada, carga “potência constante”	103
Tabela 5.5 – Ponto de operação inicial	109
Tabela 5.6 – Resultado da variação do tape para variações da tensão controlada, carga “impedância constante”	109
Tabela 5.7 – Ponto de operação inicial	116
Tabela 5.8 – Resultado da variação do tape em virtude da variação na tensão controlada, carga “ZIP”	116
Tabela 5.9 – Ponto de operação inicial	121

Tabela 5.10 – Resultado da variação do tape em virtude da variação da tensão controlada, carga “ZIP”	122
Tabela 5.11 – Comparação dos pontos de operação das simulações estática e dinâmica	127
Tabela 6.1 – Dados dos circuitos CA do sistema-teste de 10 barras	130
Tabela 6.2 – Dados dos transformadores do sistema-teste de 10 barras	130
Tabela 6.3 – Ponto de operação inicial	131
Tabela 6.4 – Posição dos tapes no ponto de operação inicial	131
Tabela 6.5 – Resultado da variação da tensão controlada (barra 11) e tape do transformador entre as barras 10 e 11	132
Tabela 6.6 – Ponto de operação inicial	133
Tabela 6.7 – Posição dos tapes no ponto de operação inicial	133
Tabela 6.8 – Resultado da variação do módulo da tensão controlada (barra 11), da tensão na barra 10 e do tape do transformador entre as barras 10 e 11	133
Tabela 6.9 – Pontos iniciais (0 s) e finais (20 s) da simulação no domínio do tempo	135
Tabela 6.10 – Pontos iniciais (0 s) e finais (20 s) da simulação no domínio do tempo, com limitação de atuação do LTC	136
Tabela 6.11 – Pontos iniciais (0 s) e finais (20 s) da simulação no domínio do tempo, com limitação de atuação do LTC	139
Tabela 6.12 – Ponto de operação inicial	141
Tabela 6.13 – Posição dos tapes no ponto de operação inicial	141
Tabela 6.14 – Resultado da variação do tape do transformador entre as barras 10 e 11 e dos módulos das tensões nas barras 10 e 11	141
Tabela 6.15 – Módulo das tensões das barras 10 e 11 e tape do transformador entre estas duas barras, retirados da simulação no domínio do tempo	144
Tabela 7.1 – Dados dos circuitos CA do sistema-teste de 39 barras	148
Tabela 7.2 – Dados dos transformadores do sistema-teste de 39 barras	149
Tabela 7.3 – Ponto de operação inicial	152
Tabela 7.4 – Resultado da variação da potência reativa gerada pelo CER, da tensão controlada (barra 16) e da susceptância do compensador	153
Tabela 7.5 - Pontos iniciais (0 s) e finais (10 s) da simulação no domínio do tempo, com regulador do CER <i>built-in</i>	161
Tabela 7.6 - Pontos iniciais (0 s) e finais (10 s) da simulação no domínio do tempo, com regulador do CER customizado	161

Tabela 7.7 - Pontos iniciais (0 s) e em $t=10$ s da simulação no domínio do tempo, com regulador do CER customizado e sem regulador de tensão nos geradores	161
Tabela 7.8 - Pontos iniciais (0 s) e finais (10 s) da simulação no domínio do tempo, com regulador do CER <i>built-in</i>	168
Tabela 7.9 - Pontos iniciais (0 s) e finais (10 s) da simulação no domínio do tempo, com regulador do CER customizado	168
Tabela 7.10 - Pontos iniciais (0 s) e em $t=10$ s da simulação no domínio do tempo, com regulador do CER customizado e sem regulador de tensão nos geradores	168
Tabela 7.11 - Pontos de operação em 0s (4), 4+ s (5), 8+ s (6) 12+ s (7), 16+ s (8) da simulação no domínio do tempo, com regulador do CER <i>built-in</i> e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita	172
Tabela 7.12 - Pontos de operação em 0s (4), 4+ s (5), 8+ s (6) 12+ s (7), 16+ s (8) da simulação no domínio do tempo, com regulador do CER customizados e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita	173
Tabela 7.13 - Pontos de operação em 0s (4), 4+ s (5), 8+ s (6) 12+ s (7), 16+ s (8) da simulação no domínio do tempo, com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores	173

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Sistema Interligado Nacional horizonte 2009 com a previsão de interligação do sistema Acre-Rondônia [3]	27
Figura 1.2 – Curva de carga típica do SIN em dias úteis [1]	28
Figura 2.1 - Sistema Série de Duas Barras	35
Figura 2.2 - Três Possibilidades de Solução para a Tensão na Carga com Mesmo fator de Potência	37
Figura 2.3 - Curva para Fator de Potência Constante na Barra de Carga no Plano SV	38
Figura 2.4 - Circuito com as Impedâncias da Transmissão e da Carga	39
Figura 2.5 - Limite de Estabilidade de Tensão no Plano SV	42
Figura 2.6 - Lugar Geométrico da Tensão na Carga para Todos os Possíveis Diferentes Níveis de Potência Ativa Constante e Para Alguns Níveis de Potência Reativa Constante	43
Figura 2.7 - Aumento e Diminuição da Tensão Respectivamente na Região Superior e Inferior da Curva com a Introdução de um Capacitor	44
Figura 2.8 - Potência Ativa Consumida na Carga com Fator de Potência Constante	49
Figura 2.9 - Circuito sem Capacitor	50
Figura 2.10 - Circuito com Capacitor	50
Figura 3.1 – Modelagem π clássica de linhas de transmissão	55
Figura 3.2 – Modelagem de LTCs com variação de tapes no primário	55
Figura 3.3 – Circuito π equivalente de um LTC	56
Figura 3.4 – Circuito π equivalente de um LTC com parâmetros expressos em função da admitância e relação de transformação	58
Figura 3.5 – Circuito π equivalente de um LTC com parâmetros expressos em função da impedância e relação de transformação	58
Figura 3.6 – Modelagem de LTCs com variação de tapes no secundário	59
Figura 3.7 – Circuito π equivalente de um LTC com parâmetros expressos em função da admitância e relação de transformação	61

Figura 3.8 – Circuito π equivalente de um LTC com parâmetros expressos em função da impedância e relação de transformação	61
Figura 3.9 - Sistema de 3 Barras com LTC	62
Figura 4.1 – Estrutura do CER	69
Figura 4.2 - Reatância equivalente do CER em função do ângulo de disparo dos tiristores ($X_C = 15 \Omega$ e $X_L = 2,56 \Omega$)	70
Figura 4.3 - Susceptância equivalente do CER em função do ângulo de disparo dos tiristores ($X_C = 15 \Omega$ e $X_L = 2,56 \Omega$)	71
Figura 4.4 – Característica VI em Regime Permanente do CER [11]	71
Figura 4.5 – Característica VQ em Regime Permanente do CER [11]	72
Figura 4.6 – Efeito esperado da variação de α sobre V_{cont}	82
Figura 4.7 – Efeito oposto ao esperado da variação de α sobre V_{cont}	83
Figura 4.8 – Sistema de 5 Barras com CER	83
Figura 4.9 – Susceptâncias do FC, TCR em função do ângulo de disparo dos tiristores	85
Figura 4.10 – Susceptância do CER em função do ângulo de disparo dos tiristores	85
Figura 5.1 – Diagrama unifilar do sistema-teste de 3 barras	92
Figura 5.2 – Diagrama de blocos do modelo de LTC automático MD01 do ANATEM	94
Figura 5.3 – Diagrama de blocos do regulador de tensão MD20 do ANATEM	95
Figura 5.4 – Diagrama de blocos do regulador de tensão customizado	96
Figura 5.5 – Curvas PV de um sistema com carga potência constante para diferentes valores de tape	97
Figura 5.6 – Resultado da variação da tensão da barra 1 X tape, carga “potência constante”	99
Figura 5.7 – Resultado da variação da tensão da barra 0, carga “potência constante”, no domínio do tempo, regulador de tensão MD20 do ANATEM	100
Figura 5.8 – Resultado da variação da tensão da barra 1 e do tape, carga “potência constante”, no domínio do tempo, regulador de tensão MD20 do ANATEM	100
Figura 5.9 – Resultado da variação da tensão das 3 barras, carga “potência constante”, no domínio do tempo, regulador de tensão barra infinita	101
Figura 5.10 – Resultado da variação do tape, carga “potência constante”, no domínio do tempo, regulador de tensão barra infinita	101

Figura 5.11 – Resultado da variação das potências geradas, carga “potência constante”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita	102
Figura 5.12 – Resultado da variação das potências consumidas, carga “potência constante”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita	102
Figura 5.13 – Resultado da variação da tensão da barra 1 X tape, carga “potência constante”	103
Figura 5.14 – Resultado da variação da tensão da barra 0, carga “potência constante”, no domínio do tempo, regulador de tensão MD20 do ANATEM	104
Figura 5.15 – Resultado da variação da tensão da barra 1 e do tape, carga “potência constante”, no domínio do tempo , regulador de tensão MD20 do ANATEM	105
Figura 5.16 – Resultado da variação da tensão das 3 barras, carga “potência constante”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita	105
Figura 5.17 – Resultado da variação do tape, carga “potência constante”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita	106
Figura 5.18 – Resultado da variação das potências geradas, carga “potência constante”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita	106
Figura 5.19 – Resultado da variação das potências consumidas, carga “potência constante”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita	107
Figura 5.20 – Curvas PV para diferentes valores de tape e curvas de carga tipo “impedância constante” e o efeito da troca de tape em pontos de operação na parte superior e inferior da curva PV	108
Figura 5.21 – Resultado da variação da tensão da barra 1 X tape, carga “impedância constante”	109
Figura 5.22 – Resultado da variação da tensão da barra 0, carga “impedância constante”, no domínio do tempo, regulador de tensão MD20 do ANATEM	110
Figura 5.23 – Resultado da variação da tensão da barra 1 e do tape, carga “impedância constante”, no domínio do tempo , regulador de tensão MD20 do ANATEM	111

Figura 5.24 – Resultado da variação da tensão das 3 barras, carga “impedância constante”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita	111
Figura 5.25 – Resultado da variação do tape, carga “impedância constante”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita	112
Figura 5.26 – Resultado da variação das potências geradas, carga “impedância constante”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita	112
Figura 5.27 – Resultado da variação das potências consumidas, carga “impedância constante”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita	113
Figura 5.28 – Curvas PV para dois valores de tape, a curva de carga tipo “corrente constante”, e o efeito da troca de tape	114
Figura 5.29 - Curvas PV para dois valores de tape, curva de carga tipo “ZIP” e o efeito da troca de tape em pontos de operação na parte superior e inferior da curva PV	115
Figura 5.30 – Resultado da variação da tensão da barra 1 X tape, carga “ZIP”	116
Figura 5.31 – Resultado da variação da tensão da barra 0, carga “ZIP”, no domínio do tempo, regulador de tensão MD20 do ANATEM	117
Figura 5.32 – Resultado da variação da tensão da barra 1 e do tape, carga “ZIP”, no domínio do tempo, regulador de tensão MD20 do ANATEM	118
Figura 5.33 – Resultado da variação da tensão das 3 barras, carga “ZIP”, no domínio do tempo, regulador de tensão barra infinita	118
Figura 5.34 – Resultado da variação do tape, carga “ZIP”, no domínio do tempo, regulador de tensão barra infinita	119
Figura 5.35 – Resultado da variação das potências geradas, carga “ZIP”, no domínio do tempo, regulador de tensão barra infinita	119
Figura 5.36 – Resultado da variação das potências consumidas, carga “ZIP”, no domínio do tempo, regulador de tensão barra infinita	120
Figura 5.37 – Resultado da variação da tensão da barra de geração e de carga, carga “ZIP”, no domínio do tempo, regulador de tensão customizado	120
Figura 5.38 – Resultado da variação do tensão da barra terminal do transformador e do tape, carga “ZIP”, no domínio do tempo, regulador de tensão barra customizado	121

Figura 5.39 – Resultado da variação da tensão da barra 1 X tape, carga “ZIP”	122
Figura 5.40 – Resultado da variação da tensão da barra 0, carga “ZIP”, no domínio do tempo, regulador de tensão MD20 do ANATEM	123
Figura 5.41 – Resultado da variação da tensão da barra 1 e do tape, carga “ZIP”, no domínio do tempo , regulador de tensão MD20 do ANATEM	123
Figura 5.42 – Resultado da variação da tensão das 3 barras, carga “ZIP”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita	124
Figura 5.43 – Resultado da variação do tape, carga “ZIP”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita	124
Figura 5.44 – Resultado da variação das potências geradas, carga “ZIP”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita	125
Figura 5.45 – Resultado da variação das potências consumidas, carga “ZIP”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita	125
Figura 5.46 – Resultado da variação da tensão da barra de geração e de carga, carga “ZIP”, no domínio do tempo , regulador de tensão customizado	126
Figura 5.47 – Resultado da variação do tensão da barra terminal do transformador e do tape, carga “ZIP”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra customizado	126
Figura 6.1 – Diagrama unifilar do sistema-teste de 10 barras	129
Figura 6.2 – Resultado da variação da tensão da barra 11 X tape do transformador entre as barras 10 e 11	132
Figura 6.3 – Resultado da variação da tensão da barra 11 X tape do transformador entre as barras 10 e 11	134
Figura 6.4 - Resultado da variação da tensão das barras 10, do tape contínuo e ilimitado e da tensão da barra 11, no domínio do tempo	135
Figura 6.5 - Resultado da variação da tensão das barras 10, do tape contínuo e limitado e da tensão da barra 11, no domínio do tempo	136
Figura 6.6 - Resultado da variação da tensão das barras 10, do tape discreto e limitado e da tensão da barra 11, no domínio do tempo	137
Figura 6.7 - Resultado da variação da tensão da barra 11, do tape contínuo e ilimitado e da tensão da barra 10, no domínio do tempo	137
Figura 6.8 - Resultado da variação da tensão da barra 11, do tape contínuo e limitado e da tensão da barra 10, no domínio do tempo	139

Figura 6.9 - Resultado da variação da tensão das barras 10, do tape discreto e limitado e da tensão da barra 11, no domínio do tempo	140
Figura 6.10 – Resultado da variação da tensão da barra 11 X tape do transformador entre as barras 10 e 11	142
Figura 6.11 - Resultado da variação do módulo da tensão das barras 10 e 11, para incrementos sucessivos no tape, no domínio do tempo	143
Figura 6.12 - Alteração imposta ao tape do transformador entre as barras 10 e 11, no domínio do tempo	143
Figura 7.1 – Diagrama unifilar do sistema-teste de IEEE-39 barras <i>New England</i>	147
Figura 7.2 – Modelo <i>built-in</i> para simulação dinâmica do CER	150
Figura 7.3 – Modelo customizado para simulação dinâmica do CER	151
Figura 7.4 – Resultado da variação da tensão da barra 16 x susceptância do CER	153
Figura 7.5 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 30 a 34, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER <i>built-in</i> e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita	155
Figura 7.6 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 35 a 39, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER <i>built-in</i> e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita	155
Figura 7.7 - Resultado da variação da tensão da barra 16, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER <i>built-in</i> e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita	156
Figura 7.8 - Resultado da variação da susceptância do CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER <i>built-in</i> e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita	156
Figura 7.9 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 30 a 34, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita	157
Figura 7.10 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 35 a 39, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita	157
Figura 7.11 - Resultado da variação da tensão da barra 16, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita	158

Figura 7.12 - Resultado da variação da susceptância do CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita	158
Figura 7.13 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 30 a 34, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão dos geradores	159
Figura 7.14 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 35 a 39, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores	159
Figura 7.15 - Resultado da variação da tensão da barra 16, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores	160
Figura 7.16 - Resultado da variação da susceptância do CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores	160
Figura 7.17 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 30 a 34, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER <i>built-in</i> e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita	162
Figura 7.18 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 35 a 39, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER <i>built-in</i> e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita	162
Figura 7.19 - Resultado da variação da tensão da barra 16, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER <i>built-in</i> e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita	163
Figura 7.20 - Resultado da variação da susceptância do CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER <i>built-in</i> e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita	163
Figura 7.21 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 30 a 34, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita	164
Figura 7.22 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 35 a 39, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita	164
Figura 7.23 - Resultado da variação da tensão da barra 16, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita	165

Figura 7.24 - Resultado da variação da susceptância do CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita	165
Figura 7.25 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 30 a 34, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão dos geradores	166
Figura 7.26 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 35 a 39, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores	166
Figura 7.27 - Resultado da variação da tensão da barra 16, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores	167
Figura 7.28 - Resultado da variação da susceptância do CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores	167
Figura 7.29 - Resultado da variação da tensão controlada pelo CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER <i>built-in</i> e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita	169
Figura 7.30 - Resultado da variação da susceptância do CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER <i>built-in</i> e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita	169
Figura 7.31 - Resultado da variação da tensão controlada pelo CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizados e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita	170
Figura 7.32 - Resultado da variação da susceptância do CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizados e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita	170
Figura 7.33 - Resultado da variação da tensão dos geradores, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores	171
Figura 7.34 - Resultado da variação da tensão dos geradores, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores	171
Figura 7.35 - Resultado da variação da tensão controlada pelo CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores	172

Figura 7.36 - Resultado da variação da susceptância do CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores

Siglas e Acrônimos

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CAG	Controle Automático de Geração
CCAT	Corrente Contínua em Alta Tensão
CDU	Controlador Definido pelo Usuário
CE/CER	Compensador Estático de Reativos
Cemig	Companhia Energética de Minas Gerais
CNOS	Centro Nacional de Operação do Sistema
CS	Compensador Síncrono
ECE	Esquema de Controle de Emergência
Eletrobrás	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
Eletropaulo	Eletropaulo - Eletricidade de São Paulo S.A.
ERAC	Esquema Regional de Alívio de Carga
Escelsa	Espírito Santo Centrais Elétricas S.A.
FC	<i>Fixed Capacitor</i>
LET	Limite de Estabilidade de Tensão
LTC	<i>Load Tap Change</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema
OXL	<i>Over Excitation Limiter</i>
RESEB	Reestruturação do Sistema Elétrico Brasileiro
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
SVC	<i>Static var Compensator</i>
TCR	<i>Thyristor Controlled Reactor</i>
UHE	Usina Hidroelétrica

1 Introdução

Desde as cubas eletrolíticas, utilizadas em processos eletrointensivos, o maior consumidor individual de carga no sistema elétrico brasileiro, até um simples carregador de celular, todos os equipamentos são projetados para trabalhar dentro de faixas de tensão fora das quais pode haver interrupção dos processos produtivos, causando prejuízos ou mesmo dano ao equipamento. [1]

O controle da tensão do SIN - Sistema Interligado Nacional, dentro dos níveis regulamentados pela ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, é, nos dias atuais, responsabilidade do ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. O SIN abrange as regiões geográficas brasileiras Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e pequena parte da Norte e é responsável por 96,6% da produção de energia do Brasil [2]. Os demais 3,4% ainda estão sob responsabilidade da Eletrobrás e subsidiárias. São compostos basicamente por sistemas isolados da região amazônica, atendidos radialmente por geradores a óleo combustível, à exceção da Grande Manaus e sistema Acre-Rondônia, que têm atendimento pela usina hidrelétrica de Balbina e Samuel, respectivamente.

A Figura 1.1 apresenta o sistema interligado nacional através dos seus principais troncos de transmissão.

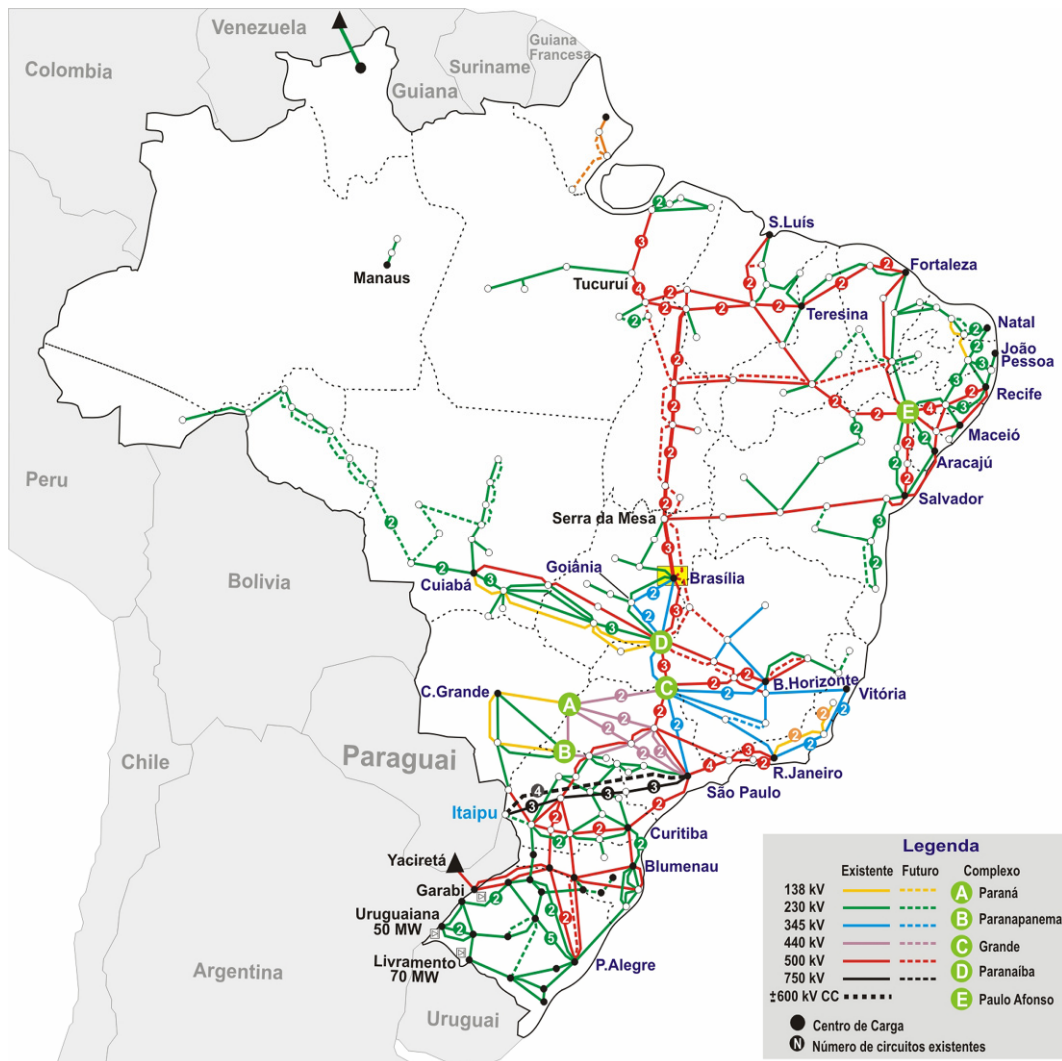


Figura 1.1 – Sistema Interligado Nacional horizonte 2009 com a previsão de interligação do sistema Acre-Rondônia [3]

O controle de tensão do SIN é hoje feito de duas formas:

- i. automaticamente, através de equipamentos que têm a capacidade de adquirir informações de grandezas do sistema elétrico e são dotados de recursos que permitem manter tais grandezas nos valores determinados pelas equipes de planejamento e;
- ii. manualmente, através de equipes de operadores de tempo real, que monitoram as grandezas e estão aptos a alterar configurações de topologia da rede e os valores de referência das grandezas do sistema.

Este controle automático é geralmente praticado por transformadores com mudança de tapes em carga, compensadores síncronos e estáticos e geradores. O segundo controle é geralmente realizado com capacitores e reatores *shunt* ou

com a mudança da referência de tensão dos equipamentos do controle automático.

O controle de tensão pode ainda ser feito de forma preventiva ou corretiva. Quando feito de forma preventiva, seu objetivo é preparar o sistema para alterações estudadas previamente de mudança de configuração ou carregamento. Um bom exemplo é a mudança de patamar de carga, onde é de conhecimento a alteração do consumo e, desta forma, são tomadas providências para manter a tensão do sistema em níveis mais adequados para receber o aumento ou a diminuição da carga. Tais perturbações estão geralmente relacionadas às dinâmicas de longa duração. Quando o controle de tensão é feito de forma corretiva, equipamentos de controle são utilizados para corrigir variações abruptas causadas por distúrbios não programados do sistema. Tais perturbações estão geralmente ligadas às dinâmicas de curta duração e serão as mais estudadas neste trabalho.

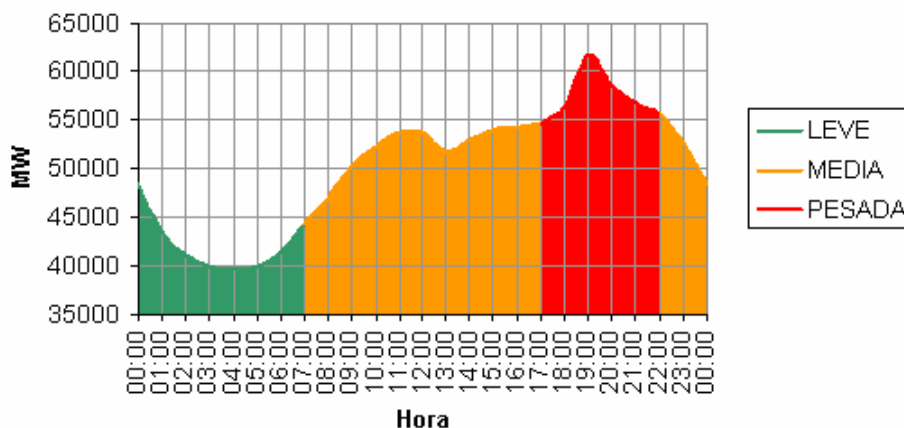


Figura 1.2 – Curva de carga típica do SIN em dias úteis [1]

1.1

O Problema da Estabilidade de Tensão

A instabilidade de tensão está diretamente relacionada com o esgotamento do suprimento de potência reativa num Sistema Elétrico de Potência – SEP [4]. Caso a necessidade do sistema esteja além da capacidade de gerar e transmitir potência reativa, a tensão do sistema ficará abaixo dos padrões desejados.

Vale ressaltar que até hoje, no sistema brasileiro, não há uma política de tarifação de energia reativa para consumidores residenciais e apenas uma tímida regulamentação para os demais setores. Este fato pouco encoraja os agentes de transmissão a investir na potência reativa. Aliado a este fato, há a

desregulamentação do setor elétrico brasileiro – RESEB, iniciada no fim dos anos 90. Este processo introduziu agentes/investidores no setor, que para tal, necessitam de aumento de produtividade e redução de custos. Outro problema que vem ganhando destaque recentemente é o alto número de recusas de licenças ambientais, emperrando projetos importantes para o crescimento do sistema nacional. Tudo isto é somado às características ainda marcantes do SIN: grandes usinas hidrelétricas distantes do centro de carga, com linhas de transmissão muito longas.

Desta forma, o problema da estabilidade de tensão, que antes ocorria apenas em situações extremas, onde o sistema elétrico já se encontrava com grandezas bem abaixo dos padrões, passou a aparecer em tensões próximas às nominais em alguns pontos do SIN.

Quando próximo das suas capacidades construtivas, um sistema elétrico de potência pode se tornar instável do ponto de vista do controle de tensão. Tão importante quanto saber se o ponto de operação inicial e final são válidos é saber qual o “caminho” percorrido entre estes dois pontos. Neste trabalho serão apresentados pontos de operação válidos em regime permanente (convergidos por um programa de fluxo de potência), mas instáveis sob a ótica de tensão. Este problema pode provocar decisões equivocadas dos controles automáticos ou mesmo de operadores de tempo real, habituados e treinados a lidar com ações de controle usuais, por exemplo, chaveamento de um capacitor para elevar a tensão. Como, geralmente, a situação de instabilidade de tensão ocorre em pontos já degradados, as decisões equivocadas podem levar o sistema a um colapso, com perda de componentes em cascata e conseqüente desligamento de consumidores. Tal situação, antigamente denominada blecaute, hoje é mais conhecida pela imprensa como “apagão”, expressão que já é inclusive utilizada em outros setores da economia quando há desatendimento.

1.2

Casos de Instabilidade de Tensão no Sistema Brasileiro

A seguir, algumas ocorrências no sistema brasileiro que evoluíram para blecautes. A ocorrência da área São Paulo, nos dias 24 de abril de 1997 e 25 de abril de 1997 são bons exemplos de colapso de tensão que evoluíram para desatendimento de consumidores. Estes “apagões” motivaram boa parte dos estudos de estabilidade de tensão [4, 5].

1.3

Instabilidade de Tensão em 24/04/1997 às 18:15 h

Desde o término do horário de verão 96/97, o sistema elétrico nacional já apresentava sinais de fraqueza em relação à geração e transmissão de potência reativa. Antes do início da carga pesada (18:00h), todos os reatores *shunt* manobráveis do sistema eram desligados, os capacitores, por sua vez, eram ligados e muitas usinas maximizavam suas tensões. A UHE Itaipu era desligada do CAG e mantida na base da curva de carga, para que sua geração não respondesse à entrada de carga e provocasse baixas de tensão no tronco de 765 kV (na época ainda composto por apenas 2 circuitos). Outras medidas eram tomadas, porém, pelas citadas já é possível concluir que o sistema encontrava-se debilitado em termos de potência reativa, cenário ideal para a ocorrência de instabilidades de tensão.

Ao entrar na carga pesada, as áreas São Paulo e Minas Gerais já apresentavam tensões abaixo da faixa operativa e, conforme exposto no parágrafo anterior, o sistema já iniciava a ponta de carga sem recursos. As 18:10h já havia sido feito um corte de carga de 33 MW pela Cemig em seu sistema, na tentativa desesperada de elevar a tensão nos seus barramentos. A medida não surtiu o efeito desejado.

Os efeitos do esgotamento das reservas de potência reativa na área São Paulo se tornaram evidentes às 18:15h. Como último recurso, foram remanejados 300 MW do setor de 60 Hz da UHE Itaipu para o seu setor de 50 Hz, na tentativa de reduzir o carregamento do tronco de 765 kV e manter a tensão em Ivaiporã nos valores adequados (780 kV). Neste instante o Compensador Síncrono (CS) nº 3 de Ibiúna atingiu o seu limite superior de excitação de campo e a tensão controlada em um valor de 331 kV (95,9%). Ocorreram então as atuações dos bloqueios por subtensão dos centros da alimentação de cargas essenciais da subestação e a interrupção de CA dos serviços auxiliares seguida da perda do referido compensador. O sistema encontrava-se operando com indisponibilidade de equipamentos de suporte de potência reativa na área São Paulo, isto é, sem o CS nº2 de Ibiúna (300 Mvar), um banco de capacitores de 200 Mvar em Tijuco Preto e 208 Mvar de capacitores no sistema de transmissão da Eletropaulo e frente a um processo de crescimento continuado da carga. Com a saída do CS nº 3 de Ibiúna, houve bloqueio do bipolo 2 do Elo de CCAT. Seguiram-se os desligamentos

automáticos dos síncronos nº 1 e nº 4, não restando nenhum dos compensadores ligados na estação. A perda de 3.000 MW de geração de potência ativa, suprimento de Itaipu 50 Hz através do bipolo 2, e de 900 Mvar de potência reativa levaram a um estado operativo com subfrequência sustentada de 48 minutos (atingindo um mínimo de 58,10 Hz) e subtensão, e com a carga ainda em crescimento. Inúmeros desligamentos se sucederam em cascata com as perdas da compensação síncrona em Tijuco Preto e Embu-Guaçu, e das gerações de Capivara, Funil, Angra I e Volta Grande, bem como os desligamentos do bipolo 1 (remanescente), da SE Bandeirantes (responsável por atendimentos prioritário na grande São Paulo), desligamentos manuais e automáticos de carga (ERAC – Esquema Regional de Alívio de Carga). Foram afetadas as regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste com cerca de 7.600 MW de carga interrompida, correspondendo a 19% da carga destas regiões. A recomposição total do sistema foi feita em cerca de 1 hora e 15 minutos.

Foi constatado que o sistema estava operando com reservas de potência reativa insuficientes para as necessidades da hora de ponta. A indisponibilidade dos equipamentos para controle de tensão na área São Paulo contribuíram decisivamente para a instalação do processo de instabilidade de tensão. Foi constatado também o esgotamento do suporte de tensão no sistema da distribuidora da região São Paulo já no patamar de carga média, bem como a falta de um ajuste coordenado dos seus transformadores com dispositivos de comutação em carga (LTC) e reduzida utilização na área de esquemas de alívio de carga por subtensão.

1.4

Instabilidade de Tensão em 25/04/1997 às 18:17 h

Similarmente ao dia anterior, foi iniciado com o esgotamento das reservas de potência reativa na área São Paulo, levando ao desligamento de 3 compensadores síncronos de Ibiúna às 18:17 h por falta de alimentação de CA dos serviços auxiliares e a perda da ligação CCAT (bipolos 1 e 2). Uma série de desligamentos em cascata levou o sistema a uma situação de instabilidade de tensão. Em razão do desligamento ocorrido no dia anterior, a usina Angra I operava com despacho bastante reduzido, pois ainda encontrava-se em elevação de geração, (88 MW em vez de 627 MW) o que tornava a operação do sistema mais vulnerável à ocorrência de instabilidade de tensão. No decorrer do processo, ocorreram os desligamentos automáticos do compensador síncrono

de Tijuco Preto, das usinas de Angra I, Capivara e Funil. A redução da frequência levou a atuação do ERAC. Estes cortes de carga, bem como os devidos às acentuadas reduções na tensão não foram suficientes para deter a queda da frequência, pois a carga do sistema ainda se encontrava crescendo para atingir a ponta, com uma taxa de crescimento de 1.700 MW/10 minutos. A reconstituição da frequência só foi alcançada posteriormente através de corte manual de carga coordenado pelo CNOS. Foram afetadas as regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste com cerca de 6.900 MW de carga cortada. A reposição gradual das cargas foi iniciada às 18:50 h e concluída às 19:23 h, cerca de uma hora após o início da ocorrência. As constatações foram idênticas às do dia anterior, bem como as conclusões.

1.5

Instabilidade de Tensão em 13/11/1997 às 9:25 h

Iniciada por uma sobrecarga na LT Mascarenhas-Gov. Valadares às 9:25 h, provocando o seu desligamento automático por atuação correta da proteção direcional temporizada de sobrecorrente de fase. O exame do registro gráfico revelou que a LT entrou numa rampa positiva de carregamento atingindo 159 MVA, com tensão de 224,7 kV (97,6%). No dia anterior havia ocorrido o mesmo desligamento quando operava com 160 MVA e 222 kV. A sua propagação se deu com a perda da interligação Escelsa–Cemig que contribuiu significativamente para o agravamento do regime de subtensões na área Rio de Janeiro – Espírito Santo, sendo registradas tensões de 78% em Carapina 138 kV (tensão operativa na faixa de 101/102%), 50% em Campos 345 kV, 67% em Adrianópolis 138 kV e 81% em São José 138 kV. O afundamento das tensões levou a uma rejeição natural de cargas (por queda de tensão) de cerca de 1.210 MW, bem como à atuação do ECE de subtensão para prevenção de colapso de tensão instalado na SE Três Rios. Um mesmo desligamento desta linha ocorreu quatro horas mais tarde, nas mesmas condições operativas de sobrecarga. Foram afetadas as áreas Rio de Janeiro e Espírito Santo com cerca de 1.210 MW de carga naturalmente cortada.

Esta perturbação ilustra uma típica ocorrência de instabilidade de tensão: sistemas radiais com carregamento elevado. O estado do Espírito Santo é atendido, principalmente pelas linhas de 345 kV que atravessam o estado do Rio de Janeiro e passam pelo norte fluminense. Em 1997, não havia sido construída ainda a interligação Vitória/Ouro Preto, as duas usinas térmicas localizadas em

Macaé, próximo ao Espírito Santo e o compensador estático de Campos. Com a perda da fraca interligação com a Cemig, a Escelsa ficou sendo atendida apenas pelo tronco de 345 kV Adrianópolis/Campos/Vitória, que possui pouca compensação reativa, criando um corredor radial. Não há uma análise detalhada sobre esta perturbação em virtude do estado do Espírito Santo não fazer parte dos estudos de pré e pós-operação, já que é atendido em sua maioria por malhas de baixa tensão.

1.6 Organização do Trabalho

Este trabalho é dividido em oito capítulos.

No Capítulo 2 é demonstrada a existência do fenômeno de colapso de tensão bem como sua base teórica e a comprovação da existência de duas regiões de operação.

No Capítulo 3 é abordada a teoria sobre tapes de transformadores e suas respostas às variações de tensão do sistema.

O enfoque do Capítulo 4 é a teoria sobre compensadores estáticos de potência reativa e suas respostas às variações de tensão.

O Capítulo 5 apresenta as modelagens de carga utilizadas e compara as mesmas através de simulações em sistemas-teste de 3 barras

No Capítulo 6 são apresentadas simulações estáticas e dinâmicas com LTCs.

No Capítulo 7 são apresentadas simulações estáticas e dinâmicas envolvendo compensadores estáticos de potência reativa.

Finalmente, no Capítulo 8 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2

Estabilidade de Tensão [6]

2.1

Introdução

O objetivo deste capítulo é mostrar a possibilidade de existência de fenômenos que possam assemelhar-se àqueles observados na operação de sistemas elétricos, e associados ao colapso de tensão. Mais precisamente, isto deve ser feito procurando-se situações de fluxo máximo de potência ativa e/ou reativa em ramos de transmissão. O efeito de ações usuais de controle de tensão também deve ser observado, no intuito de verificar a existência de regiões de operação onde o efeito dessas ações é oposto ao esperado.

O sistema é dito seguro, do ponto de vista de tensão, se possui a capacidade de não somente operar de forma estável, mas também de manter esta estabilidade frente a distúrbios e aumentos de seu carregamento. Define-se que um sistema elétrico de potência é estável no ponto de operação se, após uma perturbação, forem mantidos dentro dos limites os estados (tensões, ângulos, etc) do sistema e se for atingido um novo ponto de equilíbrio.

Para a compreensão do fenômeno da estabilidade de tensão, será estudado o comportamento estático de um sistema elétrico com duas barras, composto de um gerador com capacidade infinita de geração, uma carga modelada por potência constante e uma linha de transmissão sem limite térmico.

2.2

Equações de Fluxo de Potência Ativa e Reativa Injetada na Barra de Carga

Utilizando-se o circuito de 2 barras mostrado na Figura 2.1, deduzem-se as equações da potência ativa e reativa "saindo" da barra terminal.

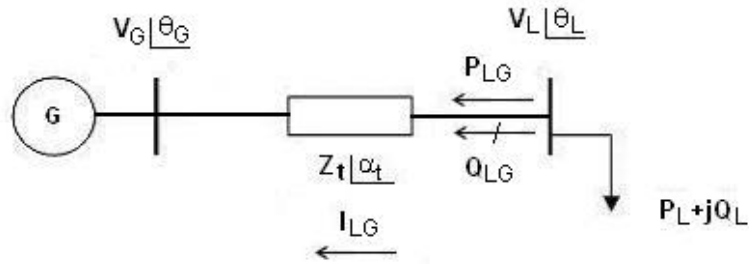


Figura 2.1 - Sistema Série de Duas Barras

$$S_{LG}^* = P_{LG} - jQ_{LG} = V_L^* \cdot I_{LG} \quad (2.1)$$

$$I_{LG} = \frac{V_L \angle \theta_L - V_G \angle \theta_G}{Z_t \angle \alpha_t} \quad (2.2)$$

$$V_L^* = V_L \angle -\theta_L \quad (2.3)$$

Substituindo-se (2.2) e (2.3) em (2.1):

$$S_{LG}^* = \frac{V_L^2 \cdot \cos(\alpha_t)}{Z_t} - \frac{V_L \cdot V_G \cdot \cos(\theta_{LG} + \alpha_t)}{Z_t} - j \left[\frac{V_L^2 \cdot \text{sen}(\alpha_t)}{Z_t} - \frac{V_L \cdot V_G \cdot \text{sen}(\theta_{LG} + \alpha_t)}{Z_t} \right] \quad (2.4)$$

Separando-se (2.4) em parte real e imaginária:

$$P_{LG} = -P_L = \frac{V_L^2}{Z_t} \cdot \cos \alpha_t - \frac{V_L \cdot V_G \cdot \cos(\theta_{LG} + \alpha_t)}{Z_t} \quad (2.5)$$

$$Q_{LG} = -Q_L = \frac{V_L^2}{Z_t} \cdot \text{sen} \alpha_t - \frac{V_L \cdot V_G \cdot \text{sen}(\theta_{LG} + \alpha_t)}{Z_t} \quad (2.6)$$

Variando-se θ_{LG} em (2.5), pode-se calcular V_L e, portanto, traçar-se a curva para P_{LG} constante no plano θV .

Variando-se θ_{LG} em (2.6), pode-se calcular V_L e, portanto, traçar-se a curva para Q_{LG} constante no plano θV .

A tangente do ângulo do fator de potência na carga é:

$$\tan \phi = \frac{Q_{LG}}{P_{LG}} = \frac{\frac{V_L^2}{Z_t} \cdot \text{sen} \alpha_t - \frac{V_L \cdot V_G \cdot \text{sen}(\theta_{LG} + \alpha_t)}{Z_t}}{\frac{V_L^2}{Z_t} \cdot \cos \alpha_t - \frac{V_L \cdot V_G \cdot \cos(\theta_{LG} + \alpha_t)}{Z_t}} \quad (2.7)$$

A equação (2.7) relaciona o módulo e o ângulo da tensão na barra de carga num sistema série de duas barras e o ângulo do fator de potência na carga. Para ϕ constante, variando-se θ_{LG} em (2.7), pode-se calcular V_L e, portanto, traçar-se a curva para ϕ constante no plano θV .

2.3 Curvas P, Q e ϕ Constantes

No circuito simples da Figura 2.1 em análise, as equações estáticas de fluxo de carga coincidem com as equações de fluxo de potência ativa e reativa chegando na barra de carga, igualadas com a potência consumida na carga. Conseqüentemente, a variação dos valores de carga está diretamente relacionada com a variação do fluxo de potência na linha de transmissão. Deve-se notar que não houve preocupação quanto aos valores quantitativos das diversas grandezas envolvidas nos gráficos das figuras a seguir. A opção escolhida foi manter a análise qualitativa, tomando-se valores numéricos quaisquer, independente de sua possibilidade física para o problema. A propósito, somente são considerados para análise, casos em que a carga ativa seja maior ou igual a zero. Então não se estuda a possibilidade de ser, na verdade, um gerador.

As equações (2.5), (2.6) e (2.7) podem ser reescritas como:

$$V_L^2 \left[\frac{\cos \alpha_t}{Z_t} \right] - V_L \left[\frac{V_G \cdot \cos(\theta_{LG} + \alpha_t)}{Z_t} \right] + [P_L] = 0 \quad (2.8)$$

$$V_L^2 \left[\frac{\text{sen} \alpha_t}{Z_t} \right] - V_L \left[\frac{V_G \cdot \text{sen}(\theta_{LG} + \alpha_t)}{Z_t} \right] + [Q_L] = 0 \quad (2.9)$$

$$V_L = \frac{V_G \cdot [\text{sen}(\theta_{LG} + \alpha_t) - \tan \phi \cdot \cos(\theta_{LG} + \alpha_t)]}{\text{sen} \alpha_t - \tan \phi \cdot \cos(\alpha_t)} \quad (2.10)$$

Usando-se (2.8), (2.9) e (2.10), as curvas θV na Figura 2.2 para diferentes valores de P, Q e ϕ constantes foram traçadas. Os dados numéricos utilizados foram $V_G = 1 \angle 0^\circ$ pu e $Z_t = 0,2 \angle 70^\circ$ pu.

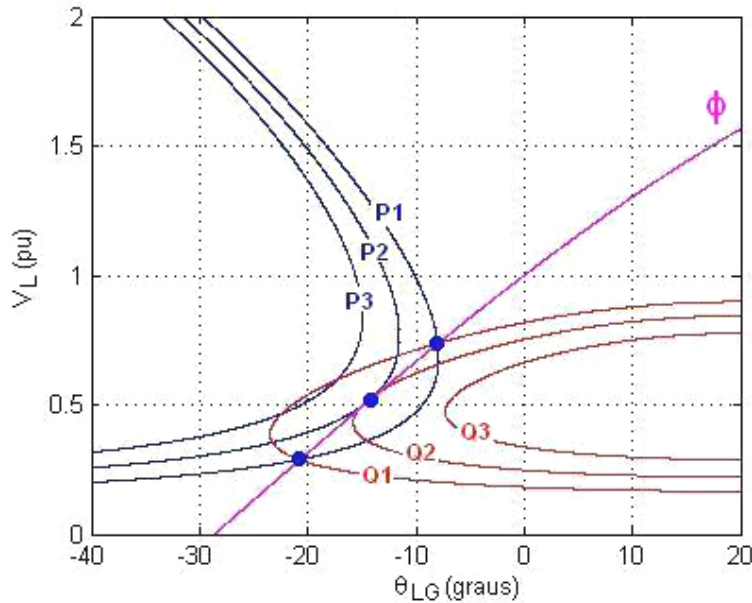


Figura 2.2 - Três Possibilidades de Solução para a Tensão na Carga com Mesmo fator de Potência

Na Figura 2.2 é ilustrado um exemplo para $\phi=41,19^\circ$ indutivo. Para $P_1=0,80$ pu e $Q_1=0,70$ pu, duas soluções para a tensão de carga se apresentam em $V_L=0,741$ pu e $V_L=0,287$ pu (curva P_1 e Q_1 se tocam em dois pontos). À medida que P e Q crescem, mantendo ϕ constante, as duas soluções se aproximam até que em $P_2=1,00$ pu e $Q_2=0,88$ pu a solução é única em $V_L=0,516$ pu (curva P_2 e Q_2 se tocam num único ponto). Para cargas maiores do que essa, por exemplo $P_3=1,20$ pu e $Q_3=1,05$ pu, não existe solução para a tensão (curva P_3 e Q_3 não se tocam em nenhum ponto). Conclui-se graficamente que existe um limite máximo para cada fator de potência de carga.

Na Tabela 2.1 são mostradas as três possibilidades de solução para tensão na carga, mantendo o mesmo fator de potência, quando as curvas P , Q e ϕ da Figura 2.2 se tocam em dois, um e nenhum ponto (sempre com $P \geq 0$).

Tabela 2.1 - Três Possibilidades de Solução para a Tensão na Carga com Mesmo Fator de Potência

N°	P (pu)	Q (pu)	ϕ (graus)	V_L (pu)	θ_{LG} (graus)
1	0,80	0,70	41,19	0,741 e 0,287	-7,92 e -20,89
2	1,00	0,88	41,19	0,516	-14,41
3	1,20	1,05	41,19	-	-

Na Figura 2.3 foi traçada a curva para $\phi = 41,19^\circ$ no plano SV para a barra de carga da Figura 2.1. Deve-se notar que o ponto de máximo P, assinalado na Figura 2.3, corresponde aos dados da segunda linha da Tabela 2.1, e que foram

tiradas da Figura 2.2, onde as curvas $P_2 = 1,00$ pu e $Q_2 = 0,88$ pu se tocam num único ponto. Neste ponto de máximo se satisfaz a condição de que a impedância de carga é igual em módulo à impedância da linha de transmissão, e então $Z_c = 0,2$ pu.

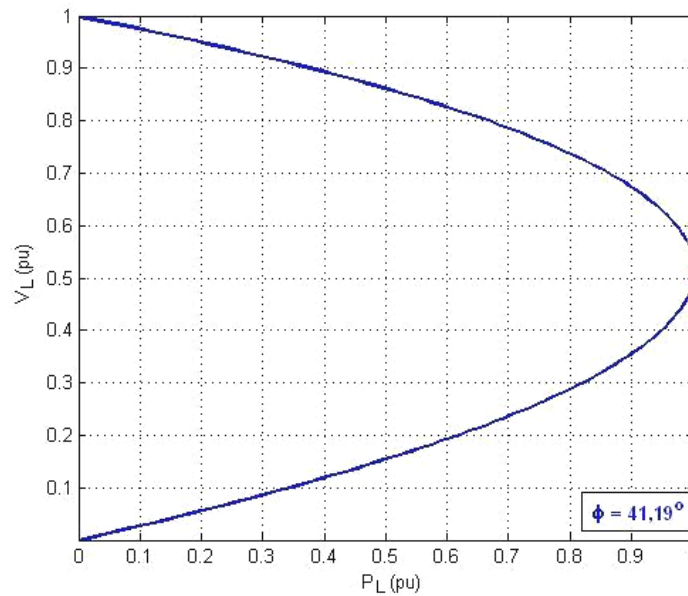


Figura 2.3 - Curva para Fator de Potência Constante na Barra de Carga no Plano SV

2.4 O Limite de Estabilidade de Tensão (LET)

A corrente que flui no circuito mostrado na Figura 2.4, correspondente ao diagrama unifilar da Figura 2.1, é:

$$\dot{I}_{GL} = \frac{\dot{V}_G}{Z_t \angle \alpha_t + Z_c \angle \phi} \quad (2.11)$$

$$I_{GL} = \frac{V_G}{\sqrt{(Z_t \cdot \cos \alpha_t + Z_c \cdot \cos \phi)^2 + (Z_t \cdot \sin \alpha_t + Z_c \cdot \sin \phi)^2}} \quad (2.12)$$

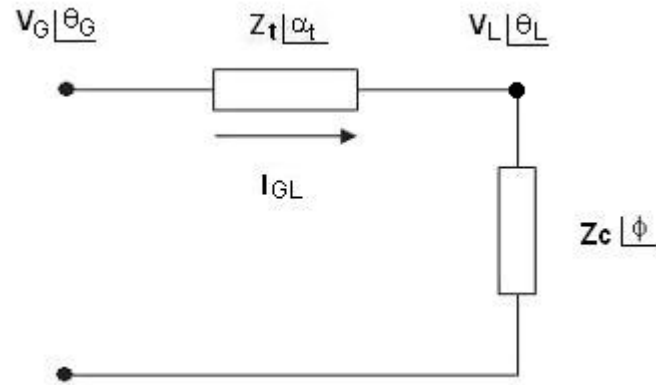


Figura 2.4 - Circuito com as Impedâncias da Transmissão e da Carga

A potência ativa que "sai" da barra de carga, e que é igual ao negativo da potência consumida na carga é:

$$P_{LG} = -P_L = -I_{GL}^2 \cdot Z_c \cdot \cos \phi \quad (2.13)$$

Substituindo (2.12) em (2.13):

$$P_{LG} = -\frac{V_G^2 \cdot Z_c \cdot \cos \phi}{Z_t^2 \cdot \cos^2 \alpha_t + 2 \cdot Z_t \cdot Z_c \cdot \cos \alpha_t \cdot \cos \phi + Z_c^2 \cdot \cos^2 \phi + b} \quad (2.14)$$

onde:

$$b = Z_t^2 \cdot \sin^2 \alpha_t + 2 \cdot Z_t \cdot Z_c \cdot \sin \alpha_t \cdot \sin \phi + Z_c^2 \cdot \sin^2 \phi \quad (2.15)$$

Reescrevendo:

$$P_{LG} = -P_L = -\frac{V_G^2 \cdot Z_c \cdot \cos \phi}{Z_t^2 + Z_c^2 + 2 \cdot Z_t \cdot Z_c \cdot \cos(\phi - \alpha_t)} \quad (2.16)$$

De (2.16), calcula-se o valor de Z_c que maximiza a potência ativa que chega na barra de carga através da primeira derivada de P_L :

$$\frac{\partial P_L}{\partial Z_c} = \frac{V_G^2 \cdot \cos \phi \cdot [Z_t^2 + Z_c^2 + 2 \cdot Z_t \cdot Z_c \cdot \cos(\alpha_t - \phi)] - Z_c \cdot V_G^2 \cdot \cos \phi \cdot [2 \cdot Z_c + 2 \cdot Z_t \cdot \cos(\alpha_t - \phi)]}{[Z_t^2 + Z_c^2 + 2 \cdot Z_t \cdot Z_c \cdot \cos(\alpha_t - \phi)]^2} = 0 \quad (2.17)$$

Logo:

$$V_G^2 \cdot Z_t^2 \cdot \cos \phi + V_G^2 \cdot Z_c^2 \cdot \cos \phi + 2 \cdot V_G^2 \cdot Z_t \cdot Z_c \cdot \cos \phi \cdot \cos(\alpha_t - \phi) - 2V_G^2 \cdot Z_c^2 \cdot \cos \phi - 2V_G^2 \cdot Z_c \cdot Z_t \cdot \cos \phi \cdot \cos(\alpha_t - \phi) = 0 \quad (2.18)$$

que é reduzido a:

$$V_G^2 \cdot Z_t^2 \cdot \cos \phi = V_G^2 \cdot Z_c^2 \cdot \cos \phi \Rightarrow Z_c = Z_t \quad (2.19)$$

Calcula-se a segunda derivada de P_L em relação à Z_c para conferir se é efetivamente um máximo:

$$\frac{\partial^2 P_L}{\partial Z_c^2} /_{Z_c=Z_t} < 0 \quad (2.20)$$

De (2.19) e (2.20), conclui-se que P_L é máximo quando:

$$\boxed{Z_c = Z_t} \quad (2.21)$$

Substituindo-se (2.21) em (2.16) e chamando de P_L^C à máxima carga que pode ser alimentada no ponto de operação, tem-se:

$$P_L^C = \frac{V_G^2 \cdot Z_c \cdot \cos \phi}{2 \cdot Z_c^2 \cdot [1 + \cos(\phi - \alpha_t)]} \quad (2.22)$$

que é reduzido a:

$$\boxed{P_L^C = \frac{V_G^2 \cdot \cos \phi}{4 \cdot Z_c \cdot \cos^2\left(\frac{\phi - \alpha_t}{2}\right)}} \quad (2.23)$$

Para P_L^C e uma dada impedância de carga Z_c com fator de potência ϕ :

$$V_L = Z_c \cdot I_{GL} \Rightarrow V_L = \frac{V_G \cdot Z_c}{\sqrt{2 \cdot Z_t^2 \cdot (1 + \cos(\phi - \alpha_t))}} \quad (2.24)$$

Usando-se (2.21):

$$V_L = \frac{V_G}{\sqrt{4 \cdot \cos^2\left(\frac{\phi - \alpha_t}{2}\right)}} \quad (2.25)$$

Chamando de V_L^C o módulo da tensão na barra terminal no ponto de operação correspondente à máxima carga que pode ser alimentada:

$$\boxed{V_L^C = \frac{V_G}{2 \cdot \cos\left(\frac{\phi - \alpha_t}{2}\right)}} \quad (2.26)$$

Por outro lado:

$$\dot{V}_L = \dot{Z}_c \cdot \dot{I}_{GL} \quad \text{logo} \quad V_L \angle \theta_L = Z_c \angle \phi \frac{\dot{V}_G}{Z_t \angle \alpha_t + Z_c \angle \phi} \quad (2.27)$$

Considerando só a parte real e usando (2.21):

$$V_L \cos \theta_L = \frac{V_G \cdot (\cos \alpha_t \cdot \cos \phi + \cos^2 \phi + \sin \alpha_t \cdot \sin \phi + \sin^2 \phi)}{d} \quad (2.28)$$

onde:

$$d = [\cos^2 \alpha_t + 2 \cdot \cos \alpha_t \cdot \cos \phi + \cos^2 \phi + \sin^2 \alpha_t + 2 \cdot \sin \alpha_t \cdot \sin \phi + \sin^2 \phi] \quad (2.29)$$

Operando (2.28) e (2.29):

$$V_L \cos \theta_L = \frac{V_G \cdot (\cos \alpha_t \cdot \cos \phi + \sin \alpha_t \cdot \sin \phi + 1)}{2 \cdot \cos \alpha_t \cdot \cos \phi + 2 \cdot \sin \alpha_t \cdot \sin \phi + 2} = \frac{V_G \cdot (\cos \alpha_t \cdot \cos \phi + \sin \alpha_t \cdot \sin \phi + 1)}{2 \cdot (\cos \alpha_t \cdot \cos \phi + \sin \alpha_t \cdot \sin \phi + 1)} \quad (2.30)$$

que é reduzido a:

$$V_L = \frac{V_G}{2 \cdot \cos \theta_L} \quad (2.31)$$

Igualando-se (2.26) a (2.31), obtém-se:

$$\frac{V_G}{2 \cdot \cos \theta_L} = \frac{V_G}{2 \cdot \cos\left[\frac{\phi - \alpha_t}{2}\right]} \quad (2.32)$$

Chamando de θ_L^C o ângulo da tensão na barra terminal no ponto de operação correspondente à máxima carga que pode ser alimentada:

$$\boxed{\theta_L^C = \frac{\phi - \alpha_t}{2}} \quad (2.33)$$

O LET é o lugar geométrico das tensões em módulo e ângulo (V_L^C e θ_L^C), onde o módulo da impedância equivalente da carga é igual ao módulo da impedância da linha de transmissão série. O LET representa os pontos da máxima transmissão de potência à carga, uma para cada fator de potência (o que depende da parte reativa e/ou eventual compensação reativa da carga). Em outras palavras, variando-se ϕ e usando-se (2.5), (2.31) e (2.33) traça-se o LET no plano SV, como mostrado na Figura 2.5.

