



MEC-SETEC

INSTITUTO FEDERAL MINAS GERAIS - Campus Formiga

Curso de Engenharia Elétrica

EMULAÇÃO DE UM DISPOSITIVO FACTS PARA RESOLVER PROBLEMAS DE ESTABILIDADE EM FUNÇÃO DO TIPO DE MARGEM DA CURVA QV

Christiano Eduardo Dutra e Silva

Orientador: Prof. Me. Renan Souza Moura

FORMIGA - MG

2014

CHRISTIANO EDUARDO DUTRA E SILVA

EMULAÇÃO DE UM DISPOSITIVO FACTS PARA
RESOLVER PROBLEMAS DE ESTABILIDADE EM
FUNÇÃO DO TIPO DE MARGEM DA CURVA QV

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto Federal Campus
Formiga, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Renan Souza Moura

FORMIGA - MG

2014

D978e Dutra e Silva, Christiano Eduardo
Emulação de um dispositivo facts para resolver problemas de estabilidade em
função do tipo de margem da curva QV. / Christiano Eduardo Dutra e Silva. –
Formiga, MG., 2014.

79p.: il.

Orientador: Prof. Ms. Renan Souza Moura

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal Minas Gerais – Campus
Formiga.

1. Estabilidade de tensão. 2. Dispositivos facts. 3. Compensação de reativos.
4. Potência reativa I. Moura, Renan Souza. II. Título.

CDD 621.31042

CHRISTIANO EDUARDO DUTRA E SILVA

EMULAÇÃO DE UM DISPOSITIVO FACTS PARA RESOLVER PROBLEMAS DE ESTABILIDADE EM FUNÇÃO DO TIPO DE MARGEM DA CURVA QV

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal Campus Formiga, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Avaliado em: ____ de _____ de _____.

Nota: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Luiz Eduardo de Souza Pereira

Prof. Me. Patrick Santos de Oliveira

Prof. Me. Renan Souza Moura

AGRADECIMENTOS

Principalmente a Deus, por me iluminar, dar forças para seguir em frente e abençoar em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais, Cristine e Adair, por me darem todo o suporte necessário para passar todos estes anos estudando, por serem sempre exemplo de dedicação e me ensinarem a caminhar em busca dos sonhos.

Aos meus irmãos, Leonardo (*in memoriam*) e Polyana, por serem os melhores irmãos que alguém pode ter, além de grandes exemplos.

A minha namorada, Ana Carla, por estar ao meu lado a todo momento compartilhando momentos especiais e me fazer feliz todos os dias.

Ao Instituto Federal de Minas Gerais - IFMG, por todo ensinamento e suporte à minha formação.

Ao orientador, o professor Renan Souza Moura, por todo o apoio dado, dúvidas tiradas, ideias e correções do trabalho.

A todos os meus professores, que em cada matéria dada em sala de aula contribuiu para o meu crescimento e aprendizado.

A todos os funcionários do IFMG por sempre serem prestativos, educados e apoiadores em meu curso.

A todos os meus amigos, tanto os que foram feitos durante o curso de graduação, quanto os amigos de toda a vida.

A empresa Engelmig Elétrica pelo apoio, confiança e oportunidade de inserção no mercado de trabalho.

RESUMO

Este trabalho visa apresentar uma análise de estabilidade, tanto para um sistema de 5 barras quanto para um sistema de 14 barras, quando estes são submetidos à saída de uma linha de transmissão. Ao todo foram realizadas 3 simulações, sendo que a primeira foi feita com o intuito de verificar qual o comportamento dos sistemas quando ocorre a saída de uma linha de transmissão em relação ao tipo de margem na curva QV. Após verificadas quais são as situações em que ocorre a instabilidade do sistema, aumentou-se a tensão das barras geradoras e uma nova simulação foi realizada. Por último, a simulação foi realizada com a adição de compensadores FACTS em algumas barras do sistema, para que se evitasse a violação dos limites operativos de potência reativa das máquinas.

Palavras Chave: Estabilidade de Tensão, Dispositivos FACTS, Compensação de Reativos, Potência Reativa.

ABSTRACT

This paper presents an analysis of stability, both for a systems of 5 and 14 buses when they are subjected to the output of a transmission line. In all three simulations were carried out of which the first was made with the intention of verifying the behavior of systems when the output of a transmission line occurs in relation to QV curve. After observing which situations where instability of the system occurred, the generation tension buses are increased and a new simulation was performed. Finally, the simulation was performed after adding compensating FACTS on some buses of the system, so that there was avoided operation limits violation of power reactive generation in machines.

Keywords: Voltage Stability, FACTS Devices, Compensation Reactive, Reactive Power.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Variação do PIB e variação do consumo de energia entre 1998 e 2007 [2].	14
Figura 2 – Energia elétrica gerada de acordo com os empreendimentos em operação [2].	15
Figura 3 - Sistema Nacional Interligado [4].	17
Figura 4 – Relação entre a operação do sistema e a operação das instalações de operação [4].	18
Figura 5 – Divisão do estudo de estabilidade em SEP [14].	20
Figura 6: Modelo de estabilizadores em reguladores de tensão [22].	28
Figura 7: Modelo dos Relés [22].	29
Figura 8: Controladores definidos pelo usuário [22].	31
Figura 9: Exemplo de um gráfico gerado pelo PlotCepel [22].	34
Figura 10 - Característica da curva QV.	38
Figura 11 - Gráfico da tensão no gerador 1 para o sistema instável de 14 barras. ...	41
Figura 12 – Gráfico da tensão no gerador 2 para o sistema instável de 14 barras. ..	42
Figura 13 – Gráfico da tensão no gerador 3 para o sistema instável de 14 barras. ..	42
Figura 14 – Gráfico da tensão no gerador 6 para o sistema instável de 14 barras. ..	43
Figura 15 – Gráfico da tensão no gerador 8 para o sistema instável de 14 barras. ..	43
Figura 16 – Potência reativa no gerador 1 para o sistema instável de 14 barras.....	44
Figura 17 – Potência reativa no gerador 2 para o sistema instável de 14 barras.....	44
Figura 18– Potência reativa no gerador 3 para o sistema instável de 14 barras.....	45
Figura 19– Potência reativa no gerador 6 para o sistema instável de 14 barras.....	45
Figura 20 – Potência reativa no gerador 8 para o sistema instável de 14 barras.....	46
Figura 21 – Tensão no gerador 1 para o sistema estável de 5 barras na saída da LT 2-4.	47
Figura 22– Tensão no gerador 2 para o sistema estável de 5 barras na saída da LT 2-4.	48
Figura 23 – Tensão no gerador 1 para o sistema estável de 5 barras na saída da LT 3-5 circuito 1.	48
Figura 24 – Tensão no gerador 2 para o sistema estável de 5 barras na saída da LT 3-5 circuito 1.	49