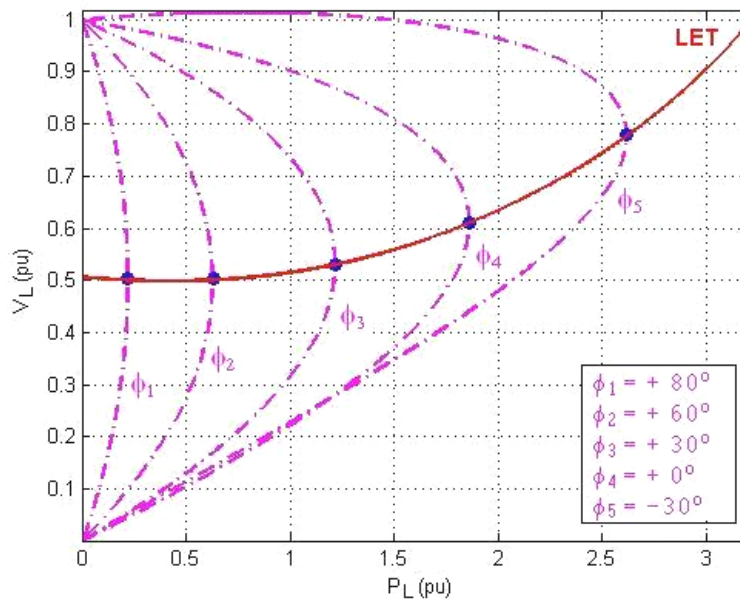


Figura 2.5 - Limite de Estabilidade de Tensão no Plano SV

Como as curvas são traçadas para ϕ constante, usar par de eixos SV, PV ou QV é indiferente.

2.5 A Existência da Potência Transmitida "Maximum Maximorum"

São mostradas na Figura 2.6 várias curvas para P constante, entre 0,00 e 3,65 pu. Quanto mais interna a curva, maior a potência ativa transmitida para a carga. A curva vai diminuindo o perímetro até que se reduz a um único ponto e que, portanto, corresponde à carga "maximum maximorum" que pode ser atendida.

Mostra-se também na Figura 2.6 seis diferentes níveis de carga reativa constante a partir de $Q=1,29$ pu indutiva até $Q=-10,04$ pu capacitiva. É interessante notar a mudança na forma das curvas à medida que a carga reativa

vai diminuindo (tornando-se mais capacitivo), e que as curvas não são fechadas. Não existe um fluxo máximo de potência reativa que pode chegar na barra de carga (com $P \geq 0$).

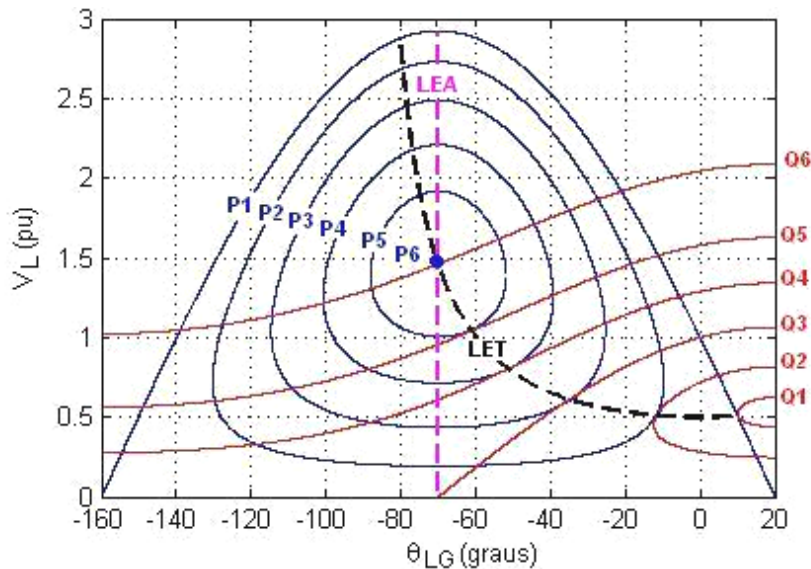


Figura 2.6 - Lugar Geométrico da Tensão na Carga para Todos os Possíveis Diferentes Níveis de Potência Ativa Constante e Para Alguns Níveis de Potência Reativa Constante

Na Figura 2.6, no ponto onde $P_6=3,65$ pu é o máximo fluxo de potência ativa, a carga reativa é $Q_6=-10,04$ pu (capacitiva). Estes valores representam um ângulo de fator de potência de -70° . Isso é um resultado conhecido que diz que a máxima absorção de potência ativa por uma impedância de carga ocorre quando esta impedância é igual em módulo e conjugada em ângulo, em relação à impedância série da linha de transmissão. No exemplo o módulo da impedância de carga seria $\frac{1,462^2}{\sqrt{3,65^2 + 10,04^2}}$ que é igual a 0,2 pu. O ângulo da impedância de carga seria $\arctg(-10,04/3,65)$ que é igual a -70° , como se queria obter.

O LET passa por todos os pontos onde as curvas P e Q constantes se tocam num único ponto no plano θV , isto é, une todos os pontos de máximo carregamento. Esse valor máximo é dependente do ângulo do fator de potência (na Figura 2.6, foi traçado para $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ utilizando (2.31) e (2.33)).

O LET separa as duas regiões de trabalho: região A ou região superior da curva, onde se tem controle sobre a tensão, e a região B ou região inferior da curva, onde ações de controle de tensão podem ter efeitos opostos ao esperado [7]. Na Figura 2.7 está mostrada a curva para ϕ constante no plano SV antes e após a conexão de um capacitor na barra de carga. Observa-se que se o ponto

de operação fosse a ponto A, a introdução do capacitor aumentaria a tensão para o ponto A', como esperado (supondo o consumo de potência na carga constante). Por outro lado, observa-se que se o ponto de operação fosse a ponto B, a introdução do capacitor diminuiria a tensão para o ponto B', contrariamente ao esperado. Isso será demonstrado na seção 2.9.

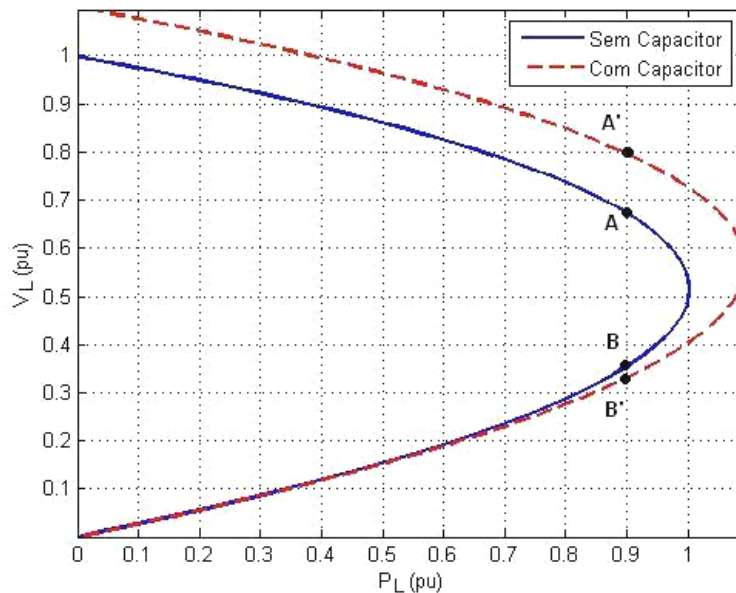


Figura 2.7 - Aumento e Diminuição da Tensão Respectivamente na Região Superior e Inferior da Curva com a Introdução de um Capacitor

Observa-se na Figura 2.6 que as curvas para P constante têm a sua derivada, em relação à defasagem do ângulo da tensão, com valor nulo sempre no mesmo valor de ângulo ($\theta_{LG} = -70^\circ$). Então, uma reta paralela ao eixo V e cortando (perpendicularmente) o eixo θ em $\theta_{LG} = -70^\circ$ define a fronteira LEA - Limite de Estabilidade Estática Angular. Do ponto de vista angular, os lugares geométricos onde o sistema é estaticamente estável são para ângulos entre 20° e -70° , e onde o sistema é estaticamente instável são para ângulos de tensão entre -70° e -160° . Neste máximo defasamento angular de tensões, a carga ativa P pode adquirir qualquer valor entre zero e um certo máximo (na Figura 2.6 o máximo é $P_6 = 3,65$ pu).

É importante notar que os dois limites LET e LEA acima descritos só coincidem em um único ponto: $P_6 = 3,65$ pu e $Q_6 = -10,04$ pu com $\theta_{LG} = -70^\circ$ e $V_L = 1,462$ pu.

Os valores correspondentes à potência "maximum maximorum" podem ser calculados analiticamente. O valor da defasagem angular na barra L que

maximiza a potência elétrica transmitida é calculado através da primeira derivada de (2.5):

$$\frac{\partial P_L}{\partial \theta_L} = -\frac{V_L \cdot V_G}{Z_t} \cdot \text{sen}(\theta_L - \theta_G + \alpha_t) = 0, \text{ onde } \theta_G = 0^\circ \quad (2.34)$$

que é reduzido a:

$$\theta_L = -\alpha_t \text{ e } \theta_L = -\alpha_t + \pi \quad (2.35)$$

A derivada segunda de (2.34) é negativa em $\theta_L = -\alpha_t$ obtida de (2.35):

$$\frac{\partial^2 P_L}{\partial \theta_L^2} < 0 \quad (2.36)$$

$$-\frac{V_L \cdot V_G}{Z_t} \cdot \text{cos}(-\alpha_t - 0^\circ + \alpha_t) < 0 \quad (2.37)$$

e então, o ângulo corresponde a P_L "maximum maximorum" é:

$$\boxed{\theta_L^C = -\alpha_t} \quad (2.38)$$

O valor da tensão V_L na barra L que corresponde a P_L "maximum maximorum" é obtido através da primeira derivada de (2.5):

$$\frac{\partial P_L}{\partial V_L} (\theta_L^C) = 0 \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial V_L} = -2 \cdot \frac{V_L}{Z_t} \cdot \text{cos}(\alpha_t) + \frac{V_G}{Z_t} \cdot \text{cos}(\theta_L - \theta_G + \alpha_t) \quad (2.40)$$

$$\boxed{V_L^C = \frac{V_G}{2 \cdot \text{cos}(\theta_L)}} \quad (2.41)$$

A derivada segunda de (2.5) é negativa, garantindo que trata-se de um ponto de máximo:

$$\frac{\partial^2 P_L}{\partial V_L^2} (\theta_L^C) < 0 \quad (2.42)$$

$$-2 \cdot \frac{\cos(\alpha_t)}{Z_t} < 0 \quad (2.43)$$

Com $\theta_L = -70^\circ$ em (2.41) obtém-se $V_L = 1,4619$ pu. Substituindo $\theta_L = -70^\circ$ e $V_L = 1,4619$ pu em (2.5) obtém-se o valor do "maximum maximorum" da potência elétrica possível de ser transmitida à carga: $P_L = 3,6547$ pu, valor que confere com o encontrado quando da construção das curvas mostradas na Figura 2.6.

2.6 O Porquê da Potência Transmitida Máxima para a Carga

Nas Seções 2.3 e 2.4, determinou-se a existência de uma máxima potência ativa e reativa que pode chegar à barra de carga. O valor desta potência depende do fator de potência e atinge um "maximum maximorum" como determinado na seção 2.5. Partindo-se de carga nula, sistema em vazio ou impedância equivalente de carga infinita, a potência consumida na carga é nula. À medida que a impedância equivalente de carga diminui, a potência consumida na carga aumenta. Entretanto, a partir de um certo ponto, mesmo com o contínuo decréscimo da impedância da carga, a potência consumida na carga passa a diminuir. Esta seção explica o porquê deste acontecimento.

Define-se a potência elétrica consumida na carga em um ponto "k" e em outro ponto "k+1" como sendo:

$$P_L^k = V_L^k \cdot I_L^k \cdot \cos \phi \quad (2.44)$$

$$P_L^{k+1} = V_L^{k+1} \cdot I_L^{k+1} \cdot \cos \phi \quad (2.45)$$

onde:

- i. V_L^k e I_L^k são os módulos da tensão e corrente na carga num ponto "k"
- ii. V_L^{k+1} e I_L^{k+1} são os módulos da tensão e corrente na carga num ponto "k+1"

Através de (2.44) e (2.45) pode-se calcular as variações de potência entre os dois pontos, dadas por:

$$\Delta P_L^{k+1} = P_L^{k+1} - P_L^k \quad (2.46)$$

$$\Delta P_L^{k+1} = V_L^{k+1} \cdot I_L^{k+1} \cdot \cos \phi - V_L^k \cdot I_L^k \cdot \cos \phi \quad (2.47)$$

A equação (2.47), e sem perda de generalidade, pode ser expressa através das variações de tensão e corrente como mostrado em (2.48) e (2.49):

$$\Delta P_L^{k+1} = (V_L^k + \Delta V_L^{k+1})(I_L^k + \Delta I_L^{k+1}) \cdot \cos \phi - (V_L^k \cdot I_L^k) \cdot \cos \phi \quad (2.48)$$

$$\boxed{\Delta P_L^{k+1} = \cos \phi \cdot [(V_L^k \cdot \Delta I_L^{k+1}) + (I_L^k \cdot \Delta V_L^{k+1} + \Delta V_L^{k+1} \cdot \Delta I_L^{k+1})]} \quad (2.49)$$

Para todo $k+1$, à medida que se aumenta a carga:

$$\Delta V_L^{k+1} < 0, \text{ as variações da tensão são negativas} \quad (2.50)$$

$$\Delta I_L^{k+1} > 0, \text{ as variações da corrente são positivas} \quad (2.51)$$

Na Tabela 2.2 são mostrados pontos de operação da curva ϕ constante, sendo que os primeiros pertencem à parte superior da curva SV, enquanto que os últimos pertencem à parte inferior. Para exemplificar como funciona (2.49), consideram-se dois pontos de operação da Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Variações de Tensão, Corrente e Potência na Barra de Carga

k	P_L^k (pu)	V_L^k (pu)	θ_L^k (graus)	I_L^k (pu)	ΔV_L^{k+1} (pu)	ΔI_L^{k+1} (pu)	ΔP_L^{k+1} (pu)
1	0,00000	1,00000	0,00	0,00000			
2	0,19459	0,95206	-1,50	0,27160	-0,04794	0,27160	0,19459
3	0,36919	0,90347	-3,00	0,54301	-0,04859	0,27141	0,17460
4	0,52332	0,85426	-4,50	0,81405	-0,04921	0,27104	0,15413
5	0,65656	0,80446	-6,00	1,08453	-0,04980	0,27048	0,13324
6	0,76854	0,75412	-7,50	1,35427	-0,05035	0,26974	0,11199
7	0,85896	0,70325	-9,00	1,62308	-0,05086	0,26881	0,09042
8	0,92758	0,65191	-10,50	1,89078	-0,05135	0,26770	0,06861
9	0,97419	0,60011	-12,00	2,15718	-0,05179	0,26640	0,04661
10	0,99868	0,54791	-13,50	2,42210	-0,05220	0,26492	0,02449
11	1,00097	0,49533	-15,00	2,68537	-0,05258	0,26326	0,00229
12	0,98107	0,44241	-16,50	2,94679	-0,05292	0,26142	-0,01990
13	0,93902	0,38919	-18,00	3,20619	-0,05322	0,25940	-0,04205
14	0,87494	0,33570	-19,50	3,46340	-0,05349	0,25721	-0,06408
15	0,78901	0,28198	-21,00	3,71823	-0,05372	0,25483	-0,08593
16	0,68145	0,22807	-22,50	3,97051	-0,05391	0,25228	-0,10755
17	0,55258	0,17400	-24,00	4,22008	-0,05407	0,24956	-0,12888
18	0,40273	0,11981	-25,50	4,46675	-0,05419	0,24667	-0,14985
19	0,23233	0,06554	-27,00	4,71036	-0,05427	0,24361	-0,17041
20	0,04183	0,01123	-28,50	4,95074	-0,05432	0,24038	-0,19050

2.7

Ponto de operação na parte superior da curva

Considerando os valores de k=8 na Tabela 2.2:

$$\Delta P_L^{k+1} = \cos \phi \left[\overset{+}{(V_L^k \cdot \Delta I_L^{k+1})} + \overset{-}{(I_L^k \cdot \Delta V_L^{k+1} + \Delta V_L^{k+1} \cdot \Delta I_L^{k+1})} \right] = +0,04661 \text{ pu}$$

onde os sinais + e - sobre a fórmula indicam se o termo é, respectivamente, positivo ou negativo.

A potência transmitida aumenta ($\Delta P_L^{k+1} > 0$) até um certo máximo carregamento enquanto o efeito de variações positivas do módulo da corrente $\Delta I_L^{k+1} > 0$ predominarem sobre as variações negativas do módulo da tensão $\Delta V_L^{k+1} < 0$ e de tal forma que: $[V_L^k \cdot \Delta I_L^{k+1}] > [I_L^k \cdot \Delta V_L^{k+1} + \Delta V_L^{k+1} \cdot \Delta I_L^{k+1}]$.

Então, no ponto k+1=9, $P_L^9 = P_L^8 + \Delta P_L^9 = +0,97419$ pu, o que confere com o valor mostrado para k=9 na Tabela 2.2.

2.8 Ponto de operação na parte inferior da curva

Considerando os valores para $k=14$ na Tabela 2.2:

$$\Delta P_L^{k+1} = \cos \phi \cdot \left[\overset{+}{\boxed{V_L^k \cdot \Delta I_L^{k+1}}} + \overset{-}{\boxed{I_L^k \cdot \Delta V_L^{k+1} + \Delta V_L^{k+1} \cdot \Delta I_L^{k+1}}} \right] = -0,08593 \text{ pu}$$

A potência transmitida diminui ($\Delta P_L^{k+1} < 0$) a partir de um certo máximo carregamento devido ao efeito das variações negativas do módulo da tensão $\Delta V_L^{k+1} < 0$ predominarem sobre as variações positivas da corrente $\Delta I_L^{k+1} > 0$ e de tal forma que: $V_L^k \cdot \Delta I_L^{k+1} < I_L^k \cdot \Delta V_L^{k+1} + \Delta V_L^{k+1} \cdot \Delta I_L^{k+1}$.

Então, no ponto $k+1=15$, $P_L^{15} = P_L^{14} + \Delta P_L^{15} = +0,78901$ pu, que confere com o valor mostrado para $k=15$ na Tabela 2.2.

Mostrou-se analítica e numericamente que a potência ativa consumida na carga aumenta, atinge um máximo e passa a diminuir. Na Figura 2.8 esse fato é mostrado graficamente.

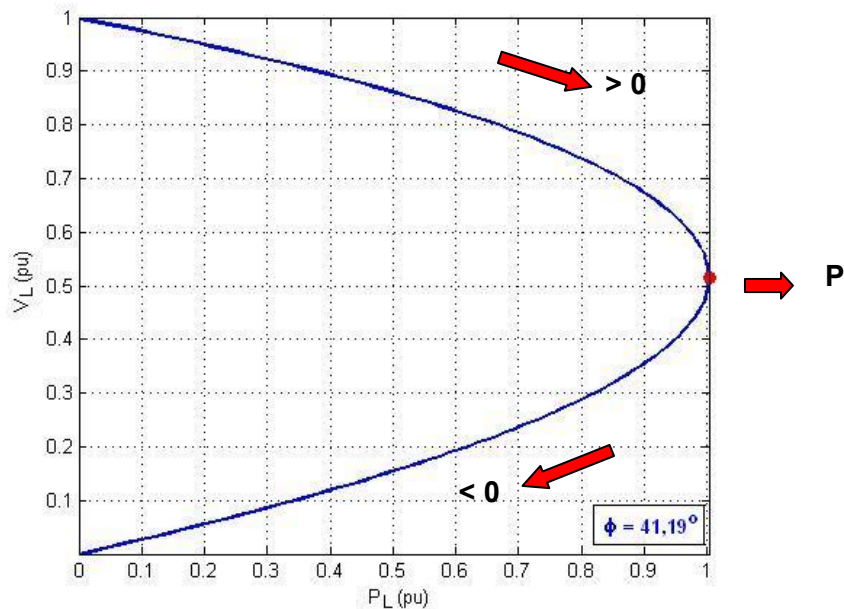


Figura 2.8 - Potência Ativa Consumida na Carga com Fator de Potência Constante

2.9

O Porquê da Introdução de um Capacitor Diminui a Tensão

Analisa-se porque, quando se conecta um capacitor de 50 Mvar em paralelo com a carga, a tensão aumenta quando o ponto de operação está na região superior da curva para ϕ constante, enquanto que a tensão diminui quando o ponto de operação está na região inferior da curva. Na Figura 2.9 e na Figura 2.10 são mostrados os circuitos sem e com capacitor respectivamente, que serão utilizados nesta análise.

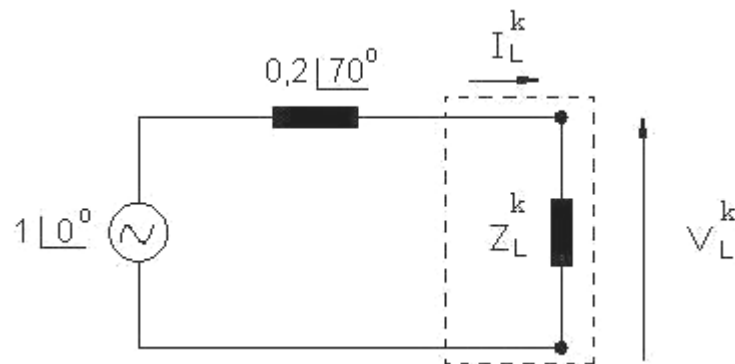


Figura 2.9 - Circuito sem Capacitor

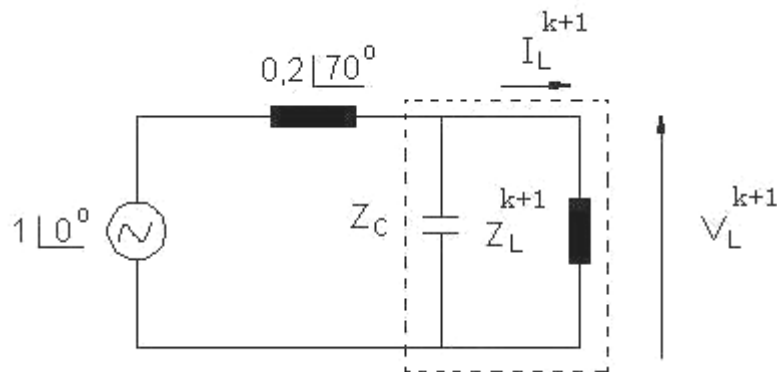


Figura 2.10 - Circuito com Capacitor

Na região superior da curva quando se passa do ponto A da curva sem capacitor para o ponto A' com capacitor, a tensão aumenta (Figura 2.7) e para manter constante a potência, a corrente que flui pela carga tem que diminuir: $P_L = \uparrow V_L \cdot \downarrow I_L \cdot \cos \phi$. Na região inferior da curva acontece o efeito contrário quando se passa do ponto B da curva sem capacitor para o ponto B' com capacitor, isto é, a tensão diminui (Figura 2.7) e para manter a potência constante, a corrente que flui pela carga tem que aumentar: $P_L = \downarrow V_L \cdot \uparrow I_L \cdot \cos \phi$.

O objetivo agora é explicar esse comportamento de forma analítica. Define-se a potência elétrica consumida na carga em um ponto “k” e em outro ponto “k+1” que representam pontos de operação em curvas SV diferentes.

O modelo de carga é potência constante e, portanto, de (2.44) e (2.45) tem-se:

$$P_L^k = P_L^{k+1} \quad (2.52)$$

$$(Z_L^k).(I_L^k)^2.\cos\phi = (Z_L^k + \Delta Z_L^{k+1}).(I_L^k + \Delta I_L^{k+1})^2.\cos\phi \quad (2.53)$$

Há uma diferença entre a impedância equivalente da carga sem e com capacitor (ΔZ_L^{k+1}) porque a carga deve consumir a mesma quantidade de potência ativa sem e com capacitor.

As tensões na carga em um ponto “k” e em outro ponto “k+1”, onde os termos Z_L^k , I_L^k , ΔZ_L^{k+1} e ΔI_L^{k+1} satisfazem (2.53), podem ser escritas como:

$$V_L^k = Z_L^k.I_L^k \quad (2.54)$$

$$V_L^{k+1} = (Z_L^k + \Delta Z_L^{k+1}).(I_L^k + \Delta I_L^{k+1}) \quad (2.55)$$

A variação do módulo da tensão na carga pode ser calculada subtraindo a tensão entre os pontos “k+1” e “k”:

$$\Delta V_L^{k+1} = V_L^{k+1} - V_L^k \quad (2.56)$$

$$\boxed{\Delta V_L^{k+1} = [I_L^k.\Delta Z_L^{k+1}] + [Z_L^k.\Delta I_L^{k+1} + \Delta Z_L^{k+1}.\Delta I_L^{k+1}]} \quad (2.57)$$

Para exemplificar como funciona (2.57) e poder explicar o aumento ou decréscimo da tensão na carga, com a introdução de um capacitor, consideram-se dois pontos de operação da Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Pontos de Operação para Avaliar o Aumento ou Decréscimo da Tensão com a Introdução de um Capacitor

<i>Na Região Superior da Curva</i>									
P_L^k (pu)	Curva sem Capacitor			Curva com capacitor			ΔZ_L^{k+1} (pu)	ΔI_L^{k+1} (pu)	ΔV_L^{k+1} (pu)
	V_L^k (pu)	Z_L^k (pu)	I_L^k (pu)	V_L^{k+1} (pu)	Z_L^{k+1} (pu)	I_L^{k+1} (pu)			
0,2	0,9505	3,3912	0,2803	1,0530	4,1822	0,2518	0,7910	-0,0285	+0,1025
0,5	0,8626	1,1223	0,7685	0,9657	1,4084	0,6856	0,2861	-0,0829	+0,1031
0,9	0,6750	0,3811	1,7710	0,7969	0,5309	1,5010	0,1498	-0,2700	+0,1219
<i>Na Região Inferior da Curva</i>									
P_L^k (pu)	Curva sem Capacitor			Curva com capacitor			ΔZ_L^{k+1} (pu)	ΔI_L^{k+1} (pu)	ΔV_L^{k+1} (pu)
	V_L^k (pu)	Z_L^k (pu)	I_L^k (pu)	V_L^{k+1} (pu)	Z_L^{k+1} (pu)	I_L^{k+1} (pu)			
0,2	0,0564	0,0119	4,7510	0,0560	0,0117	4,7716	-0,0002	0,0206	-0,0004
0,5	0,1541	0,0357	4,3112	0,1518	0,0347	4,3756	-0,0010	0,0644	-0,0023
0,9	0,3546	0,1051	3,3731	0,3316	0,0918	3,6107	-0,0133	0,2376	-0,0230

2.9.1 Ponto de operação na parte superior da curva

Considerando os valores para $P_L^k = +0,9$ pu da Tabela 2.3:

$$\Delta V_L^{k+1} = \overset{+}{[I_L^k \cdot \Delta Z_L^{k+1}]} + \overset{-}{[Z_L^k \cdot \Delta I_L^{k+1} + \Delta Z_L^{k+1} \cdot \Delta I_L^{k+1}]} = +0,12195 \text{ pu}$$

onde os sinais + e - sobre a fórmula indicam se o termo é, respectivamente, positivo ou negativo.

A elevação da tensão ($\Delta V_L^{k+1} > 0$) acontece enquanto o efeito de variações positivas do módulo da impedância de carga $\Delta Z_L^{k+1} > 0$ predominarem sobre as variações negativas do módulo da corrente de carga $\Delta I_L^{k+1} < 0$ e de tal forma que: $[I_L^k \cdot \Delta Z_L^{k+1}] > [Z_L^k \cdot \Delta I_L^{k+1} + \Delta Z_L^{k+1} \cdot \Delta I_L^{k+1}]$.

Então, no ponto k+1, $V_L^{k+1} = V_L^k + \Delta V_L^{k+1} = +0,7969$ pu, o que confere com o valor mostrado na Tabela 2.3. Portanto, a tensão aumenta quando se chaveia um capacitor.

2.9.2 Ponto de operação na parte inferior da curva

Considerando os valores para $P_L^k = +0,9$ pu da Tabela 2.3:

$$\Delta V_L^{k+1} = \overset{+}{\boxed{[Z_L^k \cdot \Delta I_L^{k+1}]}} + \overset{-}{\boxed{[I_L^k \cdot \Delta Z_L^{k+1} + \Delta Z_L^{k+1} \cdot \Delta I_L^{k+1}]} } = -0,02305 \text{ pu}$$

A redução da tensão ($\Delta V_L^{k+1} < 0$) acontece enquanto o efeito de variações negativas do módulo da impedância de carga $\Delta Z_L^{k+1} < 0$ predominarem sobre as variações positivas do módulo da corrente de carga $\Delta I_L^{k+1} > 0$ e de tal forma que: $[Z_L^k \cdot \Delta I_L^{k+1}] < |[I_L^k \cdot \Delta Z_L^{k+1} + \Delta Z_L^{k+1} \cdot \Delta I_L^{k+1}]|$.

Então, no ponto k+1, $V_L^{k+1} = V_L^k + \Delta V_L^{k+1} = +0,3316$ pu, o que confere com o valor mostrado na Tabela 2.3. Portanto, a tensão diminui quando se chaveia um capacitor.

Mostrou-se analítica, gráfica e numericamente que a tensão pode aumentar ou diminuir quando chavea-se um capacitor.

2.10 Análise dos resultados

Neste capítulo foi introduzida a teoria básica sobre estabilidade de tensão. Conceitos como curva PV (ou SV), região normal e anormal serão explorados durante este trabalho.

Foram ainda apresentadas situações em que a inserção de um capacitor reduz a tensão do sistema, produzindo um efeito oposto ao usual. No próximo capítulo, este conceito será estendido para um dos objetivos do trabalho, que é o estudo do efeito do controle de tensão em transformadores com tapes variáveis.

3

LTC – Load Tap Change

3.1

Introdução

Taps ou *tapes* (termo em português) de transformadores são recursos largamente utilizados na operação do sistema elétrico, sejam eles de transmissão, subtransmissão e distribuição. Sua função básica é alterar a relação de transformação dos equipamentos, permitindo que seja controlado o fluxo de energia reativa, controlando desta forma a tensão dos barramentos. São, portanto, recursos de otimização do fluxo de potência reativa, não gerando ou absorvendo esse tipo de potência. A maioria dos transformadores que dispõem de trocador de *tapes*, o faz em carga e são estes equipamentos que realmente apresentam alguma serventia no controle de tensão do sistema, já que trocar *tapes* com o desligamento do equipamento não costuma ser um recurso eficaz de controle. O dispositivo de mudança da relação de transformação com o equipamento em funcionamento é conhecido como *Load Tap Changer* (LTC) ou Trocador de *Tapes* em Carga (não há siglas em português, é adotada a mesma sigla do inglês).

3.2

Modelagem dos LTCs para Análises de Regime Permanente [8]

3.2.1

LTCs com Variação de *Tapes* no Primário

A modelagem dos LTCs é similar à modelagem π clássica das linhas de transmissão, mostrada na Figura 3.1.

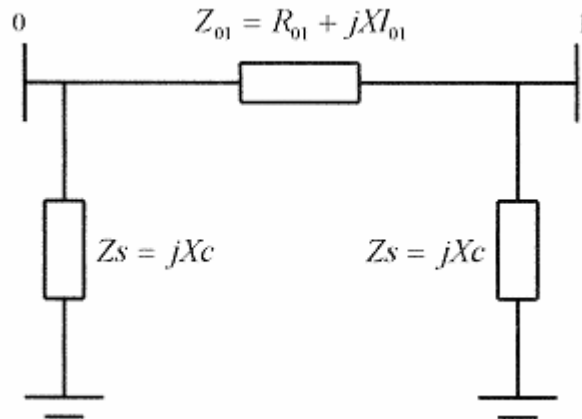


Figura 3.1 – Modelagem π clássica de linhas de transmissão

A Figura 3.2 ilustra a representação de um transformador com tapes variáveis no seu primário. Basicamente, a modelagem é composta de uma admitância série Y_{01} em série com um transformador ideal.

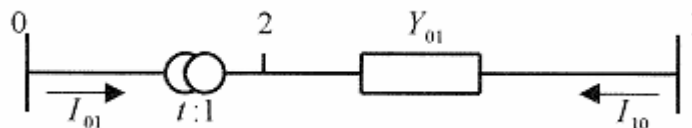


Figura 3.2 – Modelagem de LTCs com variação de tapes no primário

A relação entre as magnitudes das tensões dos terminais 0 e 2 do transformador ideal é:

$$\frac{V_2}{V_0} = \frac{1}{t} \quad (3.1)$$

Sendo ideal o transformador, não há dissipação de potência ativa e reativa entre os nós 0 e 2, então:

$$V_0 I_{01} + V_2 I_{10} = 0 \quad (3.2)$$

$$V_0 I_{01} = -V_2 I_{10} \quad (3.3)$$

$$-\frac{I_{01}}{I_{10}} = \frac{V_2}{V_0} = \frac{1}{t} \quad (3.4)$$

De (3.4) é fato que I_{01} e I_{10} estão defasadas de 180° e suas magnitudes estão na razão 1:t.

A modelagem das admitâncias A, B e C é feita identificando as correntes I_{01} e I_{10} do modelo da Figura 3.2 com as correspondentes do modelo π equivalente, como o da Figura 3.3, onde:

$$I_{01} = (V_0 - V_1)A + V_0B = (A + B)V_0 - AV_1 \quad (3.5)$$

$$I_{10} = (V_1 - V_0)A + V_1C = (A + C)V_1 - AV_0 \quad (3.6)$$

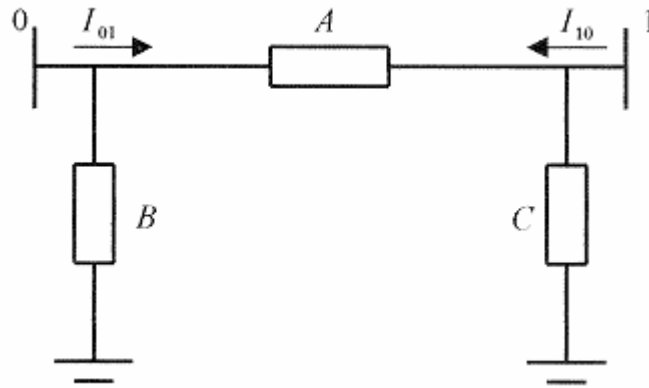


Figura 3.3 – Circuito π equivalente de um LTC

Da Figura 3.2:

$$I_{01} = (V_2 - V_1) \frac{1}{t} Y_{01} \quad (3.7)$$

$$I_{10} = (V_1 - V_2) Y_{01} \quad (3.8)$$

Aplicando (3.1) em (3.7):

$$I_{01} = \left(\frac{1}{t} V_0 - V_1 \right) \frac{1}{t} Y_{01} = \frac{Y_{01}}{t^2} V_0 - \frac{Y_{01}}{t} V_1 \quad (3.9)$$

Aplicando (3.1) em (3.8):

$$I_{10} = \left(V_1 - \frac{1}{t} V_0 \right) \frac{1}{t} Y_{01} = Y_{01} V_1 - \frac{Y_{01}}{t} V_0 \quad (3.10)$$

Aplicando (3.5) em (3.9):

$$(A+B)V_0 - AV_1 = \left(\frac{1}{t}V_0 - V_1\right)\frac{1}{t}Y_{01} = \frac{Y_{01}}{t^2}V_0 - \frac{Y_{01}}{t}V_1 \quad (3.11)$$

Aplicando (3.6) em (3.10):

$$(A+C)V_1 - AV_0 = \left(V_1 - \frac{1}{t}V_0\right)\frac{1}{t}Y_{01} = Y_{01}V_1 - \frac{Y_{01}}{t}V_0 \quad (3.12)$$

De (3.11) e (3.12):

$$A = \frac{Y_{01}}{t} \quad (3.13)$$

$$B = \frac{Y_{01}}{t^2} - \frac{Y_{01}}{t} = \frac{1}{t}\left(\frac{1}{t} - 1\right)Y_{01} \quad (3.14)$$

$$C = \left(1 - \frac{1}{t}\right)Y_{01} \quad (3.15)$$

Através das equações (3.13),(3.14) e (3.15) pode ser feita a análise do efeito de transformação t:1 sobre as magnitudes das tensões V_0 e V_1 . Considerando inicialmente t=1, as admitâncias B e C são nulas e o circuito π equivalente fica reduzido à admitância série Y_{01} . Se for alterada a relação de transformação para um valor t>1, B terá sinal contrário a Y_{01} e será do tipo capacitivo, enquanto C será indutivo. Isto significa que V_1 tenderá a diminuir e V_0 a aumentar. Por outro lado, se t<1, ocorrerá o oposto e V_1 tenderá a aumentar e V_0 a diminuir. Se uma das barras tiver tensão regulada ou estiver eletricamente próxima a uma barra deste tipo, somente a outra barra sofrerá os efeitos das alterações na relação de transformação.

A Figura 3.4 mostra o circuito π equivalente com os parâmetros expressos em função da admitância e da relação de transformação.

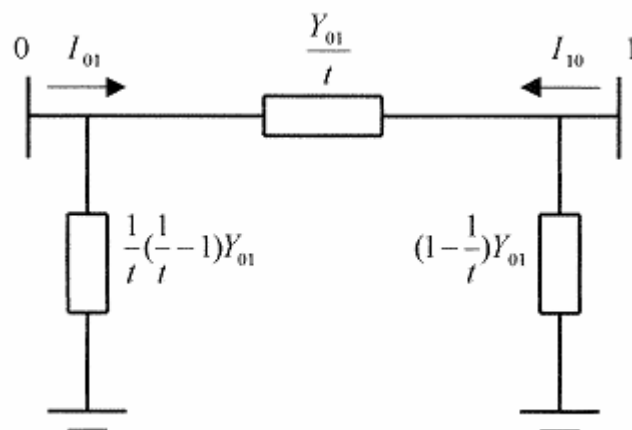


Figura 3.4 – Circuito π equivalente de um LTC com parâmetros expressos em função da admitância e relação de transformação

A Figura 3.5 mostra o circuito π equivalente com os parâmetros expressos em função da impedância e da relação de transformação.

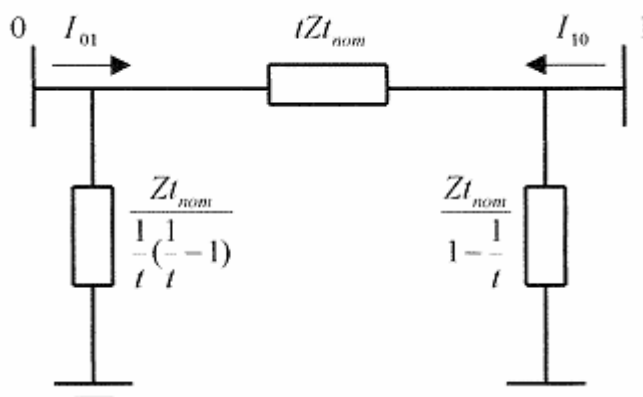


Figura 3.5 – Circuito π equivalente de um LTC com parâmetros expressos em função da impedância e relação de transformação

3.2.2 LTCs com Variação de Tapes no Secundário

A Figura 3.2 ilustra a representação de um transformador com tapes variáveis no seu secundário. A única alteração em relação à modelagem do item 3.2.1 é a relação de transformação, neste caso 1:t.

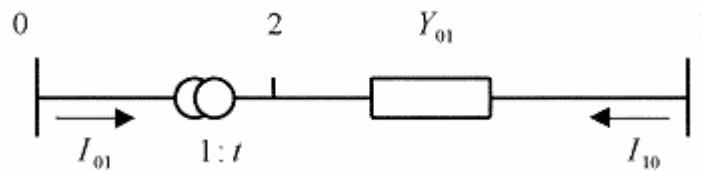


Figura 3.6 – Modelagem de LTCs com variação de tapes no secundário

A relação entre as magnitudes das tensões dos terminais 0 e 2 do transformador ideal é:

$$\frac{V_2}{V_0} = t \quad (3.16)$$

Sem dissipação de potência ativa e reativa entre os nós 0 e 2 e conforme (3.2) e (3.3):

$$-\frac{I_{01}}{I_{10}} = \frac{V_2}{V_0} = t \quad (3.17)$$

De (3.17) é fato que I_{01} e I_{10} estão defasadas de 180° e suas magnitudes estão na razão $t:1$.

Para este caso, os valores de I_{01} e I_{10} são os mesmos do caso do item 3.2.1, segundo (3.5) e (3.6).

Da Figura 3.6:

$$I_{01} = (V_2 - V_1)tY_{01} \quad (3.18)$$

$$I_{10} = (V_1 - V_2)Y_{01} \quad (3.19)$$

Aplicando (3.16) em (3.18):

$$I_{01} = (tV_0 - V_1)tY_{01} = Y_{01}t^2V_0 - Y_{01}tV_1 \quad (3.20)$$

Aplicando (3.16) em (3.19):

$$I_{10} = (V_1 - tV_0)tY_{01} = Y_{01}tV_1 - Y_{01}t^2V_0 \quad (3.21)$$

Aplicando (3.5) em (3.20):

$$(A+B)V_0 - AV_1 = \left(\frac{1}{t}V_0 - V_1 \right) \frac{1}{t}Y_{01} = Y_{01}t^2V_0 - Y_{01}tV_1 \quad (3.22)$$

Aplicando (3.6) em (3.21):

$$(A+C)V_1 - AV_0 = Y_{01}V_1 - Y_{01}tV_0 \quad (3.23)$$

De (3.22) e (3.23):

$$A = Y_{01}t \quad (3.24)$$

$$B = Y_{01}t^2 - Y_{01}t = t(t-1)Y_{01} \quad (3.25)$$

$$C = (1-t)Y_{01} \quad (3.26)$$

Através das equações (3.24), (3.25) e (3.26) pode ser feita análise similar a do item 3.2.1 do efeito de transformação 1:t sobre as magnitudes das tensões V_0 e V_1 . Considerando inicialmente $t=1$, as admitâncias B e C são nulas e o circuito π equivalente fica reduzido à admitância série Y_{01} . Se for alterada a relação de transformação para um valor $t < 1$, B terá sinal contrário a Y_{01} e será do tipo capacitivo, enquanto C será indutivo. Isto significa que V_1 tenderá a diminuir e V_0 a aumentar. Por outro lado, se $t > 1$, ocorrerá o oposto e V_1 tenderá a aumentar e V_0 a diminuir. Se uma das barras tiver tensão regulada ou estiver eletricamente próxima a uma barra deste tipo, somente a outra barra sofrerá os efeitos das alterações na relação de transformação.

A Figura 3.7 mostra o circuito π equivalente com os parâmetros expressos em função da admitância e da relação de transformação.

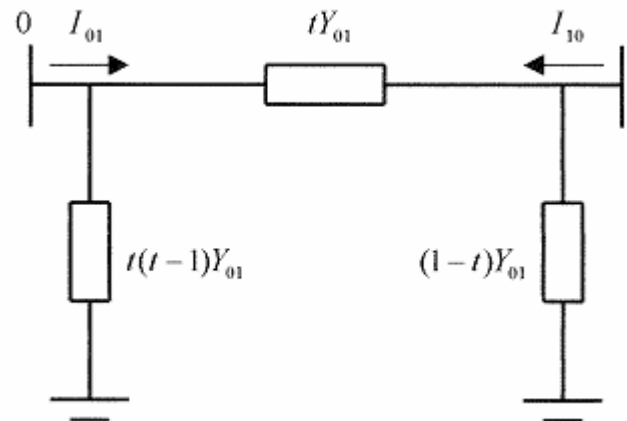


Figura 3.7 – Circuito π equivalente de um LTC com parâmetros expressos em função da admitância e relação de transformação

A Figura 3.8 mostra o circuito π equivalente com os parâmetros expressos em função da impedância e da relação de transformação.

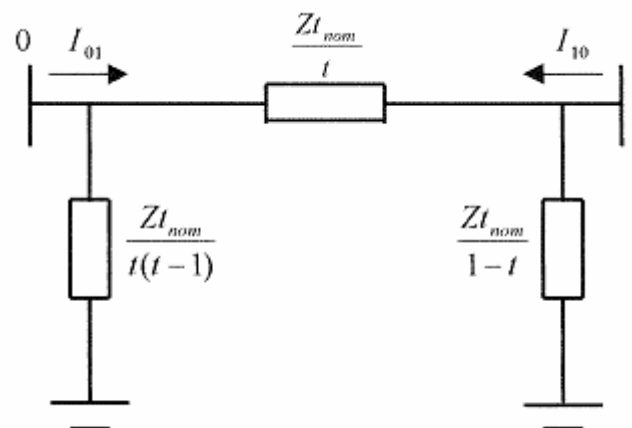


Figura 3.8 – Circuito π equivalente de um LTC com parâmetros expressos em função da impedância e relação de transformação

3.3

Modelagem de um LTC nos Programa de Fluxo de Carga [9]

Nas seções 3.2.1 e 3.2.2, foi verificada a relação entre o tape do LTC e a tensão controlada por ele. A tensão controlada pode ser de uma das barras onde o LTC está conectado (controle de tensão local) ou outra barra próxima (controle de tensão remoto). Como visto nestas seções, a ação de controle pode ter efeito oposto ao esperado e, então, o sistema pode ir ao colapso.

Nos programas atuais de fluxo de carga, o controle de tensão por LTC é feito fixando o valor desejado de tensão e calculando valor do tape necessário. Caso o valor do tape extrapole o valor inferior ou superior, ele é congelado no limite e a barra passa a ser considerada como uma barra de carga¹. Se houver convergência do algoritmo de Newton e se a lógica deste controle estiver embutida no sistema linearizado de equações, é possível verificar se o tape variou para o lado esperado ao variar o valor da tensão controlada. Entretanto, se a lógica do controle for externa, quando então está programada a relação usual entre a variação de tapes e a variação da tensão a ser controlada, só haverá meios de se alcançar o valor da tensão a ser controlada se o sistema estiver na região normal de operação. Por outro lado, se o sistema estiver na região anormal de operação, a relação entre a variação de tapes e a variação da tensão a ser controlada é oposta a usual, e não haverá meios de se alcançar o valor da tensão a ser controlada. Há duas possibilidades: ou o algoritmo não converge ou o tape atinge um limite e o algoritmo converge com outro valor da tensão controlada.

3.4 Representação dos Controles e Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão [7,9]

3.4.1 Índice Tape do LTC x Tensão da Barra Controlada Localmente

Este caso será estudado através do sistema de 3 barras mostrado na Figura 3.9, onde o tape do LTC entre as barras 0 e 1 controla a tensão na barra 1.

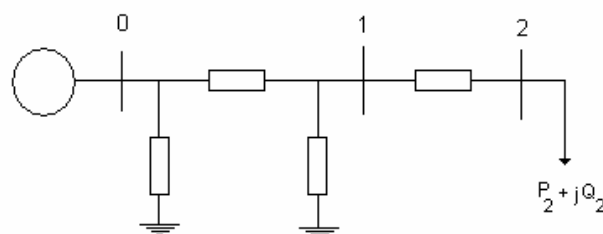


Figura 3.9 - Sistema de 3 Barras com LTC

¹ Barra onde são inserido os valores das potências ativa e reativa, carga ativa e reativa e os valores da tensão e ângulo são calculados pelo algoritmo de fluxo de potência

$$[D'] = \left[\left(\frac{\partial V_1}{\partial t_{01}} \right)' \right] \quad (3.32)$$

A matriz $[D']$ resultante desta redução é o índice que relaciona a tensão da barra 1 com o tape do LTC entre as barras 0 e 1, conforme (3.31).

No ponto de operação da Tabela 3.1 [7], é obtido:

$$[\Delta V_1] = [1,6490][\Delta t_{01}] \quad (3.33)$$

Tabela 3.1 - Ponto de operação com a barra controlada na região anormal de operação

t_{01}	1,0000
V_0	1,0000 pu
θ_0	0°
V_1	0,4885 pu
θ_1	$-34,973^\circ$
V_2	0,4636 pu
θ_2	$-37,602^\circ$
Z_{trafo}	$0,2 \angle 90^\circ$ pu
Z_{linha}	$0,01 \angle 70^\circ$ pu
P_2	-1,1400 pu
Q_2	-0,8083

Como o modelo de LTC usado no programa ANAREDE tem variação de tapes no lado primário e relação de transformação t:1 (quando o tape aumenta a tensão do secundário diminui) é trocado o sinal do índice, conforme mostrado em (3.34). Desta forma, sinal positivo indica ação de controle bem sucedida e sinal negativo, ação de controle mal sucedida.

$$\frac{\Delta V_1}{-\Delta t_{01}} = -[D'] \quad (3.34)$$

Logo,

$$\frac{\Delta V_1}{-\Delta t_{01}} = -1,6490 \quad (3.35)$$

Isto indica que a ação de controle tem efeito oposto ao esperado.