Figura 25 – Tensão no gerador 1 para o sistema estável de 5 barras na saída da LT 3-5 circuito 2.....	49
Figura 26 – Tensão no gerador 2 para o sistema estável de 5 barras na saída da LT 3-5 circuito 2.....	50
Figura 27 – Tensão no gerador 1 do sistema de 14 barras após a estabilidade.....	50
Figura 28 – Tensão no gerador 2 do sistema de 14 barras após a estabilidade.....	51
Figura 29 – Tensão no gerador 3 do sistema de 14 barras após a estabilidade.....	51
Figura 30 – Tensão no gerador 6 do sistema de 14 barras após a estabilidade.....	52
Figura 31 – Tensão no gerador 8 do sistema de 14 barras após a estabilidade.....	52
Figura 32 – Potência Reativa no gerador 1 do sistema de 14 barras após a estabilidade.....	53
Figura 33 – Potência Reativa no gerador 2 do sistema de 14 barras após a estabilidade.....	53
Figura 34 – Potência Reativa no gerador 3 do sistema de 14 barras após a estabilidade.....	54
Figura 35 – Potência Reativa no gerador 6 do sistema de 14 barras após a estabilidade.....	54
Figura 36 – Potência Reativa no gerador 8 do sistema de 14 barras após a estabilidade.....	55
Figura 37 – Compensador shunt ideal conectado ao ponto médio de uma Linha de Transmissão.....	59
Figura 38 – Diagrama fasorial de um compensador shunt ideal.....	59
Figura 39 – Malha de controle do SVC simulado.....	61
Figura 40 – Tensão no gerador 1 do sistema de 14 barras após inserir o SVC.....	62
Figura 41 – Tensão no gerador 2 do sistema de 14 barras após inserir o SVC.....	62
Figura 42 – Tensão no gerador 3 do sistema de 14 barras após inserir o SVC.....	63
Figura 43 – Tensão na barra onde foi inserido o SVC (barra 5).....	63
Figura 44 – Tensão no gerador 6 do sistema de 14 barras após inserir o SVC.....	64
Figura 45 – Tensão no gerador 8 do sistema de 14 barras após inserir o SVC.....	64
Figura 46 – Potência Reativa no gerador 1 do sistema de 14 barras após inserir o SVC.....	65
Figura 47 – Potência Reativa no gerador 2 do sistema de 14 barras após inserir o SVC.....	65

Figura 48 – Potência Reativa no gerador 3 do sistema de 14 barras após inserir o SVC.....	66
Figura 49 – Potência Reativa na barra onde foi inserido o SVC (barra 5).....	66
Figura 50– Potência Reativa no gerador 6 do sistema de 14 barras após inserir o SVC.....	67
Figura 51– Potência Reativa no gerador 8 do sistema de 14 barras após inserir o SVC.....	67
Figura 52 – Potência Reativa na barra onde foi inserido o SVC (barra 11).....	68
Figura 53 – Curva de capacidade de um gerador síncrono [1].....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação da curva QV com fator de carga, sistema com 5 barras.	39
Tabela 2 - Relação da curva QV com o fator de carga, sistema com 14 barras.	39
Tabela 3 - Comportamento dinâmico considerando o sistema com margem negativa de potência reativa para o sistema com 5 barramentos.	40
Tabela 4 - Comportamento dinâmico considerando o sistema com margem negativa de potência reativa para o sistema com 14 barramentos.	41
Tabela 5 – Novas tensões nas barras geradoras do sistema de 5 barras.	47
Tabela 6 – Novas tensões nas barras geradoras do sistema de 14 barras.	47
Tabela 7 – Novas margens na curva QV para o sistema de 5 barras.	56
Tabela 8 – Novas margens na curva QV para o sistema de 14 barras.	56
Tabela 9 – Comparativo entre as potências antes e depois de adicionar o SVC.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CSC	Convertible Static Compensator
FACTS	Flexible AC Transmission Systems
IPFC	Interline Power Flow Controller
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema
PIB	Produto Interno Bruto
SCADA	Aquisição Remota de Dados e Telecomando
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
STATCOM	Static Synchronous Shunt Compensator
SVC	Static Var Compensator
TCSC	Thyristor Controlled Series Condensador
TEP	Tonelada Equivalente de Petróleo
TSSC	Thyristor Switched Series Condensador
UPFC	Unified Power Flow Controller

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
RESUMO.....	5
ABSTRACT	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	11
SUMÁRIO.....	12
CAPÍTULO 1	14
1.1 INTRODUÇÃO	14
1.2 O QUE É UM SEP.....	15
1.3 OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA	17
1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
1.4.1 CEPEL.....	21
1.4.2 ANAREDE	22
1.4.3 ANATEM.....	25
1.5 SISTEMAS ESCOLHIDOS.....	34
1.6 VISÃO GERAL DO TRABALHO.....	34
CAPÍTULO 2	36
2.1 ESTABILIDADE DE TENSÃO	36
2.2 CURVAS QV	37
2.3 ALTERAÇÕES NAS TENSÕES TERMINAIS	46
2.4 NOVAS MARGENS NA CURVA QV	55
CAPÍTULO 3	57

3.1 CONTROLADORES FACTS “FLEXIBLE AC TRANSMISSIONS SYSTEMS”	57
3.2 SVC.....	58
3.3 EMULANDO UM DISPOSITIVO FACTS.....	60
3.4 SIMULAÇÃO DINÂMICA COM ESTABILIDADE E CONTROLE DE REATIVOS.....	61
CAPÍTULO 4	70
4.1 CONCLUSÕES.....	70
4.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
ANEXO 1.....	74
ANEXO 2.....	77
A2.1 CÓDIGO DE EXECUÇÃO DMAQ.....	77
A2.2 CÓDIGO DE EXECUÇÃO DMDG	77
A2.3 CÓDIGO DE EXECUÇÃO DCAR	78
A2.4 CÓDIGO DE EXECUÇÃO DCST.....	78
A2.5 CÓDIGO DE EXECUÇÃO DRGT	79
A2.6 CÓDIGO DE EXECUÇÃO DRGV	79
A2.7 CÓDIGO DE EXECUÇÃO DEVT.....	79
A2.8 CÓDIGO DE EXECUÇÃO DPLT	79
A2.9 CÓDIGO DE EXECUÇÃO DSIM	79

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

Em decorrência do crescimento econômico que o Brasil vem passando nos últimos anos, cresceu também a demanda de recursos energéticos, principalmente do setor elétrico [1]. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o consumo de energia elétrica é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico de um país. Ele reflete tanto o ritmo de atividade dos setores industrial, comercial e de serviços, quanto a capacidade da população para adquirir bens e serviços tecnologicamente mais avançados [2].

Essa inter-relação foi o principal motivo do acentuado crescimento no consumo mundial de energia verificado nos últimos anos. O gráfico da Figura 1 mostra a variação do consumo de energia elétrica em relação à variação do produto interno bruto (PIB) mundial entre os anos de 1998 e 2007.

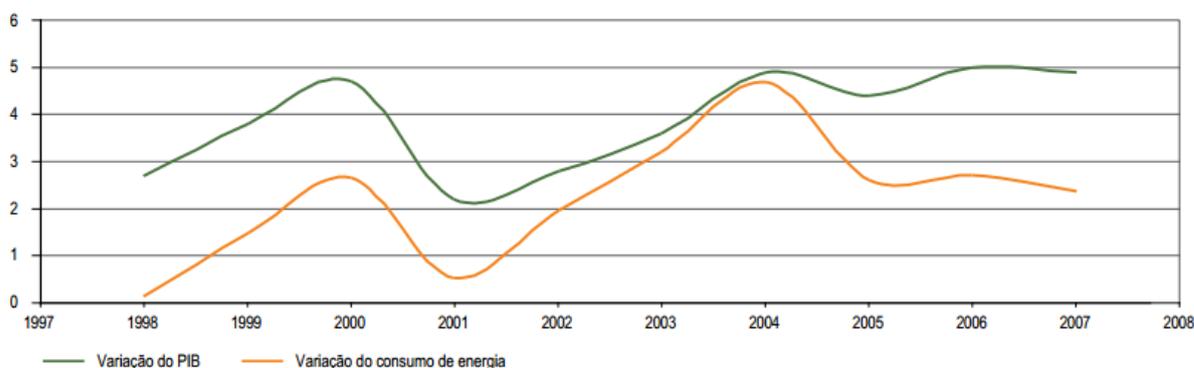


Figura 1 – Variação do PIB e variação do consumo de energia entre 1998 e 2007 [2].