Repetindo o exercício numérico para o ponto de operação mostrado na Tabela 3.2 [7], é obtido (3.36) e (3.37), indicando que a ação de controle tem o efeito esperado:

$$[\Delta V_2] = [-4,1011] [\Delta t_{01}] \quad (3.36)$$

$$\frac{\Delta V_2}{-\Delta t_{01}} = [-D'] = 4,1011 \quad (3.37)$$

Tabela 3.2 - Ponto de operação com a barra controlada na região normal de operação

t_{01}	1,0000
V_0	1,0000 pu
θ_0	0^0
V_1	0,6618 pu
θ_1	$-25,028^0$
V_2	0,6433 pu
θ_2	$-26,423^0$
Z_{trafo}	$0,2 \angle 90^0$ pu
Z_{linha}	$0,01 \angle 70^0$ pu
P_2	-1,1400 pu
Q_2	-0,8083

3.4.2 Índice Tape do LTC x Tensão da Barra Controlada Remotamente

Para tal, será utilizado o mesmo sistema de três barras da Figura 3.9, com o tape do LTC entre as barras 0 e 1 controlando remotamente a tensão na barra 2. Este controle é representado no sistema linearizado com a substituição de (3.28) por (3.39), conforme mostrado em (3.38).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \frac{\partial P_1}{\partial V_2} & \frac{\partial P_1}{\partial t_{01}} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial V_1} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & 0 \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_1}{\partial t_{01}} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta t_{01} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

$$\Delta V_2 = V_2^{\text{esp}} - V_2^{\text{calc}} \quad (3.39)$$

Como no item 3.4.1, é desejado verificar somente as variações da tensão da barra controlada e as variações de t_{01} . Por isso, é feito inicialmente

$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta Q_1 = \Delta Q_2 = 0$. Utilizando (3.29), o sistema (3.38) é reduzido para dimensão (1x1), como mostrado em (3.40).

$$[\Delta V_2] = [D'] [\Delta t_{01}] \quad (3.40)$$

No ponto de operação da Tabela 3.1, são obtidas as equações (3.41) e (3.42), indicando que a ação de controle tem o efeito oposto ao esperado.

$$[\Delta V_2] = [1,7465] [\Delta t_{01}] \quad (3.41)$$

$$\frac{\Delta V_2}{-\Delta t_{01}} = [-D'] = -1,7465 \quad (3.42)$$

Repetindo o exercício numérico para o ponto de operação mostrado na Tabela 3.2 [7], são obtidas (3.43) e (3.44), indicando que a ação de controle tem o efeito esperado.

$$[\Delta V_2] = [-4,2251] [\Delta t_{01}] \quad (3.43)$$

$$\frac{\Delta V_2}{-\Delta t_{01}} = 4,2251 \quad (3.44)$$

3.5 Equações da Matriz Jacobiana

As equações (3.45), (3.46), (3.47) e (3.48) definem algumas das equações utilizadas para o Jacobiano do sistema de 3 barras, que podem ser adaptadas para outros circuitos.

$$P_1 = V_1((V_1(B_{11}\text{sen}(\theta_1 - \theta_1) + G_{11}\text{cos}(\theta_1 - \theta_1))) + (V_2(B_{12}\text{sen}(\theta_1 - \theta_2) + G_{12}\text{cos}(\theta_1 - \theta_2))) + \dots + (V_3(B_{13}\text{sen}(\theta_1 - \theta_3) + G_{13}\text{cos}(\theta_1 - \theta_3)))) \quad (3.45)$$

$$Q_1 = V_1((V_1(G_{11}\text{sen}(\theta_1 - \theta_1) + B_{11}\text{cos}(\theta_1 - \theta_1))) + (V_2(G_{12}\text{sen}(\theta_1 - \theta_2) + B_{12}\text{cos}(\theta_1 - \theta_2))) + \dots + (V_3(G_{13}\text{sen}(\theta_1 - \theta_3) + B_{13}\text{cos}(\theta_1 - \theta_3)))) \quad (3.46)$$

$$P_1 = \left(\frac{V_1^2}{t^2 Z_t} \right) \cos(\alpha t) - \left(\frac{V_1 V_0}{t Z_t} \right) \cos(\theta_1 - \theta_0 + \alpha t) \quad (3.47)$$

$$Q_1 = \left(\frac{V_1^2}{t^2 Z_t} \right) \text{sen}(\alpha t) - \left(\frac{V_1 V_0}{t Z_t} \right) \text{sen}(\theta_1 - \theta_0 + \alpha t) \quad (3.48)$$

3.6 Análise dos Resultados

Na seção 3.2 foi caracterizada, de forma teórica, a resposta normal do sistema para manobras de tapes de transformadores. Na região normal de operação, se o transformador tiver trocador de tapes no primário, quando o mesmo é movimentado produzindo uma relação de transformação maior do que a nominal, há um acréscimo da tensão primária e um decréscimo na secundária, caso nenhuma destas tensões seja controlada remotamente. No caso da diminuição da relação de transformação, ocorre o inverso. Como os programas de simulação utilizados neste trabalho só oferecem a opção de trocar tapes no primário, este foi o foco principal deste capítulo.

4

CER – Compensador Estático de Potência Reativa

4.1

Introdução

Compensadores estáticos de potência reativa (CERs) ou *Static var Compensators* (SVCs) são equipamentos de controle de tensão cuja frequência de uso tem aumentado no sistema elétrico nos últimos tempos. Seu uso é recente porque seu funcionamento é baseado na eletrônica de potência, cujo desenvolvimento foi iniciado com a descoberta do tiristor em 1957 e sua aplicação em sistemas de potência tornou-se possível a partir da metade da década de 80.

Sua função é gerar ou absorver potência reativa, para manter a tensão do sistema dentro dos parâmetros estudados, da mesma maneira que seu predecessor, o compensador síncrono, o faz. A principal vantagem do compensador estático sobre o este último é a ausência de partes rotativas, o que aumenta o rendimento e vida útil e minimiza a necessidade de manutenção.

Basicamente, o equipamento é composto de capacitores e/ou reatores variáveis que, compostos, resultam na impedância necessária para gerar a potência reativa de acordo com a tensão de referência a ser controlada.

Nos dias atuais, os compensadores estáticos têm sido as soluções com melhor relação custo/benefício quando é necessário um controle da tensão no ponto de instalação.

4.2

Reatância e Susceptância do CER[9]

O Compensador Estático de Potência Reativa, conforme já citado, consiste numa combinação de reatores ou capacitores fixos, capacitores chaveados a tiristores e reatores controlados a tiristores. A configuração mais utilizada, mostrada na Figura 4.1, é formada de um capacitor fixo (FC – *Fixed Capacitor*)

em paralelo com um reator controlado a tiristor (TCR – *Thyristor Controlled Reactor*), ambos mais conhecidos pelas siglas em inglês.

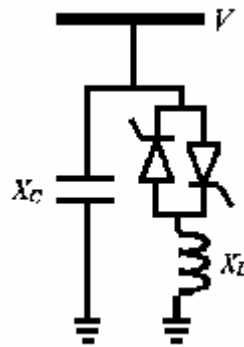


Figura 4.1 – Estrutura do CER

Do ponto de vista operacional, o CER é visto como uma reatância *shunt* variável (gerando ou absorvendo potência reativa), ajustada automaticamente em resposta à variação das condições de operação do sistema. Este ajuste é feito através do controle dos ângulos de disparo dos tiristores do TCR, de forma a manter a magnitude de tensão da barra controlada no valor especificado.

A reatância variável do TCR é dada por (4.1), onde X_L é a reatância do reator e α é o ângulo de disparo dos tiristores.

$$X_{V(TCR)} = X_L \frac{\pi}{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)} \quad (4.1)$$

A susceptância² variável do TCR é dada por (4.2). Quando $\alpha = \pi/2$, $B_{V(TCR)}$ assume seu valor máximo, sendo igual a $\frac{1}{X_L}$; quando $\alpha = \pi$, $B_{V(TCR)}$ assume seu valor mínimo, sendo igual a zero.

$$B_{V(TCR)} = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{\pi X_L} \quad (4.2)$$

A reatância total do CER é formada pela combinação em paralelo da reatância fixa do capacitor (X_C) com a reatância variável do TCR, conforme equação (4.3):

² Inverso da reatância

$$X_{CER} = j X_{V(TCR)} // -j X_C = \frac{X_C X_{V(TCR)}}{X_C - X_{V(TCR)}} = \frac{X_C X_L}{\frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)) - X_L} \quad (4.3)$$

Na Figura 4.2 é mostrada a reatância equivalente do CER em função do ângulo de disparo dos tiristores. O equipamento pode operar na região reativa ou capacitiva, de acordo com o valor de α . Pode ser observado também um valor de α onde ocorre ressonância de regime permanente, isto é, $X_{V(TCR)} = X_C$. Este valor é dependente da relação X_C/X_L .

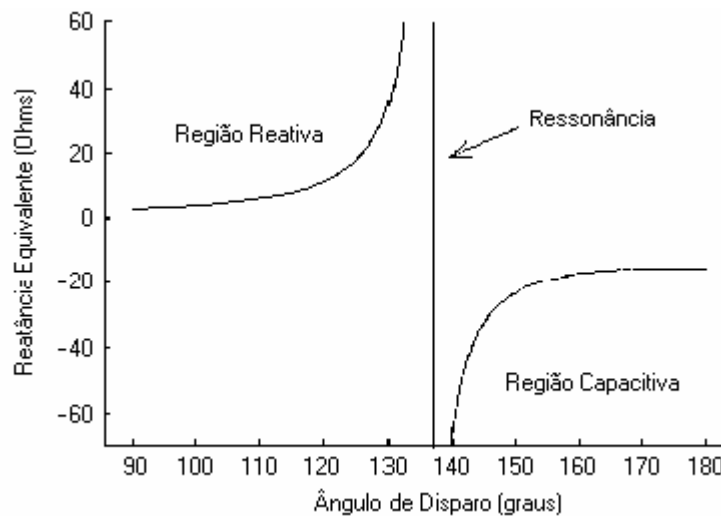


Figura 4.2 - Reatância equivalente do CER em função do ângulo de disparo dos tiristores ($X_C = 15 \Omega$ e $X_L = 2,56 \Omega$)

A susceptância total do CER é dada pela equação (4.4). Na Figura 4.3 é mostrada a susceptância equivalente do CER em função do ângulo de disparo dos tiristores, onde pode ser observado que a variação de B_{CER} ocorre sem descontinuidades, nas duas regiões de operação.

$$B_{CER} = -j B_{V(TCR)} // j B_C = \frac{X_{V(TCR)} - X_C}{X_C - X_{V(TCR)}} = \frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha))}{X_C X_L} \quad (4.4)$$

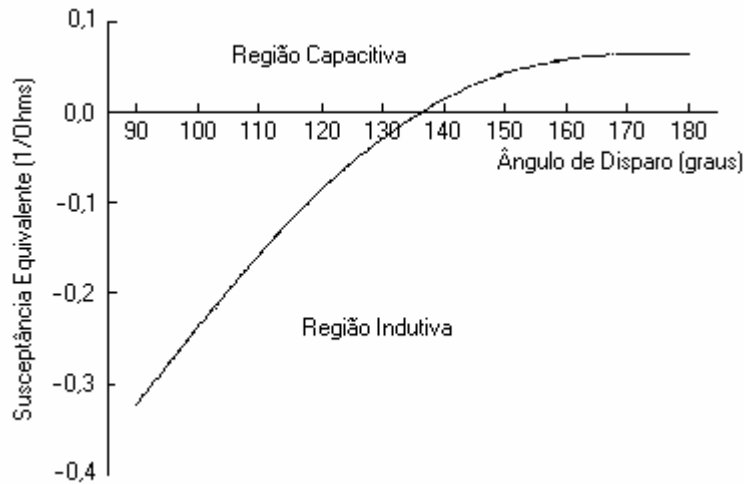


Figura 4.3 - Susceptância equivalente do CER em função do ângulo de disparo dos tiristores ($X_C = 15 \Omega$ e $X_L = 2,56 \Omega$)

Na solução do fluxo de potência, é mais prático utilizar as equações baseadas em B_{CER} do que as baseadas em X_{CER} . Enquanto $B_{V(TCR)}$ varia entre 0 e $1/X_L$, $X_{V(TCR)}$ varia entre X_L e ∞ .

4.3 Modelagem do CER nos Programas de Fluxo de Potência

A Figura 4.4 mostra a curva característica VI de regime permanente do CER (modelo de injeção de corrente) e a Figura 4.5 mostra a respectiva curva característica VQ (modelo de potência reativa injetada). V_{esp} é a tensão quando a potência reativa injetada pelo CER é nula.

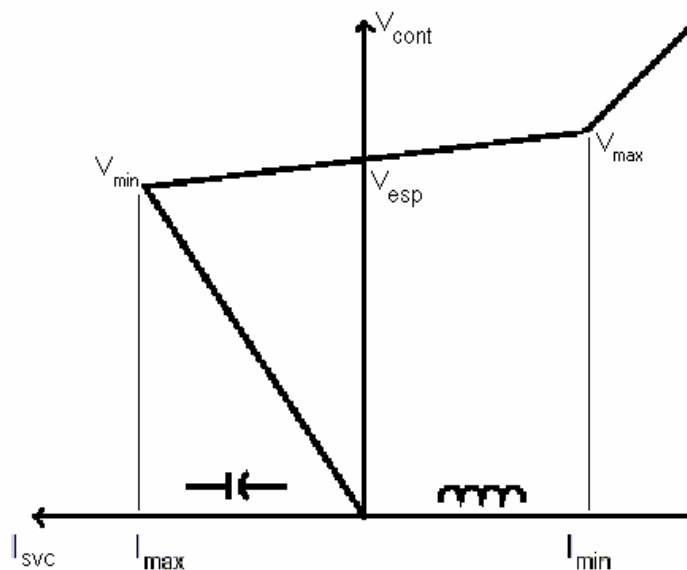


Figura 4.4 – Característica VI em Regime Permanente do CER [11]

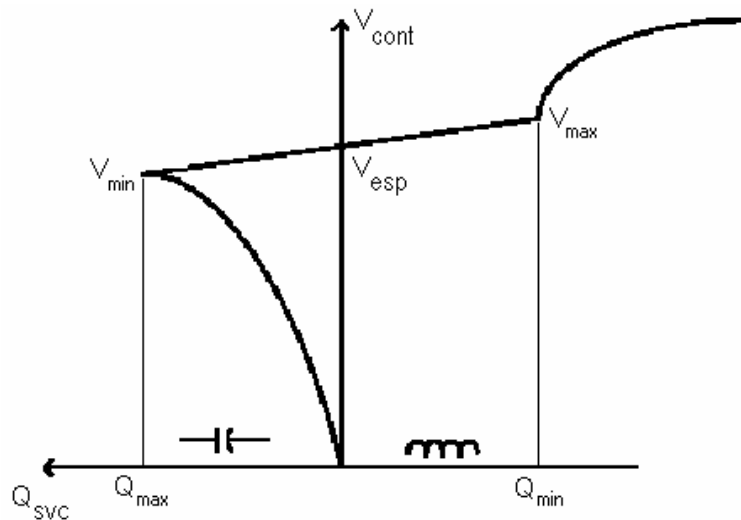


Figura 4.5 – Característica VQ em Regime Permanente do CER [11]

São definidas três regiões de operação para o CER:

- i. capacitiva, onde o equipamento se comporta puramente como um capacitor;
- ii. linear, onde a potência reativa ou corrente injetada é função da tensão na barra controlada e
- iii. indutiva, onde o equipamento se comporta puramente como um indutor.

Quando V_{cont} estiver entre V_{max} e V_{min} o CER opera na região controlável e seu comportamento é definido por uma reta. Esta faixa de controle linear é determinada pela susceptância máxima do indutor e pela susceptância total devido aos bancos de capacitores em serviço e à capacidade de filtragem [10].

Se a tensão onde o CER está conectado é inferior a V_{min} , os tiristores do TCR estão bloqueados e o CER opera na região capacitiva. Quando a tensão é maior que V_{max} , o ângulo de disparo dos tiristores é mínimo e o CER opera na região indutiva. Nestas duas últimas regiões, o equipamento se comporta como uma reatância fixa localizada na barra e perde a capacidade de controle e funciona simplesmente como capacitor ou um indutor.

A representação dos controles no problema do fluxo de potência pode ser feita através de equações adicionais que incorporam a relação entre a ação de cada controle e as respectivas variáveis controladas, formando uma matriz Jacobiana aumentada. Para a representação do Compensador Estático de Potência Reativa no programa ANAREDE[11], a potência reativa injetada na

barra do CER é considerada como variável dependente. Para tornar o sistema de equações possível e determinado, é adicionada a este uma equação de controle representando o comportamento do dispositivo. Esta equação é função do ponto de operação do equipamento e da modelagem de controle adotada. Na formulação não há qualquer tipo de inserção de barras, mantendo a topologia original do sistema.

Da faixa linear da Figura 4.4

$$V_{cont} = V_{esp} + X_{SL} I_{CER} \quad (4.5)$$

A inclinação da reta X_{SL} e V_{esp} são definidas matematicamente:

Então:

$$X_{SL} = \frac{V_{min} - V_{max}}{I_{max} - I_{min}} \quad (4.6)$$

$$V_{esp} = \frac{V_{max} I_{max} - V_{min} I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \quad (4.7)$$

Pode ser observado que a inclinação X_{SL} é negativa, pois I_{CER} cresce para a esquerda, sendo esta uma função decrescente (quando I_{CER} aumenta, V_{cont} diminui). No programa ANAREDE, este dado de entrada é positivo. O sinal negativo de X_{SL} é considerado internamente, ou seja, em (4.5) o sinal é negativo ao invés de positivo.

Nas faixas não controladas, o equipamento se comporta como uma reatância fixa conectada na barra. Para o modelo de injeção de corrente, as equações de controle (4.8), (4.9) e (4.10) são similares, sendo dados B_{min} , X_{SL} e B_{max} :

- i. Faixa Capacitiva ($V_{cont} < V_{min}$):

$$Q_{CER} - B_{max} V_t^2 = 0 \quad (4.8)$$

- ii. Faixa Linear ($V_{min} < V_{cont} < V_{max}$):

$$V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} I = 0 \quad (4.9)$$

- iii. Faixa Indutiva ($V_{cont} > V_{max}$):

$$Q_{CER} - B_{min} V_t^2 = 0 \quad (4.10)$$

onde,

- i. V_t é a tensão da barra conectada ao CER (no controle de tensão local, $V_t = V_{cont}$)
- ii. Q_{CER} é a potência reativa gerada/absorvida pelo CER

Da faixa linear da Figura 4.5:

$$V_{cont} = V_{esp} + X_{SL} Q_{CER} \quad (4.11)$$

A inclinação da reta X_{SL} e V_{esp} são definidas matematicamente:

$$X_{SL} = \frac{V_{min} - V_{max}}{Q_{max} - Q_{min}} \quad (4.12)$$

$$V_{esp} = \frac{V_{max} Q_{max} - V_{min} Q_{min}}{Q_{max} - Q_{min}} \quad (4.13)$$

Para o modelo de injeção de potência reativa são válidas as seguintes equações de controle:

- i. Faixa Capacitiva ($V_{cont} < V_{min}$):

$$Q_{CER} - B_{max} V_t^2 = 0 \quad (4.14)$$

- ii. Faixa Linear ($V_{min} < V_{cont} < V_{max}$):

$$V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} Q_{CER} = 0 \quad (4.15)$$

- iii. Faixa Indutiva ($V_{cont} > V_{max}$):

$$Q_{CER} - B_{min} V_t^2 = 0 \quad (4.16)$$

No caso do controle de tensão remoto, devem ser consideradas nas equações das faixas capacitivas e indutivas, a tensão da barra conectada ao CER ao invés da tensão da barra controlada. Pode ser observado também que as equações de controle nas faixas de operação capacitiva e indutiva são iguais para ambos os tipos de modelo.

4.4 Equações de Controle para o Cálculo dos Índices

No cálculo dos índices de adequação de controle de tensão, deve ser relacionada a grandeza física efetivamente usada para controlar a tensão e a tensão a ser controlada. No caso dos CERs há duas alternativas:

- i. índice susceptância x tensão terminal (ou remota)
- ii. índice ângulo de disparo dos tiristores x tensão terminal (ou remota)

Os dois índices devem ser equivalentes em termos qualitativos, pois de acordo com (4.3) e os respectivos resultados mostrados na Figura 4.3, o ângulo de disparo dos tiristores e a susceptância do CER variam sempre no mesmo sentido.

As equações de controle mostradas em (4.9) e (4.15) não são adequadas para o cálculo do índice susceptância x tensão terminal (ou remota) na faixa de controle linear, pois relacionam, respectivamente, a corrente injetada e a potência reativa gerada pelo CER com a tensão controlada. Neste caso, é usada (4.17) para o modelo de injeção de corrente e (4.18) para o modelo de injeção de potência reativa.

$$V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_t = 0 \quad (4.17)$$

$$V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_t^2 = 0 \quad (4.18)$$

Onde:

- i. X_{SL} de (4.17) é dado por (4.6),
- ii. X_{SL} de (4.18) é dado por (4.12).

Para o cálculo do índice ângulo de disparo dos tiristores x tensão terminal (ou remota) são usadas as equações (4.19) e (4.20). A equação (4.19), obtida de (4.3) e (4.17), é usada para a faixa de controle linear do modelo de injeção de

corrente e a equação (4.20), obtida de (4.4) e (4.18), é usada para a faixa de controle linear do modelo de injeção de potência reativa.

$$V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha))}{X_C X_L} \right) V_t = 0 \quad (4.19)$$

$$V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha))}{X_C X_L} \right) V_t^2 = 0 \quad (4.20)$$

Onde:

- i. X_{SL} de (4.19) é dado por (4.6),
- ii. X_{SL} de (4.20) é dado por (4.12).

Nas faixas não lineares, a capacidade de controle é perdida e o equipamento se comporta como uma reatância fixa localizada na barra, sendo usadas as equações (4.14) e (4.16).

4.5

Estrutura da Matriz Jacobiana e Cálculo dos Índices

4.5.1

Índice Susceptância x Tensão Terminal (ou Remota)

A matriz Jacobiana resumida utilizada para cálculo deste índice, que considera a susceptância do CER como variável dependente, é mostrada em (4.21):

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta V_{CER} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} & 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial B_{CER}} \\ 0 & \frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V} & \frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial B_{CER}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta B_{CER} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Para o modelo de injeção de corrente é usada a equação de controle (4.22), enquanto que para o modelo de injeção de potência é usada a equação

de controle (4.23). As derivadas de (4.21) para composição dos dois modelos são mostradas na equações (4.24) a (4.37).

$$\Delta V_{CER} = V_{esp} + X_{SL} (B_{CER} V_t) - V_{cont} \quad (4.22)$$

$$\Delta V_{CER} = V_{esp} + X_{SL} (B_{CER} V_t^2) - V_{cont} \quad (4.23)$$

onde,

- i. $B_{CER} V_t$ é a corrente do CER
- ii. $B_{CER} V_t^2$ é a potência reativa gerada pelo CER

4.5.1.1

Modelo de injeção de corrente - Controle de Tensão Local ($V_{cont}=V_t$)

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial B_{CER}} = \frac{\partial (V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_t)}{\partial B_{CER}} = -X_{SL} V_t \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_{cont}} = \frac{\partial (V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_t)}{\partial V_{cont}} = 1 - X_{SL} B_{CER} \quad (4.25)$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial B_{CER}} = -V_t^2 \quad (4.26)$$

4.5.1.2

Modelo de injeção de corrente - Controle de Tensão Remoto ($V_{cont} \neq V_t$)

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial B_{CER}} = \frac{\partial (V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{SVC} V_t)}{\partial B_{CER}} = -X_{SL} V_t \quad (4.27)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_{cont}} = \frac{\partial (V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_t)}{\partial V_{cont}} = 1 \quad (4.28)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_t} = \frac{\partial (V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_t)}{\partial V_t} = -X_{SL} B_{CER} \quad (4.29)$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial B_{CER}} = -V_t^2 \quad (4.30)$$

4.5.1.3 Modelo de injeção de potência - Controle de Tensão Local ($V_{cont}=V_t$)

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial B_{CER}} = \frac{\partial (V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_t^2)}{\partial B_{CER}} = -X_{SL} V_t^2 \quad (4.31)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_{cont}} = \frac{\partial (V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_t^2)}{\partial V_{cont}} = 1 - 2X_{SL} B_{CER} V_t \quad (4.32)$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial B_{CER}} = -V_t^2 \quad (4.33)$$

4.5.1.4 Modelo de injeção de potência - Controle de Tensão Remoto ($V_{cont} \neq V_t$)

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial B_{CER}} = \frac{\partial (V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_t^2)}{\partial B_{CER}} = -X_{SL} V_t^2 \quad (4.34)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_{cont}} \frac{\partial (V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_t^2)}{\partial V_{cont}} = 1 \quad (4.35)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_t} = \frac{\partial (V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_t^2)}{\partial V_t} = -2X_{SL} B_{CER} V_t \quad (4.36)$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial B_{CER}} = -V_t^2 \quad (4.37)$$

Considerando $\Delta P = \Delta Q = 0$ e utilizando (4.38), o sistema (4.21) é reduzido para dimensão (1x1). A matriz $[D']$ resultante desta redução relaciona a tensão controlada com a susceptância do CER, conforme (4.39) e (4.40).

$$[D'] = [D] - [C][A]^{-1}[B] \quad (4.38)$$

$$\Delta V_{CER} = [D'] \Delta B_{CER} \quad (4.39)$$

$$\frac{\Delta V_{CER}}{\Delta B_{CER}} = [D'] \quad (4.40)$$

Um aumento/diminuição da admitância *shunt* do CER deve corresponder a um aumento/diminuição da tensão controlada. O índice calculado adequadamente deve ser positivo quando a ação de controle tem efeito esperado, e negativo quando a ação de controle tem efeito oposto ao esperado [7].

4.5.2 Índice Ângulo de Disparo dos Tiristores x Tensão Terminal (ou Remota)

A matriz Jacobiana resumida utilizada no cálculo deste índice, considerando o ângulo de disparo dos tiristores do TCR como variável dependente, é mostrada em (4.41):

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta V_{CER} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} & 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial \alpha} \\ 0 & \frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V} & \frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial \alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

Para o modelo de injeção de corrente, é utilizada a equação de controle (4.42) e para o modelo de injeção de potência reativa é utilizada a equação de controle (4.43). As derivadas de (4.41) são mostradas nas equações de (4.44) a (4.57).

$$\Delta V_{CER} = V_{esp} + X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha))}{X_C X_L} \right) V_t - V_{cont} \quad (4.42)$$

$$\Delta V_{CER} = V_{esp} + X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha))}{X_C X_L} \right) V_t^2 - V_{cont} \quad (4.43)$$

4.5.2.1

Modelo de injeção de corrente - Controle de Tensão Local ($V_{cont}=V_t$)

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial \alpha} = \frac{\partial \left(V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} (\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{X_C X_L} \right) V_t \right)}{\partial \alpha} = -X_{SL} \frac{\left(\frac{X_C}{\pi} + 2 \cos(2\alpha) \right)}{X_C X_L} V_t \quad (4.44)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_{cont}} = \frac{\partial \left(V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} (\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{X_C X_L} \right) V_t \right)}{\partial V_{cont}} = 1 - X_{SL} \frac{\left(X_L - \frac{X_C}{\pi} (\pi - \alpha) + \sin(2\alpha) \right)}{X_C X_L} \quad (4.45)$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial \alpha} = \frac{V_t^2}{\pi} \frac{(-2 + 2 \cos(2\alpha))}{X_L} \quad (4.46)$$

4.5.2.2

Modelo de injeção de corrente - Controle de Tensão Remoto ($V_{cont} \neq V_t$)

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial \alpha} = \frac{\partial \left(V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} (\pi - \alpha) + \sin(2 * \alpha)}{X_C X_L} \right) V_t \right)}{\partial \alpha} = -X_{SL} \frac{\left(\frac{X_C}{\pi} + 2 \cos(2\alpha) \right)}{X_C X_L} V_t \quad (4.47)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_{cont}} = \frac{\partial \left(V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} (\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{X_C X_L} \right) V_t \right)}{\partial V_{cont}} = 1 \quad (4.48)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_t} = \frac{\partial \left(V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} (\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{X_C X_L} \right) V_t \right)}{\partial V_t} = -X_{SL} \frac{\left(X_L - \frac{X_C}{\pi} (\pi - \alpha) + \sin(2\alpha) \right)}{X_C X_L} \quad (4.49)$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial \alpha} = \frac{V_t^2}{\pi} \frac{(-2 + 2 \cos(2\alpha))}{X_L} \quad (4.50)$$

4.5.2.3

Modelo de injeção de potência - Controle de Tensão Local ($V_{cont}=V_t$)

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial \alpha} = \frac{\partial \left(V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} (\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{X_C X_L} \right) V_t^2 \right)}{\partial \alpha} = -X_{SL} \frac{\left(\frac{X_C}{\pi} + 2 \cos(2\alpha) \right)}{X_C X_L} V_t^2 \quad (4.51)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_{cont}} = \frac{\partial \left(V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} (\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{X_C X_L} \right) V_t^2 \right)}{\partial V_{cont}} = 1 - 2X_{SL} \frac{\left(X_L - \frac{X_C}{\pi} (\pi - \alpha) + \sin(2\alpha) \right)}{X_C X_L} V_t \quad (4.52)$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial \alpha} = \frac{V_t^2}{\pi} \frac{(-2 + 2 \cos(2\alpha))}{X_L} \quad (4.53)$$

4.5.2.4

Modelo de injeção de potência - Controle de Tensão Remoto ($V_{cont} \neq V_t$)

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial \alpha} = \frac{\partial \left(V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} (\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{X_C X_L} \right) V_t^2 \right)}{\partial \alpha} = -X_{SL} \frac{\left(\frac{X_C}{\pi} + 2 \cos(2\alpha) \right)}{X_C X_L} V_t^2 \quad (4.54)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_{cont}} = \frac{\partial \left(V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} (\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{X_C X_L} \right) V_t^2 \right)}{\partial V_{cont}} = 1 \quad (4.55)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_t} = \frac{\partial \left(V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} (\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{X_C X_L} \right) V_t^2 \right)}{\partial V_t} = -2X_{SL} \frac{\left(X_L - \frac{X_C}{\pi} (\pi - \alpha) + \sin(2\alpha) \right)}{X_C X_L} V_t \quad (4.56)$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial \alpha} = \frac{V_t^2 (-2 + 2 \cos(2\alpha))}{\pi X_L} \quad (4.57)$$

Considerando $\Delta P = \Delta Q = 0$ e utilizando (4.38), o sistema (4.41) é reduzido para dimensão (1x1). A matriz $[D]'$ resultante desta redução relaciona a tensão controlada com o ângulo de disparo dos tiristores do TCR:

$$\Delta V_{CER} = [D'] \Delta \alpha \quad (4.58)$$

$$\frac{\Delta V_{CER}}{\Delta \alpha} = [D'] \quad (4.59)$$

O aumento/diminuição do ângulo de disparo dos tiristores do CER deve resultar no aumento/diminuição do módulo da tensão controlada, conforme pode ser visto na Figura 4.6. Na figura, quando V_{ref} está no ponto 0, o CER opera no ponto a. Deslocando V_{ref} para o ponto 1, o CER passa a operar no ponto b.

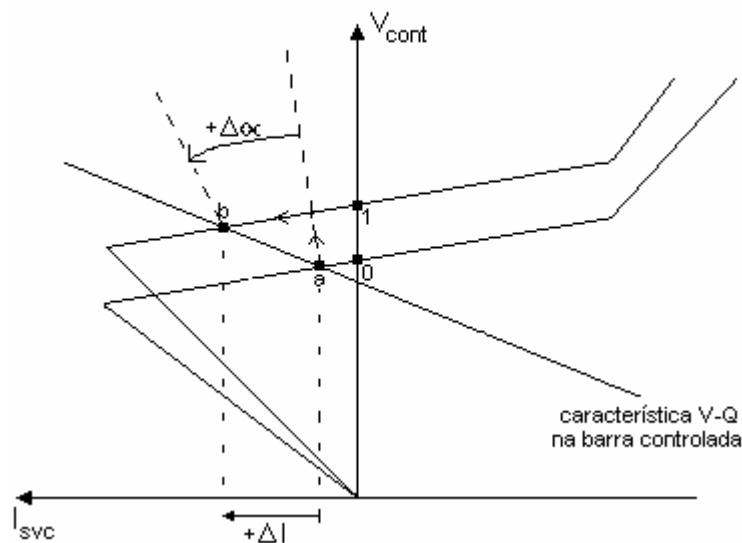


Figura 4.6 – Efeito esperado da variação de α sobre V_{cont}

Pode ser observado na Figura 4.7 um comportamento oposto ao esperado: houve aumento de V_{ref} do ponto 0 para 1 e a operação do CER passou do ponto a para o b. Há aumento de V_{cont} e a diminuição de α .

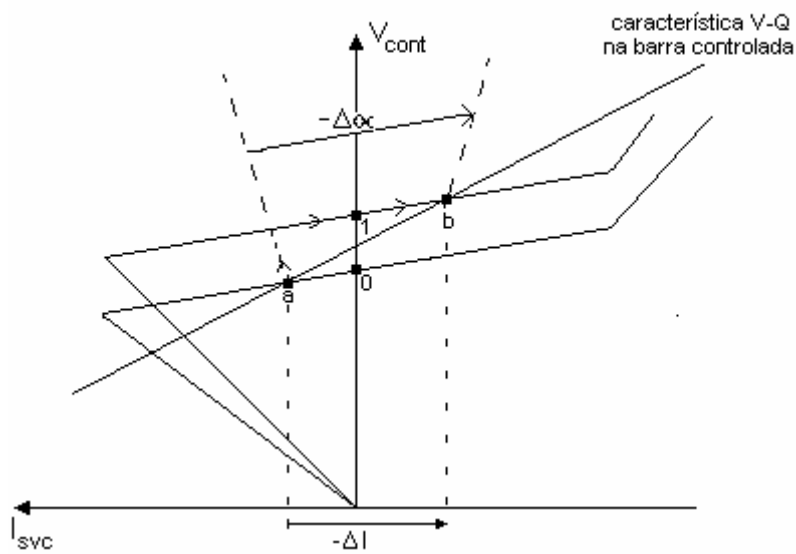


Figura 4.7 – Efeito oposto ao esperado da variação de α sobre V_{cont}

4.6 Exemplo Numérico [9]

Para exemplo, será considerado o sistema de 5 barras da Figura 4.8, onde o CER, composto por um banco de capacitores fixos em paralelo com reatores controlados a tiristores, controla a tensão da barra 5. Os dados de linha deste sistema são mostrados na Tabela 4.12. Os tapes dos LTCs são fixos.

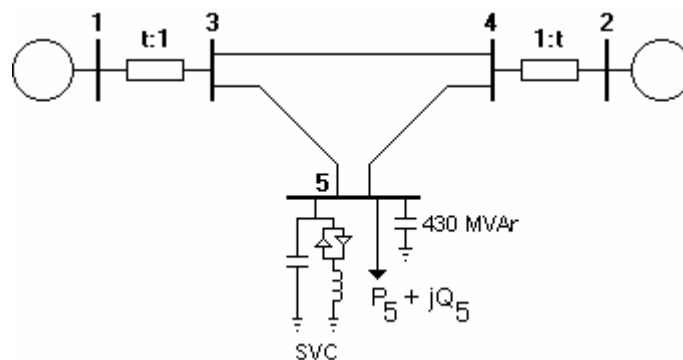


Figura 4.8 – Sistema de 5 Barras com CER

Tabela 4.1 – Dados de Linha do Sistema de 5 Barras

De	Para	Resistência(%)	Reatância(%)	Susceptância(%)
1	3	0,00	2,00	0,00
2	4	0,00	2,00	0,00
3	4	0,00	4,00	0,00
3	5	0,00	4,00	0,00
4	5	0,00	4,00	0,00

Dados do CER:

- i. $X_{SL} = -2,00\%^3$,
- ii. $Q_{\min} = -50$ Mvar (para $V = 1$ p.u.),
- iii. $Q_{\max} = 50$ Mvar (para $V = 1$ p.u.).

Para uma potência base de 100 MVA:

- i. $B_{\min} = -0,5$ p.u.,
- ii. $B_{\max} = 0,5$ p.u.

Quando a potência gerada pelo CER é máxima, os tiristores estão bloqueados ($\alpha = 180^\circ$), não permitindo a passagem de corrente pelo TCR. Pode ser calculada a reatância do capacitor pela equação (4.60):

$$X_c = \frac{1}{B_{\max}} = 2,0 \text{ p.u.} \quad (4.60)$$

Quando a potência absorvida pelo CER é máxima (Q_{\min}), os tiristores estão permitindo a condução máxima de corrente indutiva ($\alpha = 90^\circ$), sendo neste ponto a susceptância do CER igual a susceptância do reator em paralelo com a susceptância do capacitor. Logo, a susceptância do reator pode ser calculada por (4.61), e sua reatância por (4.62):

$$B_L = B_{CER(Q_{\min})} - B_C = -1,0 \text{ p.u.} \quad (4.61)$$

$$X_L = -\frac{1}{B_L} = 1,0 \text{ pu} \quad (4.62)$$

³ No programa ANAREDE o sinal negativo deste parâmetro é considerado internamente. Deve ser usado o valor 2,00%.

Os gráficos da Figura 4.9 e da Figura 4.10 foram traçados a partir de (4.4). A Figura 4.9 mostra as susceptâncias do capacitor fixo e do TCR em função do ângulo de disparo dos tiristores, enquanto que a Figura 4.10 mostra a susceptância total do CER, formada pela combinação de ambas susceptâncias.

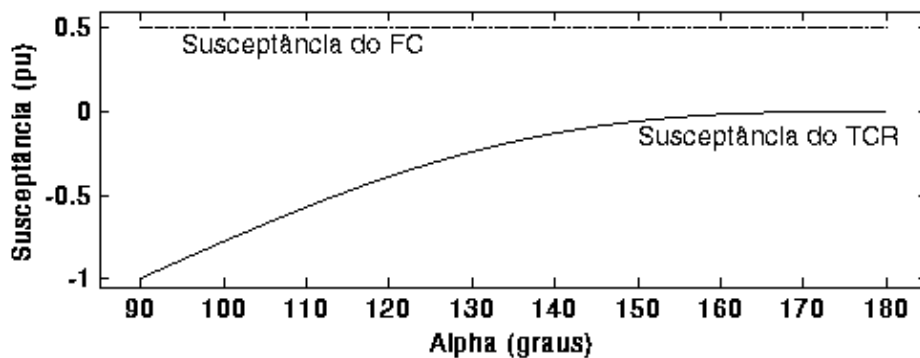


Figura 4.9 – Susceptâncias do FC, TCR em função do ângulo de disparo dos tiristores

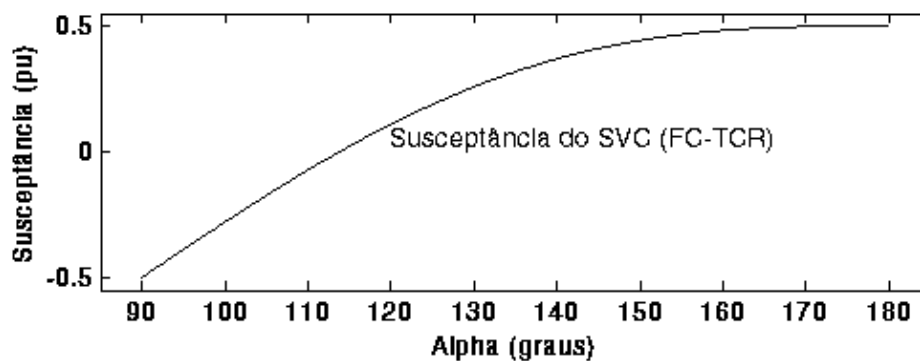


Figura 4.10 – Susceptância do CER em função do ângulo de disparo dos tiristores

4.6.1

Cálculo do Índice Susceptância x Tensão Terminal

O sistema linearizado das equações de fluxo de carga do sistema-teste para o cálculo deste índice, considerando a estrutura atual da matriz Jacobiana, é mostrado em (4.63). A equação de controle de V_5 , para a faixa de controle linear, é mostrada em (4.64). Para o teste, foi considerado o modelo de injeção de potência reativa.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta Q_5 \\ \Delta V_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_2}{\partial V_3} & \frac{\partial P_2}{\partial V_4} & \frac{\partial P_2}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial P_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_3}{\partial V_3} & \frac{\partial P_3}{\partial V_4} & \frac{\partial P_3}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial P_4}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_4}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_4}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_4}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_4}{\partial V_3} & \frac{\partial P_4}{\partial V_4} & \frac{\partial P_4}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial P_5}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_5}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_5}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_5}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_5}{\partial V_3} & \frac{\partial P_5}{\partial V_4} & \frac{\partial P_5}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_4} & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_5} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_4} & \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_5} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_4} & \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_5} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_5} & \frac{\partial Q_5}{\partial B_{CER}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial \Delta V_5}{\partial V_5} & \frac{\partial \Delta V_5}{\partial B_{CER}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \Delta V_5 \\ \Delta B_{CER} \end{bmatrix} \quad (4.63)$$

$$\Delta V_5 = V_{esp} + X_{SL} B_{CER} V_5^2 - V_5 \quad (4.64)$$

Derivando os termos que envolvem ΔV_5 e ΔB_{CER} :

$$\frac{\partial (V_5 - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_5^2)}{\partial B_{CER}} = -X_{SL} V_5^2 \quad (4.65)$$

$$\frac{\partial (V_5 - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_5^2)}{\partial V_5} = 1 - 2(X_{SL} B_{CER} V_5) \quad (4.66)$$

$$\frac{\partial Q_5}{\partial B_{CER}} = -V_5^2 \quad (4.67)$$

4.6.2

Cálculo do Índice Ângulo de Disparo dos Tiristores x Tensão Terminal

O sistema linearizado das equações de fluxo de carga do sistema-teste para o cálculo deste índice, considerando a estrutura atual da matriz Jacobiana, é mostrado em (4.68). A equação de controle de V_5 , para a faixa de controle linear, é mostrada em (4.69). É considerado o modelo de injeção de potência reativa.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta Q_5 \\ \Delta V_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_2}{\partial V_3} & \frac{\partial P_2}{\partial V_4} & \frac{\partial P_2}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial P_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_3}{\partial V_3} & \frac{\partial P_3}{\partial V_4} & \frac{\partial P_3}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial P_4}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_4}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_4}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_4}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_4}{\partial V_3} & \frac{\partial P_4}{\partial V_4} & \frac{\partial P_4}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial P_5}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_5}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_5}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_5}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_5}{\partial V_3} & \frac{\partial P_5}{\partial V_4} & \frac{\partial P_5}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_4} & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_5} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_4} & \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_5} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_4} & \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_5} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_5} & \frac{\partial Q_5}{\partial \alpha} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial \Delta V_5}{V_5} & \frac{\partial \Delta V_5}{\partial \alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \Delta V_5 \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} \quad (4.68)$$

$$\Delta V_5 = V_{esp} + X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha))}{X_C X_L} \right) V_5^2 - V_5 \quad (4.69)$$

Assim como em 4.6.1, são calculadas as derivadas:

$$\frac{\partial \Delta V_5}{\partial \alpha} = \frac{\partial \left[V_5 - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha))}{X_C X_L} \right) V_5^2 \right]}{\partial \alpha} = \frac{X_{SL} V_5^2 (-2 + 2 \cos(2\alpha))}{\pi X_L} \quad (4.70)$$

$$\frac{\partial \Delta V_5}{\partial V_5} = \frac{\partial \left[V_5 - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha))}{X_C X_L} \right) V_5^2 \right]}{\partial V_5} = 1 - 2X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha))}{X_C X_L} \right) V_5 \quad (4.71)$$

$$\frac{\partial Q_5}{\partial \alpha} = \frac{V_5^2}{\pi} \frac{(-2 + 2 \cos(2\alpha))}{X_L} \quad (4.72)$$

4.6.3 Resultados de 4.6.1 e 4.6.2

Considerando $\Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = \Delta Q_3 = \Delta Q_4 = \Delta Q_5 = 0$ e utilizando (4.38), os sistemas (4.63) e (4.68) são reduzidos para dimensão (1x1), obtendo os índices de adequação relativos ao CER. Tomando o ponto de operação inicial da Tabela 4.2 e ajustando para o ponto da Tabela 4.3, onde é aumentado V_{esp} para 1,028 pu, seguem os resultados.

Tabela 4.2 – Ponto de operação inicial na região normal de operação

$V_1 \angle \theta_1$	1,050 \angle 0,0
$V_2 \angle \theta_2$	1,010 \angle 7,6
$V_3 \angle \theta_3$	1,000 \angle - 2,3
$V_4 \angle \theta_4$	1,000 \angle 0,8
$V_5 \angle \theta_5$	1,017 \angle - 9,8
Q_{CER}	6,6 Mvar
V_{esp}	1,018
B_{CER}	0,0638 pu
α	117,36° = 2,0483 rad
t_{13}	1,053
t_{24}	1,002

Tabela 4.3 – Efeito do aumento de V_{esp} no ponto de operação da Tabela 4.2

$V_1 \angle \theta_1$	1,050 \angle 0,0
$V_2 \angle \theta_2$	1,010 \angle 7,6
$V_3 \angle \theta_3$	1,002 \angle - 2,3
$V_4 \angle \theta_4$	1,002 \angle 0,7
$V_5 \angle \theta_5$	1,023 \angle - 9,8
Q_{CER}	23,2 Mvar
V_{esp}	1,028
B_{CER}	0,221685 pu
α	127,33° = 2,2223 rad
t_{13}	1,053
t_{24}	1,002

No ponto de operação da Tabela 4.3 pode ser observado o aumento da tensão controlada V_5 , da susceptância do CER e do ângulo de disparo dos tiristores.

Este resultado é coerente com os índices positivos mostrados em (4.73) e (4.74), que indicam que a ação de controle tem o efeito esperado.

$$\frac{\Delta V_5}{\Delta B_{\text{CER}}} = 0,0630 \quad (4.73)$$

$$\frac{\Delta V_5}{\Delta \alpha} = 0,0633 \quad (4.74)$$

Para o ponto de operação da Tabela 4.4, aumentando V_{esp} para 0,573 pu, é obtido o ponto de operação da Tabela 4.5.

Tabela 4.4 – Ponto de operação inicial na região anormal de operação

$V_1 \angle \theta_1$	1,050 \angle 0,0
$V_2 \angle \theta_2$	1,010 \angle - 7,5
$V_3 \angle \theta_3$	0,983 \angle - 9,7
$V_4 \angle \theta_4$	0,917 \angle - 14,2
$V_5 \angle \theta_5$	0,570 \angle - 50,5
Q_{CER}	5,3 Mvar
V_{esp}	0,571
b_{CER}	0,1631 pu
α	123,36° = 2,1531 rad
t_{13}	0,800
t_{24}	0,900

Tabela 4.5 – Efeito do Aumento de V_{esp} no ponto de Operação da Tabela 4.4

$V_1 \angle \theta_1$	1,050 \angle 0,0
$V_2 \angle \theta_2$	1,010 \angle - 7,4
$V_3 \angle \theta_3$	0,985 \angle - 9,7
$V_4 \angle \theta_4$	0,919 \angle - 14,1
$V_5 \angle \theta_5$	0,574 \angle - 50,1
Q_{CER}	-5,6 Mvar
V_{esp}	0,573
b_{CER}	-0,1700 pu
α	105,20° = 1,8361 rad
t_{13}	0,800
t_{24}	0,900

Pode ser observado o aumento da tensão controlada V_5 e a diminuição da susceptância do CER e do ângulo de disparo dos tiristores, efeito contrário ao esperado.

Este resultado é coerente com os índices negativos mostrados em (4.75) e (4.76), indicando que a ação de controle tem efeito oposto ao esperado.

$$\frac{\Delta V_5}{\Delta B_{CER}} = -0,0057 \quad (4.75)$$

$$\frac{\Delta V_5}{\Delta \alpha} = -0,0051 \quad (4.76)$$

4.7 Análise dos Resultados

Similar ao capítulo 3, foi demonstrada a atuação de um CER num sistema elétrico. Para um ponto na região normal de operação, que produz o efeito esperado, o aumento da susceptância ou do ângulo de disparo do CER causa um aumento da tensão da barra que o CER está conectado (ou barra controlada remotamente). Logicamente, a causa inversa (diminuição da susceptância ou do ângulo de disparo do CER) causa uma diminuição na barra controlada pelo CER. Para a região anormal de operação, os efeitos são inversos.

Foi demonstrado ainda o cálculo do índice que classifica a região de operação em que o CER se encontra.

5

Análise do Efeito do Controle de Tensão com LTCs

5.1

Introdução

Neste capítulo será avaliado o efeito de ações de controle de tensão através de transformadores de tapes variáveis em regime permanente e dinâmico. O interesse é puramente qualitativo: deseja-se determinar se a ação de controle produz o efeito esperado ou contrário.

Para a definição das características dos dispositivos de controle de tensão e das cargas, foram efetuadas simulações preliminares com o sistema-teste de 3 barras cujo diagrama unifilar é mostrado na Figura 5.1.

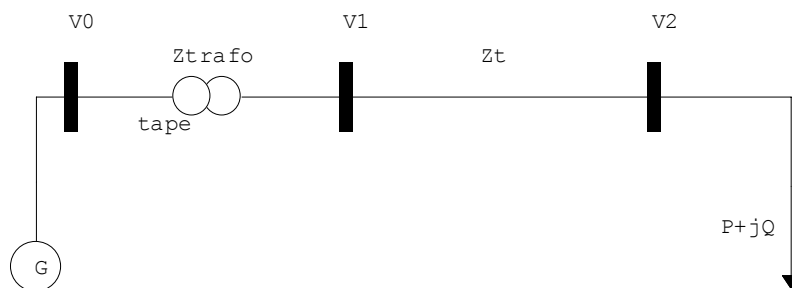


Figura 5.1 – Diagrama unifilar do sistema-teste de 3 barras

5.2

Modelagem do LTC

O modelo de transformador do programa ANAREDE⁴ prevê tapes em um dos lados do equipamento, sempre o lado “DE”⁵, que é o lado do terminal origem

⁴ O programa ANAREDE é de propriedade do CEPTEL, 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.

do transformador quando preenchidos os dados de equipamento. Caso seja necessário um transformador com tapes no outro lado, basta inverter o preenchimento dos dados do transformador, trocando a barra “DE” pela barra “PARA” e vice-versa.

No programa ANATEM[12]⁶, foi utilizado o único modelo pré-definido, cujo diagrama de blocos está mostrado na Figura 5.2.

⁵ No preenchimento dos dados de linhas do programa ANAREDE (DLIN), que também modela transformadores, a barra “DE” é a barra de origem do circuito e a barra “PARA”, a de destino.

⁶ 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.

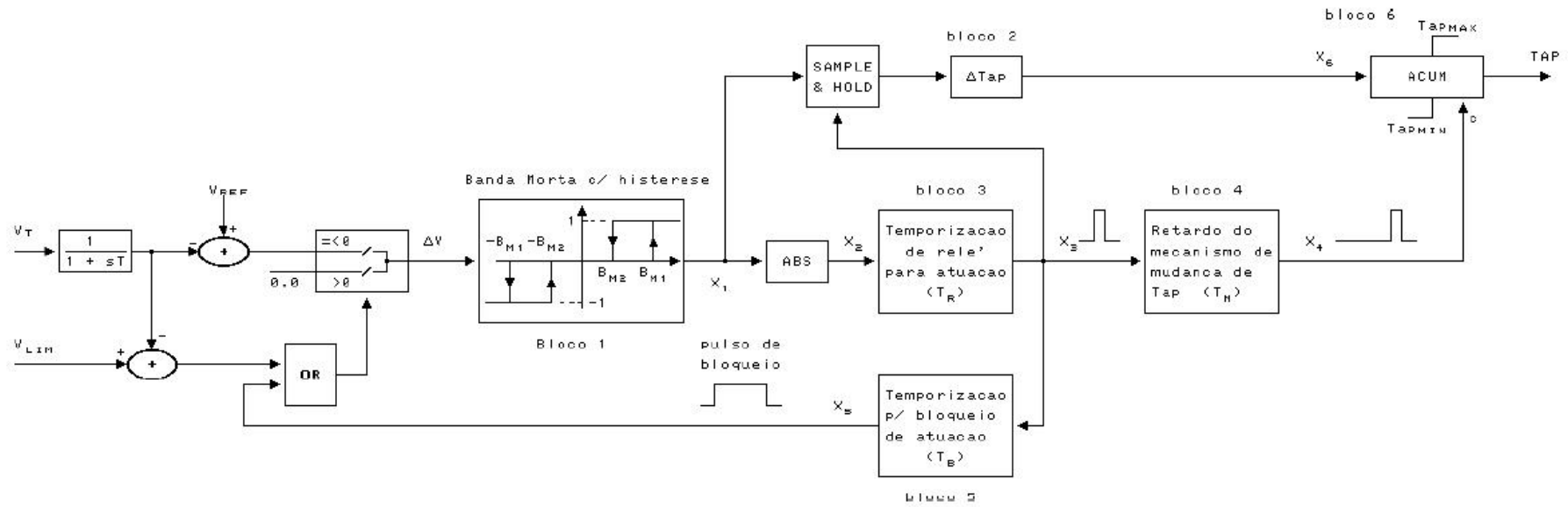


Figura 5.2 – Diagrama de blocos do modelo de LTC automático MD01 do ANATEM

Este modelo tem as seguintes características:

- i. Banda morta com histerese;
- ii. Congelamento do controle de tape, caso a tensão fique abaixo do limite inserido pelo usuário;
- iii. Tempos de retardo na atuação do tape, seja pela dinâmica do equipamento ou causada pelos transdutores de medição;
- iv. Discretização do tape;
- v. Limites mínimos e máximos do tape.

O gerador síncrono do sistema-teste ligado à barra 0 foi modelado no ANATEM como pólos salientes, com um enrolamento de campo e dois enrolamentos amortecedores, sendo um no eixo direto e um no eixo de quadratura (modelo MD02), sempre controlando a tensão da própria barra, para as simulações com regulador de tensão. Para as demais, foi modelado como barra infinita (modelo MD01 do ANATEM).

5.3 Modelagem dos Reguladores de Tensão

Neste capítulo serão utilizadas três modelagens de regulador de tensão: um regulador de tensão ideal, conhecido como barra infinita, onde a tensão na barra controlada é mantida constante durante todo o tempo de simulação, o regulador pré-definido MD20 do programa ANATEM e um regulador customizado, cujos diagramas de blocos (dos dois últimos) estão mostrados a seguir.

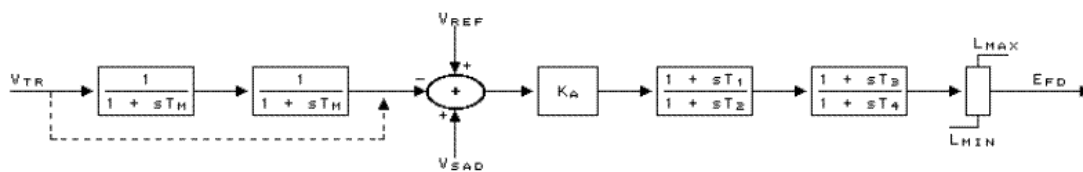


Figura 5.3 – Diagrama de blocos do regulador de tensão MD20 do ANATEM

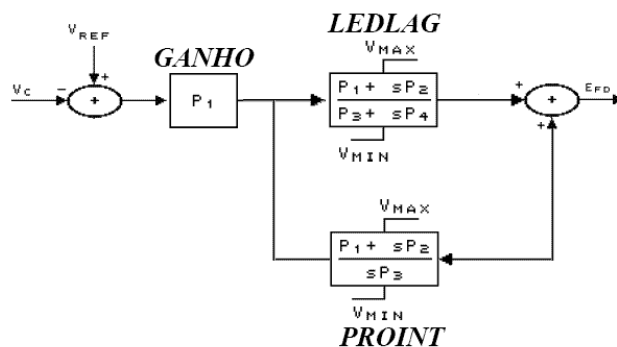


Figura 5.4 – Diagrama de blocos do regulador de tensão customizado

Onde:

- i. V_{tr} é o sinal de entrada do regulador de tensão (pu);
- ii. V_{sad} é o sinal estabilizador aplicado no regulador de tensão (pu);
- iii. V_{ref} é tensão de referência (valor desejado para a tensão da barra controlada) (pu);
- iv. E_{fd} é a tensão de campo da máquina (pu).

A linha tracejada corresponde ao *by-pass* do bloco caso a constante de tempo seja nula.

5.4 Modelagem da Carga

A modelagem da carga é de fundamental importância para o sucesso da simulação, influenciando consideravelmente os resultados [13].

O programa ANAREDE utiliza o modelo de carga “potência constante” como padrão das simulações e o ANATEM utiliza o modelo “impedância constante”.

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

5.5 Carga “Potência Constante”

A carga com modelo “potência constante” permanece inalterada independente do valor da tensão na barra onde está conectada. Este modelo de

carga é o mais severo para perturbações e é o mais adequado para os estudos de estabilidade de tensão. Na região anormal de operação, as ações de controle de tensão provocam efeitos opostos ao esperado, podendo levar o sistema ao colapso.

Na Figura 5.5, a linha azul representa a curva PV da barra 1 do sistema-teste. A linha vermelha é a curva PV deste mesmo sistema, após redução de tape do transformador. Num ponto de operação na parte superior da curva, a tensão foi elevada com a movimentação do tape no sentido de reduzir a relação de transformação. Na parte inferior da curva, a tensão reduziu com a mesma manobra.

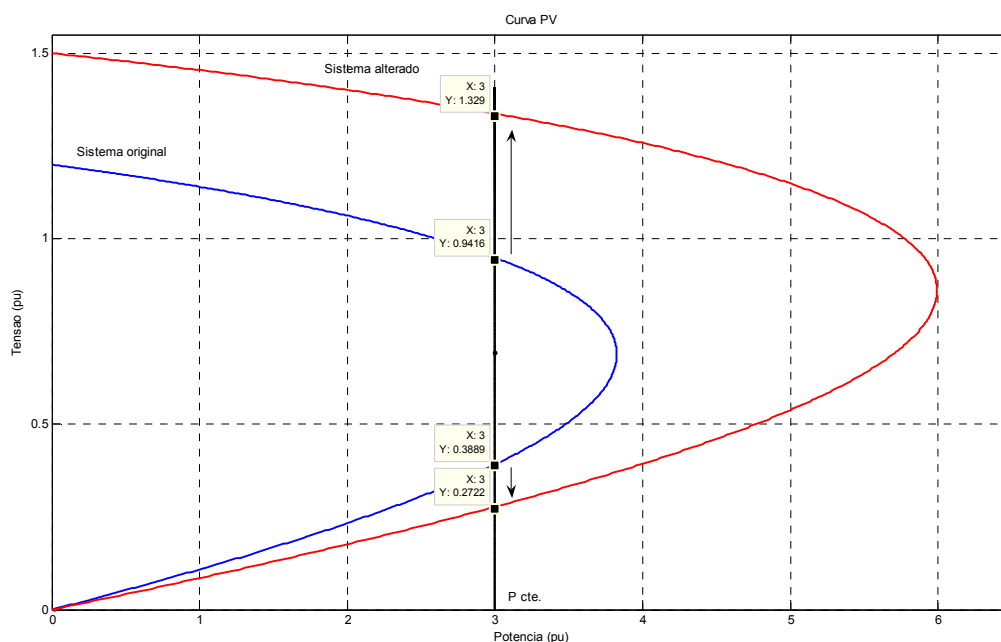


Figura 5.5 – Curvas PV de um sistema com carga potência constante para diferentes valores de tape

5.5.1

Testes no Sistema de 3 Barras com a Carga “Potência Constante”

5.5.1.1

Região Normal de Operação

O ponto de operação inicial do sistema de 3 barras da Figura 5.1 é apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Ponto de operação inicial

Região Normal		
	Módulo	Ângulo (°)
V_0 (pu)	1,618	0,0
V_1 (pu)	1,200	-20,0
V_2 (pu)	1,183	-20,7
P (MW)	2300,0	-
Q (Mvar)	1300,0	-
Z_{trafo} (pu)	0,0286	90,0
Z_t (pu)	0,100	70,0
tape (pu)	1,000	-

Para a análise estática, utilizando o programa de fluxo de carga, foram realizadas alterações da tensão de referência da barra 1 e verificada a alteração do tape.

Os resultados da simulação são apresentados numericamente na Tabela 5.2 e graficamente na Figura 5.6.

Tabela 5.2 – Resultado da variação do tape para variações na tensão controlada, carga “potência constante”

Ponto de Operação	Módulo de V_0	Módulo de V_1	tape
1	1,618	1,200	1,000
2	1,618	1,150	1,015
3	1,618	1,100	1,029
4	1,618	1,050	1,040

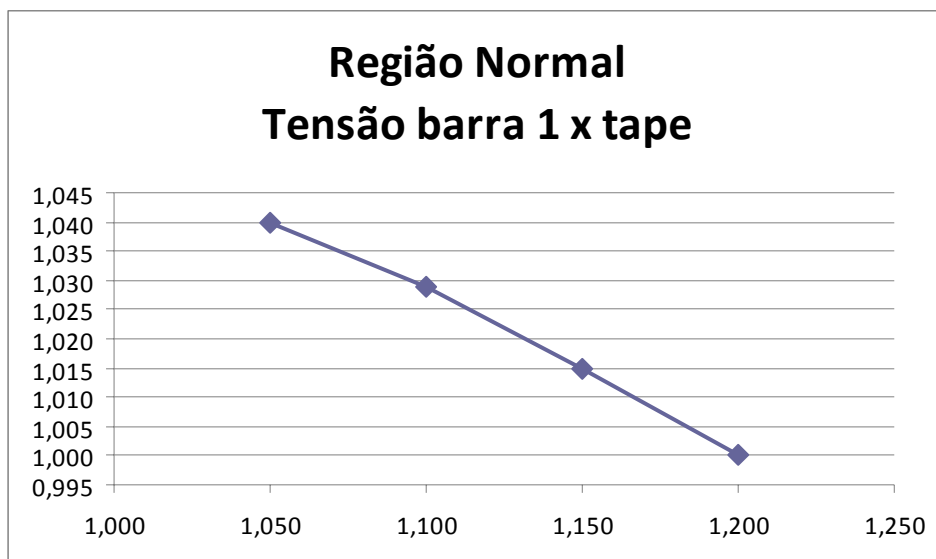


Figura 5.6 – Resultado da variação da tensão da barra 1 X tape, carga “potência constante”

Nos resultados observa-se que as variações da tensão da barra 1 e do tape são em sentidos opostos. Este é o esperado, e diz-se que o sistema está operando na região normal.

Utilizando o mesmo ponto de operação inicial da Tabela 5.1, para o sistema-teste da Figura 5.1, foi realizada a análise dinâmica através da simulação no domínio do tempo. As alterações da tensão de referência na barra 1 foram as mesmas da terceira coluna da Tabela 5.2, aplicadas em 3, 6 e 9 s, utilizando dois dos reguladores de tensão propostos.

Da Figura 5.7 até a Figura 5.12 apresentam-se os resultados. Com o regulador MD20, o algoritmo perdeu a estabilidade numérica antes mesmo da ocorrência dos eventos programados (em 2,2 s), e a simulação foi interrompida. Sabe-se que isso pode ocorrer na presença de cargas estáticas do tipo "potência constante". Para superar esse problema, utilizam-se cargas estáticas do tipo "mista", com parcela "impedância constante", ou cargas dinâmicas, inclusive do tipo "potência constante". Para a simulação com regulador de tensão barra infinita, mesmo com o gerador controlando a tensão da sua própria barra apenas, a barra terminal do transformador, controlada por este equipamento através da variação dos tapes, manteve-se com tensão constante mesmo com a atuação correta do sistema de controle em $t=3s$, alterando corretamente o tape quando da solicitação de redução da tensão de referência. Em função deste comportamento inesperado, os resultados desta simulação não servem para nenhuma análise.

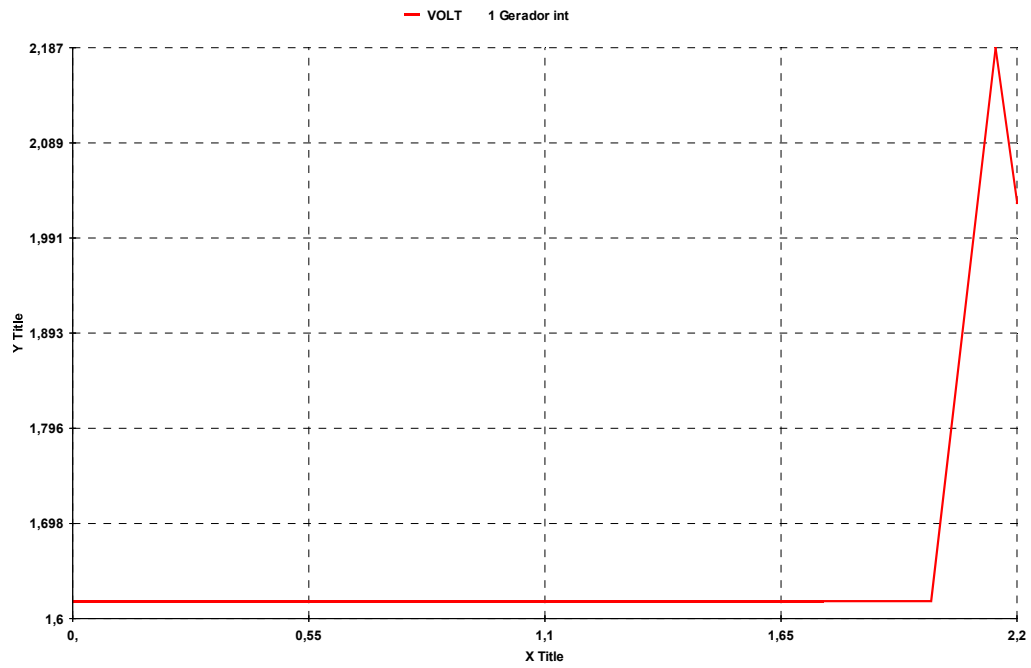


Figura 5.7 – Resultado da variação da tensão da barra 0, carga “potência constante”, no domínio do tempo, regulador de tensão MD20 do ANATEM

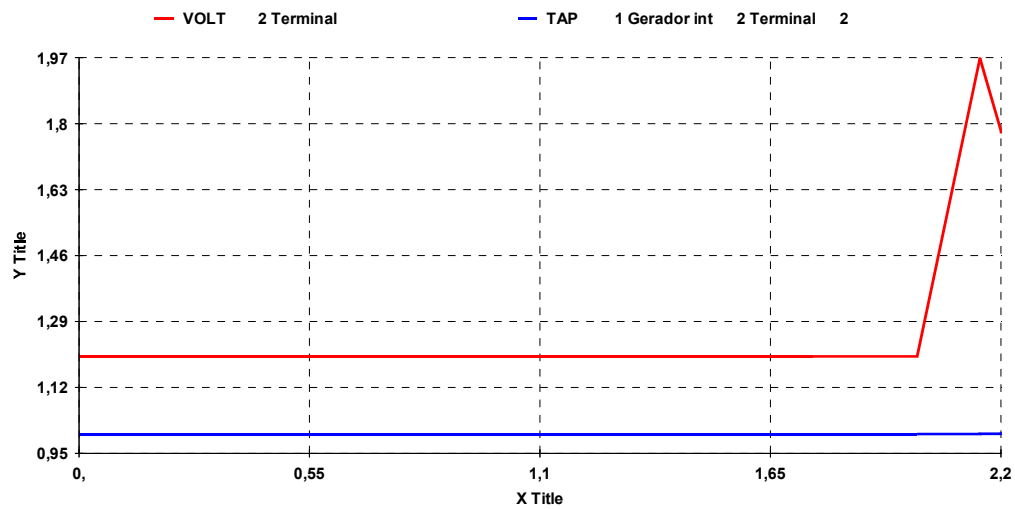


Figura 5.8 – Resultado da variação da tensão da barra 1 e do tap, carga “potência constante”, no domínio do tempo, regulador de tensão MD20 do ANATEM

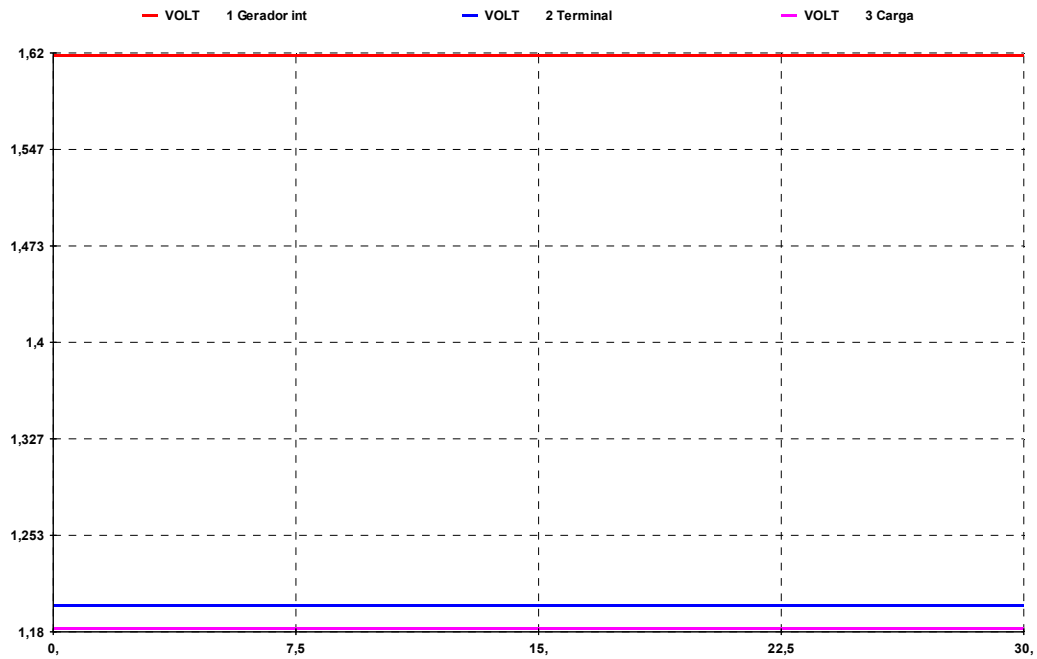


Figura 5.9 – Resultado da variação da tensão das 3 barras, carga “potência constante”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita

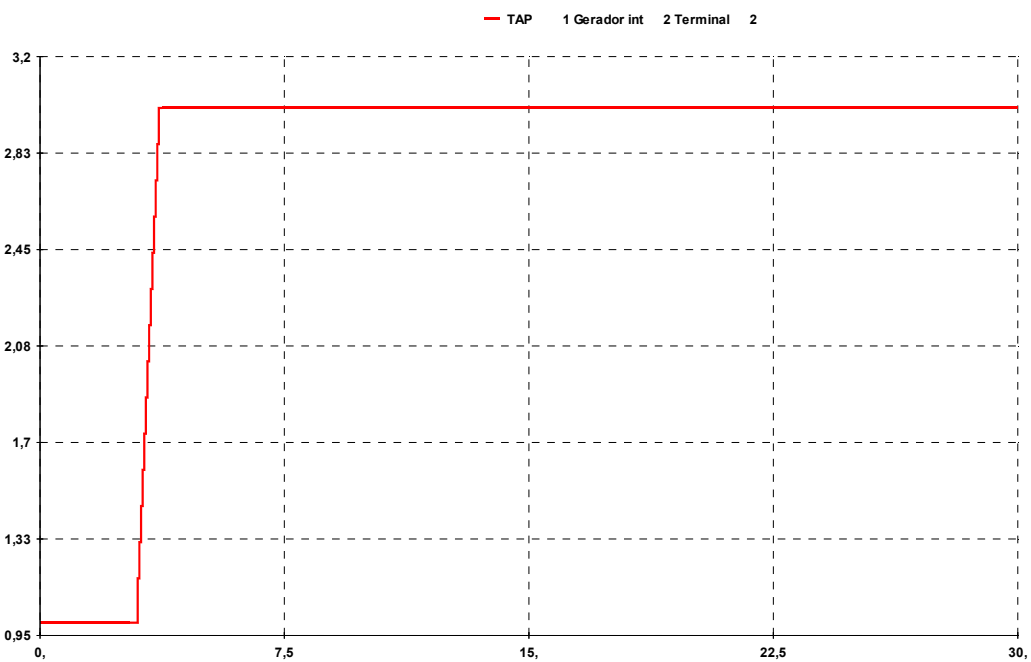


Figura 5.10 – Resultado da variação do tape, carga “potência constante”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita

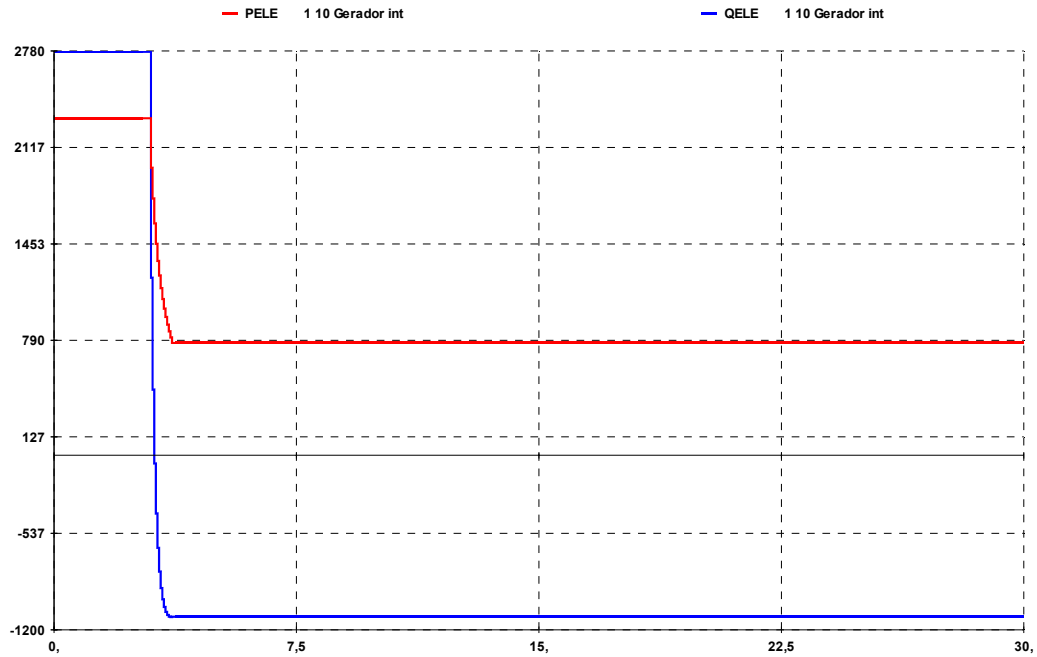


Figura 5.11 – Resultado da variação das potências geradas, carga “potência constante”, no domínio do tempo, regulador de tensão barra infinita

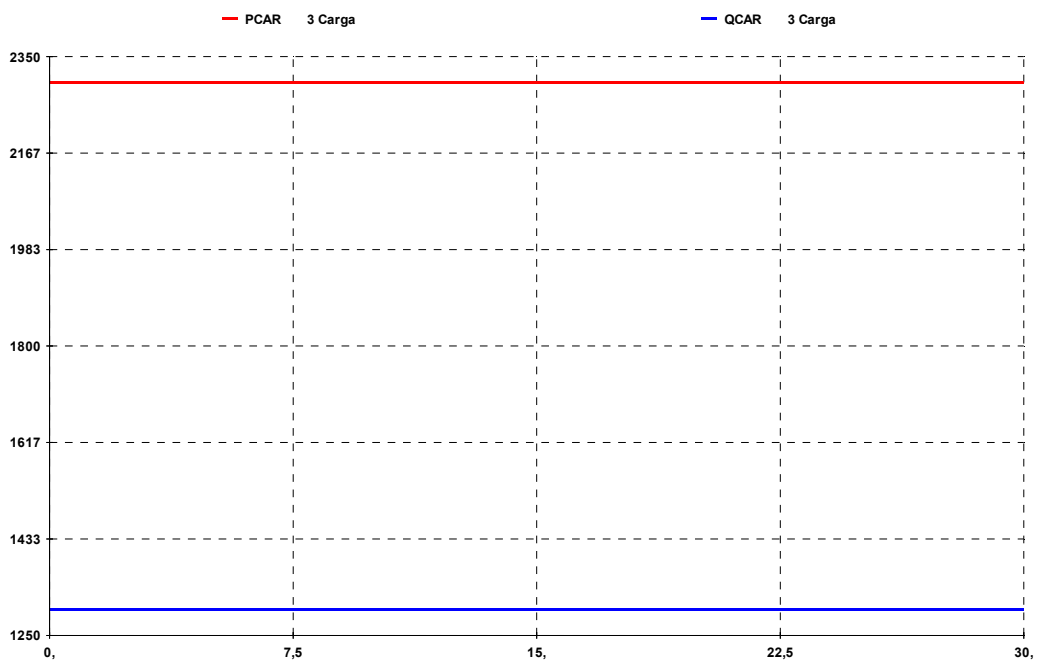


Figura 5.12 – Resultado da variação das potências consumidas, carga “potência constante”, no domínio do tempo, regulador de tensão barra infinita

5.5.1.2 Região Anormal de Operação

O ponto de operação inicial do sistema de três barras da Figura 5.1 é apresentado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Ponto de operação inicial

Região Anormal		
	Módulo	Ângulo (°)
V_0 (pu)	2,143	0,0
V_1 (pu)	0,460	-45,1
V_2 (pu)	0,409	-50,4
P (MW)	2300,0	-
Q (Mvar)	1300,0	-
Z_{trafo} (pu)	0,0286	90,0
Z_t (pu)	0,100	70,0
tape (pu)	1,000	-

Novamente, foram efetuadas alterações na tensão de referência na barra 1. Os resultados são apresentados numericamente na Tabela 5.4 e graficamente na Figura 5.13.

Tabela 5.4 – Resultado da variação do tape para variações na tensão controlada, carga “potência constante”

Ponto de Operação	Módulo de V_0	Módulo de V_1	tape
1	2,143	0,460	1,000
2	2,143	0,467	1,015
3	2,143	0,474	1,029
4	2,143	0,481	1,043

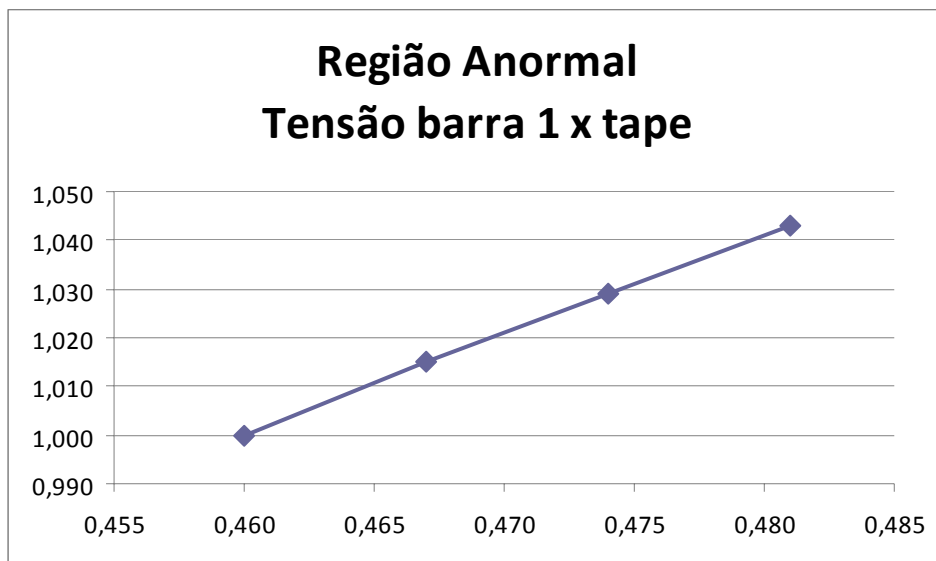


Figura 5.13 – Resultado da variação da tensão da barra 1 X tape, carga “potência constante”

Nos resultados da análise estática observa-se que as variações da tensão da barra 1 e do tape ocorrem no mesmo sentido. Este é o efeito oposto ao esperado, e diz-se que o sistema está operando na região anormal.

Utilizando o mesmo ponto de operação inicial da Tabela 5.3, para o sistema-teste da Figura 5.1, foi realizada a análise dinâmica através da simulação no domínio do tempo. As alterações da tensão de referência na barra 1 foram as mesmas da terceira coluna da Tabela 5.4, aplicadas em 3, 6 e 9s, utilizando dois dos reguladores de tensão propostos.

Da Figura 5.14 a Figura 5.19, apresentam-se os resultados. O algoritmo perdeu a estabilidade numérica, para a simulação com regulador de tensão MD20, antes mesmo da ocorrência dos eventos programados (em 0,6 s), e a simulação foi interrompida. Para a simulação com regulador de tensão barra infinita, o algoritmo converge para outro ponto de operação em $t=0+$ s, fugindo completamente do ponto de operação inicial da simulação estática, o que torna a simulação inconclusiva

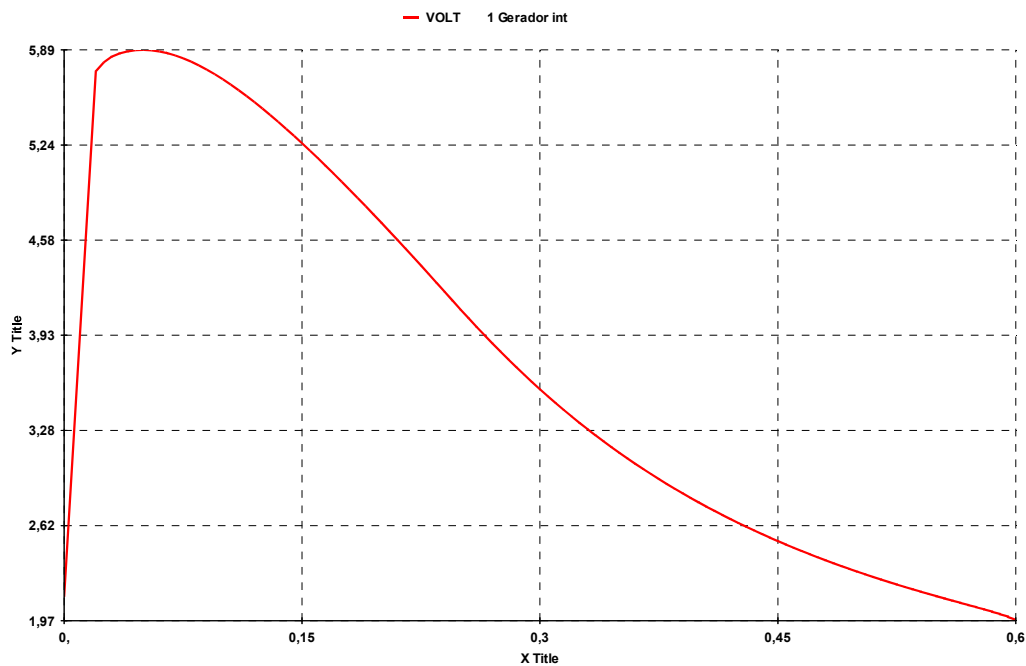


Figura 5.14 – Resultado da variação da tensão da barra 0, carga “potência constante”, no domínio do tempo, regulador de tensão MD20 do ANATEM

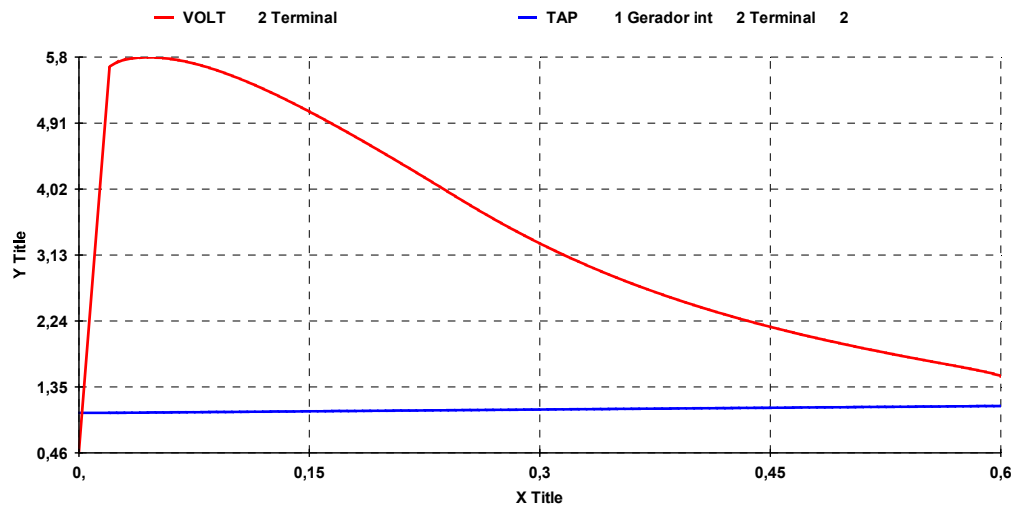


Figura 5.15 – Resultado da variação da tensão da barra 1 e do tape, carga “potência constante”, no domínio do tempo , regulador de tensão MD20 do ANATEM

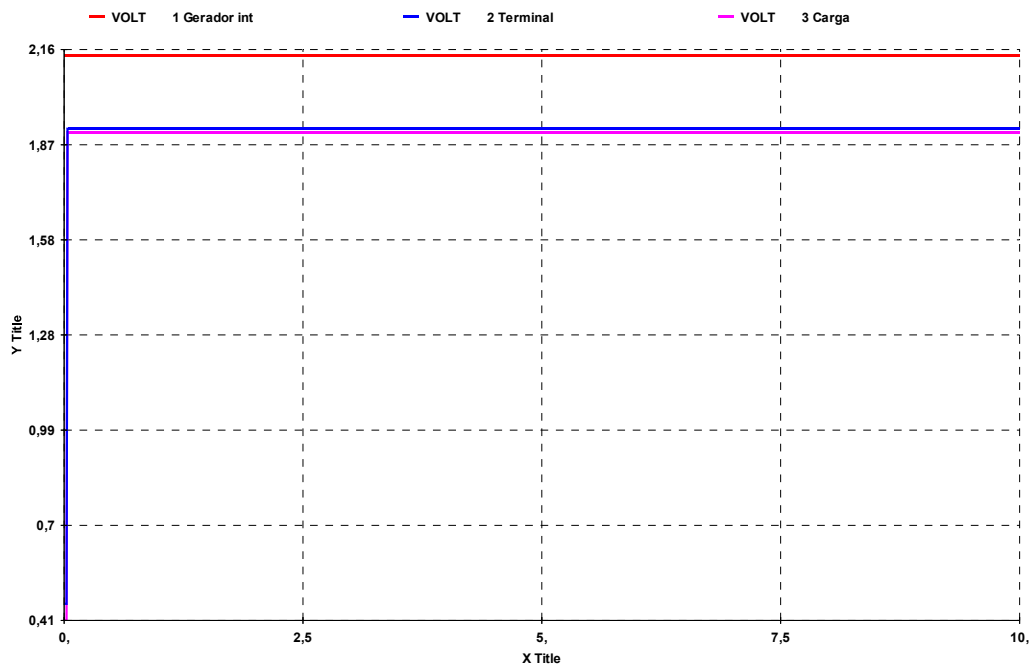


Figura 5.16 – Resultado da variação da tensão das 3 barras, carga “potência constante”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita

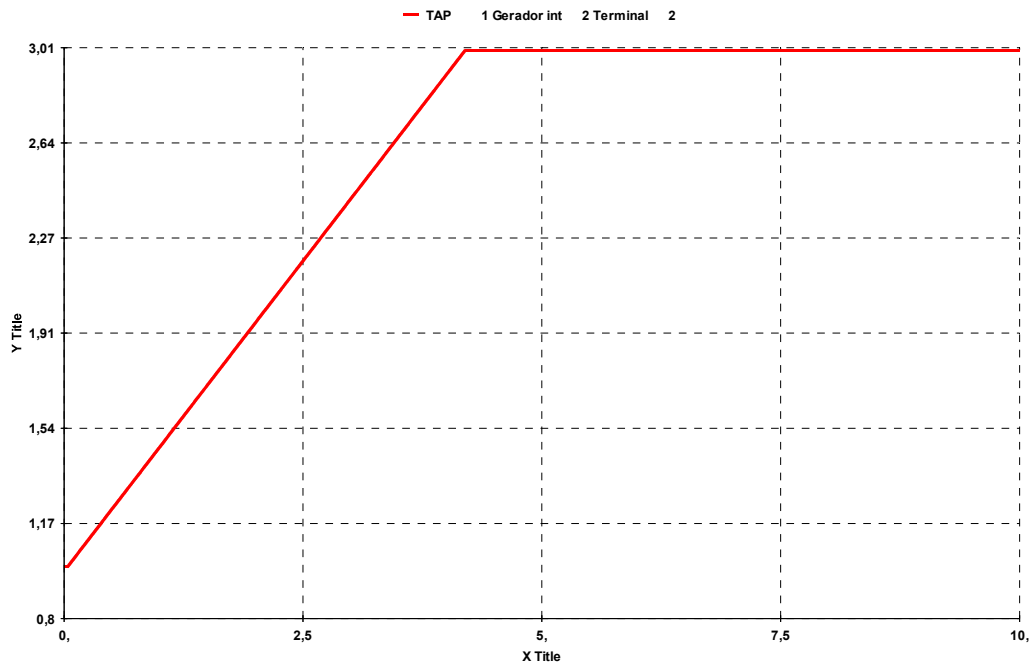


Figura 5.17 – Resultado da variação do tap, carga “potência constante”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita

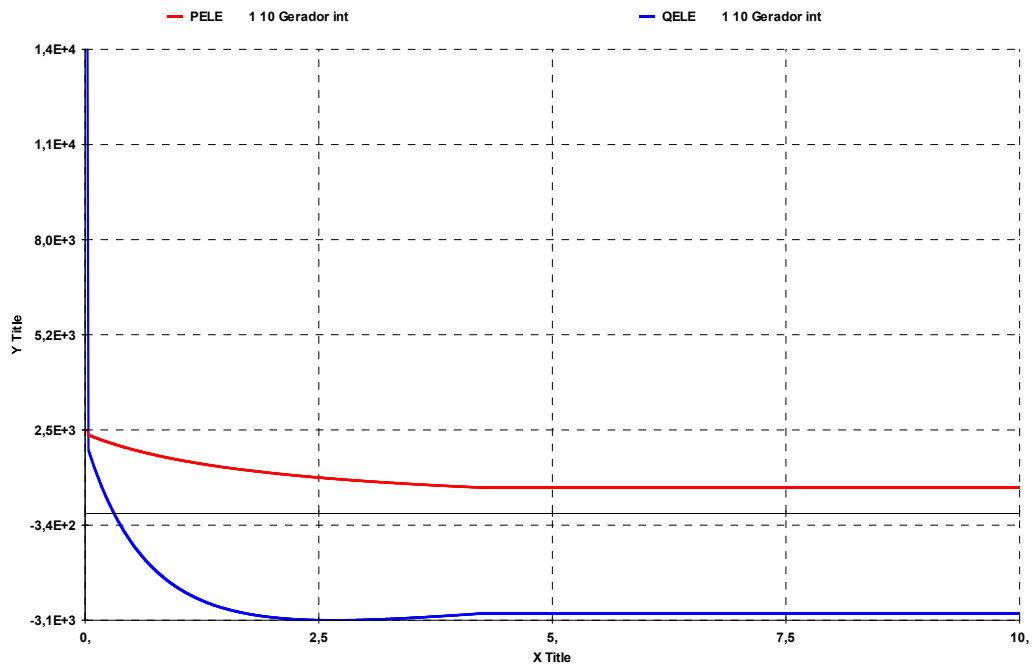


Figura 5.18 – Resultado da variação das potências geradas, carga “potência constante”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita

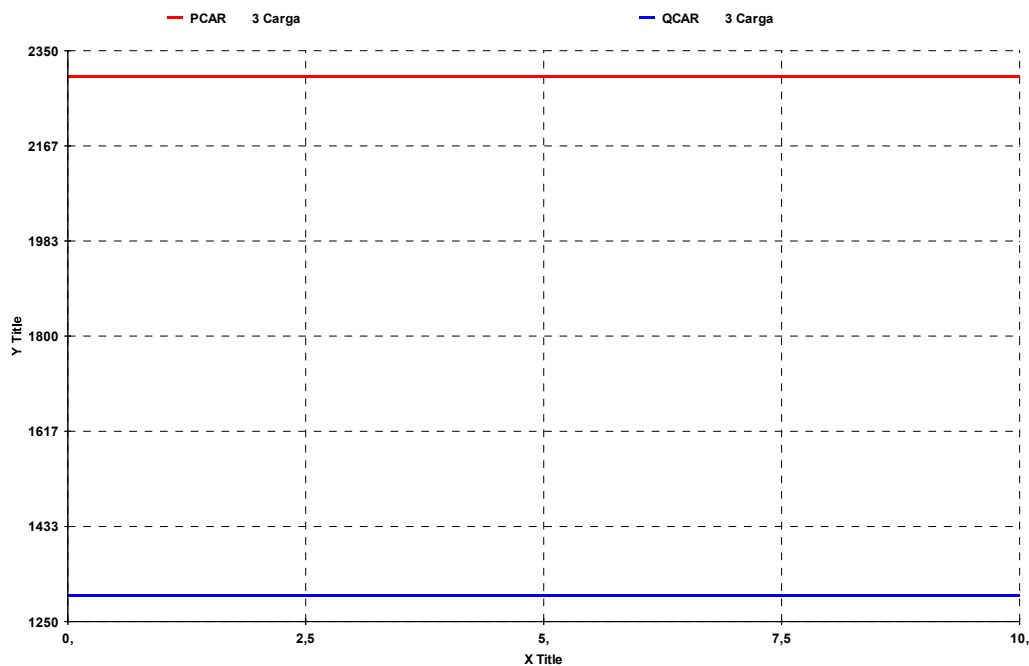


Figura 5.19 – Resultado da variação das potências consumidas, carga “potência constante”, no domínio do tempo, regulador de tensão barra infinita

A carga “potência constante” utilizada com sucesso na simulação estática (ANAREDE), na simulação no domínio do tempo (ANATEM) introduz problemas de estabilidade numérica no algoritmo.

5.6 Carga “Impedância Constante”

A carga com 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 conveniente para estudos de estabilidade de tensão.

Graficamente, é possível observar na Figura 5.20 duas curvas PV para valores diferentes de t_{ape} : a azul e a vermelha, após redução de t_{ape} . Apresentam-se ainda duas curvas de carga: a preta, “impedância constante” na região superior das curvas PV e a magenta, na região inferior da curva.

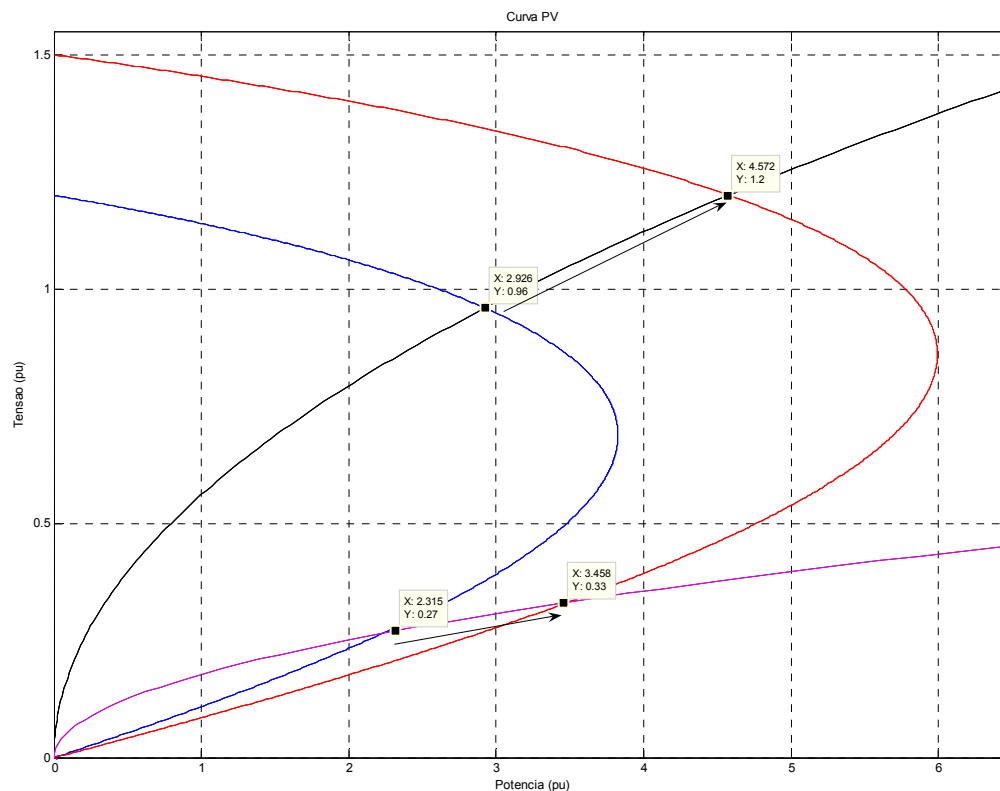


Figura 5.20 – Curvas PV para diferentes valores de tap e curvas de carga tipo “impedância constante” e o efeito da troca de tap em pontos de operação na parte superior e inferior da curva PV

Pode ser observado na Figura 5.20, mesmo em um ponto de operação na região inferior da curva, com a redução do tap, sempre haverá elevação de tensão, que é o efeito desejado. Desta forma, não é possível observar um efeito reverso com esta modelagem de carga. Ainda na Figura 5.20, observa-se que há uma e somente uma solução de tensão para um dado carregamento do sistema, já que a curva de carga do tipo “impedância constante” corta a curva PV em apenas um ponto [14].

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

5.6.1.1 Região Normal de Operação

Face às dificuldade para convergir um ponto de operação na parte de baixo da curva PV, também região normal de operação como mostrado na seção 5.6, em virtude das baixas tensões, será mostrado apenas o caso na parte superior da curva PV.

O ponto de operação inicial está na Tabela 5.5 e o sistema-teste, na Figura 5.1. Foram realizadas alterações na tensão de referência da barra 1 e verificadas as variações do tape. Os resultados são apresentados numericamente na Tabela 5.4 e graficamente na Figura 5.21.

Tabela 5.5 – Ponto de operação inicial

Região Normal		
	Módulo	Ângulo (°)
V_0 (pu)	1,287	0,0
V_1 (pu)	1,000	-14,6
V_2 (pu)	0,989	15,0
P (MW)	1140,0	-
Q (Mvar)	808,3	-
Z_{trafo} (pu)	0,0286	90,0
Z_t (pu)	0,100	70,0
tape (pu)	1,012	-

Tabela 5.6 – Resultado da variação do tape para variações da tensão controlada, carga “impedância constante”

Ponto de Operação	Módulo de V_0	Módulo de V_1	tape
1	1,287	1,000	1,012
2	1,287	1,050	0,963
3	1,287	1,100	0,920

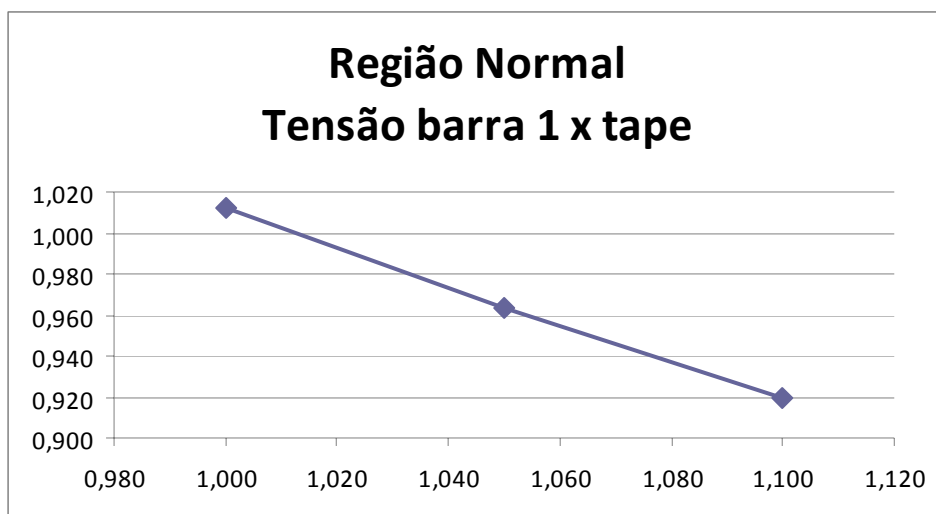


Figura 5.21 – Resultado da variação da tensão da barra 1 X tape, carga “impedância constante”

Nos resultados da análise estática observa-se que as variações da tensão da barra 1 e do tape ocorrem em sentidos opostos. Isto é o esperado e diz-se que o sistema está na região normal. Como já dito, para este tipo de carga, só existe este tipo de resultado.

Utilizando o mesmo ponto de operação inicial da Tabela 5.5 para o sistema-teste da Figura 5.1, foi realizada a simulação no domínio do tempo. Foram efetuadas as mesmas modificações na tensão de referência da terceira coluna da Tabela 5.6, aplicadas em 3 e 6 s e observada a variação do tape, para dois dos reguladores de tensão.

Na Figura 5.22 e na Figura 5.23, simulações com regulador de tensão MD20, observa-se que a variação da tensão da barra 1 e do tape ocorre em sentidos opostos. Este é o resultado esperado e concorda com o da análise estática. Da Figura 5.24 a Figura 5.27, são mostradas as simulações com regulador de tensão barra infinita, as quais se mostram mais uma vez inconclusivas, pelos menos motivos já tratados nas seções 5.5.1.1 e 5.5.1.2.