Onde a variação do PIB é medida em valores percentuais, enquanto que a variação do consumo de energia é medida em toneladas equivalente de petróleo (TEP). Analisando a Figura 1, percebe-se como a curva de variação do consumo de energia acompanha proporcionalmente a curva de variação do PIB.

A partir do momento em que se percebeu esta relação entre o crescimento econômico e a disponibilidade de energia elétrica, iniciou-se o investimento em estudos e planejamentos referente à confiabilidade do sistema elétrico.

No cenário nacional, tem-se que a produção de energia elétrica é predominantemente atendida por grandes centrais hidrelétricas. O que se confirma através do gráfico representado pela Figura 2, que mostra os valores referentes ao potencial de geração, considerando os empreendimentos em operação no ano de 2013 [1].

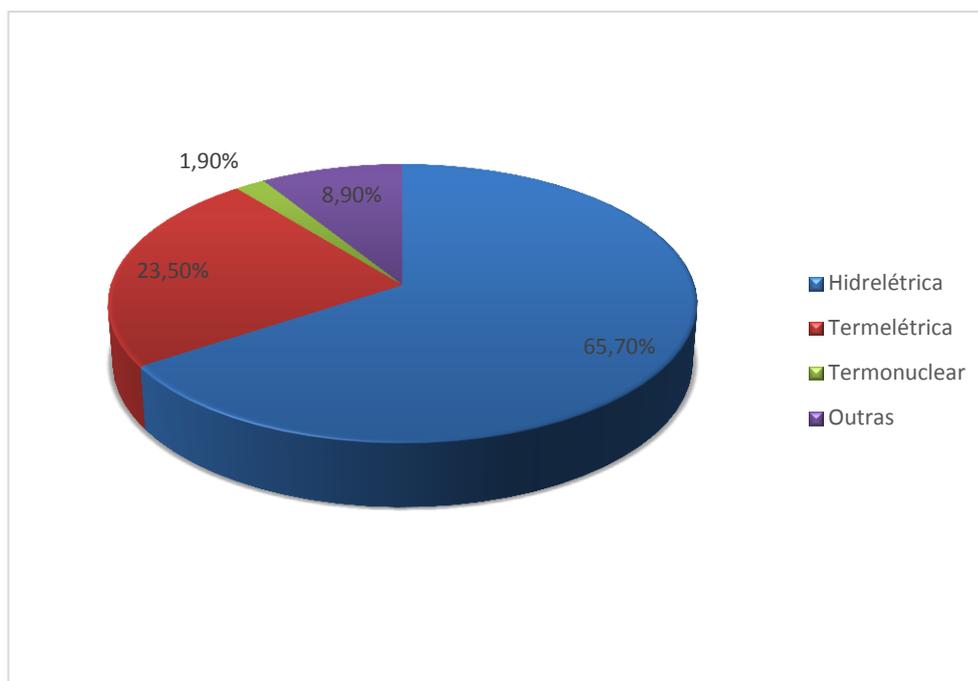


Figura 2 – Energia elétrica gerada de acordo com os empreendimentos em operação [2].

Sendo assim, é necessário interligar estas grandes centrais produtoras de energia com os grandes centros consumidores. Para isto, existem os sistemas de transmissão e distribuição de energia. Todos estes circuitos elétricos compreendidos entre a geração, transmissão e distribuição da energia é chamado de Sistema Elétrico de Potência (SEP) e é apresentado na próxima seção.

1.2 O QUE É UM SEP

Os SEP tem como função principal o fornecimento de energia elétrica com qualidade aos consumidores. A demanda deve ser atendida de forma contínua, mantendo seus parâmetros dentro dos limites de operação especificados pelos órgãos regulamentadores [3].

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define sistema elétrico de potência como sendo: "o conjunto de circuitos elétricos inter-relacionados, que compreende a instalação para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica até a medição inclusive". A seguir é descrito cada um destes três grupos que compõe os SEP:

- Geração: composto pelas centrais geradoras de energia elétrica. No Brasil, a principal fonte de geração de energia é através de hidrelétricas. Em geral, essas centrais hidrelétricas são localizadas em pontos distantes dos grandes centros de consumo, exigindo sistemas de transmissão complexos e em tensão elevada.
- Transmissão: constituído pelas linhas de transmissão e equipamentos auxiliares necessários para transmitir a energia produzida nas centrais geradoras até os centros de consumo. Os sistemas de transmissão podem ser em corrente alternada ou em corrente contínua, sendo os últimos utilizados apenas no caso de transmissão de grandes blocos de potência a longas distâncias.
- Distribuição: constituído pelas subestações e alimentadores responsáveis pela distribuição da energia elétrica aos consumidores industriais, comerciais e residenciais. Em geral, incluem também uma parte local do sistema de transmissão, em tensão mais baixa, o qual recebe a denominação de subtransmissão.

No Brasil, o sistema elétrico é quase que inteiramente interligado e, por isso, chamado de Sistema Interligado Nacional (SIN). Este sistema possui tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial. O SIN é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 1,7% da energia do país não se encontra no SIN. Estes são pequenos sistemas isolados, localizados principalmente na região amazônica, como pode ser visto através da Figura 3 [4].

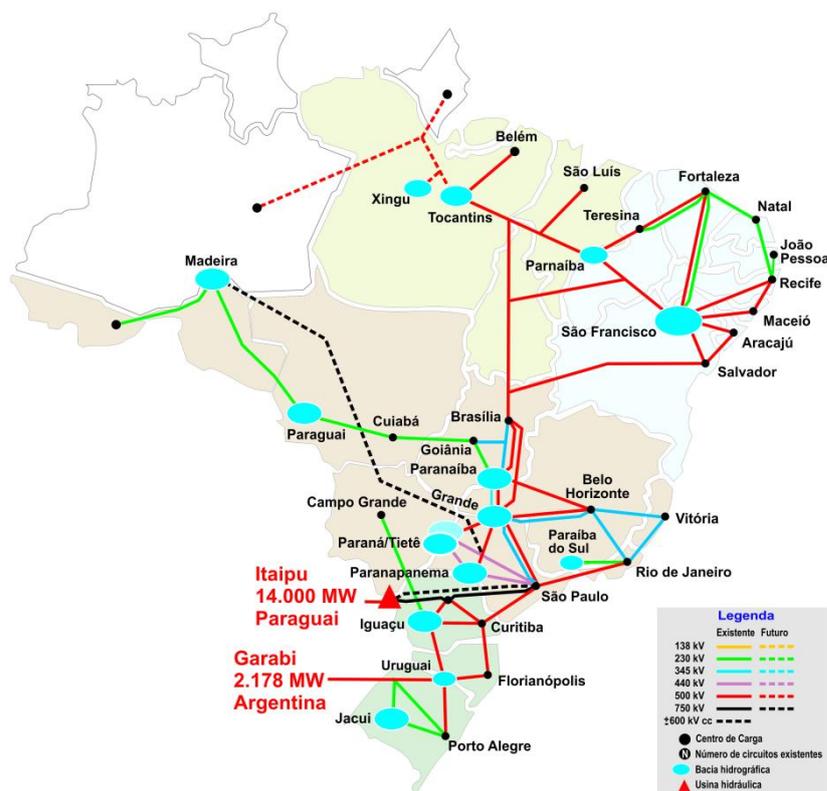


Figura 3 - Sistema Nacional Interligado [4].

Para operar todo o SIN foi criado o Operador Nacional do Sistema (ONS). No tópico seguinte é descrito um pouco mais sobre este órgão.

1.3 OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA

Este é o órgão responsável pelo controle e coordenação da operação dos sistemas de geração e transmissão de energia elétrica no SIN, sob a fiscalização e regulação da ANEEL [4].

O ONS desenvolve uma série de estudos e ações sobre o sistema e seus agentes com o intuito de atender a determinados padrões de confiabilidade, disponibilidade, qualidade, segurança e custos, com o mínimo impacto ambiental e o máximo de segurança pessoal [4].

O Operador Nacional é constituído por membros associados e membros participantes, constituídos por empresas de geração, transmissão, distribuição e consumidores livres de grande porte. Também participam importadores e exportadores de energia, além do Ministério de Minas e Energia (MME) [4].

Em 1º de março de 1999 o ONS assumiu a coordenação, supervisão, monitoração e comando da operação do SIN. Em 11 de março de 1999 ocorreu o primeiro blecaute da era ONS. Em 21 de Janeiro de 2002 ocorreu outro grande blecaute no Sistema Elétrico Brasileiro. Em ambos os casos a estratégia de recomposição foi bastante eficiente. Desde então o ONS vem exercendo suas funções no setor elétrico brasileiro [5].

A estrutura organizacional do sistema elétrico brasileiro está representada na Figura 4, onde mostra relações entre a operação do sistema e a operação das instalações na rede de operação.

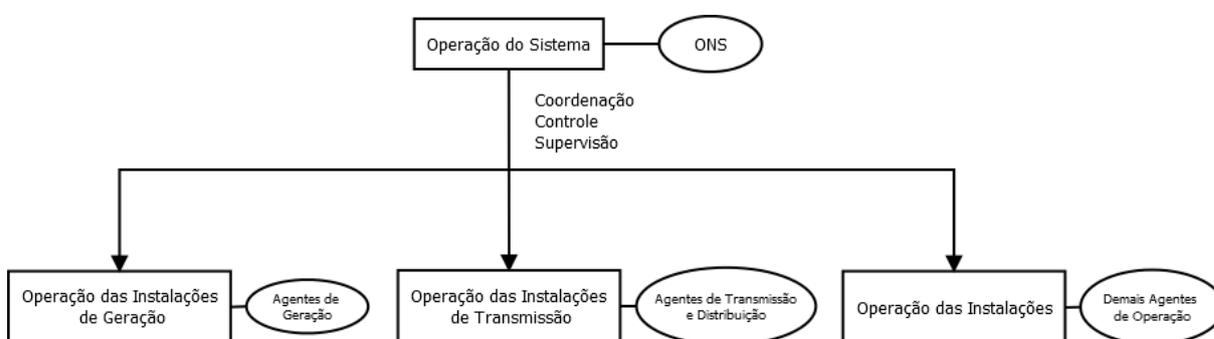


Figura 4 – Relação entre a operação do sistema e a operação das instalações de operação [4].

O ONS atua tanto no planejamento quanto na operação do SIN, contribuindo sempre para um funcionamento que visa minimizar as falhas do mesmo. Essas atividades do ONS podem ser classificadas em três categorias principais, são elas [6]:

- Planejamento da Expansão: tem como objetivo determinar a longo prazo (até 30 anos), os novos equipamentos a serem instalados no sistema, visando atender um aumento previsto da demanda de energia elétrica. Geralmente, o planejamento é realizado de forma mais ou menos independente nos diversos blocos funcionais do sistema. No caso da geração e transmissão, existe uma integração mais forte do processo de planejamento.
- Planejamento da Operação: estabelece uma estratégia de operação, incluindo planos de emergência, a médio prazo. Normalmente é subdividido em um planejamento da operação energética, no qual se analisa a melhor

estratégia para utilização dos recursos energéticos, e em planejamento da operação elétrica, onde são analisados os impactos das decisões energéticas, do programa de manutenção, visando garantir um nível adequado de confiabilidade.

- Operação em Tempo Real: tem como objetivo atender à demanda instantânea do sistema, segundo as diretrizes do planejamento da operação, com desvios mínimos em relação às tensões e frequência nominais e minimizando as interrupções no fornecimento de energia. Atualmente é realizado a partir dos Centros de Operação de Sistemas, os quais possuem facilidades para aquisição remota de dados e telecomando (SCADA) e sistemas computacionais capazes de fornecer aos operadores condições mais adequada para tomadas de decisões e ações de controle.

Este trabalho irá atuar na parte de planejamento do sistema elétrico, verificando qual o comportamento de um sistema mediante a saída de uma linha de transmissão, dentro do contexto da curva QV, e quais as soluções para que o sistema se comporte de maneira satisfatória mediante este distúrbio.

1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A instabilidade de tensão, caracterizada por um declínio lento e progressivo das magnitudes das tensões das barras de carga, tem-se constituído no principal obstáculo à operação estável dos sistemas de energia elétrica, e a razão essencial da ocorrência desse fenômeno reside na incapacidade dos sistemas de atender à crescente demanda reativa [3, 7].

A estabilidade de um sistema de potência é a propriedade que o sistema tem de permanecer em um estado de equilíbrio em regime permanente ou atingir um estado de equilíbrio após ser submetido à uma perturbação. A preocupação do estudo de estabilidade é em relação à resposta dinâmica do sistema frente à perturbação [8, 9].

Segundo Anderson [10], o sistema é estável se sua resposta oscilatória durante o período transitório que segue um distúrbio é amortecida e o sistema se estabiliza em um tempo finito para uma nova condição de operação. Se isso não

ocorrer, o sistema é considerado instável. Paixão [11], Borges [12] e Kundur [13] preferem dividir o estudo de estabilidade de acordo com a Figura 5.

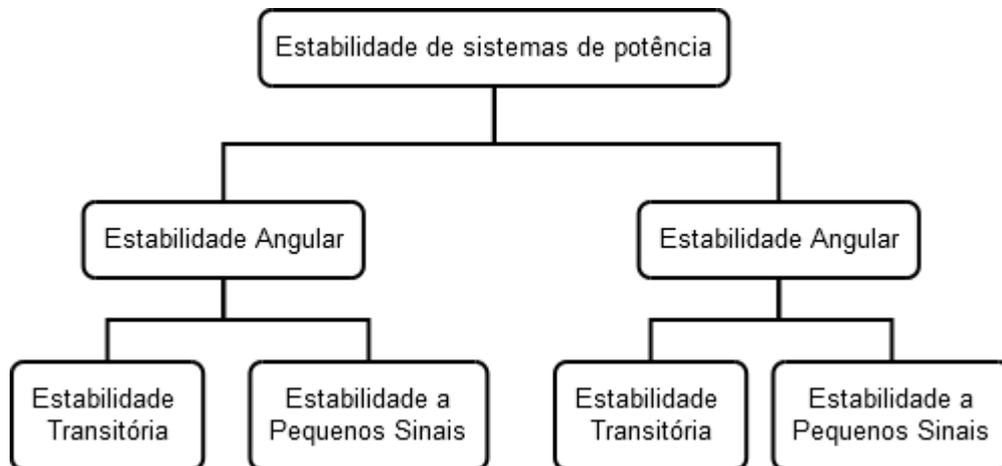


Figura 5 – Divisão do estudo de estabilidade em SEP [14].