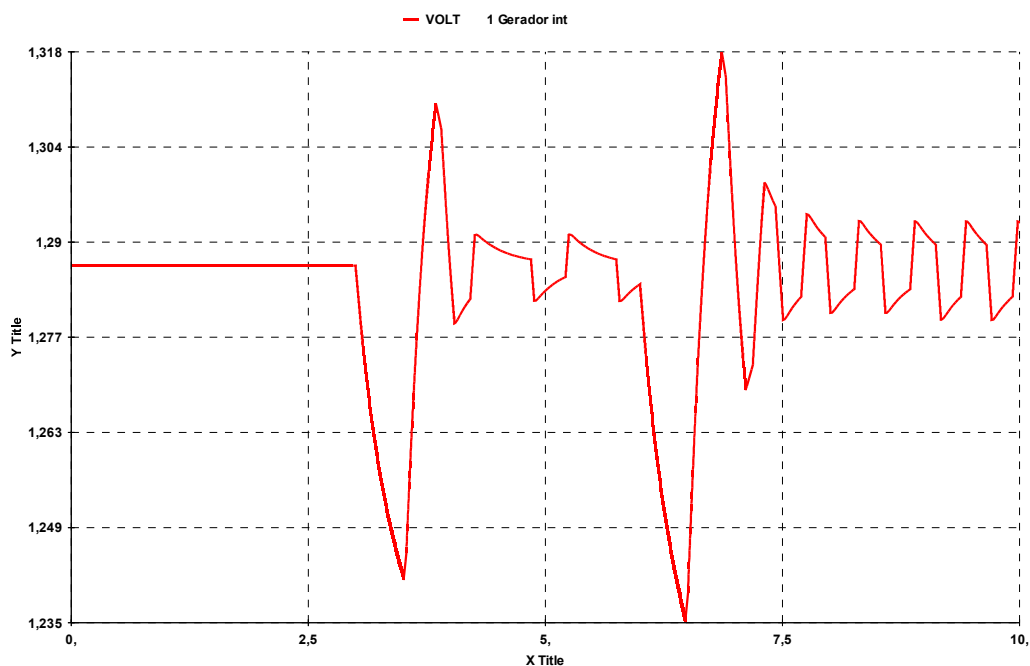


Figura 5.22 – Resultado da variação da tensão da barra 0, carga “impedância constante”, no domínio do tempo, regulador de tensão MD20 do ANATEM

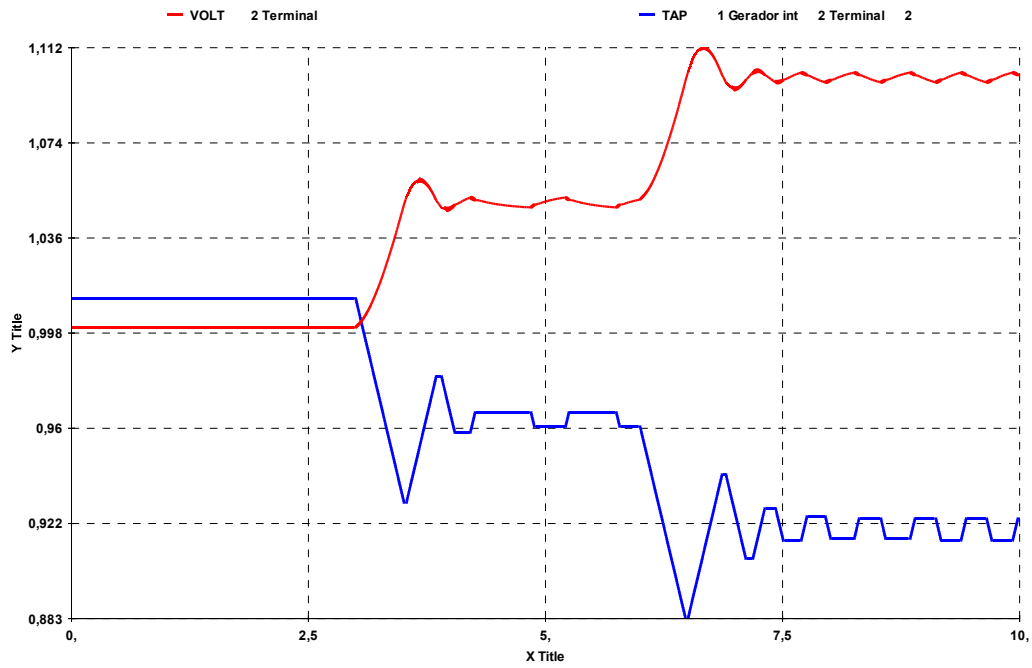


Figura 5.23 – Resultado da variação da tensão da barra 1 e do tape, carga “impedância constante”, no domínio do tempo, regulador de tensão MD20 do ANATEM

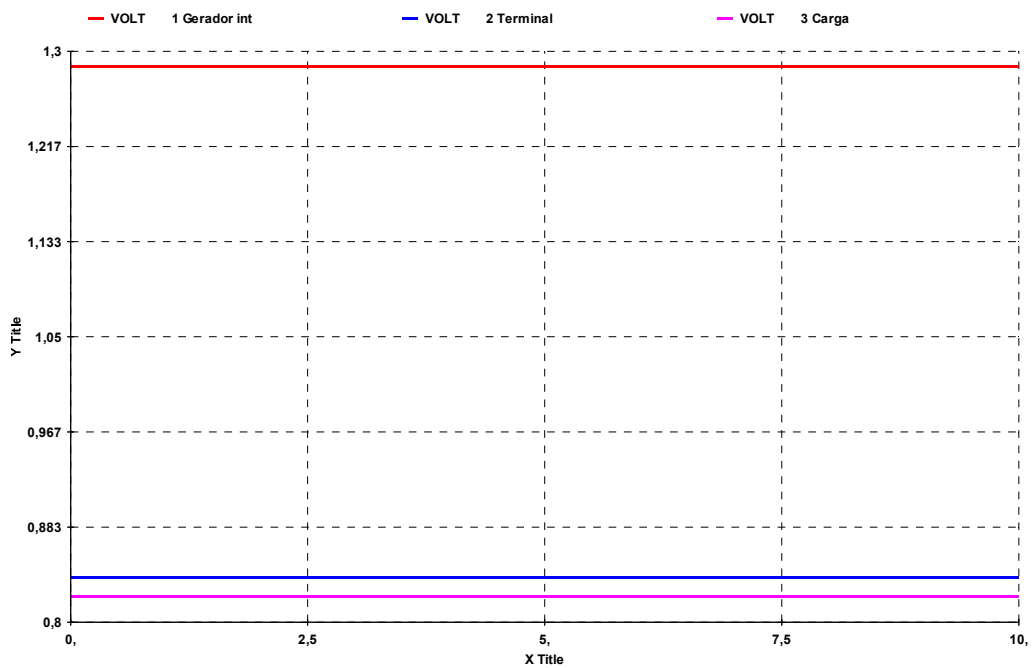


Figura 5.24 – Resultado da variação da tensão das 3 barras, carga “impedância constante”, no domínio do tempo, regulador de tensão barra infinita

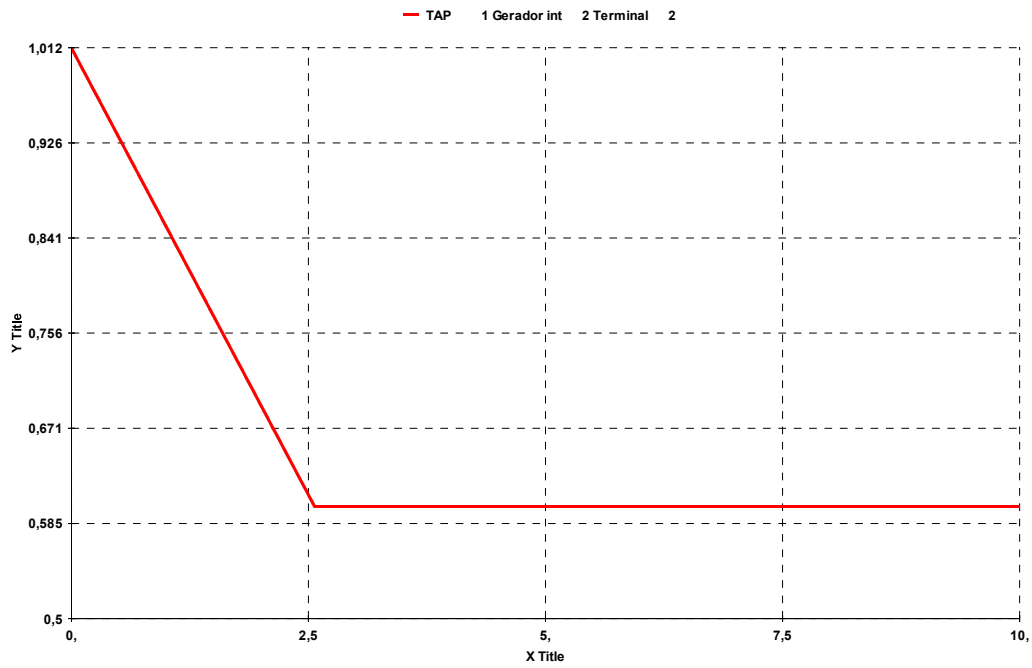


Figura 5.25 – Resultado da variação do tape, carga “impedância constante”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita

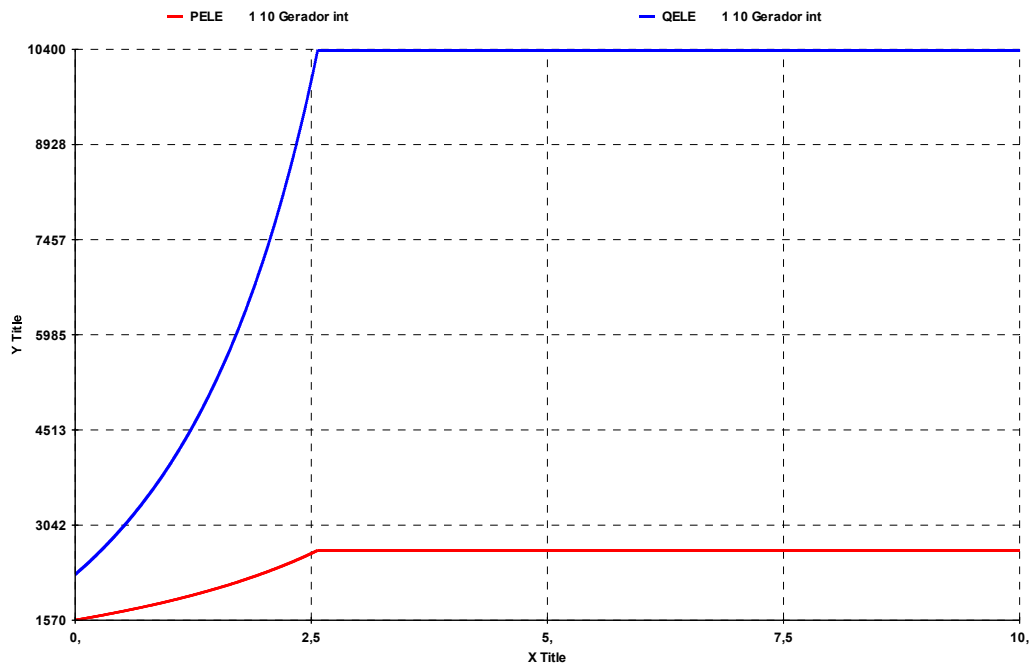


Figura 5.26 – Resultado da variação das potências geradas, carga “impedância constante”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita

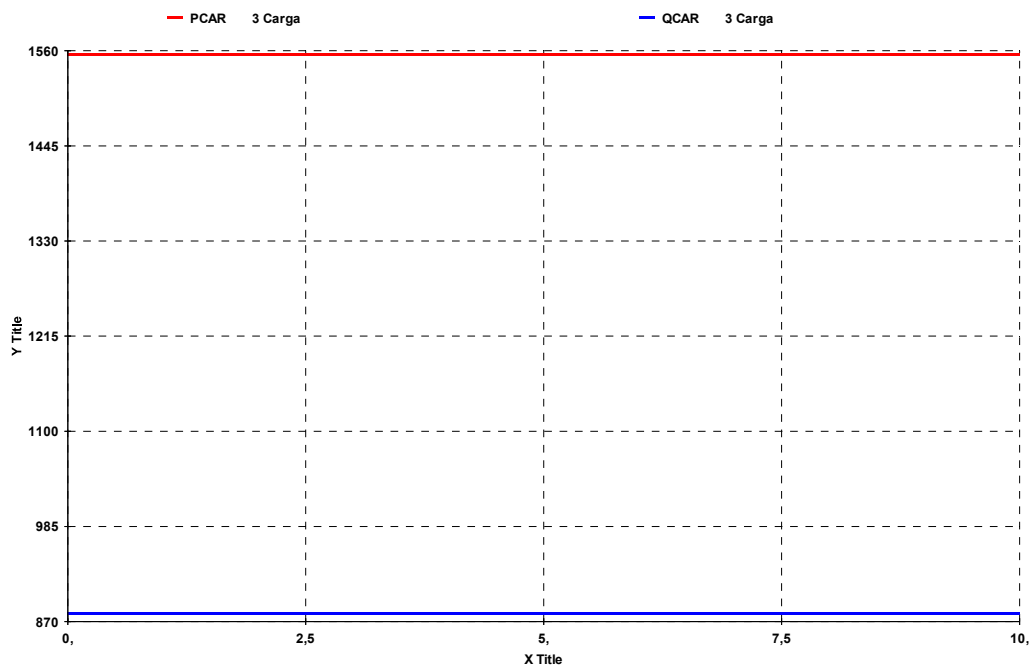


Figura 5.27 – Resultado da variação das potências consumidas, carga “impedância constante”, no domínio do tempo, regulador de tensão barra infinita

A carga “impedância constante” é utilizada com sucesso na simulação estática (ANAREDE) e também na simulação no domínio do tempo (ANATEM) – com regulador MD20 - na região normal de operação. Porém, mesmo na região inferior da curva PV, não é possível observar o efeito inverso de ações dos dispositivos de controle de tensão.

5.7 Carga “Corrente Constante”

A carga “corrente constante” é intermediária entre a carga “potência constante” e a carga “impedância constante”, no sentido em que ela varia linearmente com a tensão da barra onde está conectada. A título de ilustração, na Figura 5.28 é mostrada em azul a curva PV de um sistema-teste, e em vermelho a curva PV após diminuição do tape. Em preto, é mostrada a curva de carga do tipo “corrente constante”.

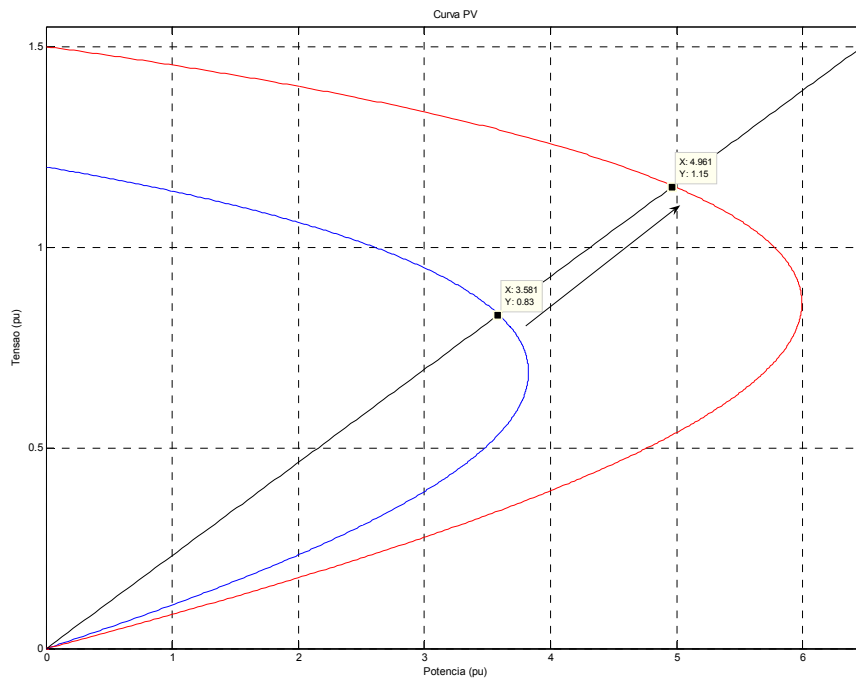


Figura 5.28 – Curvas PV para dois valores de $tape$, a curva de carga tipo “corrente constante”, e o efeito da troca de $tape$

5.8 Carga “ZIP”

Em virtude das características da modelagem das cargas nos itens anteriores, que impedia a realização com sucesso das simulações no domínio do tempo, optou-se por utilizar a composição dos três modelos de carga (“potência constante”, “impedância constante” e “corrente constante”) para que sejam verificados os efeitos da instabilidade do controle de tensão.

A proporção utilizada é 35% “impedância constante”, 35% “corrente constante” e 30% “potência constante”, ou abreviando, 35% Z^{cte} , 35% I^{cte} , 30% P^{cte} . A curva de carga, em preto, pode ser observada na Figura 5.29.

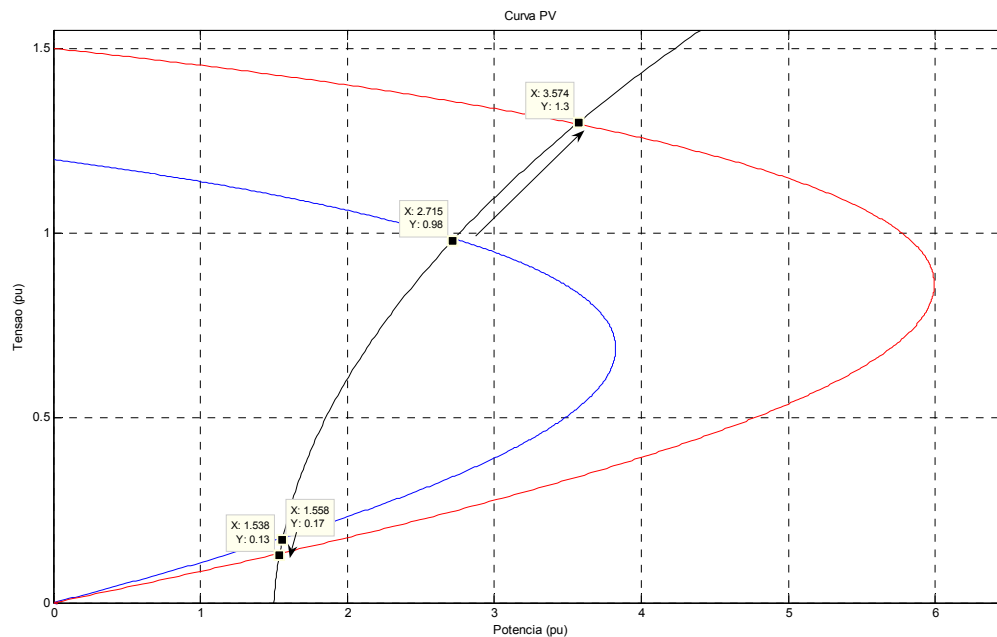


Figura 5.29 - Curvas PV para dois valores de tape, curva de carga tipo “ZIP” e o efeito da troca de tape em pontos de operação na parte superior e inferior da curva PV

A curva em azul é uma curva PV de um sistema-teste como o da Figura 5.1 e a curva em vermelho é a curva PV do mesmo sistema após diminuição do tape.

Graficamente, é possível observar que a variação da tensão na barra 1 versus variação do tape pode ocorrer no mesmo sentido (relação oposta à usual) tendo em vista que a curva da carga corta a curva PV em dois pontos.

5.8.1

Testes do Sistema de 3 Barras com a Carga “ZIP”

5.8.1.1

Região Normal de Operação

Utilizando o ponto de operação inicial da Tabela 5.7 para o sistema-teste da Figura 5.1, agora com a carga “ZIP” proposta, são realizados comandos para alterar a tensão de referência da barra 1 e observar o sentido da variação do tape. Os resultados da simulação são apresentados numericamente na Tabela 5.8 e graficamente na Figura 5.30.

Tabela 5.7 – Ponto de operação inicial

Região Normal		
	Módulo	Ângulo (°)
V_0 (pu)	3,554	0,0
V_1 (pu)	1,000	-45,0
V_2 (pu)	0,980	-46,0
P (MW)	2302,0	-
Q (Mvar)	1329,0	-
Z_{trafo} (pu)	0,1057	90,0
Z_t (pu)	0,100	70,0
tape (pu)	1,036	-

Tabela 5.8 – Resultado da variação do tape em virtude da variação na tensão controlada, carga “ZIP”

Ponto de Operação	Módulo de V_0	Módulo de V_1	tape
1	3,554	1,000	1,036
2	3,554	0,970	1,043
3	3,554	0,940	1,049
4	3,554	0,910	1,056

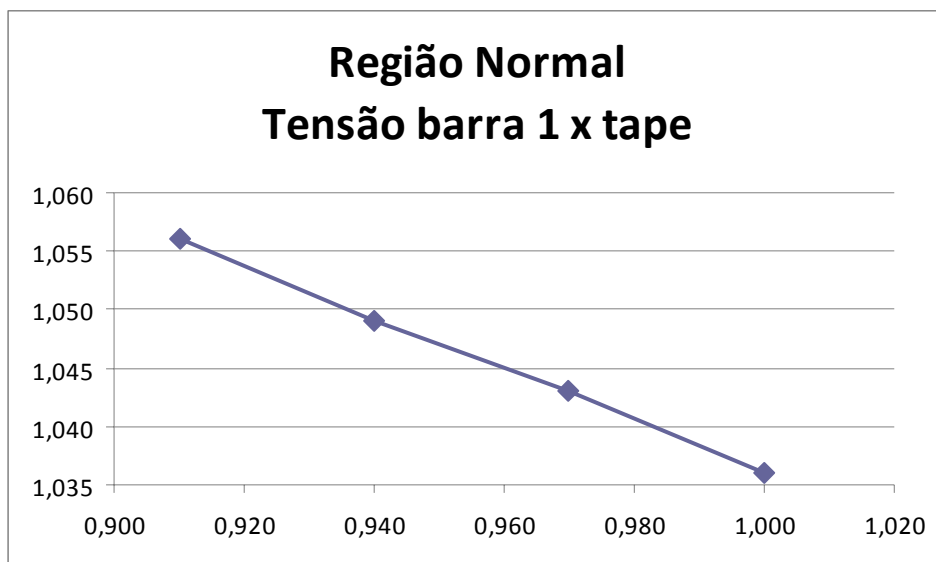


Figura 5.30 – Resultado da variação da tensão da barra 1 X tape, carga “ZIP”

Nos resultados da análise estática observa-se que as variações da tensão da barra 1 e do tape ocorrem em sentidos opostos. Este é o resultado esperado e diz-se que o sistema está na região normal de operação.

Utilizando o mesmo ponto de operação inicial da Tabela 5.7 para o sistema-teste da Figura 5.1, foi realizada a simulação no domínio do tempo com carga “ZIP”. Foram efetuadas as mesmas alterações na referência da tensão da barra 1 da terceira coluna da Tabela 5.8 em 3, 6 e 9s, para os três tipos de reguladores de tensão citados no capítulo.

Na simulações com o regulador de tensão MD20 (Figura 5.31 e Figura 5.32) e o regulador customizado (Figura 5.37 e Figura 5.38), observa-se que a variação da tensão da barra 1 e do tape ocorre em sentidos opostos. Este é o resultado esperado e concorda com o da análise estática. Nas simulações com regulador de tensão barra infinita (Figura 5.33 a Figura 5.36), as simulações permanecem inconclusivas.

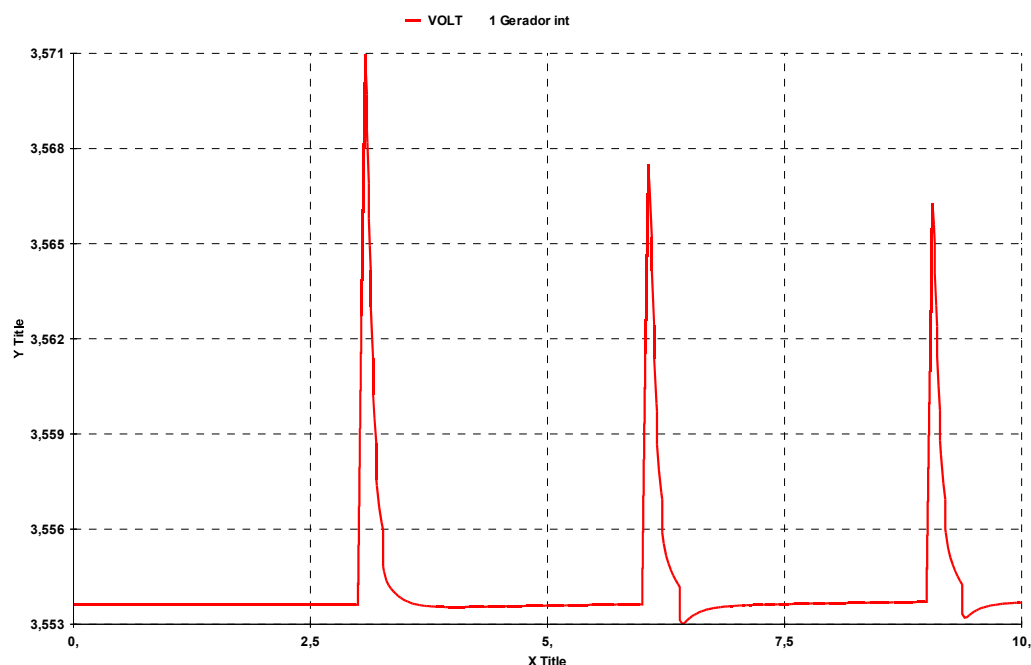


Figura 5.31 – Resultado da variação da tensão da barra 0, carga “ZIP”, no domínio do tempo, regulador de tensão MD20 do ANATEM

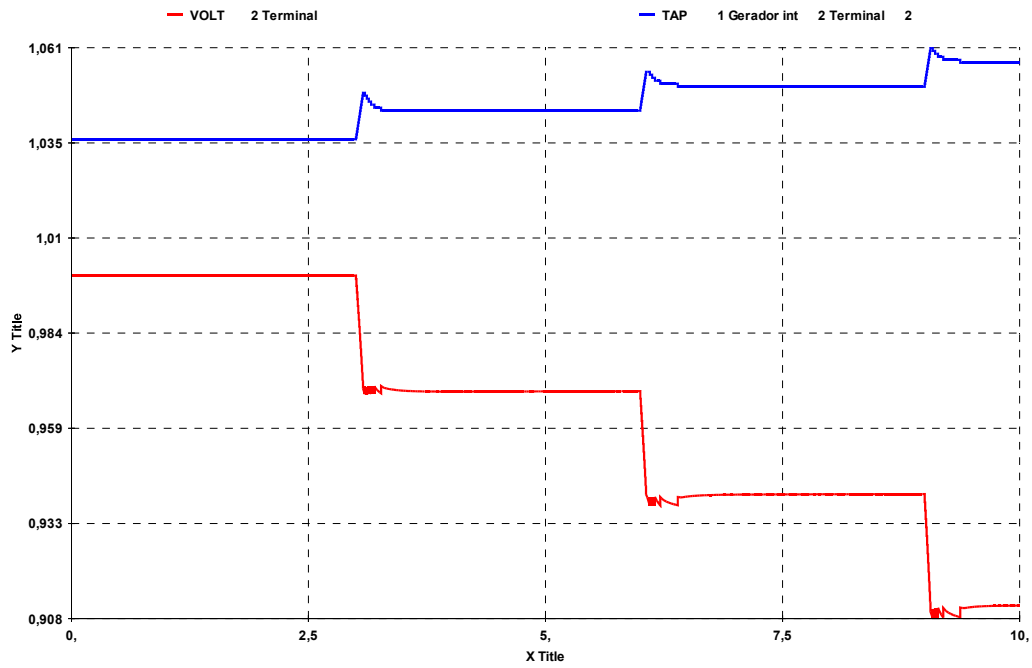


Figura 5.32 – Resultado da variação da tensão da barra 1 e do tape, carga “ZIP”, no domínio do tempo, regulador de tensão MD20 do ANATEM

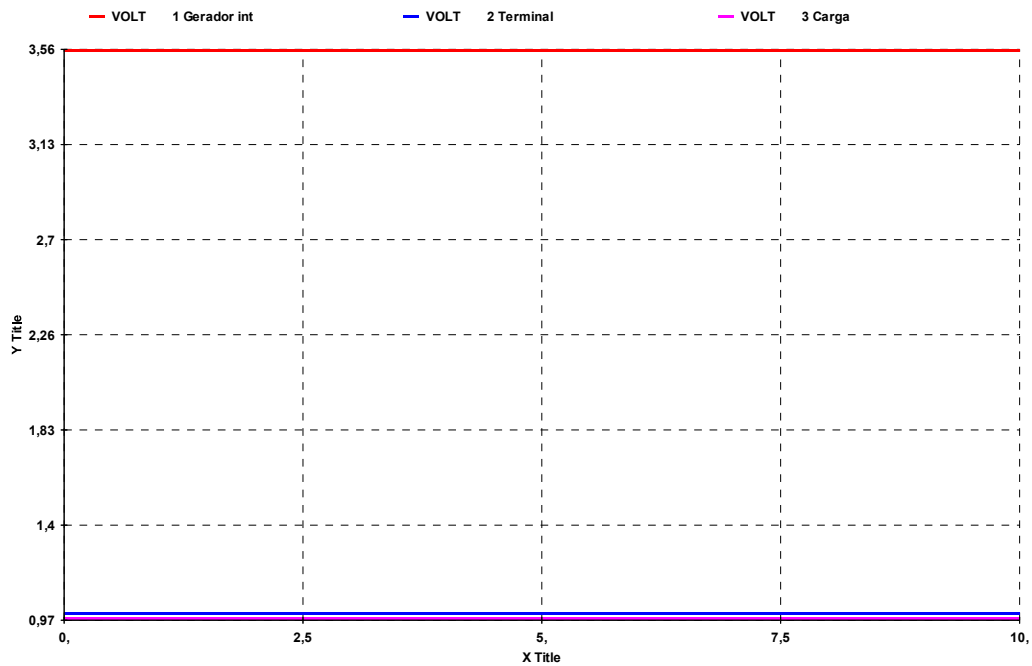


Figura 5.33 – Resultado da variação da tensão das 3 barras, carga “ZIP”, no domínio do tempo, regulador de tensão barra infinita

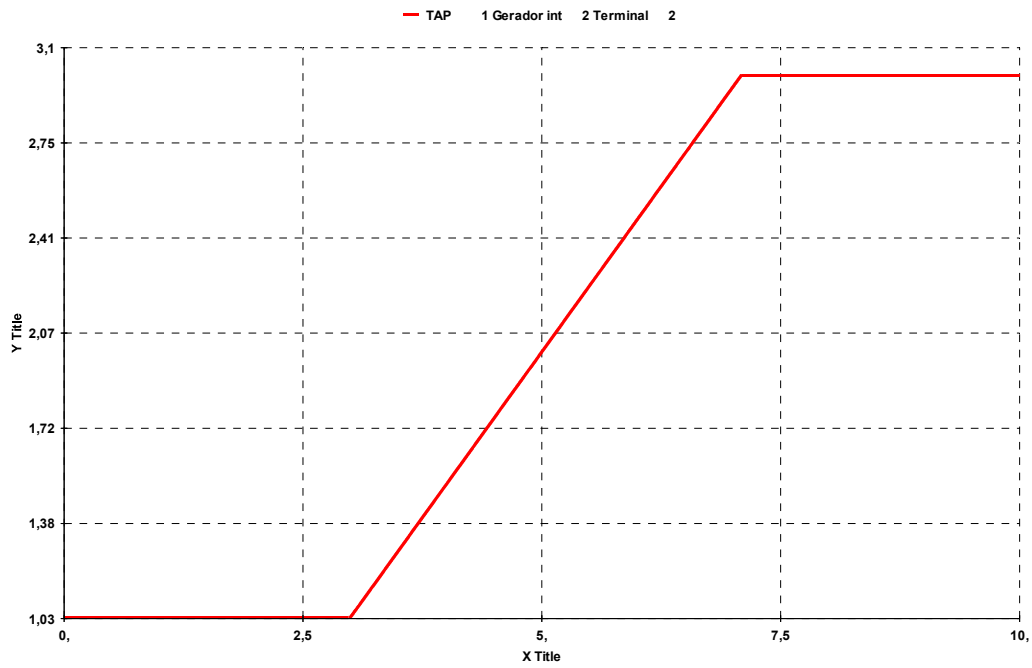


Figura 5.34 – Resultado da variação do tap, carga “ZIP”, no domínio do tempo, regulador de tensão barra infinita

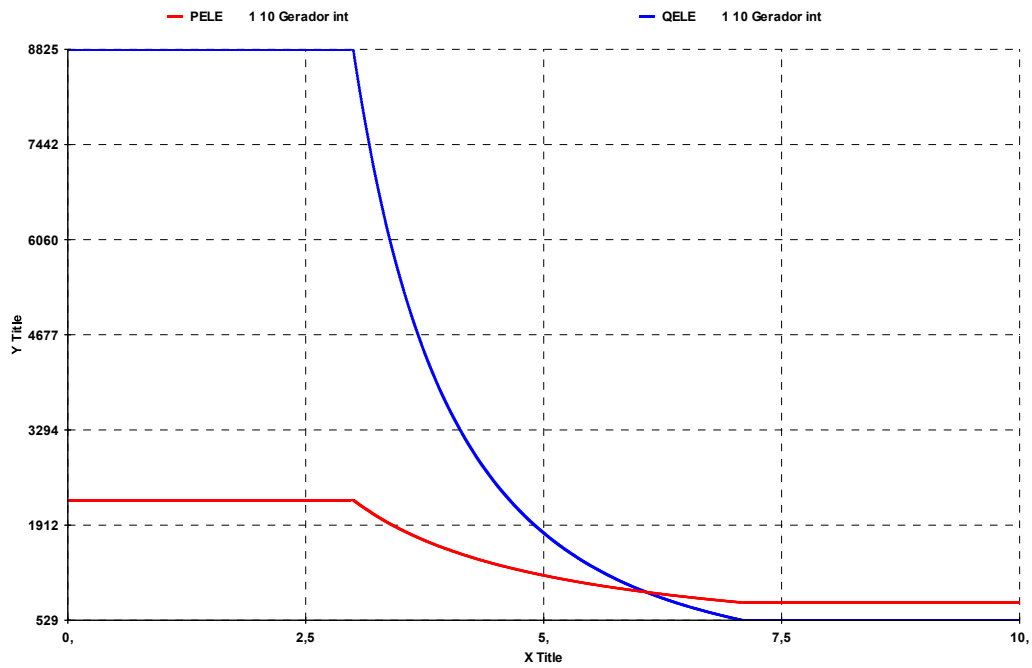


Figura 5.35 – Resultado da variação das potências geradas, carga “ZIP”, no domínio do tempo, regulador de tensão barra infinita

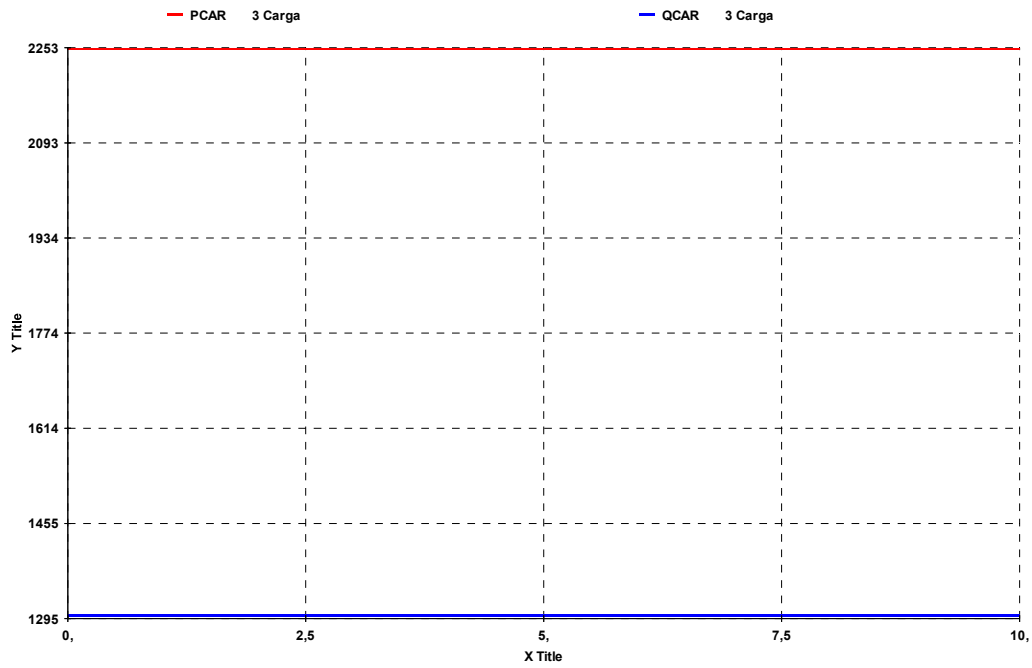


Figura 5.36 – Resultado da variação das potências consumidas, carga “ZIP”, no domínio do tempo, regulador de tensão barra infinita

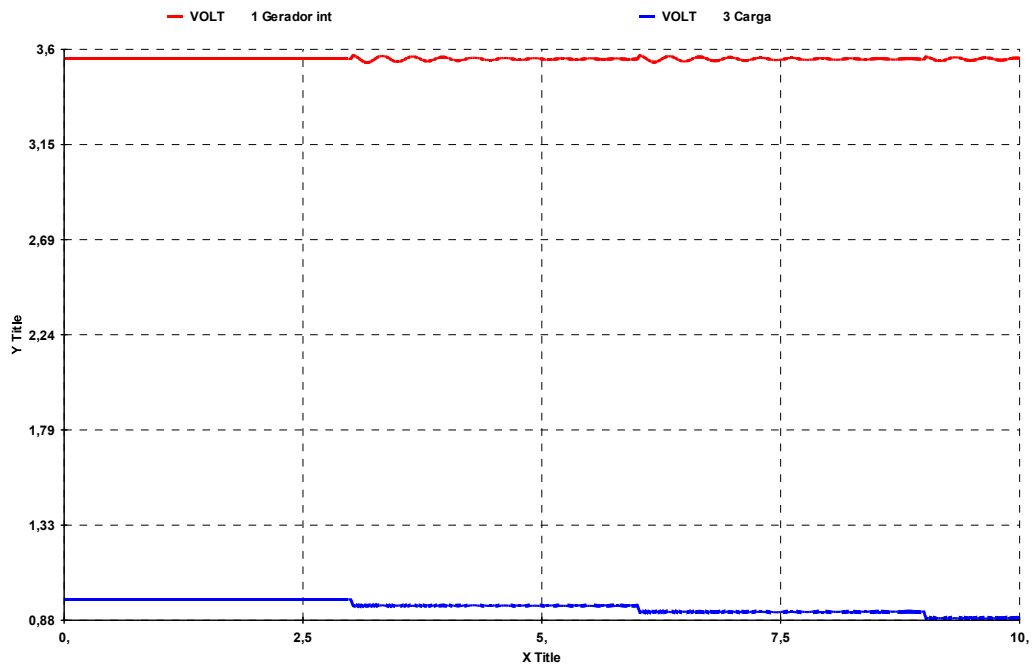


Figura 5.37 – Resultado da variação da tensão da barra de geração e de carga, carga “ZIP”, no domínio do tempo, regulador de tensão customizado

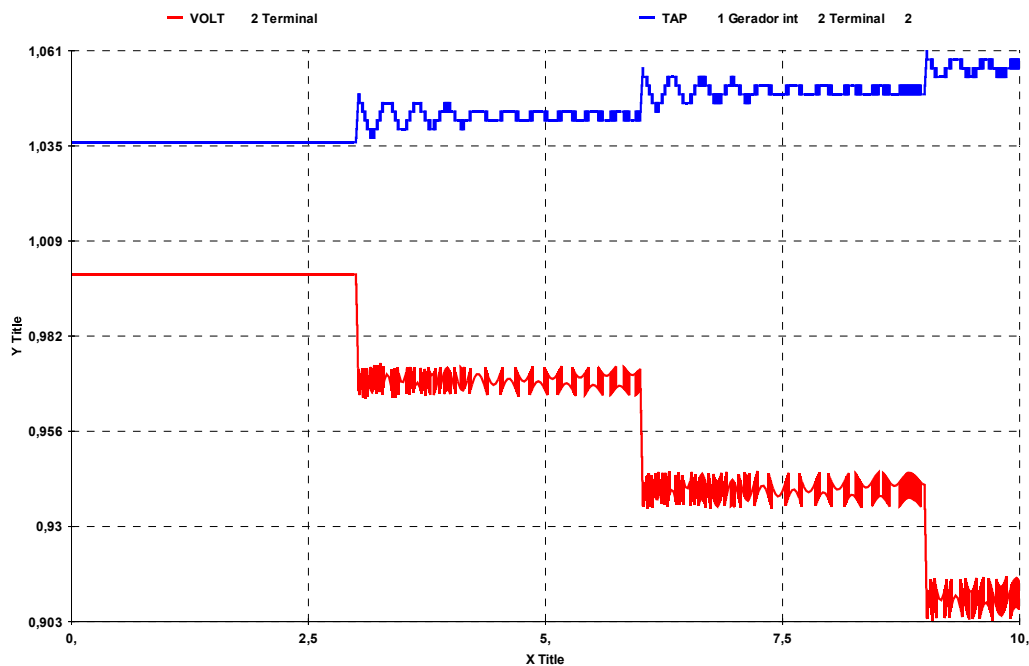


Figura 5.38 – Resultado da variação do tensão da barra terminal do transformador e do tape, carga “ZIP”, no domínio do tempo, regulador de tensão barra customizado

5.8.1.2 Região Anormal de Operação

Utilizando agora o ponto de operação inicial da Tabela 5.9 para o sistema da Figura 5.1, novamente foram efetuados comandos de alteração na referência de tensão da barra 1 e observada a mudança de tape. Os resultados são apresentados numericamente na Tabela 5.10 e graficamente na Figura 5.39.

Tabela 5.9 – Ponto de operação inicial

Região Anormal		
	Módulo	Ângulo (°)
V_0 (pu)	3,457	0,0
V_1 (pu)	0,730	-48,0
V_2 (pu)	0,709	-49,0
P (MW)	2302,0	-
Q (Mvar)	1329,0	-
Z_{trafo} (pu)	0,1057	90,0
Z_t (pu)	0,100	70,0
tape (pu)	1,045	-

Tabela 5.10 – Resultado da variação do tape em virtude da variação da tensão controlada, carga “ZIP”

Ponto de Operação	Módulo de V_0	Módulo de V_1	tape
1	3,457	0,730	1,045
2	3,457	0,700	1,044
3	3,457	0,670	1,041
4	3,457	0,640	1,036

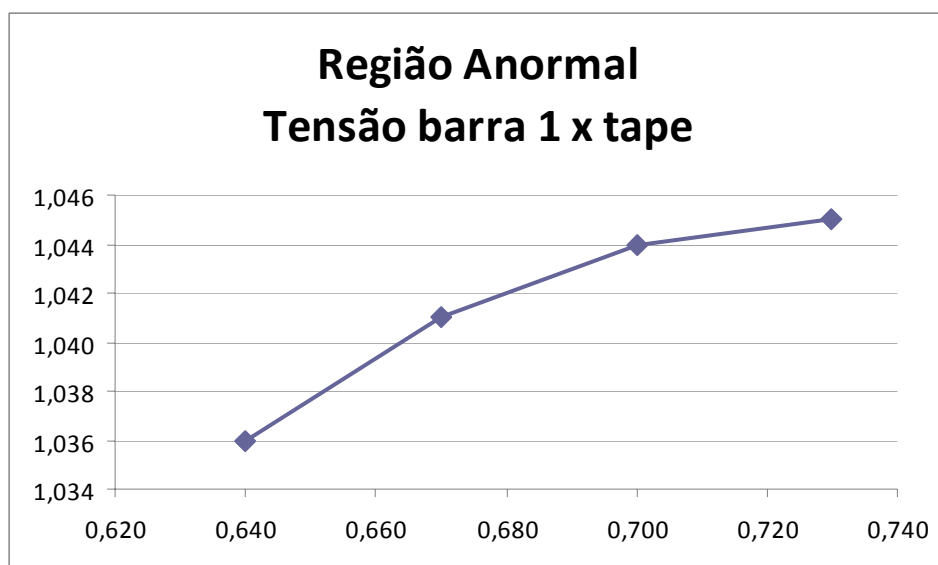


Figura 5.39 – Resultado da variação da tensão da barra 1 X tape, carga “ZIP”

No resultado da análise estática, observa-se que o sentido da variação da tensão da barra 1 é o mesmo da variação do tape, o que é oposto ao usual. Diz-se que o sistema está operando na região anormal.

Utilizando o mesmo ponto de operação inicial da Tabela 5.9 para o sistema-teste da Figura 5.1, foi realizada a simulação no domínio do tempo com carga “ZIP”. Novamente as alterações na referência da tensão foram similares às da simulação estática, ou seja, as da terceira coluna da Tabela 5.10, aplicadas em 3, 6 e 9 s, para os três tipos de reguladores de tensão citados no capítulo.

Novamente os resultados das simulações com regulador MD20 (Figura 5.40 e Figura 5.41) e com regulador customizado (Figura 5.46 e Figura 5.47) são similares. Observa-se que os sentidos de variação da tensão da barra 1 e do tape são opostos, o que é característica de um sistema operando na região normal. A lógica do controle de tensão por LTC empregada foi a usual: para

tentar reduzir a tensão de referência, como especificado, os tapes foram aumentados.

Nas simulações com regulador de tensão barra infinita (Figura 5.42 a Figura 5.45), mais uma vez, os resultados são inconclusivos.

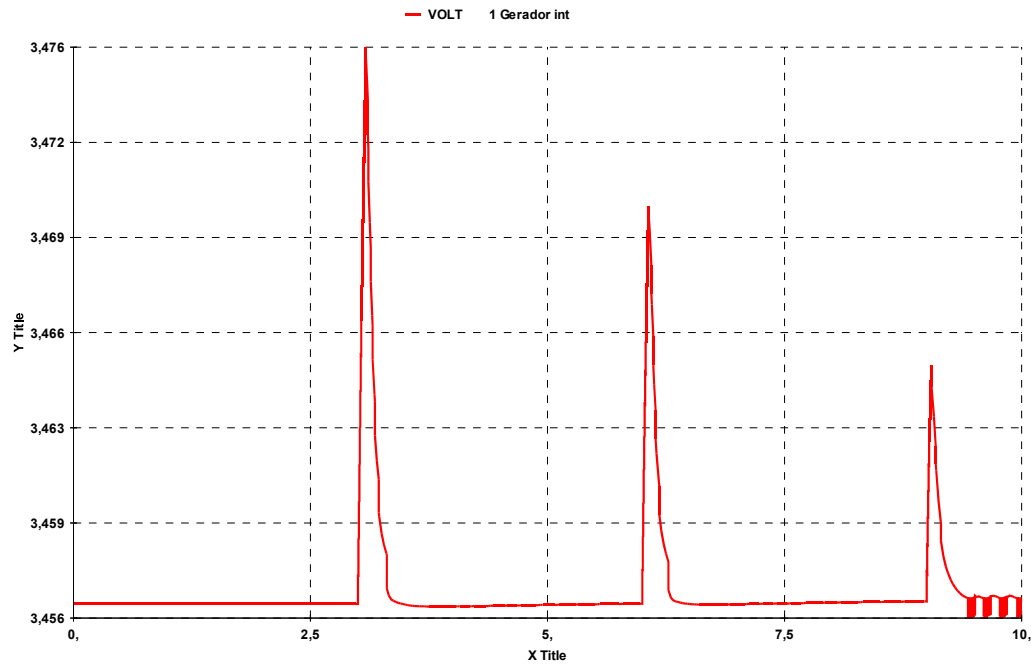


Figura 5.40 – Resultado da variação da tensão da barra 0, carga “ZIP”, no domínio do tempo, regulador de tensão MD20 do ANATEM

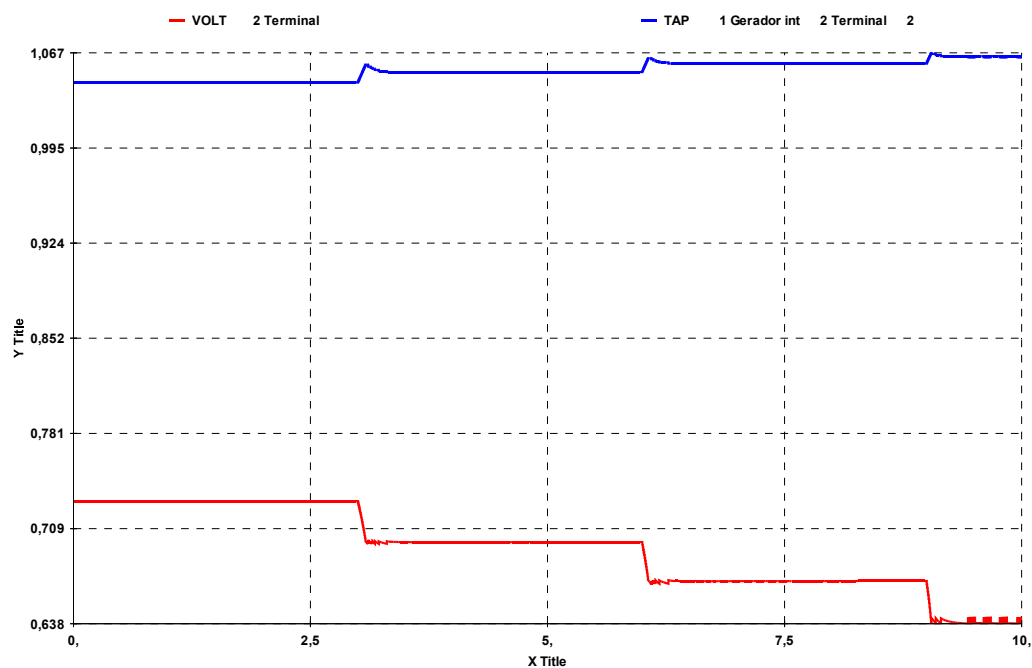


Figura 5.41 – Resultado da variação da tensão da barra 1 e do tape, carga “ZIP”, no domínio do tempo, regulador de tensão MD20 do ANATEM

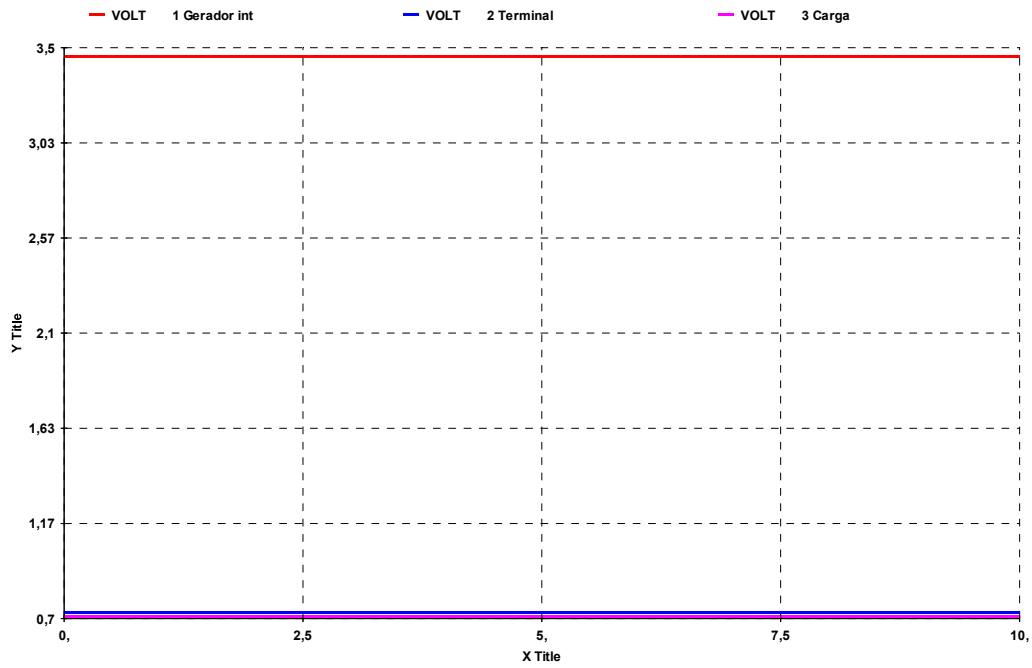


Figura 5.42 – Resultado da variação da tensão das 3 barras, carga “ZIP”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita

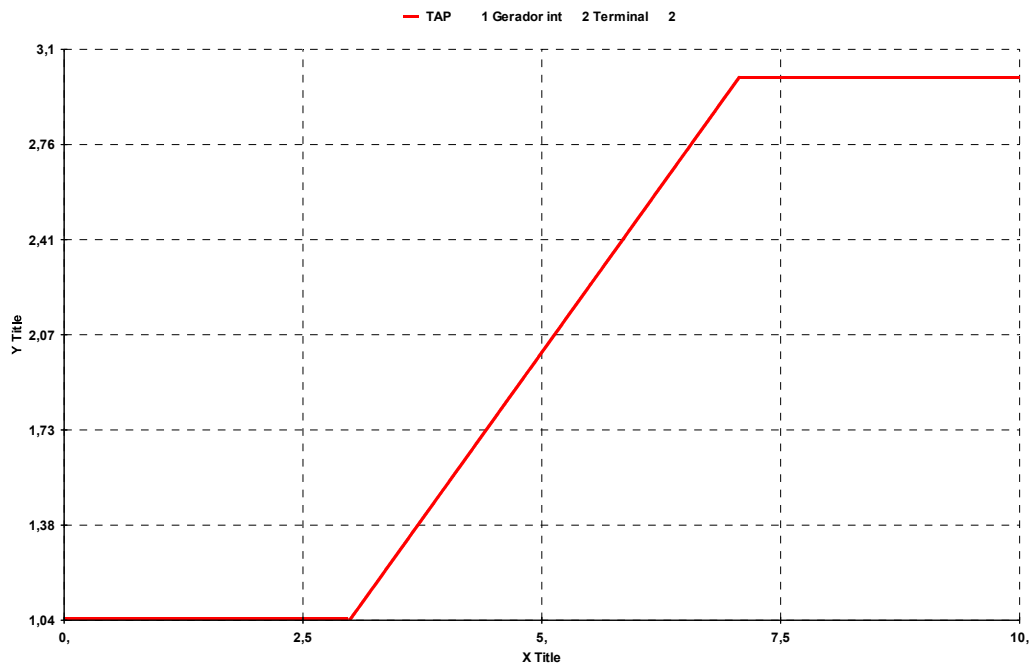


Figura 5.43 – Resultado da variação do tape, carga “ZIP”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita

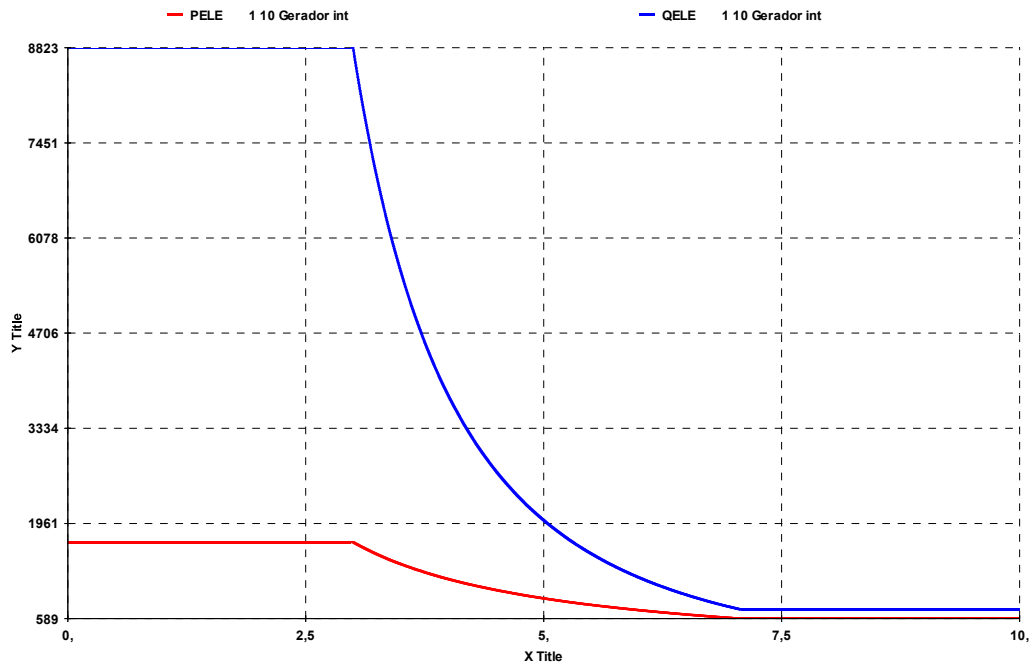


Figura 5.44 – Resultado da variação das potências geradas, carga “ZIP”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita

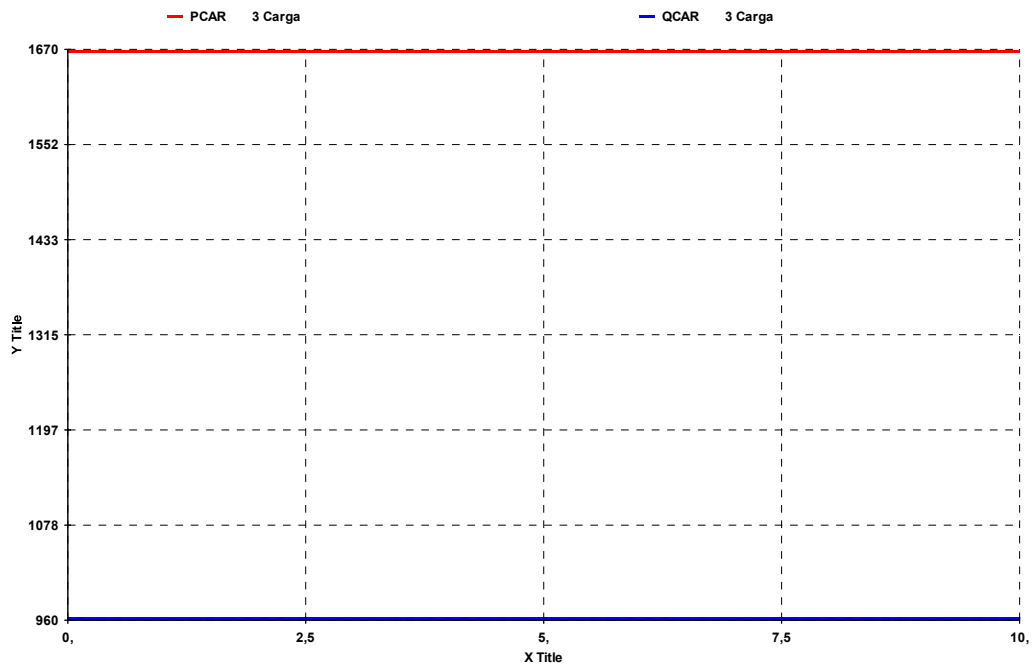


Figura 5.45 – Resultado da variação das potências consumidas, carga “ZIP”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra infinita

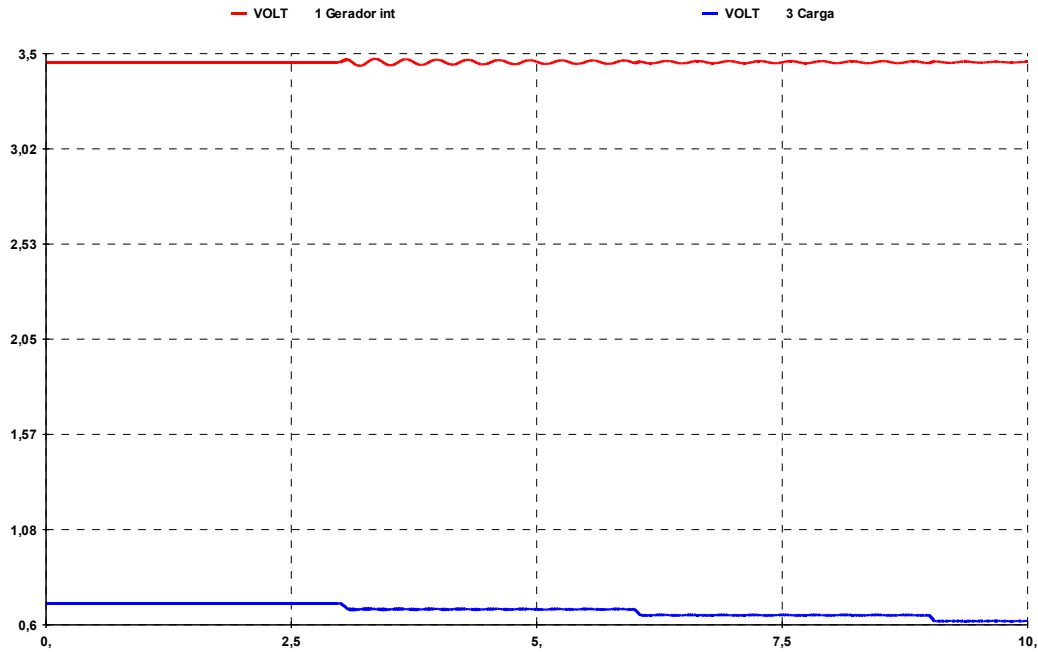


Figura 5.46 – Resultado da variação da tensão da barra de geração e de carga, carga “ZIP”, no domínio do tempo , regulador de tensão customizado

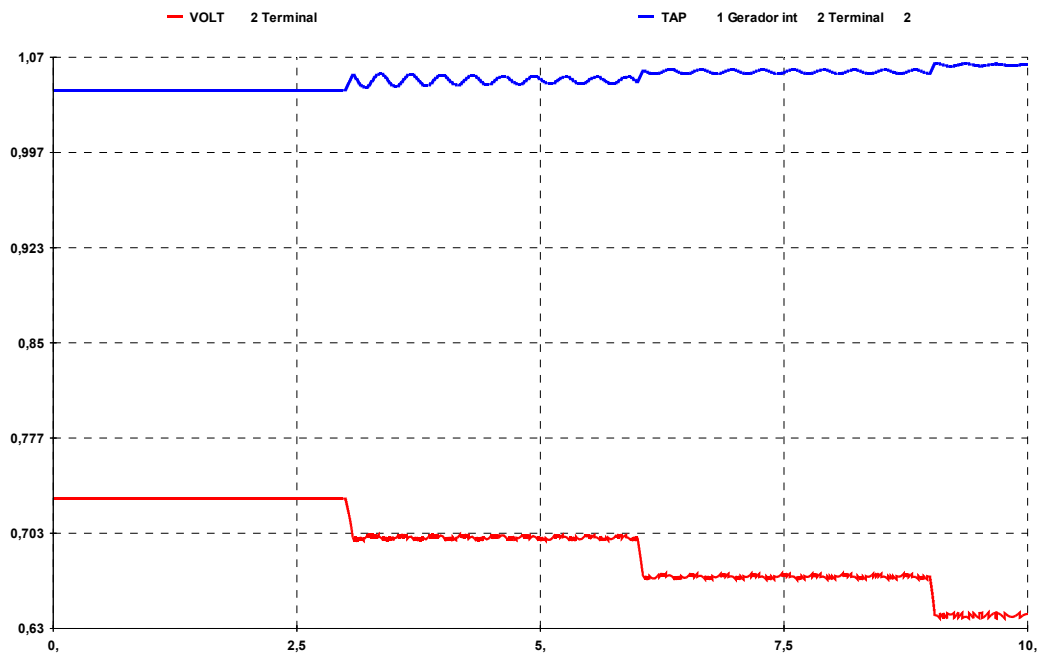


Figura 5.47 – Resultado da variação do tensão da barra terminal do transformador e do tape, carga “ZIP”, no domínio do tempo , regulador de tensão barra customizado

Ao invés de ocorrer instabilidade do controle de tensão devido ao movimento do tape oposto ao observado na simulação estática, o algoritmo empregado na simulação no domínio do tempo achou outras soluções diferentes naquela direção. Assim, após as trocas de tapes, os pontos de operação obtidos

nas simulações estática e dinâmica são diferentes, conforme Tabela 5.11, para o caso com regulador de tensão MD20.