O problema da estabilidade de tensão, geralmente é causado pelo aumento da demanda de carga no sistema elétrico. Ela ocorre quando o SEP possui níveis de tensão aceitáveis para operação após a ocorrência de perturbações.

Situações como a inserção de grandes blocos de carga no sistema, chaveamento de linhas de transmissão, chaveamento de bancos de capacitores e geradores distantes dos centros de cargas podem provocar o declínio dos níveis de tensão, fazendo com que ocorra o fenômeno denominado “Instabilidade de Tensão”. O declínio rápido dos níveis de tensão é chamado de colapso de tensão que é um problema complexo associado a sistemas muito carregados [15, 16]. Segundo [17], citado por [14], a instabilidade de tensão e os colapsos de tensão são grandes obstáculos para a operação estável do sistema e um dos principais fatores para a sua ocorrência é a incapacidade do sistema de atender a demanda crescente de energia reativa.

A análise da estabilidade de tensão pode ser feita a partir de métodos estáticos, como a construção das curvas PV e QV, através de cálculos de fluxo de potência [14]. As curvas PV apresentam a relação entre o módulo da tensão e a carga em uma barra do sistema, enquanto que as curvas QV relacionam a variação da tensão em uma barra com a potência reativa nela injetada.

Em vista disso, esse fenômeno vem sendo intensamente estudado e metodologias estáticas e dinâmicas foram propostas para a sua análise, assim como novas formas para um uso e controle mais eficientes do sistema de transmissão, propiciadas pela utilização da tecnologia FACTS (Flexible AC Transmission Systems) [18].

O conceito de FACTS propõe uma generalização da utilização da eletrônica de potência para um controle mais flexível da transmissão em corrente alternada. De acordo com essa tecnologia, um dos dispositivos utilizados para melhorar o suporte de reativos do sistema, e, por conseguinte, a estabilidade de tensão, é o compensador estático de reativos (SVC - Static Var Compensators) [18].

Nos sistemas elétricos de transmissão e distribuição o controle de reativo é feito, em geral, utilizando dispositivos conectados em paralelo ou em série e que tenham característica de absorver ou injetar reativos na rede [18].

Para realizar todas as simulações deste trabalho, utilizou-se os *softwares* ANAREDE e ANATEM, desenvolvidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Nas seções seguintes estes programas serão apresentados.

1.4.1 CEPEL

No Brasil as pesquisas no setor de energia elétrica foram iniciadas de forma tardia quando comparado com os países desenvolvidos. As primeiras atividades neste ramo foram iniciadas em 1974, quando foi criado pelo Ministério de Minas e Energia e empresas privadas o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). As pesquisas se restringiam a trabalhos realizados por institutos eletrotécnicos ligados a universidades, como o de São Paulo, do Rio de Janeiro e de Itajubá (MG), e por departamentos de estudos e pequenos laboratórios de algumas concessionárias de energia elétrica [19].

Como a tecnologia existente até então era escassa, o que se utilizavam eram sistemas locais de pequeno porte e alguns empreendimentos de maior expressão, que eram promovidos por grupos estrangeiros e que utilizavam equipamentos importados [19].

A notável ampliação da capacidade instalada de energia elétrica requeria um tipo de tecnologia que, em certos casos, se encontrava em estágio ainda

experimental nos países industrializados. O aproveitamento de fontes energéticas localizadas em regiões cada vez mais distantes das áreas de consumo, a complexidade da operação e do controle de redes de transmissão de energia elétrica - que experimentavam um processo crescente de interligação - e a necessidade de transmitir e distribuir grandes blocos de energia em zonas de elevada concentração urbana ou industrial provocaram um interesse maior, tanto das concessionárias quanto dos fabricantes de equipamentos na procura de alternativas tecnológicas próprias [19].

A criação do CEPEL situou-se, portanto, na confluência de duas perspectivas governamentais: de um lado, tentar diminuir a carga exercida pelo pagamento de royalties e patentes no balanço de pagamentos e, de outro, dotar as empresas de energia elétrica de um centro de pesquisas tecnológicas, tendo em vista as suas crescentes necessidades nesse aspecto. A expansão da capacidade de geração de energia elétrica baseou-se na construção de hidrelétricas de grande porte. Seguindo esta política foi constituída a Itaipu Binacional, que colocaria mais em evidência um dos grandes desafios tecnológicos a serem enfrentados pelo setor: a transmissão de grandes blocos de energia a longas distâncias [19].

1.4.2 ANAREDE

O ANAREDE é o programa computacional mais utilizado no Brasil na área de SEP. Ele é formado por um conjunto de aplicações integradas que inclui: Fluxo de Potência, Equivalente de Redes, Análise de Contingências, Análise de Sensibilidade de Tensão e Fluxo e Análise de Segurança de Tensão. O programa dispõe ainda de modelo de curva de carga, modelo de bancos de capacitores / reatores chaveados para controle de tensão, modelos de equipamentos equivalentes e individualizados, algoritmo para verificação de conflito de controles e facilidades para estudos de recomposição do sistema. Sua poderosa interface gráfica, aliada à utilização dos aplicativos de pós-processamento de resultados FormCepel e do EditCepel, torna o seu uso simples e rápido. O programa destaca-se por sua robustez e confiabilidade [20].

Entre os usuários do programa destacam-se as empresas concessionárias que operam redes de transmissão ou subtransmissão, universidades, ONS, EPE, MME, ANEEL e outras [20].

Abaixo será apresentada uma breve explicação da função de cada programa que compõe o ANAREDE [20].

Fluxo de Potência

O programa de fluxo de potência tem como objetivo o cálculo do estado operativo da rede elétrica para definidas condições de carga, geração, topologia e determinadas restrições operacionais.

O cálculo do estado operativo da rede elétrica consiste de um processo iterativo de soluções para o sistema CA e para o sistema CC, até que as variações entre interações consecutivas das potências injetadas na rede CA pela rede CC sejam menores que uma tolerância determinada. Dois métodos estão disponíveis para a solução das equações da rede elétrica CA:

- Método desacoplado rápido;
- Método de Newton.

Análise de Contingências

O programa de análise de contingências tem como objetivo detectar dificuldades operativas severas. Para isto, ele processa sequencialmente um conjunto de casos de contingências. Para cada caso é executada uma solução de fluxo de potência e efetuado o monitoramento do estado operativo simulado da rede elétrica. O monitoramento da rede é traduzido em termos de índices de severidade que, ao final do processamento, são ordenados decrescentemente de forma a indicar os casos mais severos.

A lista de contingência a ser processada consiste em qualquer combinação dos seguintes fatores:

- Abertura de circuito em uma das extremidades;
- Perda de carga;
- Perda de circuito;
- Perda de elemento shunt;
- Perda de geração.

Pode ser associado um grau de prioridade a cada caso para permitir um processamento seletivo dos subconjuntos de casos de contingências de mesma prioridade.