Tabela 5.11 – Comparação dos pontos de operação das simulações estática e dinâmica

ANAREDE					
Pto de Operação	Módulo de V_0 (pu)	Módulo de V_1 (pu)	Tape (pu)	Carga (MW)	Carga (Mvar)
1	3,457	0,730	1,045	1666,9	962,3
2	3,457	0,700	1,044	1608,8	928,8
3	3,457	0,670	1,041	1552,1	896,1
4	3,457	0,640	1,036	1496,9	864,2
ANATEM					
Pto de Operação	Módulo de V_0 (pu)	Módulo de V_1 (pu)	Tape (pu)	Carga (MW)	Carga (Mvar)
1	3,457	0,730	1,045	1666,90	962,35
2	3,457	0,699	1,052	1591,98	919,08
3	3,457	0,670	1,059	1522,84	879,71
4	3,457	0,638	1,064	1449,80	836,69

Tentativas de aumentar a parcela “potência constante” na composição da carga “ZIP” resultaram em problemas de instabilidade numérica do algoritmo empregado no programa de simulação dinâmica.

Com a configuração de carga “ZIP” é possível observar o fenômeno de instabilidade de tensão na simulação estática. Na simulação dinâmica, o resultado na região anormal, para este sistema de 3 barras da Figura 5.1 é diferente da simulação estática.

5.9 Análise dos Resultados

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, a convergência é bem mais difícil e não foi alcançada nem na região normal, que supostamente é mais simples.

O uso da carga tipo "impedância constante" não possibilita análises do efeito oposto ao esperado da relação tape x tensão controlada. Apesar de ser obtida convergência no domínio do tempo, o sistema sempre se comporta de forma usual.

O uso da carga "ZIP" reúne as características das cargas "impedância constante", "corrente constante" e "potência constante", permitindo que sejam observados os fenômenos de estabilidade de tensão. Consegue-se também a desejada convergência. Com o ponto de operação da seção 5.8.1.2, na simulação dinâmica, não foi possível observar o efeito reverso.

As simulações com regulador de tensão barra infinita, utilizado para evitar que os sistemas de controle do regulador de tensão e do trocador de tapes interajam e provoquem conclusões equivocadas, não funcionaram a contento para este circuito de 3 barras, com resultados inesperados e inconclusivos.

6

Análise do Efeito do Controle de Tensão com LTCs em um Sistema-Teste de 10 barras, em Regime Permanente e Dinâmico

6.1

Introdução

Neste capítulo, para comprovar a possibilidade de ocorrência de fenômenos associados à estabilidade de tensão, serão simulados eventos associados ao controle de tensão por LTCs, manual ou automático. Será avaliado o efeito de ações de controle em regime permanente e no domínio do tempo em um sistema-teste com 10 barras, 3 geradores e 6 transformadores. O diagrama unifilar deste sistema está mostrado na Figura 6.1.

Para os testes com LTC automático, será alterada a tensão de referência da barra 11, controlada pelo transformador e observado o comportamento do tape. Para os testes com LTC manual, será alterado o tape do transformador entre as barras 10 e 11 e observada a variação das tensões das barras.

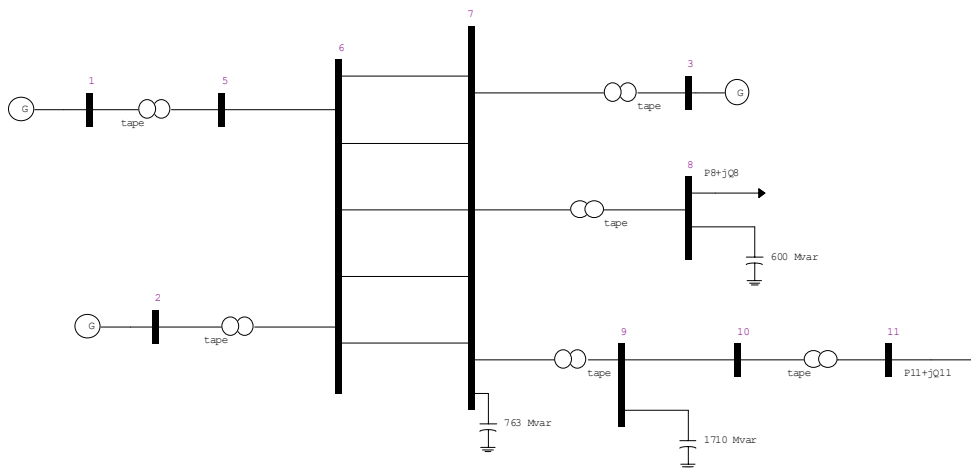


Figura 6.1 – Diagrama unifilar do sistema-teste de 10 barras

Os parâmetros das linhas e transformadores, retirados de [10] estão reproduzidos na Tabela 6.1 e na Tabela 6.2.

Tabela 6.1 – Dados dos circuitos CA do sistema-teste de 10 barras

Barra DE	Barra PARA	Nº do circuito	Resistência (%)	Reatância (%)	Susceptância (Mvar)
5	6	1	0,00	0,40	0,0
6	7	1	0,15	2,88	234,6
6	7	2	0,15	2,88	234,6
6	7	3	0,15	2,88	234,6
6	7	4	0,15	2,88	234,6
6	7	5	0,15	2,88	234,6
9	10	1	0,10	0,30	0,0

Tabela 6.2 – Dados dos transformadores do sistema-teste de 10 barras

Barra DE	Barra PARA	Nº do circuito	Resistência (%)	Reatância (%)
1	5	1	0,00	0,20
2	6	1	0,00	0,45
3	7	1	0,00	1,25
8	7	1	0,00	0,30
9	7	1	0,00	0,26
10	11	1	0,00	0,10

6.2 Controle de Tensão por LTC Automático

Conforme mencionado, o objetivo é manter a tensão da barra controlada pelo transformador no valor desejado através da variação do tape do transformador designado para efetuar este controle, sem que haja intervenção do operador. O transformador entre as barras 10 e 11 controlará a tensão na barra 11. A modelagem de carga para estas simulações é $35\%Z^{cte}$, $35\%I^{cte}$ e $30\%P^{cte}$. A escolha da modelagem da carga visa convergência das simulações dinâmicas com a maior parcela possível de carga “potência constante”.

6.3 Análise em Regime Permanente

A análise em regime permanente serve para verificar a região de operação na qual se encontram os pontos testados e ainda fornecer o ponto de operação inicial para a análise dinâmica.

6.3.1 Região Normal de Operação

Para esta simulação foi utilizado o ponto de operação da Tabela 6.3. Na Tabela 6.4 estão detalhadas as posições iniciais dos tapes que, com exceção do transformador entre as barras 10 e 11, não sofrem alterações durante a simulação. Na Tabela 6.5 está mostrada a variação da tensão na barra 10 e do tape do transformador citado anteriormente quando da variação da tensão de referência da barra 11. Na Figura 6.2 apresenta-se graficamente os valores da Tabela 6.5.

As cargas ativa e reativa, mostradas nas colunas 6 e 7 da Tabela 6.3, são referidas às tensões apresentadas na coluna 2.

Tabela 6.3 – Ponto de operação inicial

Barra	Tensão (pu)	Ângulo (°)	Geração (MW)	Geração (Mvar)	Carga (MW)	Carga (Mvar)
1	0,980	0,0	3781,0	899,8	0,0	0,0
2	0,964	-7,2	1736,0	324,9	0,0	0,0
3	0,955	-20,0	1154,0	166,1	0,0	0,0
5	1,092	-3,6	0,0	0,0	0,0	0,0
6	1,077	-11,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	1,048	-27,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,928	-32,0	0,0	0,0	3032,0	940,7
9	0,967	-32,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,886	-38,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	1,003	-40,0	0,0	0,0	3395,0	974,1

Tabela 6.4 – Posição dos tapes no ponto de operação inicial

Barra DE	Barra PARA	Tape
1	5	0,886
2	6	0,886
3	7	0,902
8	7	0,900
9	7	0,926
10	11	0,875

Tabela 6.5 – Resultado da variação da tensão controlada (barra 11) e tape do transformador entre as barras 10 e 11

Ponto de Operação	Módulo de V_{10}	Módulo de V_{11}	tape
1	0,886	1,003	0,874
2	0,795	1,100	0,716

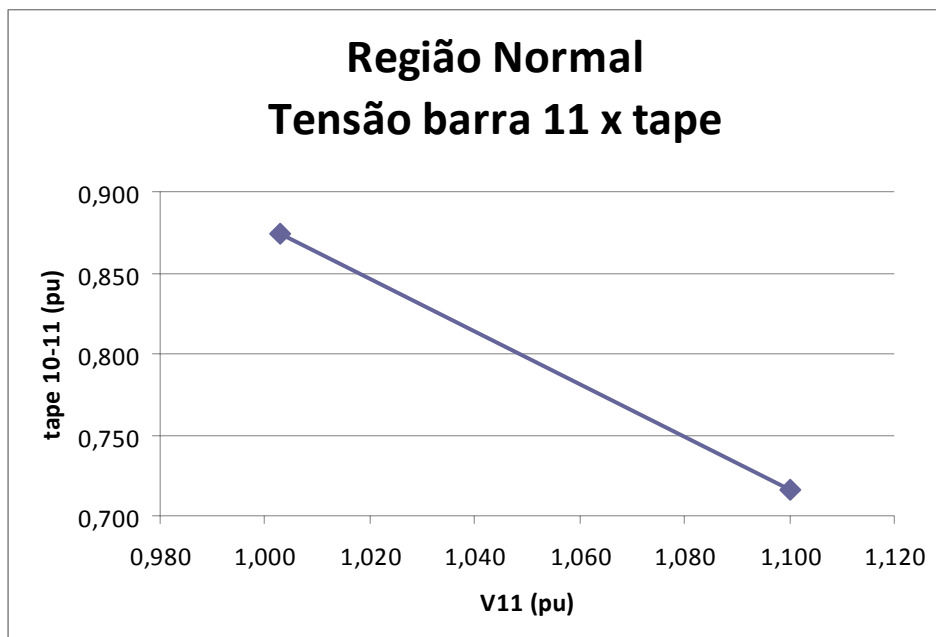


Figura 6.2 – Resultado da variação da tensão da barra 11 X tape do transformador entre as barras 10 e 11

Como pode ser observado, as variações da tensão da barra 11 e do tape do transformador ocorrem em sentido inverso, que é o esperado. Diz-se que o ponto de operação está na região normal de operação. Assim, para que a tensão da barra 11 seja reduzida, o tape do transformador deve aumentar.

6.3.2 Região Anormal de Operação

Para esta simulação foi utilizado o ponto de operação da Tabela 6.6 com as posições iniciais dos tapes conforme Tabela 6.7. Na Tabela 6.8 está mostrada a variação da tensão na barra 10 e do tape quando da variação da tensão de referência da barra 11. Na Figura 6.3 mostra-se graficamente os valores da Tabela 6.8.

Assim como na seção 6.3.1, as cargas ativa e reativa, mostradas nas colunas 6 e 7 da Tabela 6.6, são referidas às tensões apresentadas na coluna 2.

Tabela 6.6 – Ponto de operação inicial

Barra	Tensão (pu)	Ângulo (°)	Geração (MW)	Geração (Mvar)	Carga (MW)	Carga (Mvar)
1	0,822	0,0	1749,0	2801,0	0,0	0,0
2	0,714	-1,2	1736,0	1019,0	0,0	0,0
3	0,692	-27,0	450,2	744,1	0,0	0,0
5	0,869	-2,5	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,756	-8,6	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,564	-35,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,478	-46,0	0,0	0,0	1829,0	563,4
9	0,564	-45,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,472	-56,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,453	-61,0	0,0	0,0	1822,0	522,4

Tabela 6.7 – Posição dos tapes no ponto de operação inicial

Barra DE	Barra PARA	Tape
1	5	0,886
2	6	0,886
3	7	0,999
8	7	0,900
9	7	1,080
10	11	1,013

Tabela 6.8 – Resultado da variação do módulo da tensão controlada (barra 11), da tensão na barra 10 e do tape do transformador entre as barras 10 e 11

Ponto de Operação	Módulo de V_{10}	Módulo de V_{11}	tape
1	0,472	0,453	1,013
2	0,499	0,460	1,054

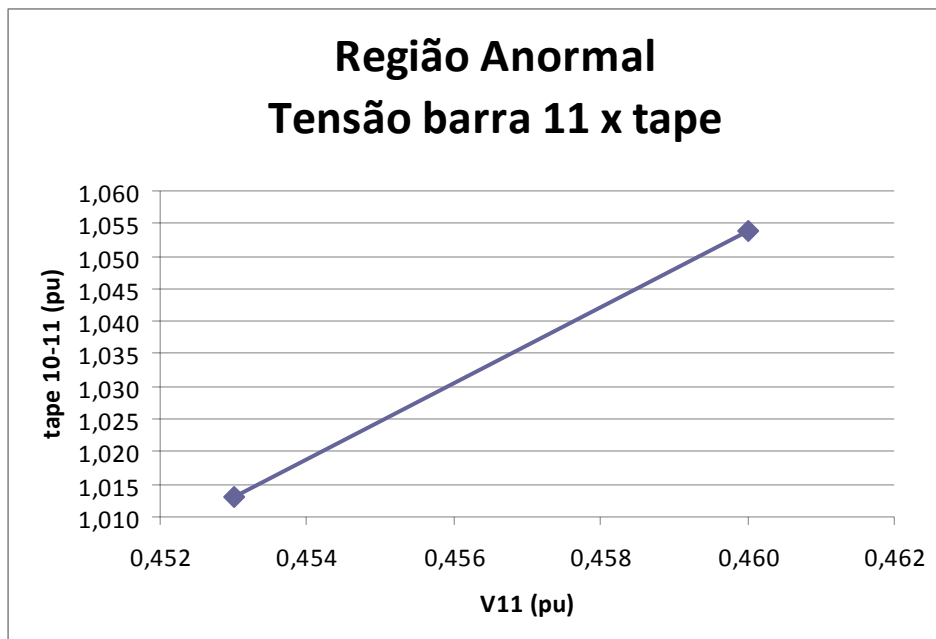


Figura 6.3 – Resultado da variação da tensão da barra 11 X tape do transformador entre as barras 10 e 11

6.4 Análise no Domínio do Tempo

A análise no domínio do tempo serve para observação contínua do comportamento do sistema, partindo de um ponto da simulação estática, cuja região de operação é conhecida. Espera-se que os resultados encontrados sejam equivalentes nas duas análises.

6.4.1 Região Normal de Operação

Para esta simulação foi utilizado o ponto de operação da Tabela 6.3 e a perturbação é a mesma da Tabela 6.5, ou seja, alteração na tensão de referência da barra 11, aplicada em 2 s. Os tapes do LTC tem variação contínua, sem limites inferior e superior e sem retardo entre operações. Os resultados estão mostrados na Figura 6.4 e na Tabela 6.9

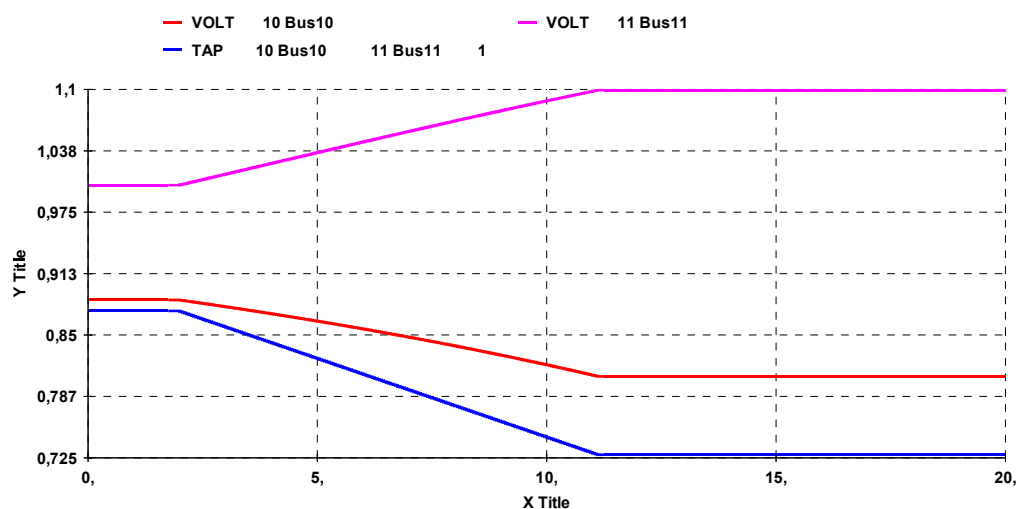


Figura 6.4 - Resultado da variação da tensão das barras 10, do tape contínuo e ilimitado e da tensão da barra 11, no domínio do tempo

Tabela 6.9 – Pontos iniciais (0 s) e finais (20 s) da simulação no domínio do tempo

Ponto de Operação	Módulo de V_{10}	Módulo de V_{11}	tape
1	0,886	1,003	0,874
2	0,808	1,099	0,728

Nesta simulação, pode ser observado que os sentidos da variação da tensão da barra 10 e do tape são os mesmos e opostos ao sentido da variação da tensão na barra 11, efeito esperado para um sistema na região normal de operação. Quantitativamente os resultados são bem próximos aos da simulação estática, quando comparando a Tabela 6.9 com a Tabela 6.5.

Ao inserir limites mínimo (0,75 pu) e máximo (1,20 pu) na atuação do LTC e repetir a simulação anterior, o LTC age para elevar a tensão na barra 11, porém ao chegar ao seu limite inferior, sua atuação cessa. Desta forma, não é alcançado o valor desejado na tensão controlada na barra 11, conforme pode ser observado na Figura 6.5 e na Tabela 6.10.

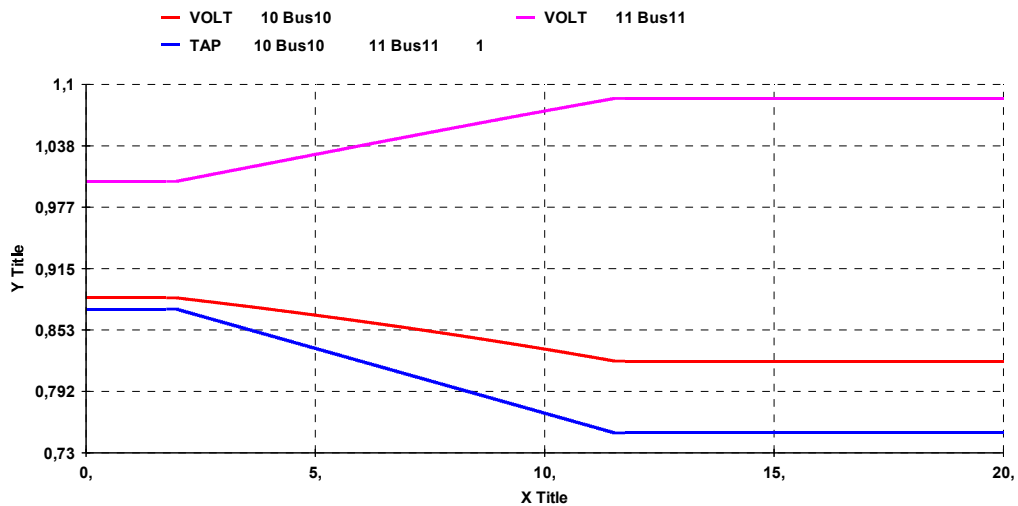


Figura 6.5 - Resultado da variação da tensão das barras 10, do tape contínuo e limitado e da tensão da barra 11, no domínio do tempo

Tabela 6.10 – Pontos iniciais (0 s) e finais (20 s) da simulação no domínio do tempo, com limitação de atuação do LTC

Ponto de Operação	Módulo de V_{10}	Módulo de V_{11}	tape
1	0,886	1,003	0,874
2	0,822	1,086	0,750

Repetindo a simulação anterior e discretizando o tape em degraus de 0,018 pu com retardo de 0,5 s entre as atuações, têm-se o mesmo resultado final da simulação anterior, porém a atuação do tape é mais rápida, conforme pode ser observado na Figura 6.6.

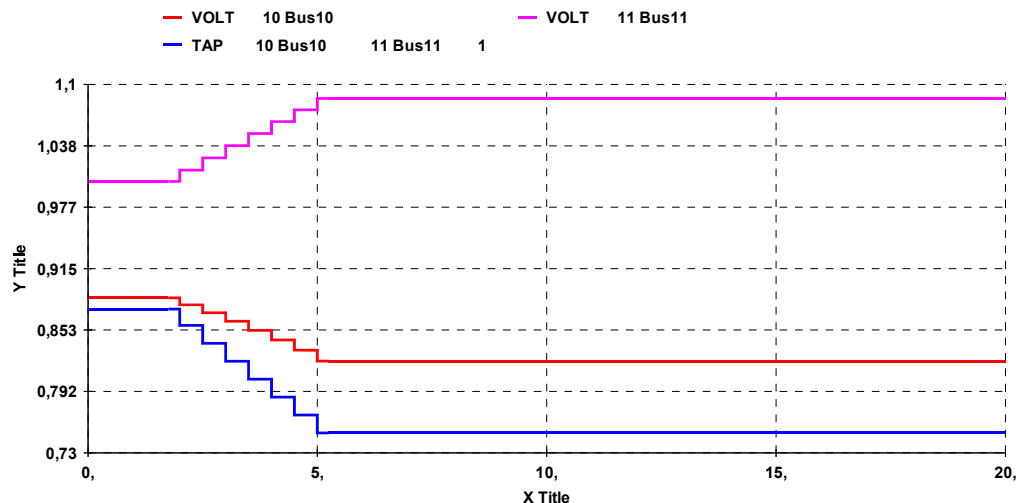


Figura 6.6 - Resultado da variação da tensão das barras 10, do tape discreto e limitado e da tensão da barra 11, no domínio do tempo

6.4.2 Região Anormal de Operação

Para esta simulação foi utilizado o ponto de operação da Tabela 6.6, aplicando a mesma alteração na tensão de referência da barra 11 da Tabela 6.8 em 2 s. Os tapes do LTC tem variação contínua, sem limites inferior e superior e sem retardo entre operações. A variação da tensão da barra 11, do tape contínuo e ilimitado e da tensão da barra 10 está mostrada na Figura 6.7.

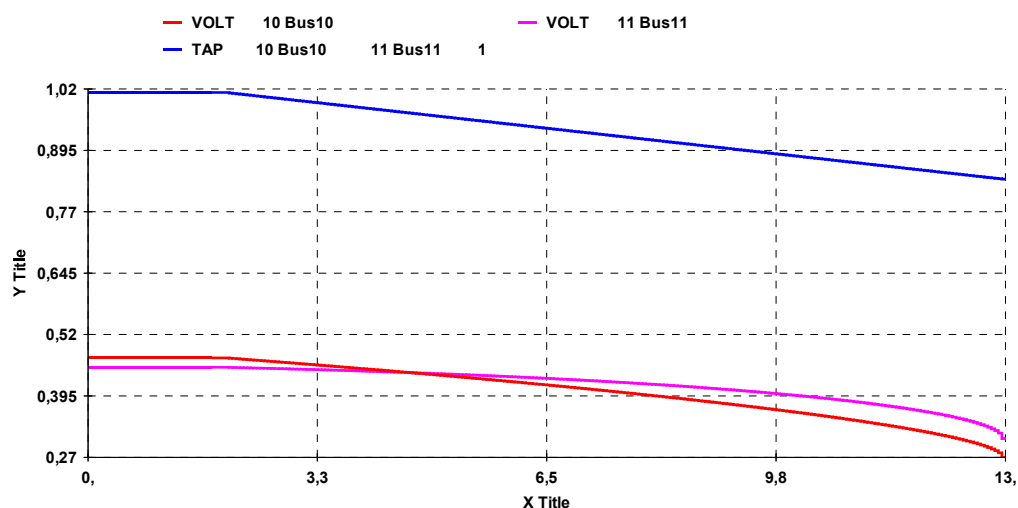


Figura 6.7 - Resultado da variação da tensão da barra 11, do tape contínuo e ilimitado e da tensão da barra 10, no domínio do tempo

Observa-se que a lógica empregada pelo algoritmo foi a usual: buscando incrementar a tensão na barra 11, conforme especificação, o valor do tape foi

trocado para valores menores. O resultado, entretanto, foi oposto ao esperado: ao invés de subir, a tensão na barra 11 decresceu.

Nesta direção, o algoritmo não chegou à solução obtida na simulação estática e não encontrou nenhuma outra solução. Assim, em 13 s a simulação foi interrompida em virtude do número máximo de iterações excedido no processo de solução pós-impacto da rede CA.

Ao tentar aumentar a tensão da barra 11 para atingir o novo valor de referência, o circuito de controle do LTC atuou corretamente, isto é, conforme sua lógica de construção, reduzindo seu tap. Como o sistema encontra-se na região anormal de operação, conforme observado na simulação estática, esta manobra produz um efeito reverso, reduzindo a tensão controlada para valores ainda mais baixos, até a divergência do algoritmo, já que uma outra solução não foi encontrada.

Na prática, a manobra para elevação da tensão da barra 11, que já se encontrava muito baixa, produziria efeitos desastrosos para o sistema, culminando com um colapso de tensão.

Ao inserir limites mínimo (0,85 pu) e máximo (1,20 pu) na atuação do LTC e repetir a simulação anterior, o LTC age para elevar a tensão na barra 11, porém ao chegar ao seu limite inferior, sua atuação cessa. Este efeito é benéfico para o sistema, pois a atuação do LTC, como na simulação anterior, levaria o sistema ao colapso de tensão. Com a interrupção da sua atuação, o sistema manteve-se estável, mesmo com uma tensão inferior à inicial. Os resultados desta simulação estão mostrados na Figura 6.8 e Tabela 6.11.

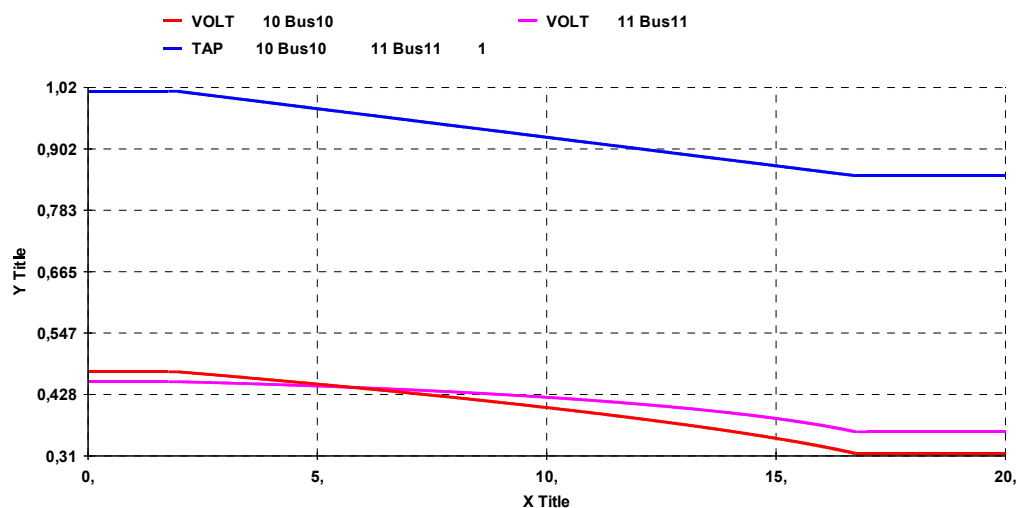


Figura 6.8 - Resultado da variação da tensão da barra 11, do tape contínuo e limitado e da tensão da barra 10, no domínio do tempo

Tabela 6.11 – Pontos iniciais (0 s) e finais (20 s) da simulação no domínio do tempo, com limitação de atuação do LTC

Ponto de Operação	Módulo de V_{10}	Módulo de V_{11}	tape
1	0,472	0,453	1,013
2	0,314	0,356	0,850

Assim como na seção 6.4.1, foi discretizado o tape em degraus de 0,018 pu com retardo de 0,5 s entre as atuações. O resultado é o mesmo da simulação anterior, porém a atuação do tape é mais rápida, conforme pode ser observado na Figura 6.9.

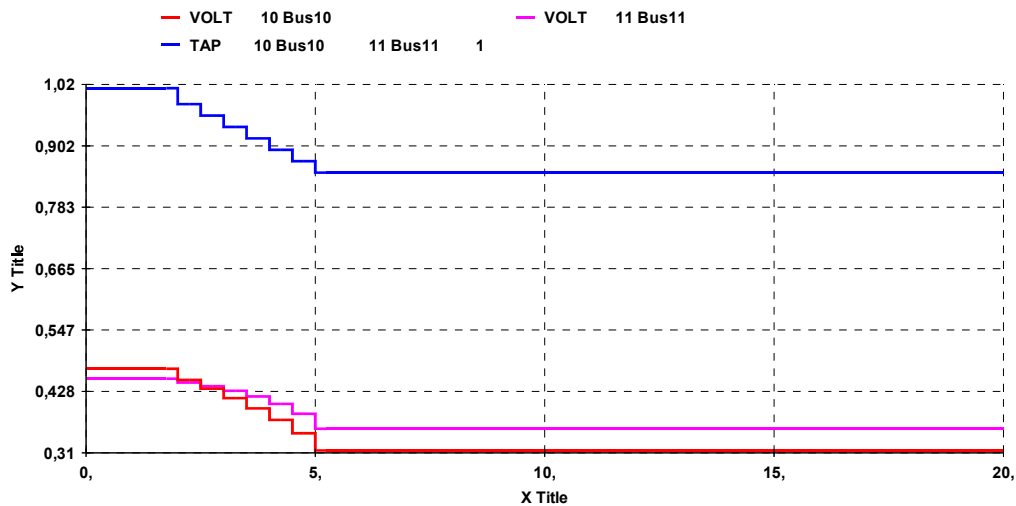


Figura 6.9 - Resultado da variação da tensão das barras 10, do tape discreto e limitado e da tensão da barra 11, no domínio do tempo

6.5 Controle de Tensão por LTC Manual

Nesta seção, o objetivo é verificar a alteração da tensão das barras 10 e 11 ao alterar manualmente o tape do transformador entre as estas barras. Será utilizada a mesma modelagem de carga, referida à tensão da coluna 2, assim como foi feito na seção 6.2.

6.5.1 Análise em Regime Permanente

6.5.1.1 Regiões Normal e Anormal de Operação

Para esta simulação foi utilizado o ponto de operação da Tabela 6.12, dito na região anormal em consequência dos resultados da análise estática. As posições iniciais dos tapes estão mostradas na Tabela 6.13.

Como o controle da tensão é realizado pelo LTC de forma manual, nesta simulação é variado o tape do transformador entre as barras 10 e 11 e verificados os módulos das tensões destas barras. O resultado está apresentado na Tabela 6.14.

Tabela 6.12 – Ponto de operação inicial

Barra	Tensão (pu)	Ângulo (°)	Geração (MW)	Geração (Mvar)	Carga (MW)	Carga (Mvar)
1	0,822	0,0	1749,0	2801,0	0,0	0,0
2	0,714	-1,2	1736,0	1019,0	0,0	0,0
3	0,692	-27,0	450,2	744,1	0,0	0,0
5	0,869	-2,5	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,756	-8,6	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,564	-35,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,478	-46,0	0,0	0,0	1829,0	563,4
9	0,564	-45,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,472	-56,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,453	-61,0	0,0	0,0	1822,0	522,4

Tabela 6.13 – Posição dos tapes no ponto de operação inicial

Barra DE	Barra PARA	Tape
1	5	0,886
2	6	0,886
3	7	0,999
8	7	0,900
9	7	1,080
10	11	1,013

Tabela 6.14 – Resultado da variação do tape do transformador entre as barras 10 e 11 e dos módulos das tensões nas barras 10 e 11

Ponto de Operação	tape	Módulo de V_{10}	Módulo de V_{11}
1	1,013	0,472	0,453
2	1,020	0,477	0,455
3	1,025	0,481	0,456
4	1,030	0,484	0,459
5	1,050	0,496	0,460
6	1,060	0,503	0,461
7	1,100	0,525	0,464
8	1,150	0,551	0,466
9	1,200	0,573	0,465
10	1,250	0,594	0,462
11	1,300	0,612	0,457
12	1,350	0,628	0,452

Partindo do ponto de operação 1, o tape do transformador é aumentado, provocando aumento do módulo da tensão na barra 11. Este é um efeito inverso e diz-se que a barra 11 está na região anormal de operação. Este efeito perdura até o ponto de operação 8, destacado na Tabela 6.14 em negrito. A partir daí, ao seguir aumentando o tape do mesmo transformador, o módulo da tensão da barra 10 continua aumentando, porém o da barra 11 passa a reduzir, ambos efeitos esperados, insinuando que o ponto de operação passou para a região normal de operação. Na Figura 6.10 apresenta-se os valores da Tabela 6.14 de forma gráfica, o que permite visualizar mais facilmente a mudança da região de operação.

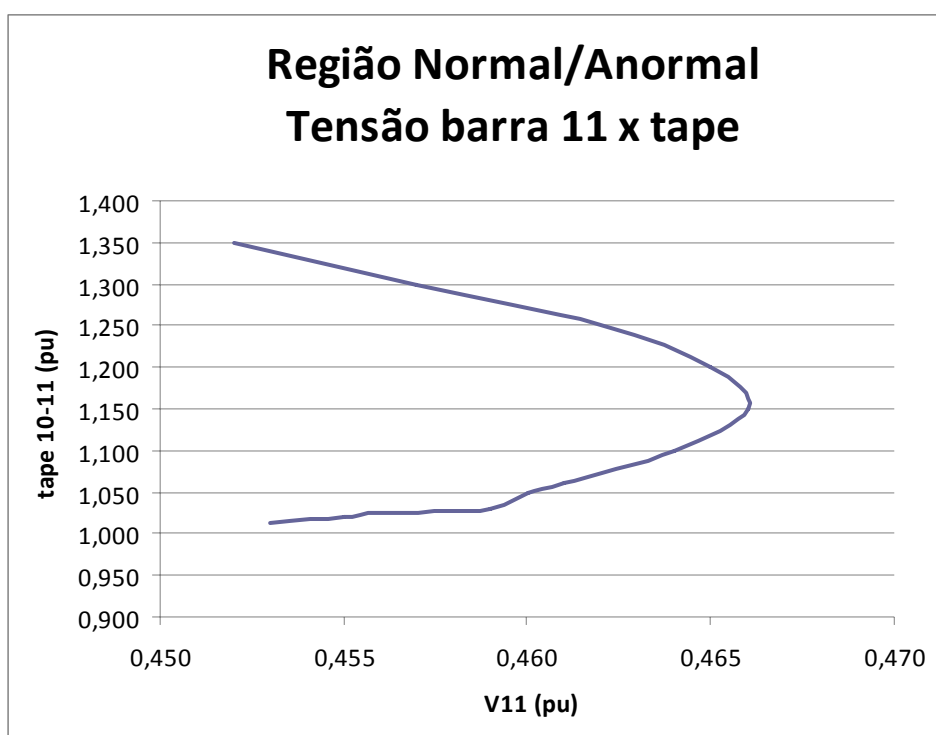


Figura 6.10 – Resultado da variação da tensão da barra 11 X tape do transformador entre as barras 10 e 11

Assim sendo, conclui-se que do ponto de operação 1 ao 7 (Tabela 6.14), o sistema encontra-se na região anormal de operação. Nos pontos de operação 9 a 12, o sistema encontra-se na região normal de operação. No ponto 8, o sistema encontra-se na região de transição entre as duas regiões, o que corresponderia à “ponta do nariz” da curva V_{tape} .

6.5.2 Análise no Domínio do Tempo

6.5.2.1 Regiões Normal e Anormal de Operação

Para esta simulação foi utilizado o ponto de operação da Tabela 6.12 e as perturbações são as mesmas alterações de tape da Tabela 6.14, aplicadas de $t=2$ s até $t=22$ s, de 2 em 2 segundos. Os resultados desta simulação estão apresentados na Figura 6.11 para as variações impostas ao tape e apresentadas na Figura 6.12.

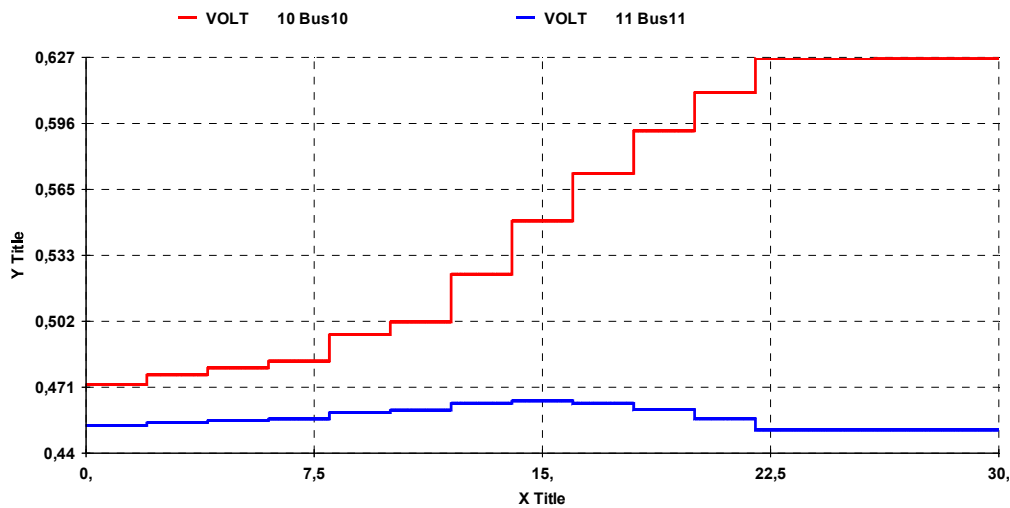


Figura 6.11 - Resultado da variação do módulo da tensão das barras 10 e 11, para incrementos sucessivos no tape, no domínio do tempo

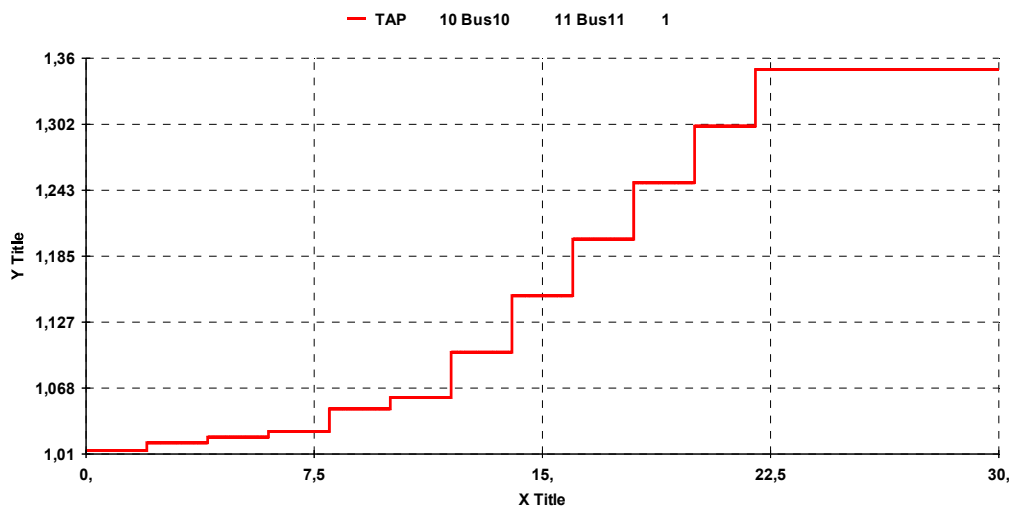


Figura 6.12 - Alteração imposta ao tape do transformador entre as barras 10 e 11, no domínio do tempo

O resultado da simulação no domínio do tempo é similar ao apresentado na seção 6.5.1. Até $t=14$ s, ao aumentar o tape do transformador entre as barras 10 e 11, ambos módulos de tensão aumentam, o que significa que a barra 11 está apresentando efeito oposto ao esperado. Após $t=16$ s, o mesmo aumento de tape provoca redução na tensão da barra 11, que é um efeito esperado. A Tabela 6.15 apresenta os resultados da simulação dinâmica e permite a comparação com a simulação em regime permanente (Tabela 6.14). Os resultados são bem próximos.

Tabela 6.15 – Módulo das tensões das barras 10 e 11 e tape do transformador entre estas duas barras, retirados da simulação no domínio do tempo

Ponto de Operação	t (s)	tape	Módulo de V_{10}	Módulo de V_{11}
1	0+	1,013	0,472	0,453
2	2+	1,020	0,477	0,454
3	4+	1,025	0,480	0,455
4	6+	1,030	0,484	0,456
5	8+	1,050	0,496	0,459
6	10+	1,060	0,502	0,460
7	12+	1,100	0,525	0,463
8	14+	1,150	0,550	0,465
9	16+	1,200	0,572	0,464
10	18+	1,250	0,592	0,461
11	20+	1,300	0,610	0,456
12	22+	1,350	0,627	0,451

6.6 Análise dos resultados

Através de simulações estáticas e dinâmicas, foi possível demonstrar a existência do fenômeno de efeito reverso do controle de tensão através de LTC.

Nas simulações apresentadas, o sistema-teste foi levado ao colapso de tensão em virtude da atuação automática da troca de tapes de um LTC. Como a lógica de controle deste equipamento não diferencia a região de operação em que se encontra sistema, sua atuação é exatamente a mesma para ambos os lados da curva V_{tape} . Ao reduzir o tape na região anormal, a tensão na barra 11 também foi reduzida, quando o desejado seria aumentá-la. Ao inserir limites mínimos e máximos, o fenômeno também é observado e o sistema só não é levado ao colapso de tensão porque o limite do LTC é atingido. Eles serviram

para limitar a atuação do LTC e impedir que o sistema apresentasse tensões ainda mais baixas.

Nas simulações utilizando a troca manual de tapes do LTC, o sistema parte de um ponto de operação na região anormal. Ao aumentar o tape, a tensão na barra secundária do transformador (na região anormal) aumenta. Esta resposta aproxima o ponto de operação para a “ponta do nariz” até que há uma inversão do efeito e o aumento no tape do LTC passa a provocar uma redução na tensão secundária. Este efeito foi demonstrado em simulações estáticas e dinâmicas.

As normas de operação vigentes hoje para a operação do sistema elétrico não prevêm a operação na região anormal. Desta forma, todas as medidas operativas determinadas nos documentos pertinentes são tomadas na região normal de operação, o que pode levar a situações como a da seção 6.2, onde uma medida corretiva leva a um afundamento da tensão do sistema.

7

Análise do Efeito do Controle de Tensão com Compensadores Estáticos de Reativos (CER) em um Sistema-Teste de 39 Barras, em Regime Permanente e Dinâmico

7.1

Introdução

Neste capítulo, para comprovar a possibilidade de ocorrência de fenômenos associados à estabilidade de tensão, serão simulados eventos associados ao controle de tensão, utilizando um compensador estático de potência reativa. Será avaliado o efeito de ações de controle em regime permanente e no domínio do tempo.

O sistema a ser utilizado é o *New England* IEEE-39 barras, com 10 geradores e 12 transformadores, modificado com a inserção de um CER na barra 16. O diagrama unifilar deste sistema está mostrado na Figura 7.1.

Para efeito de testes, será alterada a tensão de referência da barra 16, barra onde está conectado o compensador e é controlada por ele, e observada a resposta do compensador estático. É esperado que, ao aumentar a tensão de referência da barra em questão, o CER aumente sua susceptância equivalente.

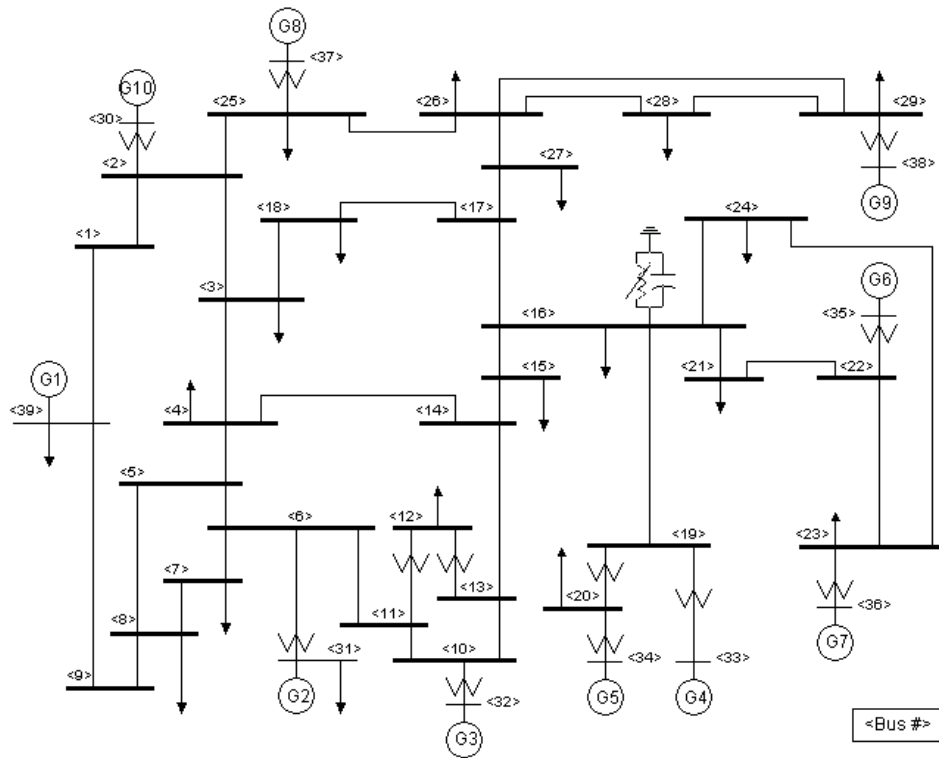


Figura 7.1 – Diagrama unifilar do sistema-teste de IEEE-39 barras *New England*

Os parâmetros das linhas e transformadores estão apresentados na Tabela 7.1 e na Tabela 7.2.

Tabela 7.1 – Dados dos circuitos CA do sistema-teste de 39 barras

Barra DE	Barra PARA	Nº do circuito	Resistência (%)	Reatância (%)	Susceptância (Mvar)
1	2	1	0,35	4,11	69,9
1	39	1	0,10	2,50	75,0
2	3	1	0,13	1,51	25,7
2	25	1	0,70	0,86	14,6
3	4	1	0,13	2,13	22,1
3	18	1	0,11	1,33	21,4
4	5	1	0,08	1,28	13,4
4	14	1	0,08	1,29	13,8
5	6	1	0,02	0,26	4,3
5	8	1	0,08	1,12	14,8
6	7	1	0,06	0,92	11,3
6	11	1	0,07	0,82	13,9
7	8	1	0,04	0,46	7,8
8	9	1	0,23	3,63	38,0
9	39	1	0,10	2,50	120,0
10	11	1	0,04	0,43	7,3
10	13	1	0,04	0,43	7,3
13	14	1	0,09	1,01	17,2
14	15	1	0,18	2,17	36,6
15	16	1	0,09	0,94	17,1
16	17	1	0,07	0,89	13,4
16	19	1	0,16	1,95	30,4
16	21	1	0,08	1,35	25,5
16	24	1	0,03	0,59	6,8
17	18	1	0,07	0,82	13,2
17	27	1	0,13	1,73	32,2
21	22	1	0,08	1,40	25,7
22	23	1	0,06	0,96	18,5
23	24	1	0,22	3,50	36,1
25	26	1	0,32	3,23	51,3
26	27	1	0,14	1,47	24,0
26	28	1	0,43	4,74	78,0
26	29	1	0,57	6,25	102,9
28	29	1	0,14	1,51	24,9

Tabela 7.2 – Dados dos transformadores do sistema-teste de 39 barras

Barra DE	Barra PARA	Nº do circuito	Resistência (%)	Reatância (%)	Tape
2	30	1	0,00	1,81	1,025
6	31	1	0,00	2,50	1,070
10	32	1	0,00	2,00	1,070
11	12	1	0,16	4,35	1,006
12	13	1	0,16	4,35	1,006
19	20	1	0,07	1,38	1,060
19	33	1	0,07	1,42	1,070
20	34	1	0,09	1,80	1,009
22	35	1	0,00	1,43	1,025
23	36	1	0,05	2,72	1,000
25	37	1	0,06	2,32	1,025
29	38	1	0,08	1,56	1,025

O CER utilizado nas simulações em regime permanente é próximo ao ideal, com X_{SL} igual a 0,001%. Desta forma, baseado em (4.6), na página 73.

$$X_{SL} = \frac{V_{\min} - V_{\max}}{I_{\max} - I_{\min}} \approx 0 \quad (7.1)$$

X_{SL} é a inclinação (negativa) da reta de controle do CER, conforme Figura 4.4 e Figura 4.5.

Aplicando em (4.9):

$$V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} I = 0 \Rightarrow V_{cont} \approx V_{esp} \quad (7.2)$$

Operando com seus limites máximo e mínimo abertos, o CER estará sempre na região controlada, controlando a tensão da barra 16.