As grandezas monitoradas nos casos simulados de contingências são:

- Fluxo de potência nos circuitos;
- Níveis de tensão em barramentos;
- Potência Reativa de barras de geração.

Análise de Sensibilidade de Tensão

Tem como objetivo o cálculo de fatores de sensibilidade de primeira ordem, que traduzem o comportamento de determinadas grandezas da rede elétrica, denominadas variáveis dependentes, em relação à variação de uma grandeza de controle, denominada variável de controle. Podem também ser calculados os fatores de sensibilidade de uma variável dependente em relação a um conjunto de variáveis de controle.

As variáveis de controle consideradas são as magnitudes de tensão em barras de geração, injeções de potência reativa em barras de geração, injeções de potência reativa em barras de carga e taps de transformadores. Como variáveis dependentes são consideradas as magnitudes de tensão em barras de carga e gerações de potência reativa.

Análise de Sensibilidade de Fluxo

Tem como objetivo o cálculo de fatores de sensibilidade de primeira ordem, que traduzem o comportamento dos fluxos nos diversos circuitos da rede elétrica, denominados circuitos monitorados, em relação à variação de uma potência ativa ou reativa ou ainda a retirada de um circuito.

Para o cálculo dos fatores de sensibilidade, o sistema de equações que representa o comportamento da rede elétrica é linearizado em torno do ponto de operação. O modelo linear é obtido pela expansão destas equações em um série de Taylor e da qual são considerados somente os termos de primeira ordem.

A matriz Jacobiana resultante desta formulação é formada e seus fatores triangulares são armazenados para o efetivo cálculo dos fatores de sensibilidade.

Estes fatores de sensibilidade obtidos são sempre dados em relação à variação das potências ou retirada dos circuitos feita de forma individual, não sendo permitido o cálculo de fatores de sensibilidade em relação a uma perturbação composta por duas ou mais variações de potência ou retiradas de circuito.

Fluxo de Potência Continuado

Processa sequencialmente vários casos de fluxo de potência, aumentando a carga de um conjunto de barras de acordo com uma direção especificada. Este programa é utilizado para a determinação das margens de estabilidade de tensão e para a análise da variação do perfil de tensão frente ao crescimento da demanda do sistema.

As grandezas a serem monitoradas, durante o incremento automático de carga, são os níveis de tensão em barramentos e a potência ativa e reativa das máquinas síncronas especificados.

Para cada incremento na carga, o balanço de potência do sistema é restabelecido entre os geradores de acordo com os respectivos fatores de participação e limites de potência ativa. Esta redistribuição de potência pode ser efetuada entre os geradores da área onde ocorreu o desbalanço ou entre todos os geradores do sistema, dependendo da simulação requerida.

As cargas variam com a magnitude da tensão da barra, caso existam, são sempre modeladas na solução dos casos de fluxo de potência. O fluxo continuado permite a obtenção de curvas PV's e a detecção de margens de cargas nos SEP's [21].

1.4.3 ANATEM

A correta avaliação da estabilidade eletromecânica de um sistema elétrico de potência depende da adequada modelagem dos equipamentos do sistema. O programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM) realiza a simulação no domínio do tempo do sistema elétrico, disponibilizando modelos de todos os elementos do sistema relevantes na análise eletromecânica, em especial aqueles que incorporam um sistema de controle, tais como geradores, compensadores estáticos, etc. Recentemente foram desenvolvidos também alguns modelos de

geradores eólicos, para atender à demanda criada pela inserção deste tipo de equipamento no sistema brasileiro [22].

Um recurso do ANATEM que merece destaque é a capacidade de representar praticamente qualquer tipo de controle com o uso da funcionalidade do Controle Definido pelo Usuário (CDU), onde é oferecida uma grande variedade de blocos elementares, os quais podem ser conectados para modelagem de um controle de topologia complexa [22].

São descritas abaixo as características dos principais modelos e funcionalidades atualmente disponibilizados no ANATEM [22].

Contextos de Execução

Há dois grandes modos de utilização do ANATEM, identificados como contextos de execução, e denominados de ANATEM e ANACDU. O contexto ANATEM estabelece um ambiente para a simulação de casos de estabilidade considerando a rede elétrica e todos os tipos de modelos de controle. O contexto ANACDU estabelece um ambiente de execução para a simulação de sistemas de controle definidos pelo usuário para permitir a análise destes controladores sem a necessidade de incorporação dos demais elementos da rede elétrica.

Modelos de Carga

O programa ANATEM permite a representação de cargas variando em função da tensão. Em princípio todas as cargas de potência constante definidas no programa de fluxo de potência são convertidas para impedância constante. No entanto o usuário pode especificar quais cargas variarão com a tensão de acordo com o conhecido modelo ZIP (cargas representadas por parcelas de impedância, corrente e potência constante). Esta modelagem pode ser alterada durante a simulação.

Modelos de Geradores

Podem ser representados 3 tipos de modelo, pré-definidos no programa:

- Modelo clássico, incluindo o modelo de barra infinita;
- Modelo de polos salientes;
- Modelo de rotor liso

Aos dois últimos modelos pode ser incluída a representação da saturação.

Os dados dos modelos de gerador são fornecidos na base da máquina. O programa introduz o conceito de gerador equivalente, constituído de uma ou mais unidades da mesma máquina.

A uma mesma barra de geração, definida no programa de fluxo de potência ANAREDE, podem ser associados mais de um gerador equivalente para englobar a geração total da barra.

Modelos de Reguladores de Tensão e Excitatrizes

O programa dispõe de 24 tipos de modelos pré-definidos de regulador de tensão e excitatrizes. Alguns modelos permitem a representação da saturação. Estes sistemas de controle podem também ser modelados através de controladores definidos pelo usuário.

Modelos de Reguladores de Velocidade e Turbinas

O programa dispõe de 7 tipos de modelos pré-definidos de regulador de velocidade e turbinas. Estes sistemas de controle podem também ser modelados através de controladores definidos pelo usuário.

Modelos de Estabilizadores em Reguladores de Tensão

O programa dispõe de 12 tipos de modelos pré-definidos de estabilizador em regulador de tensão. Estes sistemas de controle podem também ser modelados através de controladores definidos pelo usuário.

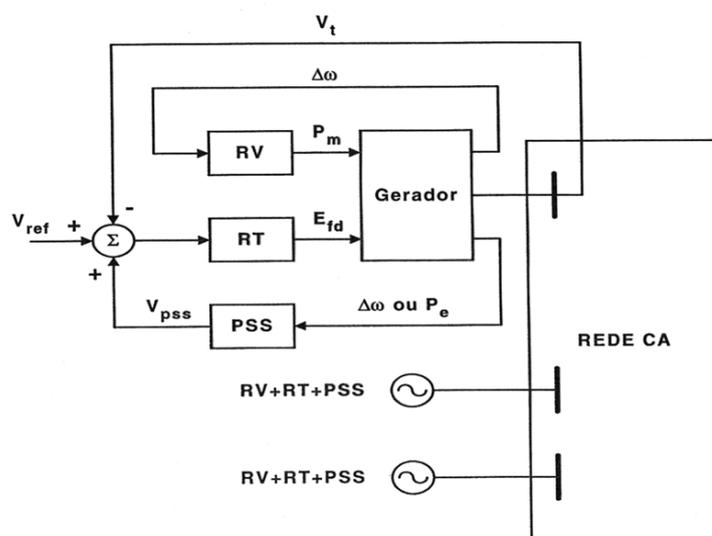


Figura 6: Modelo de estabilizadores em reguladores de tensão [22].

Modelos de Motores de Indução

O programa dispõe de 2 tipos de modelos pré-definidos de motor de indução:

- Modelo com um enrolamento de rotor, sem dinâmica elétrica rotórica;
- Modelo com um enrolamento de rotor, com dinâmica elétrica rotórica.

Modelos de Aero-geradores (geração eólica)

Foram desenvolvidos 3 tipos de modelos para a representação de aero-geradores, juntamente com a turbina eólica:

- GIDC – Gerador de indução diretamente conectado no sistema;
- GIDA – Gerador de indução duplamente alimentado;
- GSE – Gerador síncrono de velocidade variável, conectado a rede através de um conversor CA/CC/CA

Modelo de Compensador Estático (SVC)

O programa dispõe de um modelo pré-definido de compensador estático, que admite a introdução de sinal estabilizador. Os sistemas de controle dos SVCs podem também ser modelados através de controladores definidos pelo usuário (CDU).

Modelo de Compensador Série Controlável (CSC)

O programa dispõe de 2 tipos de modelo pré-definido de CSC: um para representação de TCSC (capacitor série controlado por tiristor) e o outro para TSSC (capacitor série chaveado a tiristor). Estes modelos admitem sinais estabilizadores.

Os sistemas de controle dos CSCs podem também ser modelados através de controladores definidos pelo usuário (CDU).

Modelos de Relés

O programa dispõe de 16 tipos de modelos de relés, dentre os quais podem ser citados os seguintes:

- Relé de sobrecorrente para abertura de circuito;
- Relé de sobretensão para abertura de circuito;
- Relé de impedância para abertura de circuito (2 modelos);
- Relé de impedância para detecção de oscilação entre áreas;
- Relé de subfreqüência para alívio de carga;
- Relé de subtensão para alívio de carga;
- Relé de sobretensão para desligamento de capacitor shunt;
- Relé de subtensão para desligamento de reator shunt.

Os relés podem ser utilizados com finalidade simples de monitoração ou para o efetivo desligamento do elemento associado, de acordo as condições de operação.

O relé de subfreqüência para alívio de carga possui lógica de operação por freqüência absoluta, taxa de variação ou a combinação destas lógicas.

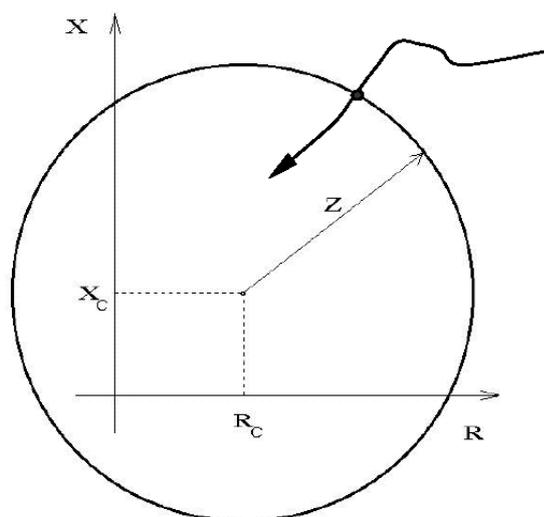


Figura 7: Modelo dos Relés [22].

Modelos de Controle de Comutadores de Tap de Transformadores em Carga (OLTC)

O programa dispõe de um modelo pré-definido para OLTC. Estes sistemas de controle podem também ser modelados através de controladores definidos pelo usuário (CDU).

Modelos de Elos de Corrente Contínua

O programa dispõe de um modelo de controle de elo CC e 2 tipos de modelos de controle de conversor CA-CC para a representação de redes multiterminais de corrente contínua, derivados a partir de sistemas de controle atualmente utilizados. Estes sistemas de controle podem também ser modelados através de controladores definidos pelo usuário e permitem também a incorporação de sinais de modulação de potência, corrente e sinais de modulação para controle de área mínima e gama mínimo.

Controladores Definidos Pelo Usuário (CDU)

O programa tem a capacidade de permitir ao usuário a definição de sistemas gerais de controle, utilizando uma linguagem de descrição baseada em diagramas de blocos funcional, onde os blocos são representados por sua função de transferência de Laplace (blocos lineares) ou pela função não linear que relaciona as entradas e as saídas no domínio do tempo.

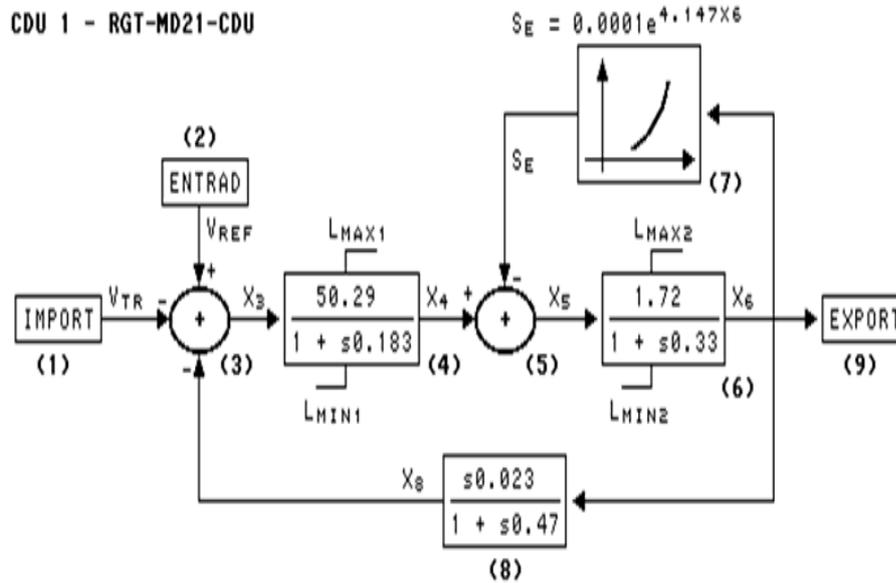


Figura 8: Controladores definidos pelo usuário [22].

Variação dos Parâmetros da Rede com a Frequência

O programa permite representar a variação dos parâmetros dos elementos da rede, estáticos e dinâmicos, com a frequência. Considera a média das frequências dos geradores da ilha elétrica, ponderadas pelas inércias das máquinas, para a correção dos parâmetros dos elementos.

Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC)

O programa implementa um esquema de alívio de carga, baseado na supervisão da frequência ou da taxa de variação da frequência da zona de controle. Como na representação dos relés, este esquema pode ser utilizado com finalidade simples de monitoração ou para o efetivo alívio da carga, de acordo as condições de operação.

Variação Automática de Cenário de Carga/Geração

Para ajudar o usuário a simular a variação da carga e dos sinais de referência de potência dos geradores durante um certo período, o programa permite a variação linear destas grandezas. O usuário deve especificar o intervalo de tempo, a amplitude e o número das variações, assim como quais elementos serão alterados. O programa gera automaticamente os eventos, simplificando desta forma a entrada de dados.