O modo de controle adotado foi potência gerada e a modelagem de carga utilizada nas simulações em regime permanente e também no regime dinâmico foi 100% P^{cte} .

Para as simulações no domínio do tempo, os geradores foram modelados como barra infinita ou sem regulador de tensão, a fim de não haver sobreposição de controles. Foram utilizados dois modelos para o CER: o único pré-definido

(*built-in*) do programa computacional ANATEM e um customizado, cujos diagramas de blocos estão mostrados na Figura 7.2 e na Figura 7.3.

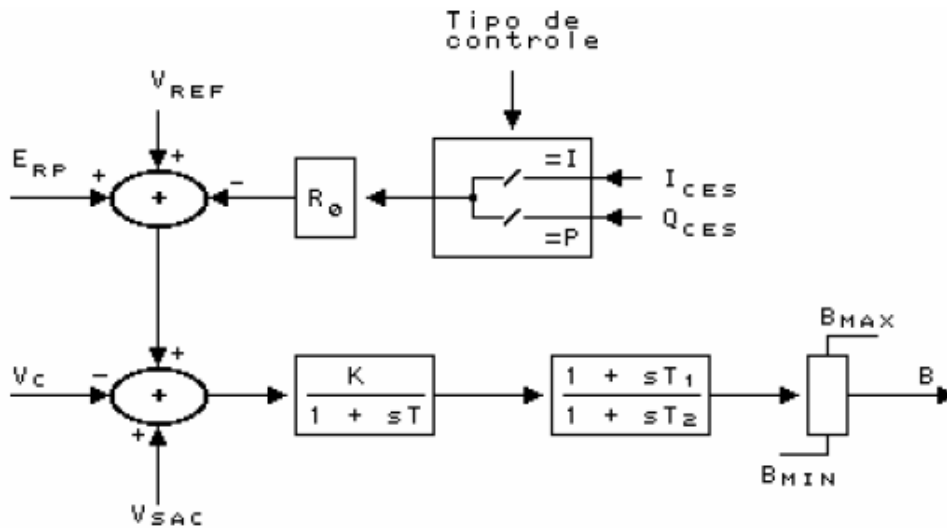


Figura 7.2 – Modelo *built-in* para simulação dinâmica do CER

onde:

- i. V_c é tensão da barra controlada pelo CER (pu);
- ii. V_{sac} é o sinal estabilizador aplicado no CER (pu);
- iii. V_{ref} é tensão de referência (valor desejado para a tensão da barra controlada) (pu);
- iv. B_{min} é susceptância mínima total do CER (pu);
- v. B_{max} é susceptância máxima total do CER (pu);
- vi. B é susceptância total do CER (pu);
- vii. R_0 é o estatismo do CER, em pu de tensão / pu de potência;
- viii. I_{ces} é a corrente injetada pelo CER (pu) – positiva se operando na faixa capacitiva – apenas para o modo de corrente;
- ix. Q_{ces} é a potência reativa injetada pelo CER (pu) – positiva se operando na faixa capacitiva;
- x. E_{rp} é o sinal adicional (pu) para fechamento das condições iniciais do fluxo de potência.

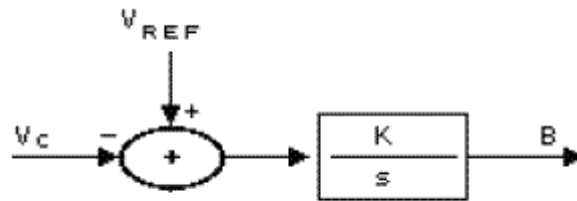


Figura 7.3 – Modelo customizado para simulação dinâmica do CER

- i. V_c é tensão da barra controlada pelo CER (pu);
- ii. V_{ref} é tensão de referência (valor desejado para a tensão da barra
- iii. B é susceptância total do CER (pu);

7.2

Análise em Regime Permanente

A análise em regime permanente serve para verificar a região de operação na qual se encontram os pontos testados e ainda fornecer o ponto de operação inicial para a análise dinâmica.

7.2.1

Regiões Normal e Anormal de Operação

Para esta simulação, foi utilizado o ponto de operação da Tabela 7.3. Foram feitas alterações na tensão controlada pelo CER na barra 16 e obtidos os pontos de operação da Tabela 7.4, onde está mostrada a variação da potência do CER, do módulo da tensão na barra 16 e a susceptância do compensador. A Figura 7.4 apresenta graficamente os valores da Tabela 7.4.

Tabela 7.3 – Ponto de operação inicial

Barra	Tensão (pu)	Ângulo (°)	Geração (MW)	Geração (Mvar)	Carga (MW)	Carga (Mvar)
1	0,966	-17,0	-	-	-	-
2	0,933	-28,0	-	-	-	-
3	0,915	-35,0	-	-	338,40	2.522,00
4	0,896	-35,0	-	-	525,50	193,40
5	0,904	-32,0	-	-	-	-
6	0,909	-31,0	-	-	-	-
7	0,895	-32,0	-	-	245,70	88,28
8	0,893	-32,0	-	-	548,60	185,00
9	0,942	-19,0	-	-	-	-
10	0,921	-30,0	-	-	-	-
11	0,916	-30,0	-	-	-	-
12	0,893	-31,0	-	-	8.934,00	92,49
13	0,915	-31,0	-	-	-	-
14	0,908	-35,0	-	-	-	-
15	0,917	-41,0	-	-	336,30	160,80
16	0,940	-41,0	-	-	1.104,00	473,00
17	0,923	-39,0	-	-	-	-
18	0,918	-38,0	-	-	166,10	31,53
19	0,980	-36,0	-	-	-	-
20	0,934	-38,0	-	-	714,70	108,30
21	0,947	-39,0	-	-	288,00	120,90
22	0,977	-33,0	-	-	-	-
23	0,970	-34,0	-	-	260,10	88,92
24	0,948	-41,0	-	-	324,30	(96,90)
25	0,922	-27,0	-	-	235,40	49,61
26	0,897	-33,0	-	-	146,10	17,87
27	0,900	-38,0	-	-	295,30	79,35
28	0,866	-29,0	-	-	216,50	29,01
29	0,862	-25,0	-	-	298,00	28,27
30	0,951	-25,0	250,00	219,60	-	-
31	0,919	-20,0	573,20	310,70	9.669,00	4.835,00
32	0,916	-20,0	650,00	307,90	-	-
33	0,940	-30,0	632,00	162,90	-	-
34	0,972	-33,0	508,00	249,80	-	-
35	0,993	-28,0	650,00	313,90	-	-
36	1,003	-25,0	560,00	153,20	-	-
37	0,898	-19,0	540,00	20,00	-	-
38	0,841	-14,0	830,00	34,53	-	-
39	0,980	-11,0	954,10	131,10	-	-

Tabela 7.4 – Resultado da variação da potência reativa gerada pelo CER, da tensão controlada (barra 16) e da susceptância do compensador

Ponto de Operação	Q gerada pelo CER (Mvar)	Módulo de V_{16} (pu)	Susceptância do CER (pu)
1	579,8	0,940	6,562
2	377,9	0,950	4,187
3	250,4	0,960	2,717
4	204,4	0,970	2,172
5	192,6	0,980	2,005
6	190,8	0,985	1,967
7	195,2	0,990	1,992
8	227,8	1,000	2,278
9	306,0	1,010	3
10	400,7	1,020	3,851
11	498,3	1,030	4,697
12	599,5	1,040	5,543
13	709,0	1,050	6,431
14	819,9	1,060	7,297
15	917,3	1,070	8,012

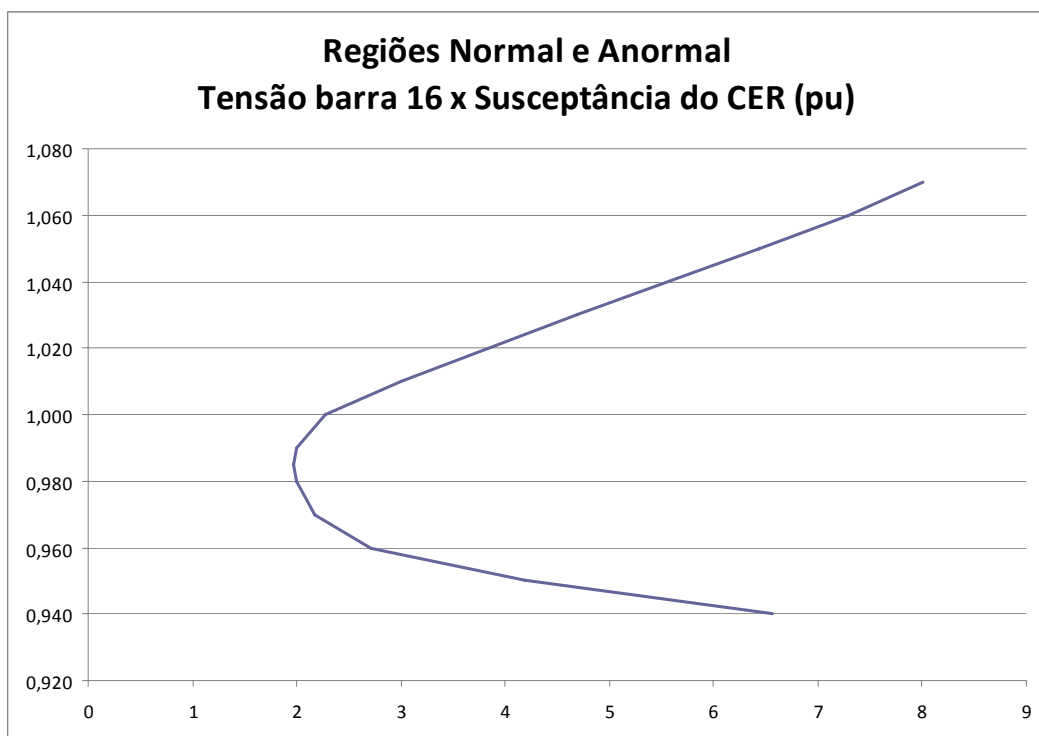


Figura 7.4 – Resultado da variação da tensão da barra 16 x susceptância do CER

Conforme pode ser observado, os pontos de operação 1 a 5 apresentam comportamento diferentes se comparados com os pontos de operação 7 a 15.

Nos pontos de operação 7 a 15, há um acréscimo da susceptância, através da adequação do ângulo de disparo dos tiristores, quando do aumento da tensão controlada, lógica usual de controle, indicando pontos na região normal de operação. Já nos pontos de 1 a 5, a relação entre grandeza controlada e controladora é invertida, indicando que o sistema encontra-se na região anormal de operação. O ponto de operação 6 encontra-se na transição entre as regiões normal e anormal.

7.3 Análise no Domínio do Tempo

7.3.1 Região Normal de Operação

Para esta simulação, foi utilizado o ponto de operação 10 da Tabela 7.4. A partir deste, foi alterada a tensão de referência do CER em +0,01 pu, em $t=5$ s, repetindo a perturbação aplicada entre os pontos 10 e 11 da Tabela 7.4. As variações da tensão controlada, da potência reativa e da susceptância equivalente são apresentadas segundo orientação abaixo

- i. Figura 7.5 a Figura 7.8 – Controlador do CER *built-in* e reguladores de tensão dos geradores barra infinita;
- ii. Figura 7.9 a Figura 7.12 – Controlador do CER customizado e reguladores de tensão dos geradores barra infinita;
- iii. Figura 7.13 a Figura 7.16 – Controlador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores.

Verifica-se que a lógica usual de controle foi empregada: a susceptância foi aumentada (através da alteração adequada do ângulo de disparo dos tiristores) para alcançar a uma tensão de referência mais alta.

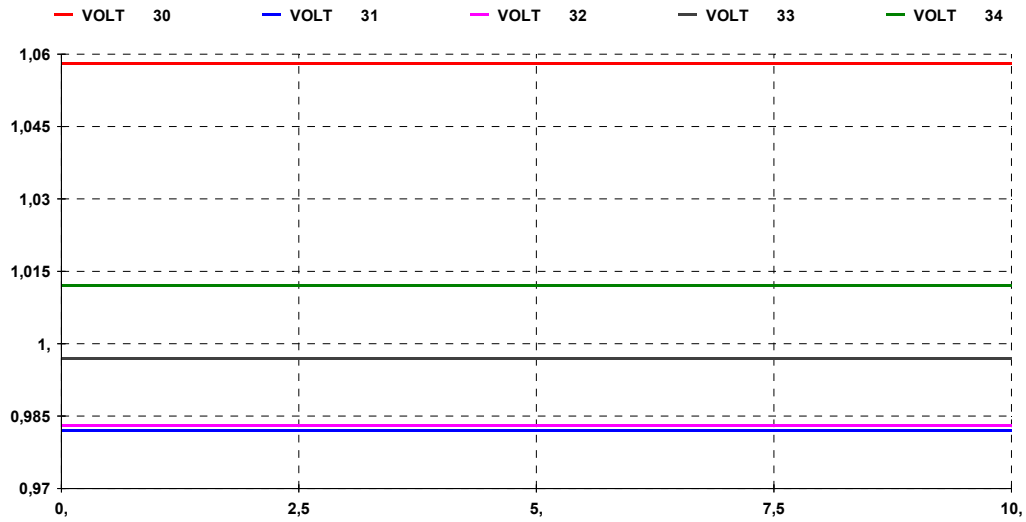


Figura 7.5 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 30 a 34, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER *built-in* e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita

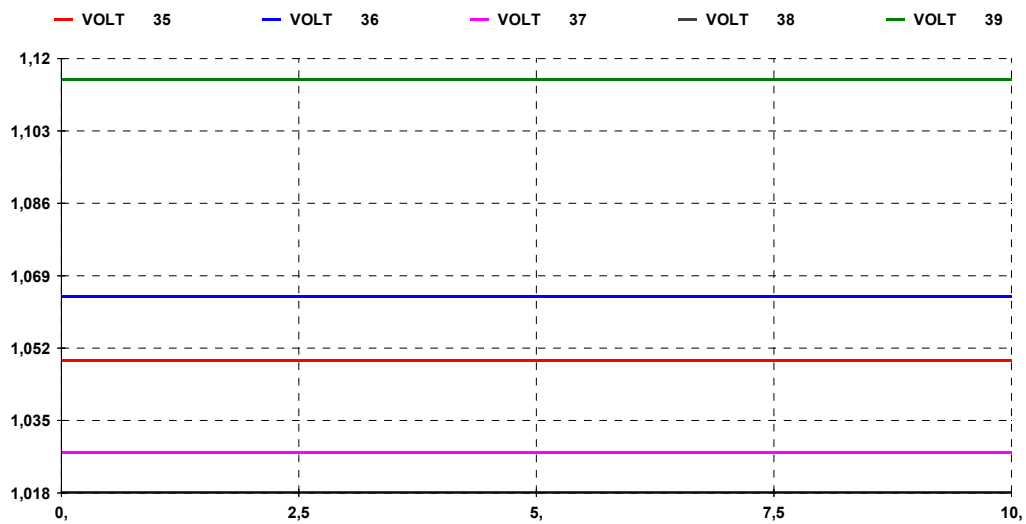


Figura 7.6 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 35 a 39, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER *built-in* e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita

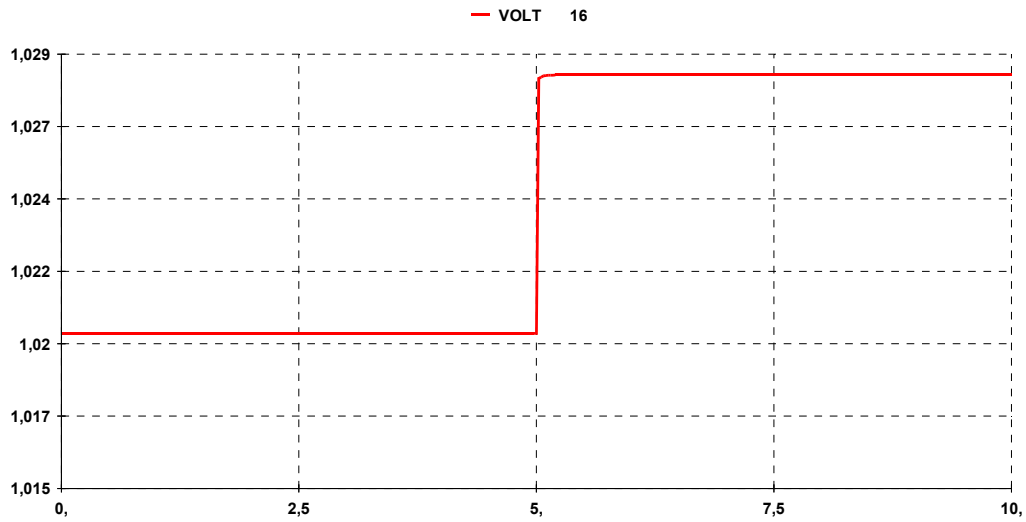


Figura 7.7 - Resultado da variação da tensão da barra 16, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER *built-in* e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita

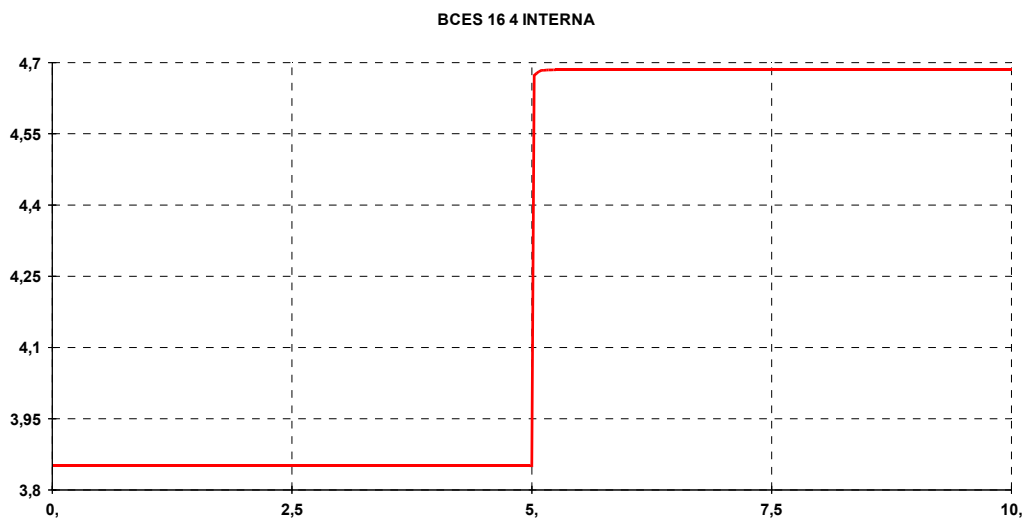


Figura 7.8 - Resultado da variação da susceptância do CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER *built-in* e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita

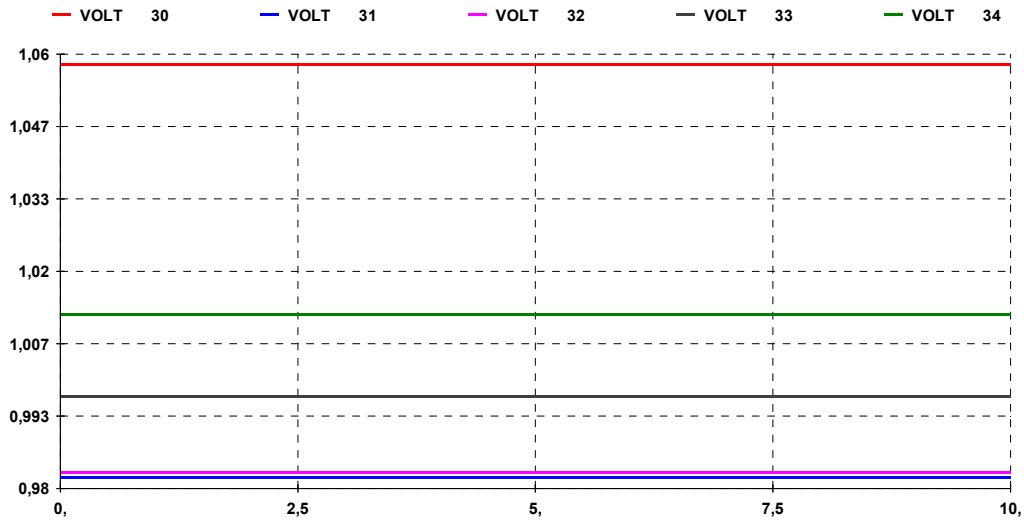


Figura 7.9 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 30 a 34, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita

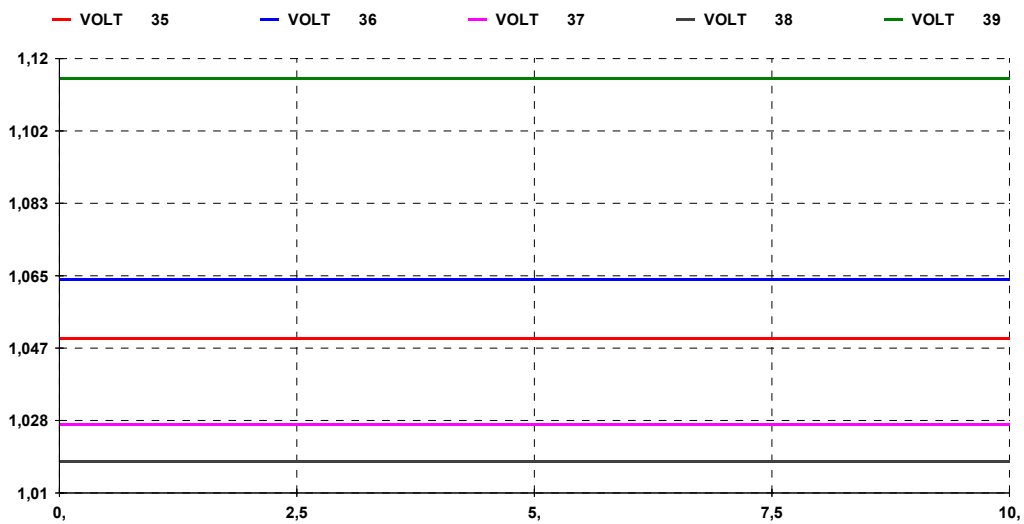


Figura 7.10 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 35 a 39, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita

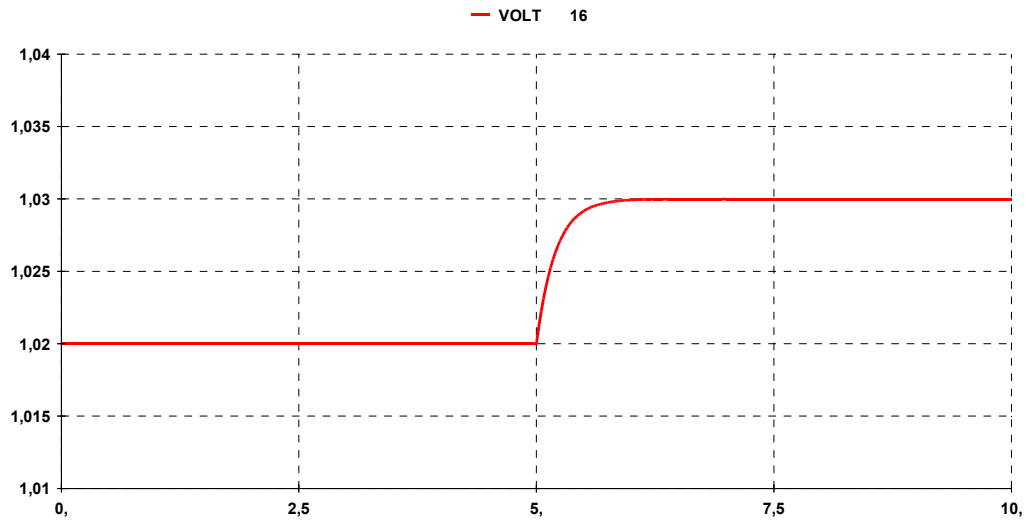


Figura 7.11 - Resultado da variação da tensão da barra 16, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita

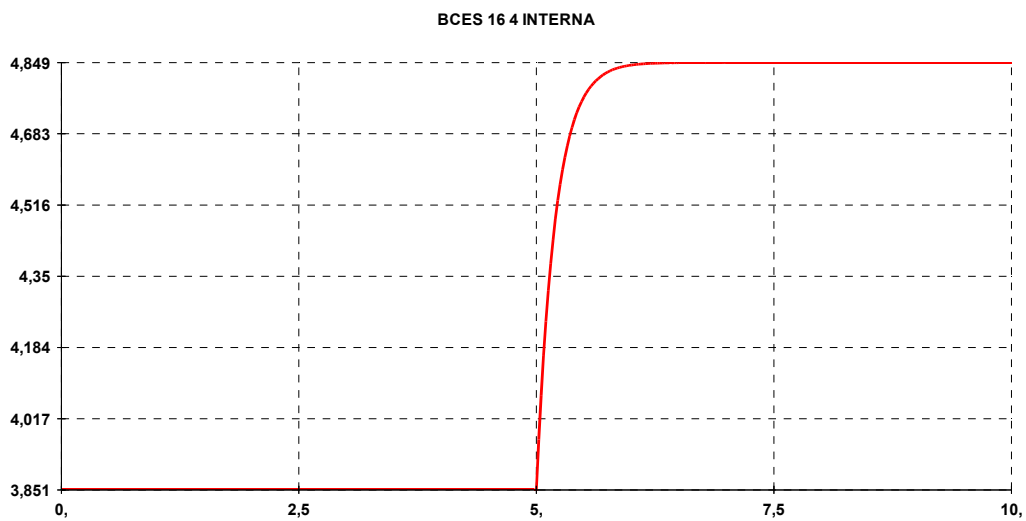


Figura 7.12 - Resultado da variação da susceptância do CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita

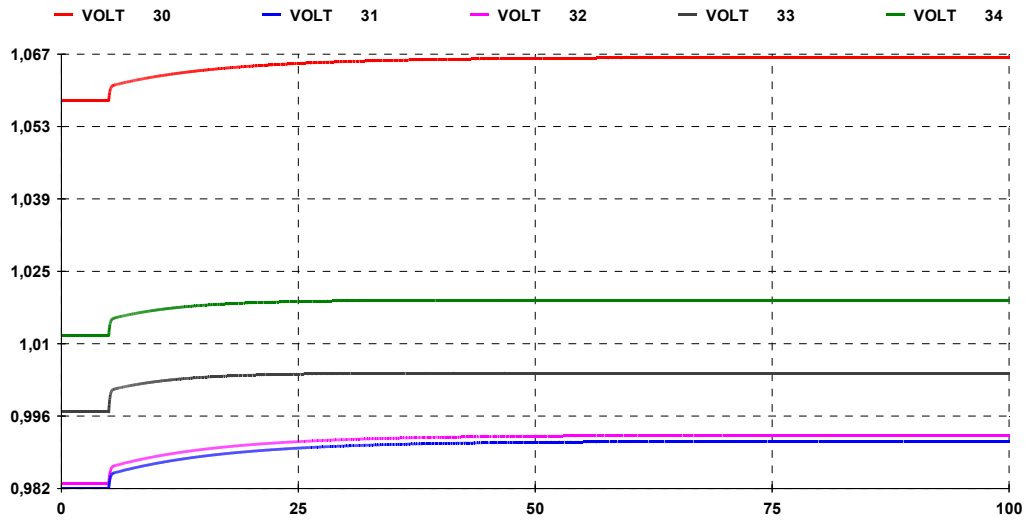


Figura 7.13 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 30 a 34, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão dos geradores

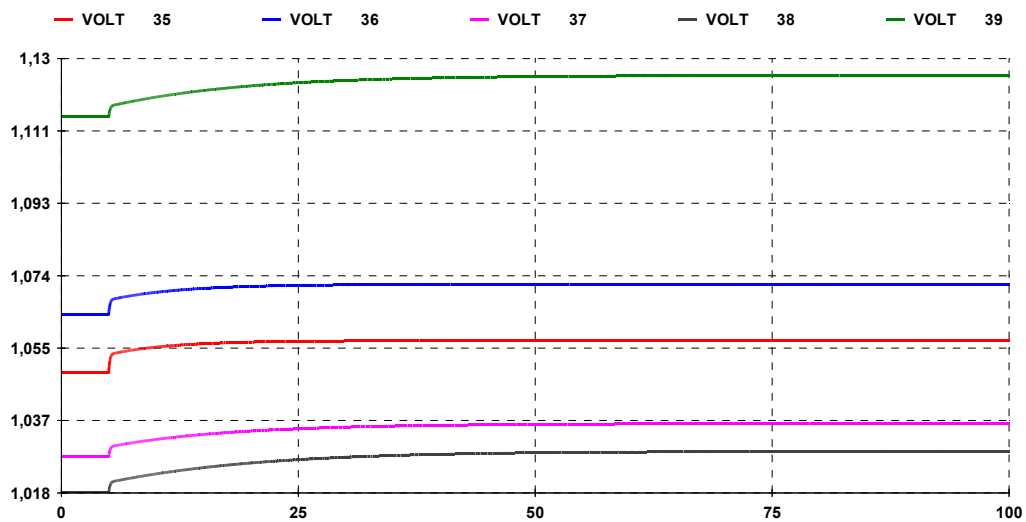


Figura 7.14 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 35 a 39, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores

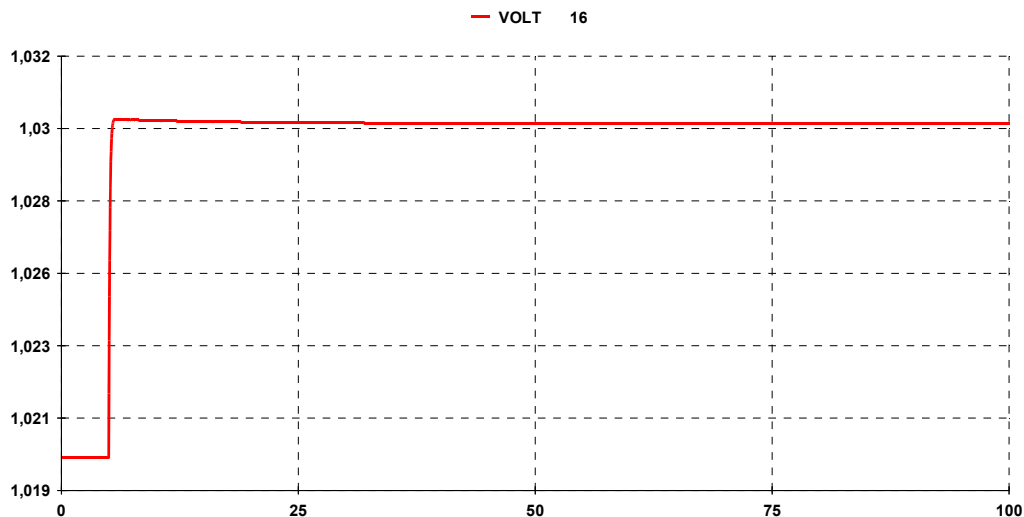


Figura 7.15 - Resultado da variação da tensão da barra 16, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores

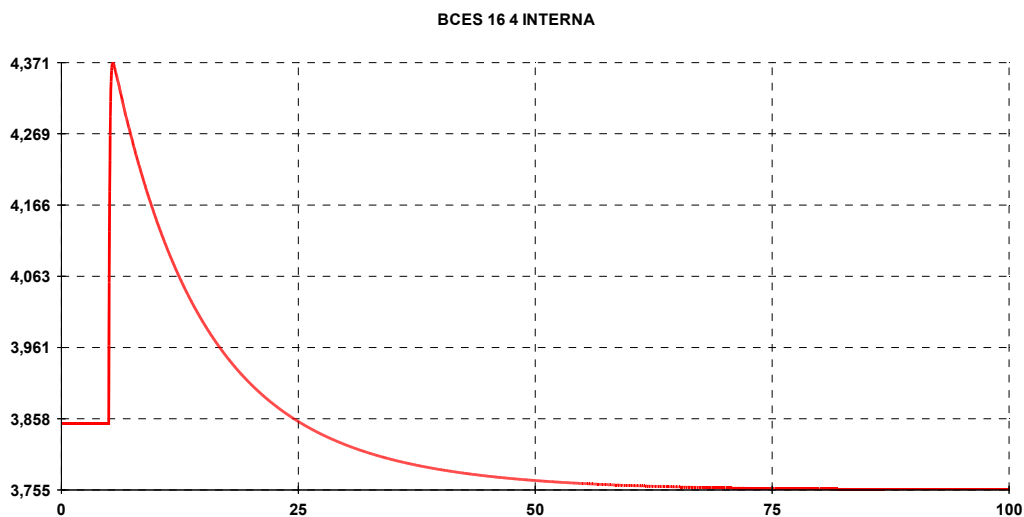


Figura 7.16 - Resultado da variação da susceptância do CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores

Os pontos de operação inicial e final da simulação no domínio do tempo são apresentados na Tabela 7.5, Tabela 7.6 e Tabela 7.7. Comparando os valores destas tabelas com a Tabela 7.4, conclui-se que os pontos de operação são coerentes.

Com o regulador *built-in*, a tensão na barra 16 converge em um valor ligeiramente inferior ao solicitado. Ao utilizar o regulador customizado, integral, o erro é reduzido a zero.

Tabela 7.5 - Pontos iniciais (0 s) e finais (10 s) da simulação no domínio do tempo, com regulador do CER *built-in*

Ponto de Operação	Q gerada pelo CER (Mvar)	Módulo de V_{16} (pu)	Susceptância do CER (pu)
10	400,655	1,020	3,851
11	495,432	1,028	4,688

Tabela 7.6 - Pontos iniciais (0 s) e finais (10 s) da simulação no domínio do tempo, com regulador do CER customizado

Ponto de Operação	Q gerada pelo CER (Mvar)	Módulo de V_{16} (pu)	Susceptância do CER (pu)
10	400,655	1,020	3,851
11	514,490	1,030	4,849

Tabela 7.7 - Pontos iniciais (0 s) e em t=10 s da simulação no domínio do tempo, com regulador do CER customizado e sem regulador de tensão nos geradores

Ponto de Operação	Q gerada pelo CER (Mvar)	Módulo de V_{16} (pu)	Susceptância do CER (pu)
10	400,655	1,020	3,851
11	439,678	1,030	4,145

As simulações estática e dinâmica apresentam resultados equivalentes. As variações da tensão na barra 16 e da susceptância do CER ocorrem no mesmo sentido. Quando da redução da tensão de referência, o CER se torna mais indutivo, efeito esperado, caracterizando um caso na região normal de operação.

7.3.2 Região Anormal de Operação

Para esta simulação, foi utilizado o ponto de operação 2 da Tabela 7.4. Foi aplicada uma variação de tensão de +0,01 pu em t=5 s, repetindo o ocorrido entre os pontos de operação 2 e 3 da Tabela 7.4. As variações da tensão controlada, da potência reativa absorvida e da susceptância equivalente são apresentadas segundo orientação abaixo.

- i. Figura 7.17 a Figura 7.20 – Controlador do CER *built-in* e reguladores de tensão dos geradores barra infinita;

- ii. Figura 7.21 a Figura 7.24 – Controlador do CER customizado e reguladores de tensão dos geradores barra infinita;
- iii. Figura 7.25 a Figura 7.28 – Controlador do CER customizado e sem reguladores de tensão dos geradores.

Verifica-se que a lógica usual de controle foi empregada: a susceptância foi aumentada (através da alteração adequada do ângulo de disparo dos tiristores) para alcançar a uma tensão de referência mais alta.

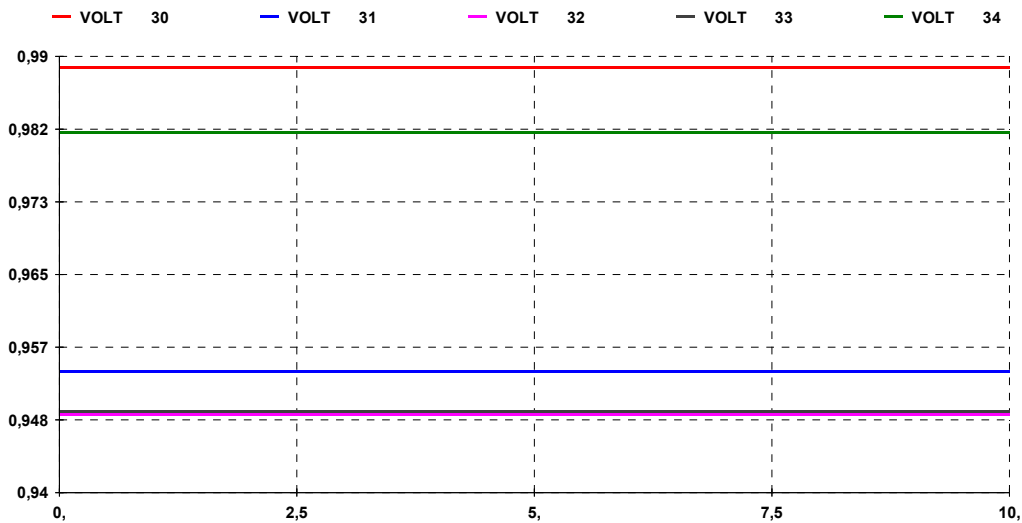


Figura 7.17 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 30 a 34, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER *built-in* e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita

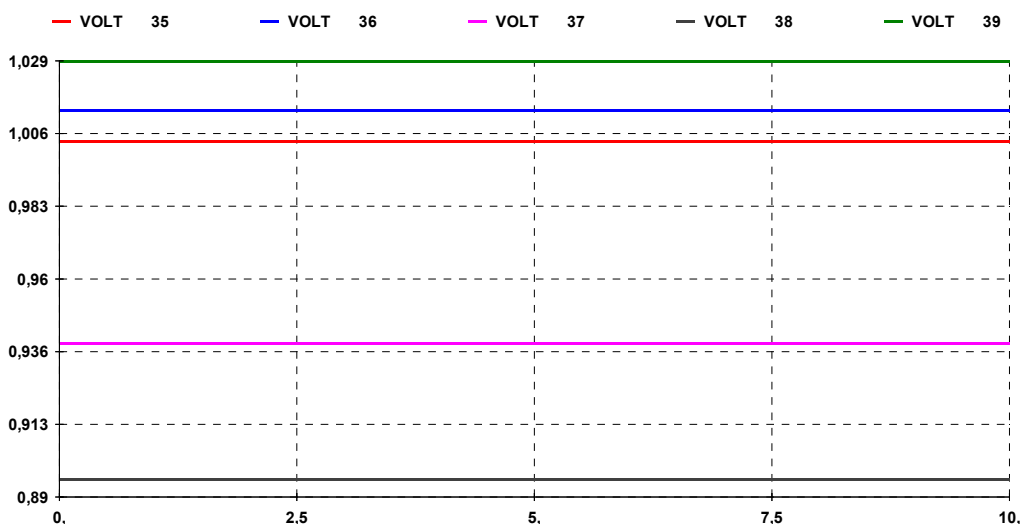


Figura 7.18 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 35 a 39, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER *built-in* e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita

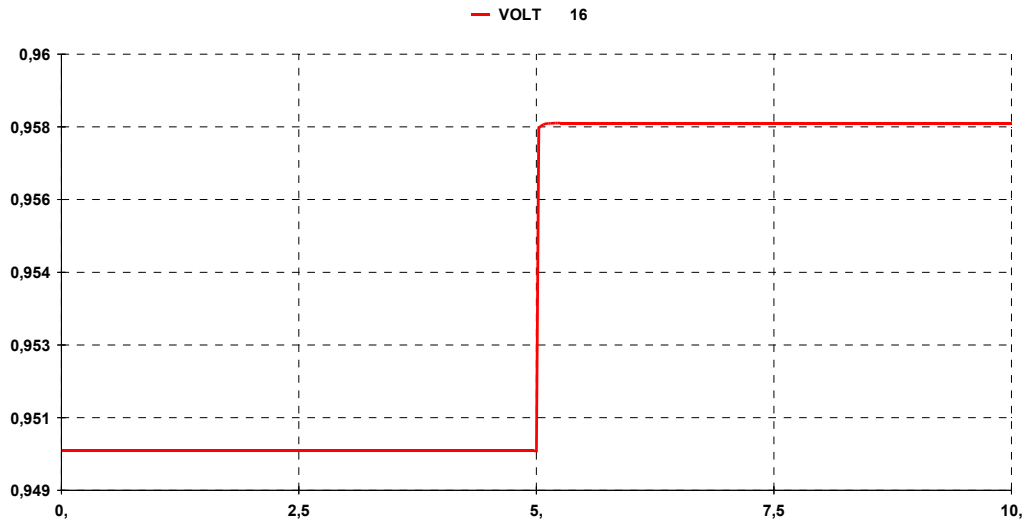


Figura 7.19 - Resultado da variação da tensão da barra 16, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER *built-in* e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita

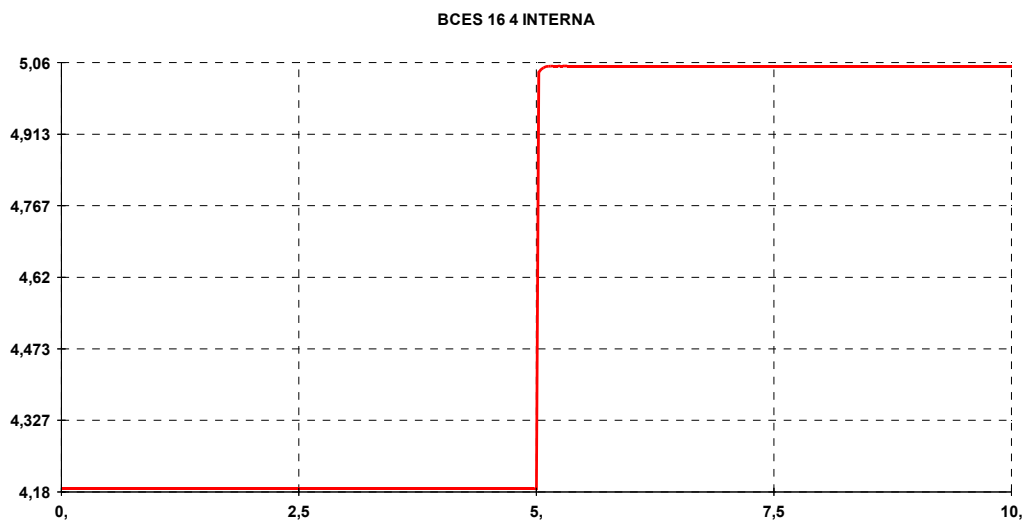


Figura 7.20 - Resultado da variação da susceptância do CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER *built-in* e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita

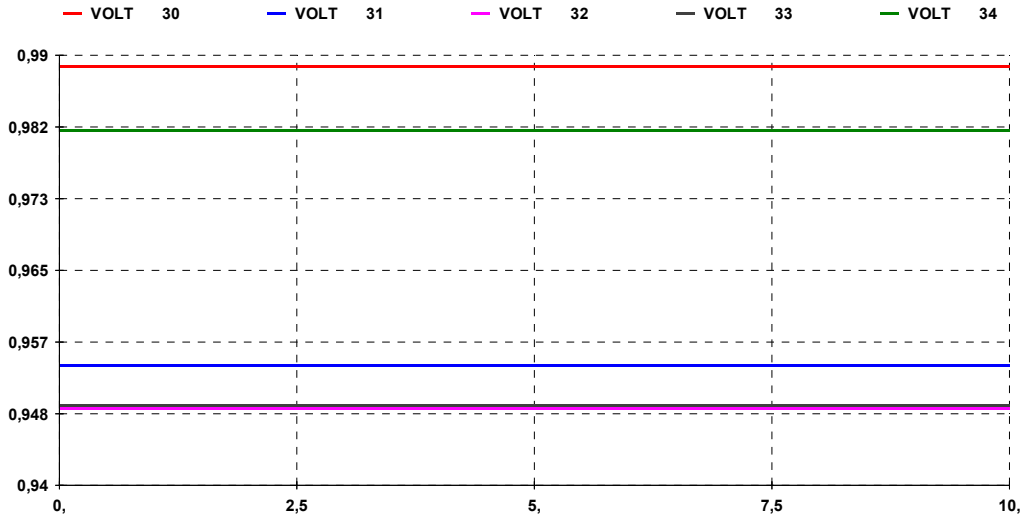


Figura 7.21 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 30 a 34, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita

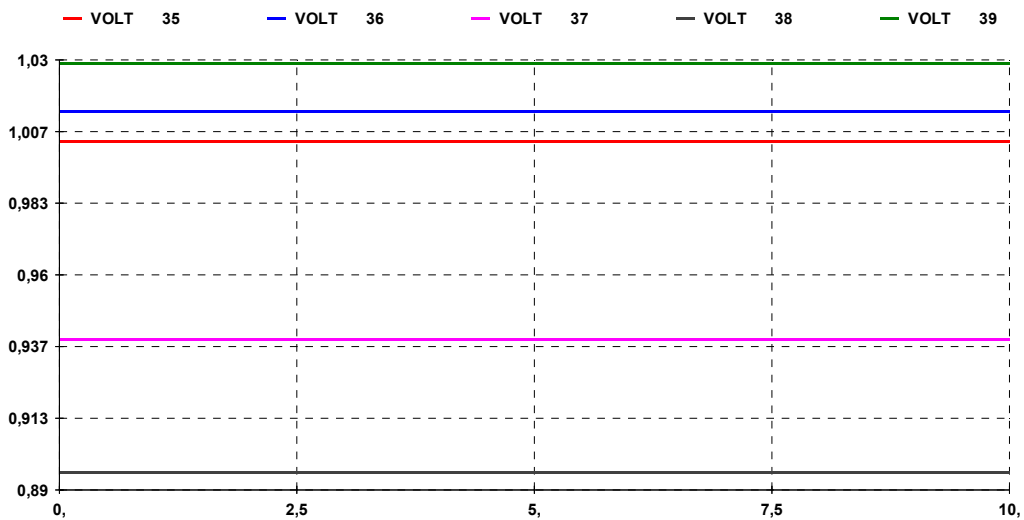


Figura 7.22 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 35 a 39, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita

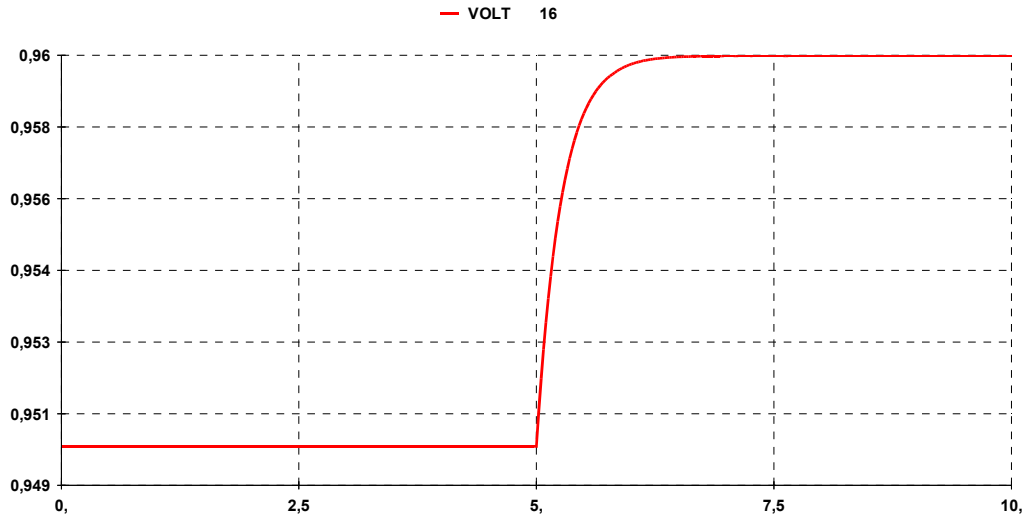


Figura 7.23 - Resultado da variação da tensão da barra 16, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita

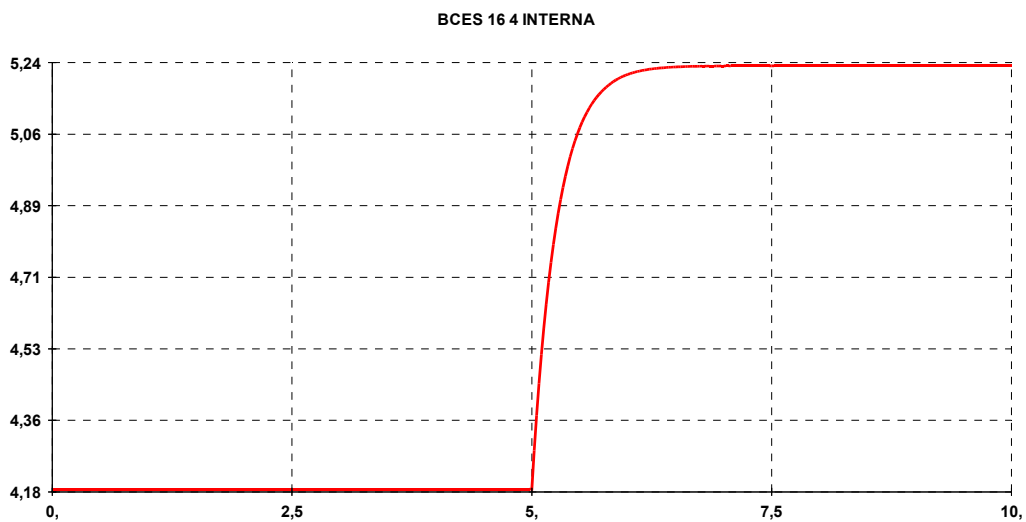


Figura 7.24 - Resultado da variação da susceptância do CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita

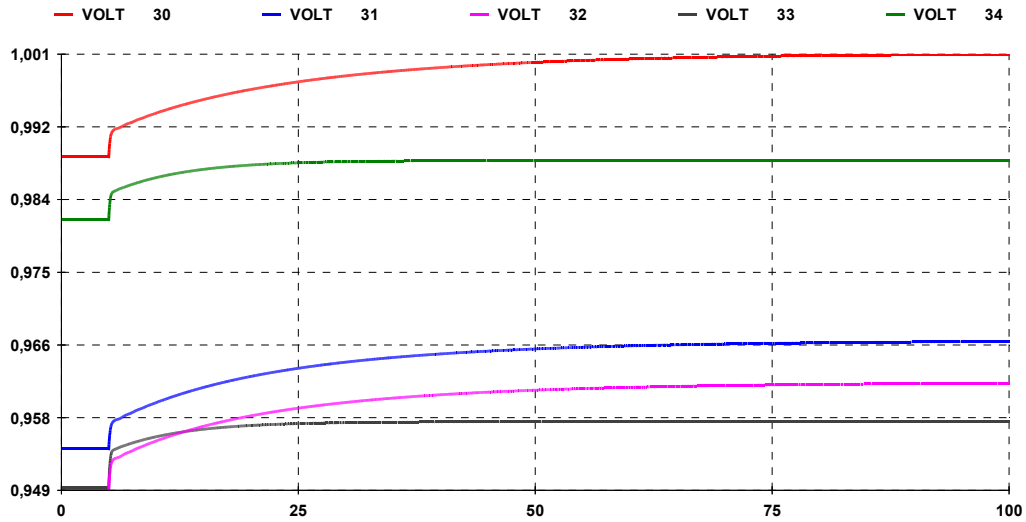


Figura 7.25 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 30 a 34, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão dos geradores

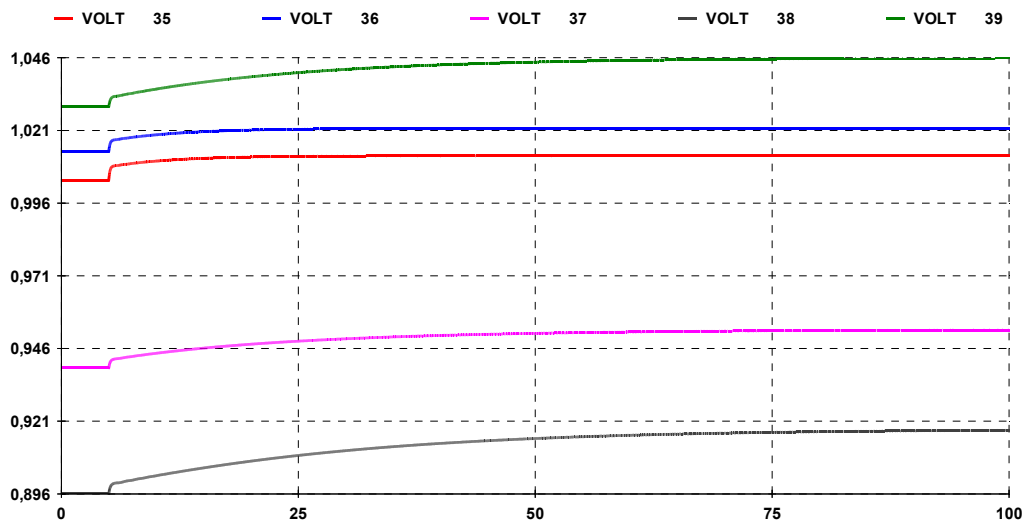


Figura 7.26 - Resultado da variação da tensão dos geradores ligados às barras 35 a 39, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores

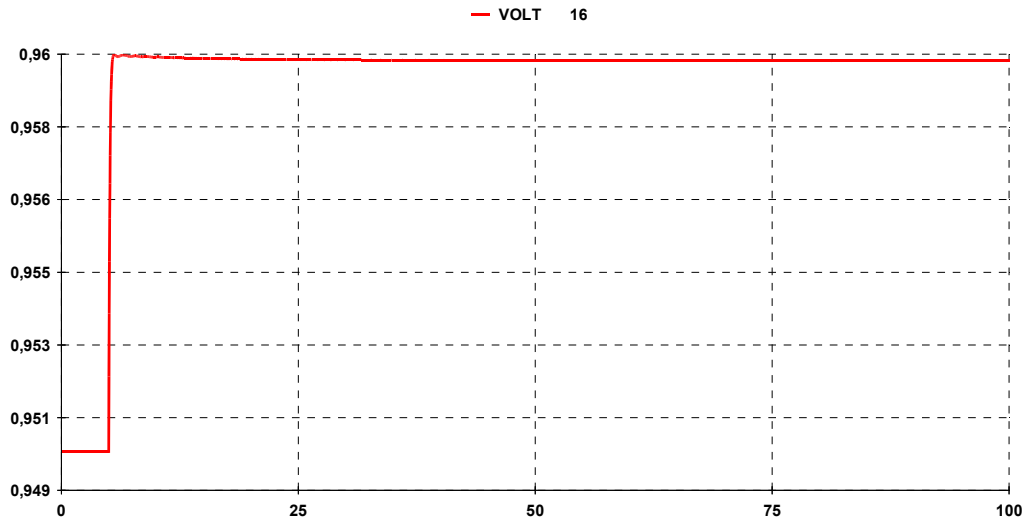


Figura 7.27 - Resultado da variação da tensão da barra 16, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores

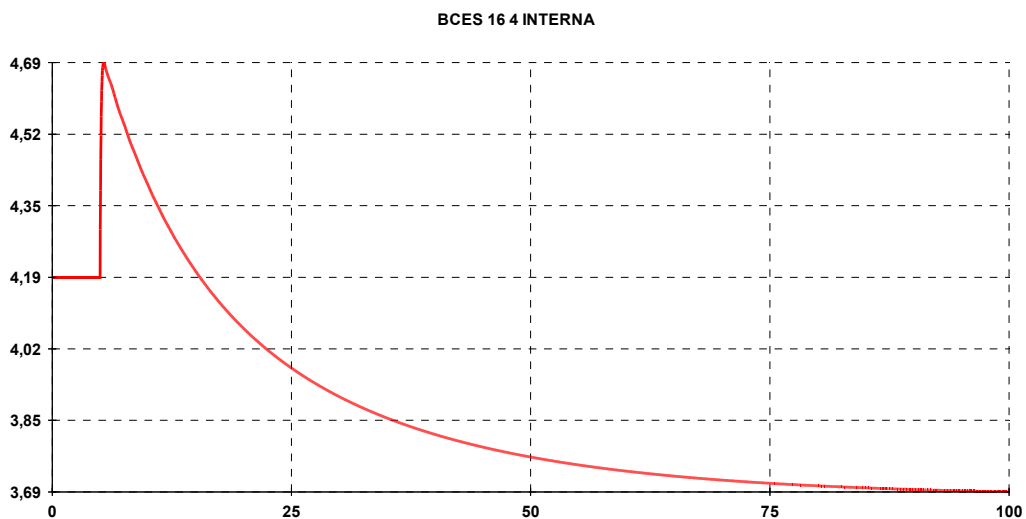


Figura 7.28 - Resultado da variação da susceptância do CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores

Os pontos de operação inicial e final da simulação no domínio do tempo são apresentados na Tabela 7.8, Tabela 7.9 e Tabela 7.10. Comparando estas tabelas com a Tabela 7.4, conclui-se que os pontos de operação são bem diferentes, isto é, apesar dos pontos de operação iniciais serem idênticos para as simulações estáticas e dinâmicas, os diferentes algoritmos convergiram para diferentes pontos de equilíbrio.

Tabela 7.8 - Pontos iniciais (0 s) e finais (10 s) da simulação no domínio do tempo, com regulador do CER *built-in*

Ponto de Operação	Q gerada pelo CER (Mvar)	Módulo de V_{16} (pu)	Susceptância do CER (pu)
2	377,867	0,950	4,187
3	464,064	0,958	5,056

Tabela 7.9 - Pontos iniciais (0 s) e finais (10 s) da simulação no domínio do tempo, com regulador do CER customizado

Ponto de Operação	Q gerada pelo CER (Mvar)	Módulo de V_{16} (pu)	Susceptância do CER (pu)
2	377,867	0,950	4,187
3	482,239	0,960	5,232

Tabela 7.10 - Pontos iniciais (0 s) e em $t=10$ s da simulação no domínio do tempo, com regulador do CER customizado e sem regulador de tensão nos geradores

Ponto de Operação	Q gerada pelo CER (Mvar)	Módulo de V_{16} (pu)	Susceptância do CER (pu)
2	377,867	0,950	4,187
3	405,861	0,960	4,404

As simulações estática e dinâmica apresentam resultados opostos quanto ao sentido de variação das grandezas. As variações da tensão na barra 16 e a susceptância do CER ocorrem no mesmo sentido. Quando do aumento da tensão de referência, a susceptância do CER também se eleva, contrariando os resultados da simulação executada na seção 7.2.1, onde a variação da susceptância é negativa quando da variação positiva da tensão de referência.

É interessante notar que, embora as susceptâncias tenham variado em sentidos opostos nas simulações estática e dinâmica, ambos os algoritmos encontram soluções estáveis, diferentes, é claro. Não se espera que isso sempre aconteça. Por exemplo, empregando a lógica usual de controle, o algoritmo da simulação no domínio do tempo poderia divergir, interrompendo a trajetória, caso não houvesse outra solução naquela direção.

Da Figura 7.29 a Figura 7.36 são apresentadas as saídas das simulações dinâmicas dos pontos de operação 4 a 8 da Tabela 7.4, pontos próximos à região de transição da região normal para a região anormal, utilizando das mesmas perturbações da simulação estática e os controladores de CER e configurações de reguladores de tensão dos geradores já utilizadas nas seções 7.2.1 e 7.3.1. A Tabela 7.11, Tabela 7.12 e Tabela 7.13 resumem estas simulações.

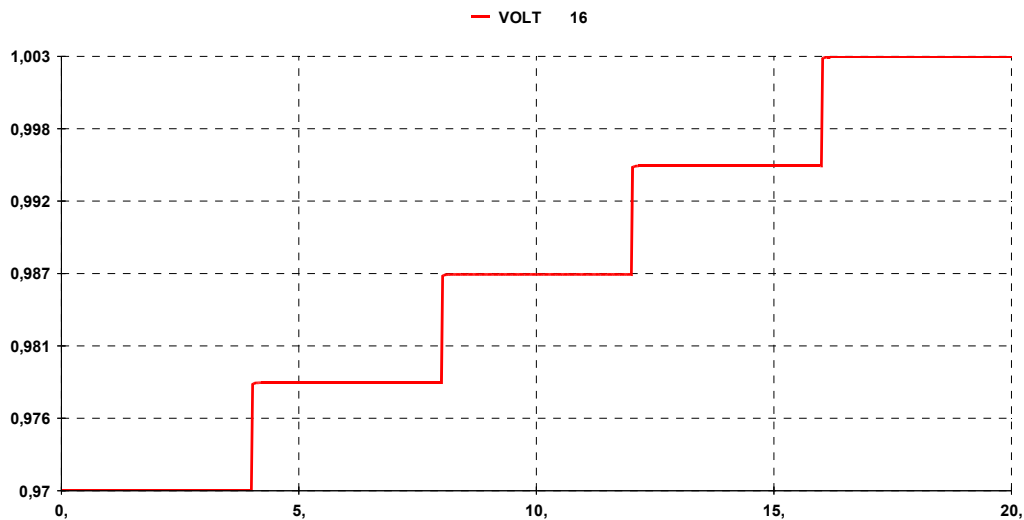


Figura 7.29 - Resultado da variação da tensão controlada pelo CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER *built-in* e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita

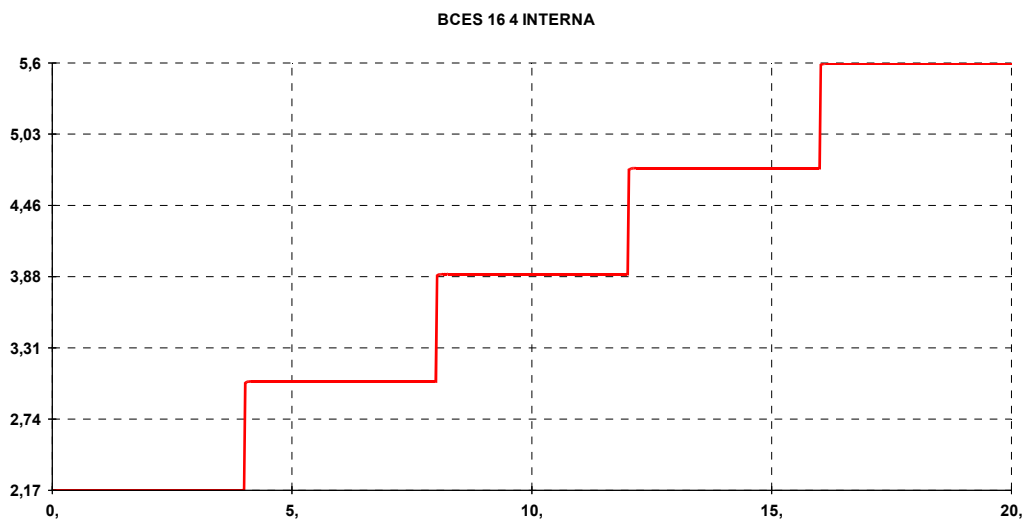


Figura 7.30 - Resultado da variação da susceptância do CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER *built-in* e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita

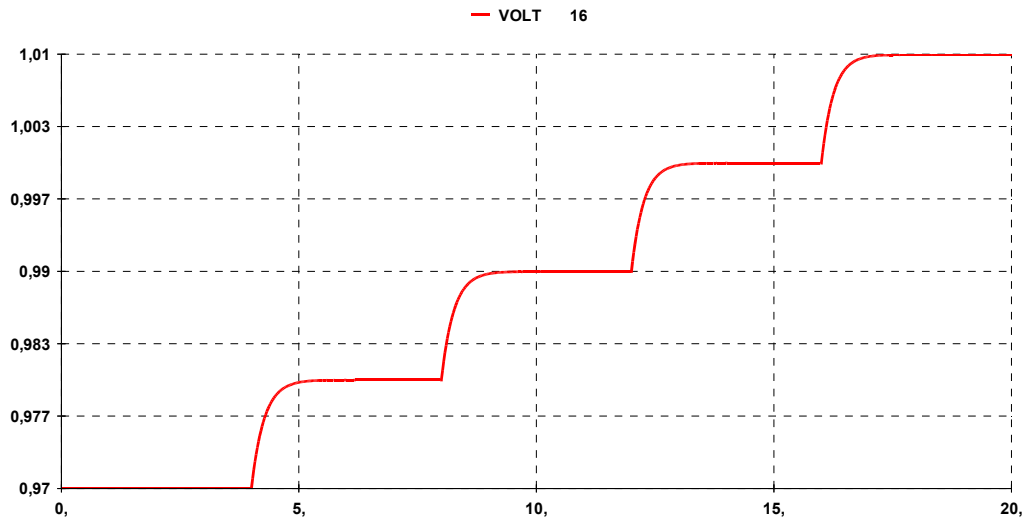


Figura 7.31 - Resultado da variação da tensão controlada pelo CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizados e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita

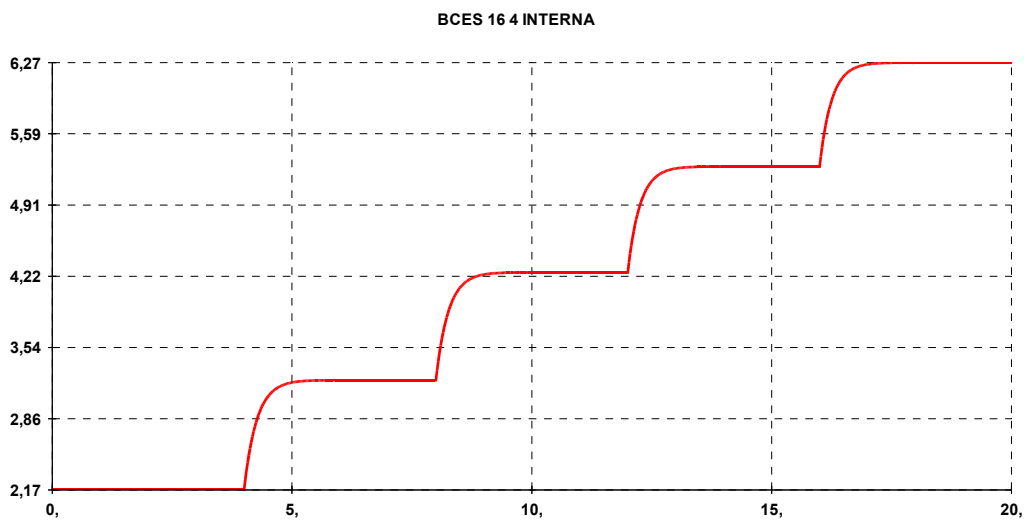


Figura 7.32 - Resultado da variação da susceptância do CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizados e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita

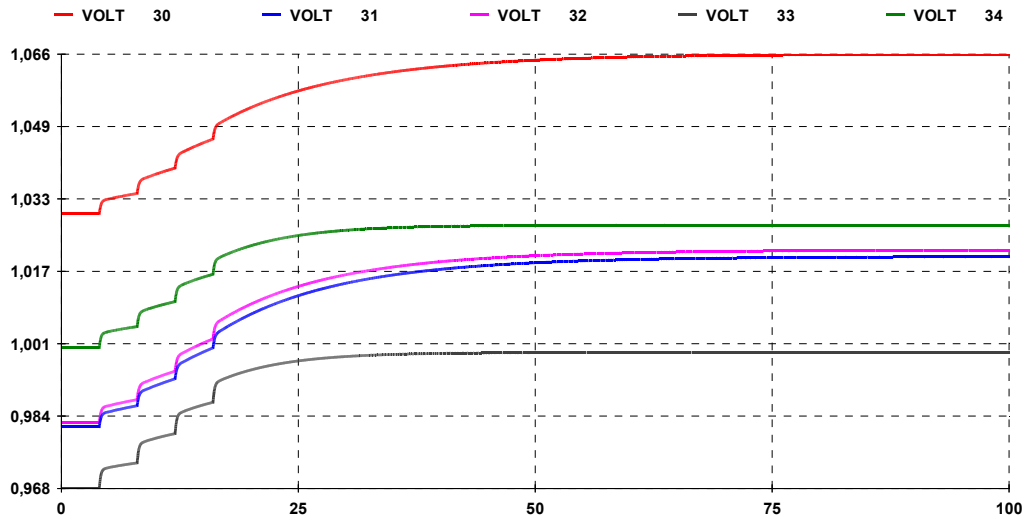


Figura 7.33 - Resultado da variação da tensão dos geradores, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores

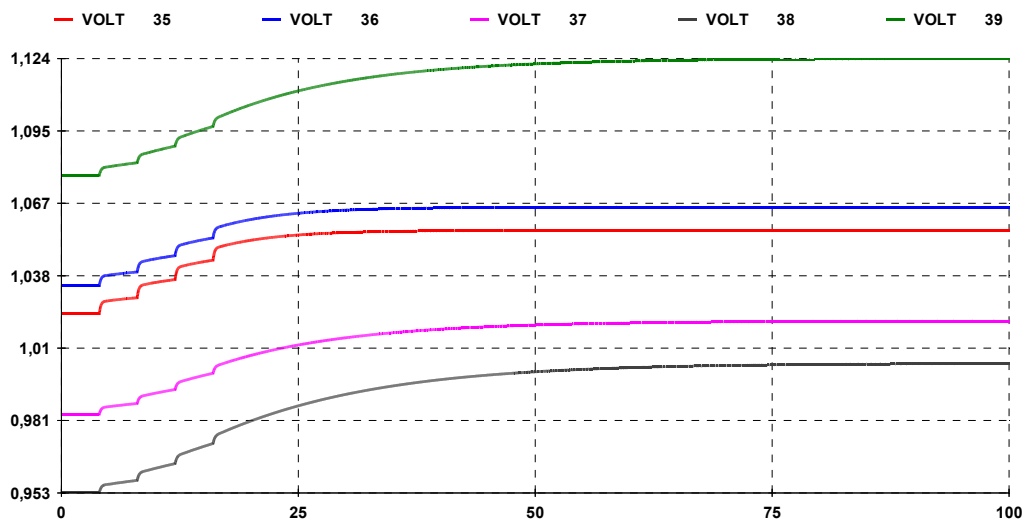


Figura 7.34 - Resultado da variação da tensão dos geradores, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores

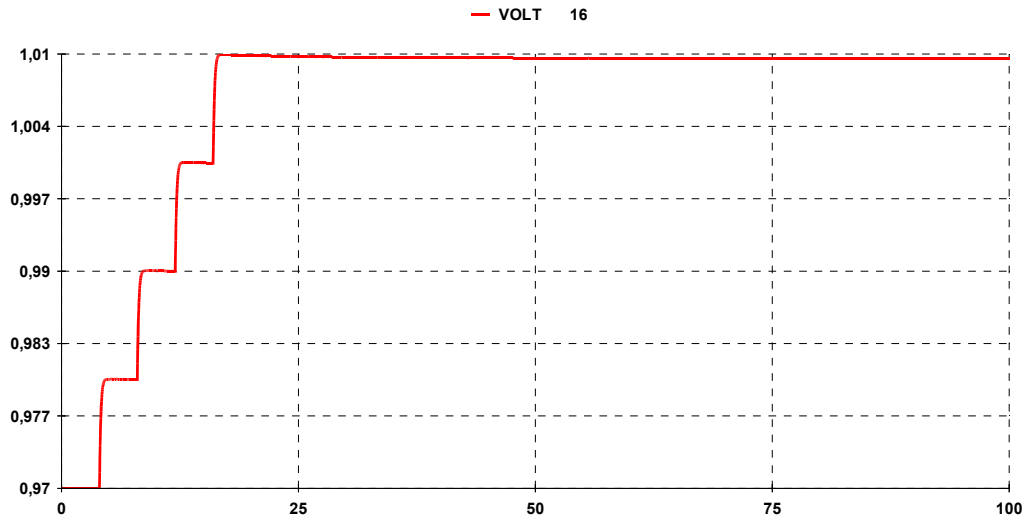


Figura 7.35 - Resultado da variação da tensão controlada pelo CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores

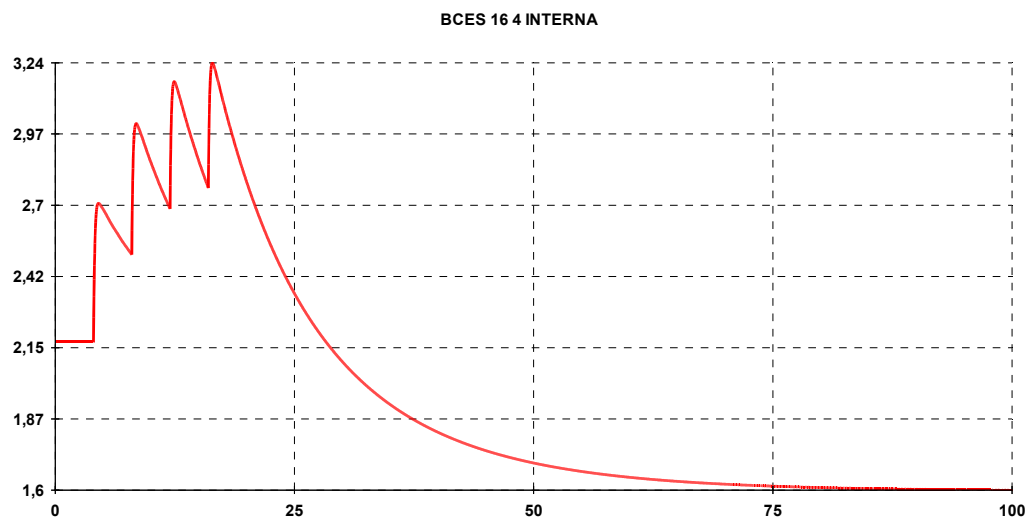


Figura 7.36 - Resultado da variação da susceptância do CER, no domínio do tempo, simulação com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores

Tabela 7.11 - Pontos de operação em 0s (4), 4+ s (5), 8+ s (6) 12+ s (7), 16+ s (8) da simulação no domínio do tempo, com regulador do CER *built-in* e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita

Ponto de Operação	Q gerada pelo CER (Mvar)	Módulo de V_{16} (pu)	Susceptância do CER (pu)
4	204,384	0,970	2,172
5	291,329	0,978	3,046
6	380,099	0,987	3,902
7	470,720	0,995	4,755
8	563,184	1,003	5,598

Tabela 7.12 - Pontos de operação em 0s (4), 4+ s (5), 8+ s (6) 12+ s (7), 16+ s (8) da simulação no domínio do tempo, com regulador do CER customizados e reguladores de tensão dos geradores como barra infinita

Ponto de Operação	Q gerada pelo CER (Mvar)	Módulo de V_{16} (pu)	Susceptância do CER (pu)
4	204,384	0,970	2,172
5	309,796	0,980	3,225
6	417,549	0,990	4,26
7	527,641	1,000	5,276
8	640,073	1,010	6,274

Tabela 7.13 - Pontos de operação em 0s (4), 4+ s (5), 8+ s (6) 12+ s (7), 16+ s (8) da simulação no domínio do tempo, com regulador do CER customizado e sem reguladores de tensão nos geradores

Ponto de Operação	Q gerada pelo CER (Mvar)	Módulo de V_{16} (pu)	Susceptância do CER (pu)
4	204,384	0,970	2,172
5	259,596	0,980	2,699
6	294,330	0,990	2,999
7	317,144	1,000	3,165
8	329,525	1,010	3,243

Ao contrário do observado na seção 7.2.1, não há uma mudança na relação tensão controlada x susceptância do CER. As variações destas grandezas ocorrem sempre no mesmo sentido, conforme lógica usual de controle do compensador estático.

7.4 Análise dos resultados

A simulação na região normal de operação apresentou resultados conclusivos com todas as configurações testadas.

Para a simulação estática na região anormal de operação, foi verificado o efeito oposto ao esperado. Partindo deste ponto estático, com carga 100% P^{cte} , caso mais severo, a simulação dinâmica apresentou resultados diferentes da simulação em regime permanente. Conclui-se que os programas de simulação estática e dinâmica apresentaram resultados diferentes para um mesmo ponto de operação, em todas as configurações testadas.

Ao alterar a modelagem do controlador do CER para integral, o erro em regime permanente foi reduzido a zero, embora não tenha havido nenhuma alteração substancial no resultados das simulações. Ao retirar o regulador de tensão dos geradores, as tensões de máquinas estabilizaram-se em tempos muito superiores àquelas quando se faz uso dos reguladores de tensão em função da falta de regulação secundária.

8

Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros

Foi introduzida a teoria básica sobre estabilidade de tensão e apresentadas situações em que pode ser observado o controle de tensão com efeito oposto ao usual, utilizando um sistema-teste simples, com um gerador, uma linha de transmissão e uma carga.

Ainda utilizando sistemas-teste simples, foram deduzidas as respostas usuais de um sistema para manobras de tapes de transformadores. Caso o transformador tenha tapes no seu lado primário, para aumento da relação de transformação, é normal um acréscimo da tensão primária e uma diminuição na secundária, se nenhuma destas tensões for controlada remotamente. No caso da diminuição da relação de transformação, ocorre o inverso. Ou seja, o módulo de tensão controlada e o tape do transformador têm, usualmente, relação inversa. Neste trabalho, apenas os transformadores com tapes no primário foram utilizados.

Foi também demonstrada a atuação usual de um compensador estático de potência reativa (CER) num sistema elétrico. Ao aumentar a susceptância ou o ângulo de disparo do equipamento, há um aumento da tensão da barra que o CER está conectado (ou da barra controlada remotamente). Logicamente, a causa inversa (diminuição da susceptância ou do ângulo de disparo do CER) causa uma diminuição na tensão da barra controlada pelo CER.

Ainda utilizando sistemas-teste, foi demonstrado que a modelagem da carga influencia a resposta do sistema às perturbações (variações da tensão de referência) causadas pelos equipamentos estudados. Ao utilizar cargas “potência constante”, o sistema é levado mais facilmente à região anormal de operação, nas simulações em regime permanente, onde as respostas são opostas às esperadas. Em compensação, há dificuldades na convergência do algoritmo da simulação dinâmica. Ao utilizar as modelagens “corrente constante” e “impedância constante”, não há possibilidade de se obter respostas opostas às usuais, embora seja possível convergir ambos algoritmos. No entanto, a carga

mista ZIP, que mescla os três tipos, reúne a característica dos três modelos e foi demonstrado que é a mais indicada para as simulações de estabilidade de tensão.

Utilizando sistemas-teste de maior porte foram demonstradas situações em que o sistema pode ser levado ao colapso causado por equipamentos de controle. Ao atuar automaticamente, a lógica de controle de um LTC não diferencia a região de operação em que se encontra o sistema: sua atuação é exatamente a mesma para ambos os lados da curva Vtape. Desta forma, ao tentar controlar a tensão de uma barra, o controle do transformador atua segundo sua lógica usual, porém estando na região de efeitos reversos, o sistema é levado em direção ao colapso de tensão. Até que o controle atinja seus limites e cesse sua atuação (se houver limites), uma atuação corretiva na região anormal acaba por degradar ainda mais o sistema. Quando o LTC opera de forma manual, sem uma lógica de controle, o mesmo acontece, porém a intervenção humana é mais capaz de diferenciar os efeitos da operação anormal do que o controle automático. Foi evidenciada uma mudança na resposta dos controles de tape para a tensão controlada, em outras palavras, uma mudança de região de operação, tanto nas simulações estáticas quanto nas simulações dinâmicas.

Simulações similares, em sistemas-teste ainda maiores foram executadas para compensadores estáticos de potência reativa. Novamente, as ações de controle, no caso a alteração da susceptância do compensador através da mudança do ângulo de disparo dos tiristores, tiveram respostas opostas às usuais para alguns pontos de operação. Porém, não foi possível mostrar este tipo de resposta em regime dinâmico. Os algoritmos das simulações estática e dinâmica convergiram para pontos de operação estáveis, porém em sentidos opostos, comparado com o ponto de operação inicial.

Os efeitos da operação na região anormal podem ser maléficos para um sistema de potência. Nos Procedimentos de Rede do Sistema Interligado Nacional brasileiro, normas que regem a operação e o planejamento do sistema brasileiro, não há ainda instruções para reconhecimento e operação de casos na parte inferior da curva SV. Todas as atuações dos operadores de tempo real no sistema elétrico são baseadas em estudos realizados em pontos de operação na região normal. Portanto, caso o sistema se encontre numa situação atípica, é provável que as medidas tomadas baseadas nas normas ajudem na degradação

do sistema. O caso se agrava quando são considerados equipamentos de controle, que estão sempre programados para atuar na região normal de operação.

8.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, devem ser refeitas as simulações do Capítulo 7, utilizando-se outros programas de análise dinâmica, e outras simulações com o programa ANATEM afim de serem estudados os motivos da não conformidade entre as simulações estática e dinâmica quando o ponto de operação encontrava-se na região anormal.

É importante que as simulações sejam realizadas em sistemas de maior porte, podendo ser utilizado sistemas reais.

Referências Bibliográficas

1. Lima, R. T., **Redes Neurais Artificiais Aplicadas no Controle de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência**, Rio de Janeiro, 2007. 99 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Energia Elétrica, PUC-Rio
2. ONS - Home Page Institucional. **Conheça o SIN**. Apresenta dados do Sistema Interligado Nacional. Disponível em: http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.asp. Acesso em 20 jan 2008.
3. ONS - Home Page Institucional. **Mapas do SIN**. Apresenta mapas do Sistema Interligado Nacional. Disponível em: http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx. Acesso em 22 jan 2008
4. Guimarães, C. H. C., **Simulação Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência Considerando os Fenômenos de Longa Duração**, Rio de Janeiro, 2003. 309 p. Dissertação de Doutorado – COPPE, UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro
5. Gomes, P., **Segurança Operativa dos Sistemas Elétricos: Diagnóstico e Perspectivas Face à Reestruturação do Setor Elétrico**, Itajubá, MG, 2001. 169 p. Dissertação de Doutorado – EFEI
6. Prada, R. B., Vega, J. L. L., Medeiros, L., **Estabilidade do Controle de Tensão em Geradores de Produtores Independentes – Relatório Final**, Rio de Janeiro, 2007. 142 p. – Departamento de Energia Elétrica, PUC-Rio
7. Prada, R.B., Santos, J.O.R., Greenhalgh, A.B., Seelig, B.H.T., Palomino, E.G.C., 2001, **"Monitoração das Condições de Estabilidade de Tensão na Supervisão e Controle de Sistemas Elétricos em Tempo Real"**, Relatório Final do Acordo Especifico 16/98 entre a FPLF e o CEPEL
8. Seelig, B. H. T., **Modelagem do Controle de Tensão para a Avaliação do Carregamento da Rede de Transmissão**, Rio de Janeiro, 2001. 85 p. Dissertação de Mestrado – PUC-RJ
9. Seelig, B. H. T., **Índices de Adequação das Ações de Controle de Tensão para o Reforço das Condições de Segurança de Tensão**, Rio de Janeiro, 2005. 144 p. Dissertação de Doutorado – PUC-RJ
10. Kundur, P., 1994, **"Power System Stability and Control"**, McGraw-Hill, Inc., USA
11. CEPEL, 2007, **"Programa de Análise de Redes"**: ANAREDE V09.01.06 -05/2007"
12. CEPEL, 2006, **"Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos"**: ANATEM V10-11/2006

13. Gomes, P., Guarini, A. P., Souza, M. M. P., Massaud, A. G., Ferreira, C., Vicente, J. M. E., Mendes, P. P. C., Ribeiro, A. M., **Modelagem de carga para estudos dinâmicos**, XIX SNPTEE, GAT – Grupo de estudo de análise e técnicas de sistemas de potência, GAT 24, 2007, Rio de Janeiro, RJ
14. Leite, A.G., 2008, “**Simulação Estática e Dinâmica do Controle de Tensão por Gerador e Compensador Síncrono**”. 117p, Dissertação de Mestrado, DEE / PUC-Rio
15. ONS - Home Page Institucional. **Casos de Referência – Estabilidade – Transitórios Eletromecânicos**. Disponível em: http://www.ons.org.br/avaliacao_condicao/casos_eletromecanicos.aspx. Acesso em 06 jan 2008.
16. Poma, C. E. P, **Simulação Dinâmica do Efeito Reverso no Sistema Teste de 10 Barras do Livro de Kundur**, recebido por e-mail em 21/12/2007.
17. Monticelli, A.J., 1983, “**Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**”, 1 ed. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda

10

Apêndice

Neste apêndice estão listados os arquivos do ANATEM utilizados nas simulações dos capítulos 5, 6 e 7.

Os complementos devem ser utilizados juntos com os arquivos base e havendo mnemônicos iguais, utilizado o do arquivo de complemento.

10.1

Arquivo base do ANATEM das simulações do Capítulo 5

```

DCTE
(Ct) (Val)
tete 0.001
temd 0.001
tepq 0.01
imds 1000
iacs 1000
iace 1000
mrac 300000
999999
DCAR
(tp) (no) C (tp) (no) C (tp) (no) C (tp) (no) (A) (B) (C) (D) (Vmn)
barr 0003 00 00 00 00 10
999999
DMTC MD01
(No) (Bm1)(Bm2)(TR)(TM)(TB)(T ) (V1i)
0001 0.0020.0010000000000000000000000000000000000000
999999
DLTC
(De) (Par) (N (Mode)u (Tmi) (Tma) (I) (Bcon)
0001 00002 02 000001 0.6 3.0 999
999999

```

10.2

Complemento de 10.1 para a simulação da Figura 5.7 e Figura 5.8

```

DMDG MD02
(No) (CS) (Ld)(Lq)(L'd) (L''d)(Le)(T'd) (T''d)(T''q)
0011 50.0 76.2 33.6 26.9 17.9 7.92 .060 .090
(No) (Ra)(H)(D)(MVA)Fr C
0011 4.000 465.
999999
DRGT MD20
(No) (Tm)(Ka)(T1)(T2)(T3)(T4)(Lmn)(Lmx)
0111 .02190.8 3.0 12. .07.0133-90 90
999999
DMAQ
(Nb) Gr (P) (Q) Und (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd)(Nbc)
0001 10 1 0011 0111 0000
999999
DEVT
(Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)
TTAP 03.0 0000010000202 -0.05
TTAP 06.0 0000010000202 -0.05
TTAP 09.0 0000010000202 -0.05
999999
DSIM
(Tmax) (Stp) (P) (I)
10.00 .05 5

```

10.3

Complemento de 10.1 para a simulação da Figura 5.9, Figura 5.10, Figura 5.11 e Figura 5.12

```

DMDG MD01
(No) (L'd)(Ra)(H ) (D ) (MVA) (F C
0011 60
999999

```

```

DMAQ
(Nb) Gr (P) (Q) Und (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd)(Nbc)
0001 10          1 0011          0000
999999
DEVT
(Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und          (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)
TTAP 03.0 0000010000202          -0.05
TTAP 06.0 0000010000202          -0.05
TTAP 09.0 0000010000202          -0.05
999999
DSIM
(Tmax) (Stp) (P) (I)
30.00 .05 5

```

10.4

Complemento de 10.2 para a simulação da Figura 5.14 e Figura 5.15

```

DEVT
(Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und          (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)
TTAP 3.0 0000010000202          0.007
TTAP 6.0 0000010000202          0.007
TTAP 9.0 0000010000202          0.007
999999
DSIM
(Tmax) (Stp) (P) (I)
10.00 0.005 5

```

10.5

Complemento de 10.3 para a simulação da Figura 5.16, Figura 5.17, Figura 5.18 e Figura 5.19

```

DEVT
(Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und          (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)
TTAP 3.0 0000010000202          0.007
TTAP 6.0 0000010000202          0.007
TTAP 9.0 0000010000202          0.007
999999
DSIM
(Tmax) (Stp) (P) (I)
10.00 0.005 5

```

10.6

Complemento de 10.1 para a simulação da Figura 5.22 e Figura 5.23

```

DCAR
(tp) (no) C (tp) (no) C (tp) (no) C (tp) (no) (A) (B) (C) (D) (Vmn)
barr 0003          00 100 00 100 10
999999
DMDG MD02
(No) (CS) (Ld)(Lq)(L'd) (L''d)(Le)(T'd) (T''d)(T''q)
0011          50.0 76.2 33.6          26.9 17.9 7.92          .060 .090
(No) (Ra)(H)(D)(MVA)Fr C
0011          4.000          465.
999999
DRGT MD20
(No) (Tm)(ka)(T1)(T2)(T3)(T4)(Lmn)(Lmx)
0111          .02190.8 3.0 12. .07.0133-90 90
999999
DMAQ
(Nb) Gr (P) (Q) Und (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd)(Nbc)
0001 10          1 0011 0111          0000
999999

```

```

DEVT
(Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)
TTAP 3.0 0000010000202 0.05
TTAP 6.0 0000010000202 0.05
999999
DSIM
(Tmax) (Stp) (P) (I)
10.00 .005 5

```

10.7

Complemento de 10.6 para a simulação da Figura 5.24, Figura 5.25, Figura 5.26 e Figura 5.27

```

DMDG MD01
(No) (L'd)(Ra)(H)(D)(MVA)(F C
0011 60
999999
DMAQ
(Nb) Gr (P) (Q) Und (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd)(Nbc)
0001 10 1 0011 0000
999999
DEVT
(Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)
TTAP 3.0 0000010000202 0.05
TTAP 6.0 0000010000202 0.05
999999
DSIM
(Tmax) (Stp) (P) (I)
10.00 .005 5

```

10.8

Complemento de 10.1 para a simulação da Figura 5.31 e Figura 5.32

```

DCAR
(tp) (no) C (tp) (no) C (tp) (no) C (tp) (no) (A) (B) (C) (D) (Vmn)
barr 0003 35 35 35 35 10
999999
DMDG MD02
(No) (CS) (Ld)(Lq)(L'd) (L''d)(Le)(T'd) (T''d)(T''q)
0011 50.0 76.2 33.6 26.9 17.9 7.92 .060 .090
(No) (Ra)(H)(D)(MVA)Fr C
0011 4.000 465.
999999
DRGT MD20
(No) (Tm)(ka)(T1)(T2)(T3)(T4)(Lmn)(Lmx)
0111 .02190.8 3.0 12. .07.0133-90 90
999999
DMAQ
(Nb) Gr (P) (Q) Und (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd)(Nbc)
0001 10 1 0011 0111 0000
999999
DEVT
(Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)
TTAP 3.0 0000010000202 -0.03
TTAP 6.0 0000010000202 -0.03
TTAP 9.0 0000010000202 -0.03
999999
DSIM
(Tmax) (Stp) (P) (I)
10.00 .005 5

```


10.9

Complemento de 10.8 para a simulação da Figura 5.33 ,Figura 5.34, Figura 5.35 e Figura 5.36

```

DMDG MD01
(No) (L'd)(Ra)(H)(D)(MVA)(F C
0011 60
999999
DMAQ
(Nb) Gr (P) (Q) Und (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd)(Nbc)
0001 10 1 0011 0000
999999
DEVT
(Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)
TTAP 3.0 0000010000202 -0.03
TTAP 6.0 0000010000202 -0.03
TTAP 9.0 0000010000202 -0.03
999999
DSIM
(Tmax) (Stp) (P) (I)
10.00 .005 5

```

10.10

Complemento de 10.8 para a simulação da Figura 5.37 e Figura 5.38

```

DMDG MD02
(..... Gerador polos salientes
(No) (CS) (Ld)(Lq)(L'd) (L''d)(Le)(T'd) (T''d)(T''q)
0011 50.0 76.2 33.6 26.9 17.9 7.92 .060 .090
(No) (Ra)(H)(D)(MVA)Fr C
0011 4.000 465.
999999
DCDU IMPR
(ncdu) (nome cdu)
0111 AVR
(EFPAR (npar) ( valpar )
DEFPAR #K1 1.
DEFPAR #T1 12.
DEFPAR #K2 10.
DEFPAR #G 200.
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) (p1)(p2)(p3)(p4) (vmin) (vmax)
0001 ENTRAD vref
0002 IMPORT VOLT vt
0003 SOMA vref x2
-vt x2
0004 GANHO x2 x3 #G
0005 LEDLAG x3 x4 #K1 3.0 1.0 #T1
0006 PROINT x3 x5 #K2 0.0 1.0
0007 SOMA x4 Efd
x5 Efd
0008 EXPORT EFD Efd
FIMCDU
999999
DMAQ
(Nb) Gr (P) (Q) Und (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd)(Nbc)
0001 10 1 0011 0111 u 0000
999999
DEVT
(Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)
TTAP 3.0 0000010000202 -0.03
TTAP 6.0 0000010000202 -0.03
TTAP 9.0 0000010000202 -0.03
999999
DSIM
(Tmax) (Stp) (P) (I)

```

10.00 .005 5

10.11

Complemento de 10.8 para a simulação da Figura 5.40 e Figura 5.41

```

DEVT
(Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und          (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)
TTAP  03.0 0000010000202                -0.03
TTAP  06.0 0000010000202                -0.03
TTAP  09.0 0000010000202                -0.03
999999
DSIM
(Tmax) (Stp) (P) (I)
  10.00 .005 5

```

10.12

Complemento de 10.9 para a simulação da Figura 5.42, Figura 5.43, Figura 5.44 e Figura 5.45

```

DEVT
(Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und          (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)
TTAP  03.0 0000010000202                -0.03
TTAP  06.0 0000010000202                -0.03
TTAP  09.0 0000010000202                -0.03
999999
DSIM
(Tmax) (Stp) (P) (I)
  10.00 .005 5

```

10.13

Complemento de 10.10 para a simulação da Figura 5.46 e Figura 5.47

```

DEVT
(Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und          (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)
TTAP  03.0 0000010000202                -0.03
TTAP  06.0 0000010000202                -0.03
TTAP  09.0 0000010000202                -0.03
999999
DSIM
(Tmax) (Stp) (P) (I)
  10.00 .005 5

```

10.14**Arquivo base do ANATEM das simulações da Figura 6.4 a Figura 6.9**

```

DCTE
(Ct) (Val)
tete 0.001
temd 0.001
tepq 0.01
imds 1000
iacs 1000
iace 1000
mrac 300000
999999
DMTC MD01
(No) (Bm1)(Bm2)(TR)(TM)(TB)(T )(Vli)
0001 0.0020.0010000000000000000000000000
999999
DCAR IMPR
(tp) (no) C (tp) (no) C (tp) (no) C (tp) (no) (A) (B) (C) (D) (Vmn)
barr 0001 a barr 0011 35 35 35 35 .5
999999

```

10.15**Complemento de 10.14 para a simulação da Figura 6.4**

```

DLTC
(De) (Par) (N (Mode)u (Tmi) (Tma) (I) (Bcon)
0010 00011 01 000001 999
999999
DMDG MD01
(No) (L'd)(Ra)(H)(D)(MVA)Fr C
0010 60
999999
DMAQ
(Nb) Gr (P) (Q) Und (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd)(Nbc)
0001 10 1 0010 0000
0002 10 1 0010 0000
0003 20 1 0010 0000
999999
DEVT
(Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)
TTAP 2.0 0000100001101 0.097
999999
DSIM
(Tmax) (Stp) (P) (I)
20.00 .05 5

```

10.16**Complemento de 10.15 para a simulação da Figura 6.5**

```

DLTC
(De) (Par) (N (Mode)u (Tmi) (Tma) (I) (Bcon)
0010 00011 01 000001 0.750 999
999999

```

10.17**Complemento de 10.15 para a simulação da Figura 6.6**

```

DLTC
(De) (Par) (N (Mode)u (Tmi) (Tma) (I) (Bcon)
0010 00011 01 000001 0.750 1.200 25

```

999999

10.18**Complemento de 10.15 para a simulação da Figura 6.7**

DEVT
 (Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)
 TTAP 2.0 0000100001101 0.007
 999999

10.19**Complemento de 10.16 para a simulação da Figura 6.8**

DEVT
 (Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)
 TTAP 2.0 0000100001101 0.007
 999999

10.20**Complemento de 10.17 para a simulação da Figura 6.9**

DEVT
 (Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)
 TTAP 2.0 0000100001101 0.007
 999999

10.21**Arquivo completo do ANATEM para a simulação da Figura 6.11 e Figura 6.12**

DCTE
 (Ct) (Val)
 tete 0.001
 temd 0.001
 tepq 0.01
 imds 1000
 iacs 1000
 iace 1000
 mrac 300000
 999999
 DMDG MD01
 (Gerador 1 Barra Infinita
 (No) (L'd)(Ra)(H)(D)(MVA)Fr C
 0010 60
 999999
 DMAQ
 (Nb) Gr (P) (Q) Und (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd) (Nbc)
 0001 10 1 0010 0000
 0002 10 1 0010 0000
 0003 20 1 0010 0000
 999999
 DCAR IMPR
 (tp) (no) C (tp) (no) C (tp) (no) C (tp) (no) (A) (B) (C) (D) (Vmn)
 barr 0001 a barr 0011 35 35 35 35 .5
 999999
 DEVT
 (Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)
 MTAP 2.0 0010 001101 0.007
 MTAP 4.0 0010 001101 0.005
 MTAP 6.0 0010 001101 0.005
 MTAP 8.0 0010 001101 0.020
 MTAP 10.0 0010 001101 0.010
 MTAP 12.0 0010 001101 0.040

MTAP	14.0	0010	001101	0.050
MTAP	16.0	0010	001101	0.050
MTAP	18.0	0010	001101	0.050
MTAP	20.0	0010	001101	0.050
MTAP	22.0	0010	001101	0.050

999999
DSIM
(Tmax) (Stp) (P) (I)
30.00 .0005 5

10.22

Arquivo base do ANATEM das simulações do Capítulo 7

```

DCTE
(Ct) (Val)
tete 0.001
temd 0.001
tepq 0.01
imds 1000
iacs 1000
iace 1000
mrac 300000
999999
DCAR
(tp) (no) C (tp) (no) C (tp) (no) C (tp) (no) (A) (B) (C) (D) (Vmn)
barr 0001 a barr 0039 00 00 00 00 .5
999999

```

10.23

Complemento de 10.22 para a simulação da Figura 7.5 a Figura 7.8 e Figura 7.17 a Figura 7.20 (alteração apenas do caso base de regime permanente)

```

DMDG MD01
(No) (L'd)(Ra)(H)(D)(MVA)Fr c
0001 60
999999
DRGT MD20
(No) (Tm)(Ka)(T1)(T2)(T3)(T4)(Lmn)(Lmx)
3000 .02190.8 3.0 12. .07.0133-90 90
999999
DMAQ
(Nb) Gr (P) (Q) Und (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd)(Nbc)
0030 30 1 0001 3000
0031 31 1 0001 3000
0032 32 1 0001 3000
0033 33 1 0001 3000
0034 34 1 0001 3000
0035 35 1 0001 3000
0036 36 1 0001 3000
0037 37 1 0001 3000
0038 38 1 0001 3000
0039 39 1 0001 3000
999999
DMCE MD01
(No) (K)(T)(T1)(T2)
0001 500.0 0.05 0.04 0.02
999999
DCER
(Nb) Gr (Mc)u(Me)u
16 4 000001
999999
DEVT
(Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)
TSVC 5.0 16 0.01 04
999999
DSIM
(Tmax) (Stp) (P) (I)
10.00 .005 5

```

10.24**Complemento de 10.22 para a simulação da Figura 7.9 a Figura 7.12 e Figura 7.21 a Figura 7.24 (alteração apenas do caso base de regime permanente)**

```

DMDG MD01
(Gerador 1 Barra Infinita
(No) (L'd)(Ra)(H)(D)(MVA)Fr c
0001 60
999999
DMAQ
(Nb) Gr (P) (Q) Und (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd)(Nbc)
0030 30 1 0001 3000
0031 31 1 0001 3000
0032 32 1 0001 3000
0033 33 1 0001 3000
0034 34 1 0001 3000
0035 35 1 0001 3000
0036 36 1 0001 3000
0037 37 1 0001 3000
0038 38 1 0001 3000
0039 39 1 0001 3000
999999
DMCE MD01
(No) (K)(T)(T1)(T2)
0001 500.0 0.05 0.04 0.02
999999
DCDU IMPR 80CO
(ncdu) (nome cdu)
0100 CONTROLE_CER
(EFPAR (npar) ( valpar )
DEFPAR #K 400
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) (p1)(p2)(p3)(p4) (vmin) (vmax)
0001 ENTRAD vref
0002 IMPORT VOLT vt
0003 SOMA vref x1
-vt x1
0004 PROINT x1 B #K 0.0 1.0
0005 EXPORT BCES B
FIMCDU
999999
DCER
(Nb) Gr (Mc)u(Me)u
16 4 000100u
999999
DEVT
(Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)
TCDU 5.0 0100 0.01 0001
999999
DSIM
(Tmax) (Stp) (P) (I)
10.00 .005 5

```

10.25**Complemento de 10.22 para a simulação da Figura 7.13 a Figura 7.16 e Figura 7.25 a Figura 7.28 (alteração apenas do caso base de regime permanente)**

```

DCDU IMPR
(ncdu) (nome cdu)
0001 CONTROLE_CER
(EFPAR (npar) ( valpar )
DEFPAR #K 500
(DEFVA (stip) (vdef) (d1)

```

```

(DEFVAL V0CES VREF
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) (p1)(p2)(p3)(p4) (vmin) (vmax)
0001 ENTRAD          Vref
0002 IMPORT VOLT      vt
0003 SOMA            vref x1
                   -vt  x1
0004 PROINT          x1  B   #K   0.0  1.0
0005 EXPORT BCES     B
FIMCDU
999999
DMDG MD01
(Gerador 1 Barra Infinita
(No) (L'd)(Ra)(H)(D)(MVA)Fr C
0001                               60
999999
DMAQ
(Nb) Gr (P) (Q) Und (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd)(Nbc)
0030  30          1 0300
0031  31          1 0300
0032  32          1 0300
0033  33          1 0300
0034  34          1 0300
0035  35          1 0300
0036  36          1 0300
0037  37          1 0300
0038  38          1 0300
0039  39          1 0300
999999
DCER
(Nb) Gr (Mc)u(Me)u
  16   4 000001u
999999
DEVT
(Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und          (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)
TCDU  5.0  000001          0.01          0001
999999
DSIM
(Tmax) (Stp) (P) (I)
 100.00 .005  5

```

10.26

Complemento de 10.22 para a simulação da Figura 7.29 e Figura 7.30

```

DMDG MD01
(Gerador 1 Barra Infinita
(No) (L'd)(Ra)(H)(D)(MVA)Fr C
0001                               60
999999
DRGT MD20
(No) (Tm)(Ka)(T1)(T2)(T3)(T4)(Lmn)(Lmx)
3000  .02190.8  3.0  12.  .07.0133-90  90
999999
DMAQ
(Nb) Gr (P) (Q) Und (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd)(Nbc)
0030  30          1 0001  3000
0031  31          1 0001  3000
0032  32          1 0001  3000
0033  33          1 0001  3000
0034  34          1 0001  3000
0035  35          1 0001  3000
0036  36          1 0001  3000
0037  37          1 0001  3000
0038  38          1 0001  3000
0039  39          1 0001  3000
999999
DMCE MD01

```



```

(No) (K)(T)(T1)(T2)
0001 500.0 0.05 0.04 0.02
999999
DCER
(Nb) Gr (Mc)u(Me)u
 16 4 000001
999999
DEVT
(Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)
TSVC 4.0 16 0.01 04
TSVC 8.0 16 0.01 04
TSVC 12.0 16 0.01 04
TSVC 16.0 16 0.01 04
999999
DSIM
(Tmax) (Stp) (P) (I)
 20.00 .005 5

```

10.27

Complemento de 10.22 para a simulação da Figura 7.31 e Figura 7.32

```

DCDU IMPR
(ncdu) (nome cdu)
 0001 AVR
(EFPAR (npar) ( valpar )
DEFPAR #G 190.8
DEFPAR #P2 3
DEFPAR #P4 12
DEFPAR #K2 10
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) (p1)(p2)(p3)(p4) (vmin) (vmax)
0001 ENTRAD vref
0002 IMPORT VOLT vt
0003 SOMA vref x2
 -vt x2
0004 GANHO x2 x3 #G
0005 LEDLAG x3 x4 1.0 #P2 1.0 #P4
0006 PROINT x3 x5 #K2 0.0 1.0
0007 SOMA x4 Efd
 x5 Efd
0008 EXPORT EFD Efd
FIMCDU
999999
DMDG MD01
(No) (L'd)(Ra)(H)(D)(MVA)Fr c
0001 60
999999
DRGT MD20
(No) (Tm)(Ka)(T1)(T2)(T3)(T4)(Lmn)(Lmx)
3000 .02190.8 3.0 12. .07.0133-90 90
999999
DMAQ
(Nb) Gr (P) (Q) Und (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd)(Nbc)
(0016 16 1 016 3000
0030 30 1 0001 3000
0031 31 1 0001 3000
0032 32 1 0001 3000
0033 33 1 0001 3000
0034 34 1 0001 3000
0035 35 1 0001 3000
0036 36 1 0001 3000
0037 37 1 0001 3000
0038 38 1 0001 3000
0039 39 1 0001 3000
999999
DMCE MD01
(No) (K)(T)(T1)(T2)

```

```

0001 500.0 0.05 0.04 0.02
999999
DCDU IMPR 80CO
(ncdu) (nome cdu)
  0100 CONTROLE_CER
(EFPAR (npar) ( valpar )
DEFPAR #K 400
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) (p1)(p2)(p3)(p4) (vmin) (vmax)
0001 ENTRAD vref
0002 IMPORT VOLT vt
0003 SOMA vref x1
      -vt x1
0004 PROINT x1 B #K 0.0 1.0
0005 EXPORT BCES B
FIMCDU
999999
DCER
(Nb) Gr (Mc)u(Me)u
  16 4 000100u
999999
DEVT
(Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)
TCDU 4.0 0100 0.01 0001
TCDU 8.0 0100 0.01 0001
TCDU 12.0 0100 0.01 0001
TCDU 16.0 0100 0.01 0001
999999
DSIM
(Tmax) (Stp) (P) (I)
  20.00 .005 5

```

10.28

Complemento de 10.22 para a simulação da Figura 7.33 a Figura 7.36

```

DMDG MD02
(No) (CS) (Ld)(Lq)(L'd) (L''d)(Le)(T'd) (T''d)(T''q)
0300 100. 69. 31. 26.9 17.9 10.2 .060 .090
(No) (Ra)(H)(D)(MVA)Fr C
0300 .14 4.2 4. 1000.
999999
(Nb) Gr (P) (Q) Und (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd)(Nbc)
0030 30 1 0300
0031 31 1 0300
0032 32 1 0300
0033 33 1 0300
0034 34 1 0300
0035 35 1 0300
0036 36 1 0300
0037 37 1 0300
0038 38 1 0300
0039 39 1 0300
999999
DCDU IMPR 80CO
(ncdu) (nome cdu)
  0100 CONTROLE_CER
(EFPAR (npar) ( valpar )
DEFPAR #K 400
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) (p1)(p2)(p3)(p4) (vmin) (vmax)
0001 ENTRAD vref
0002 IMPORT VOLT vt
0003 SOMA vref x1
      -vt x1
0004 PROINT x1 B #K 0.0 1.0
0005 EXPORT BCES B
FIMCDU
999999

```

DCER

(Nb) Gr (Mc)u(Me)u

16 4 000100u

999999

DEVT

(Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)

TCDU 4.0 0100 0.01 0001

TCDU 8.0 0100 0.01 0001

TCDU 12.0 0100 0.01 0001

TCDU 16.0 0100 0.01 0001

999999

DSIM

(Tmax) (Stp) (P) (I)

100.00 .005 5

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)