Simulação de Distúrbios

O programa apresenta facilidades de alteração da configuração e carregamento do sistema para a simulação de grande variedade de distúrbios, dentre os quais os principais são:

- Abertura e fechamento de circuitos em um lado ou ambos, incluindo os reatores
- Modificação de elementos shunt
- Modificação de parâmetros de circuitos CA
- Modificação de carga
- Aplicação e remoção de curto em barra
- Aplicação e remoção de curto em linha
- Remoção de unidade geradora ou usina
- Remoção de motor de indução
- Bloqueio de elo CC
- Aplicação de degrau em sinais de referência em controladores pré-definidos
- Aplicação de degrau em blocos de entrada de controladores definidos pelo usuário
- Aplicação de degrau no valor de tensão de barra infinita

Arquivo de Reguladores

Os dados de modelos dos sistemas de controle, que independem dos dados do modelo de fluxo de potência, podem ser armazenados em arquivo, constituindo desta forma uma base de dados de modelos para o programa. Neste arquivo podem ser armazenados os modelos de gerador, reguladores de tensão, reguladores de velocidade, estabilizadores, elos de corrente contínua, compensadores estáticos, compensadores série controláveis, controles de OLTC, curvas de saturação e controladores definidos pelo usuário.

Relatórios de Saída e Dados Para Saída Gráfica

Estão disponíveis diversos relatórios de saída que podem ser obtidos antes e durante a fase de simulação de um caso. Durante a simulação o usuário pode especificar a frequência com que estes relatórios serão produzidos.

Para a análise gráfica dos resultados estão disponíveis diversas grandezas dos elementos das redes elétricas CA e CC e dos modelos dos reguladores pré-definidos. Para os controladores definidos pelo usuário estão disponíveis todas as variáveis de saída de todos os blocos, bem como as variáveis de estado dos blocos integradores.

Dois programas auxiliares permitem a plotagem de resultados de simulação: **Plotgraf**, para uso em ambiente DOS, e **PlotCepel**, para uso em ambiente Windows.

Capacidade do Programa

A versão de distribuição tem capacidade de representação de 5000 barras CA, 1250 barras de geração, 9000 circuitos CA, 24 elos CC, 1375 máquinas equivalentes, 1100 modelos de geradores, 825 modelos de regulador de tensão e excitatriz, 680 modelos de reguladores de velocidade e turbinas e 2000 controladores definidos pelo usuário.

Esta capacidade pode ser facilmente alterada de acordo com instalações computacionais específicas.

Programas auxiliares

No pacote do ANATEM encontram-se programas acessórios para pré e pós-processamento que auxiliam a análise dos resultados e na preparação de dados de entrada, a seguir listados:

- **ANATO** - uma das principais funções é o cálculo do número de unidades geradoras de um caso de inércia mínima;
- **PlotCepel** - destinado para a visualização dos resultados em forma de gráficos;

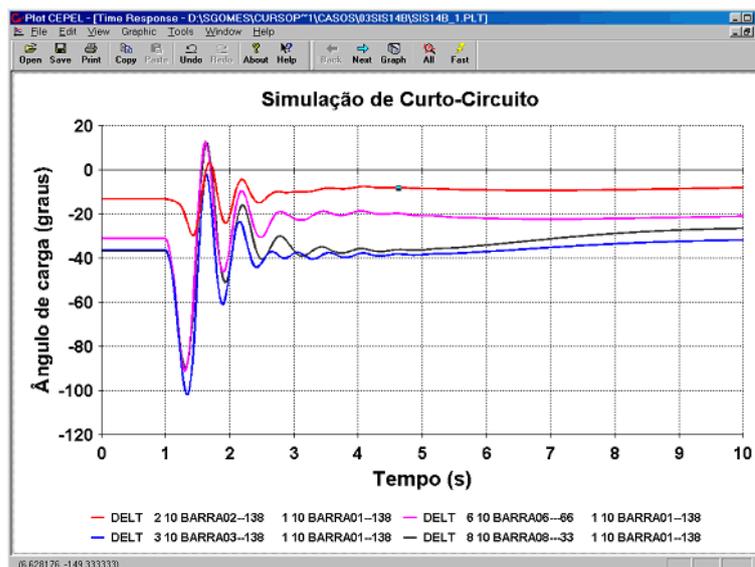


Figura 9: Exemplo de um gráfico gerado pelo PlotCepel [22].

- **ConvForm** - para a conversão do formato antigo (baseado em 4 dígitos) para o formato novo (5-dígitos);
- **Plotgraf**- programa para plotagem em ambiente DOS;
- **Convert** - programa para conversão dos arquivos de saída em padrão Microsoft EXCEL;
- **EditCepel** - editor dedicado para arquivos de entrada dos programas do Cepel, que contém réguas associadas aos diversos comandos, e crítica de erro de formatação dos dados.

1.5 SISTEMAS ESCOLHIDOS

Foram selecionados para simulação os seguintes sistemas elétricos, apresentados no ANEXO I deste documento:

- Sistema teste de 5 Barras;
- Sistema teste de 14 Barras.

1.6 VISÃO GERAL DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo geral mostrar como se comporta um sistema com pequena margem de reativos na curva QV mediante a um grande distúrbio não linear, como a saída de uma linha de transmissão.

Para isso, serão traçadas várias curvas QV utilizando o *software* ANAREDE. Feito isso, será escolhido um ponto com baixa margem da curva QV e, através do *software* ANATEM será simulada a saída da linha de transmissão. Após verificar como foi o comportamento deste sistema, a margem da curva QV será aumentada, através da adição de dispositivos FACTS, em alguns pontos do sistema. Feito isso, será verificado se o sistema será capaz de suportar o mesmo distúrbio. Em caso positivo, será calculada novamente a curva QV para o sistema compensado. Pretende-se conscientizar o leitor em relação a qual tipo de margem de potência reativa é mais benéfica para os sistemas analisados.

A organização do trabalho foi feita da seguinte maneira:

- No Capítulo 1 é feita uma breve introdução do que é um sistema elétrico de potência, operador nacional do sistema, faz uma revisão bibliográfica acerca do tema abordado, apresenta os sistemas utilizados nas simulações e por último mostra uma visão geral do trabalho.
- O Capítulo 2 apresenta o conceito de estabilidade de tensão, curva QV, bem como os resultados obtidos através das simulações dinâmicas com instabilidade e estabilidade.
- No capítulo 3 é apresentado o conceito de dispositivos FACTS, escolhido qual destes dispositivos será utilizado no trabalho e realizado a compensação dos reativos para o sistema utilizando este equipamento.
- Capítulo 4 preocupa-se com a conclusão do trabalho e propõe atividades futuras que podem ser desenvolvidas.

CAPÍTULO 2

2.1 ESTABILIDADE DE TENSÃO

Um dos principais objetivos dos sistemas elétricos de potência (SEP) é o fornecimento de energia elétrica com qualidade. A demanda deve ser atendida de forma contínua, mantendo seus parâmetros (tensão, frequência, etc.) dentro dos limites de operação especificados pelos órgãos regulamentadores. Entretanto, durante a operação, o sistema está sujeito a eventos que podem afetar seus parâmetros, podendo causar inclusive a interrupção do fornecimento de energia elétrica.

Além dos fenômenos de estabilidade angular, a possibilidade de ocorrência de problemas ligados à estabilidade de tensão vem se tornando, no passado recente, um assunto de grande preocupação nas empresas de energia elétrica do mundo inteiro [3]. Os fenômenos de estabilidade de tensão estão intrinsecamente ligados ao fluxo de potência reativa sobre a rede, ao comportamento das cargas face a variações de tensão, à ação de dispositivos automáticos de controle de tensão e limitação de sobre-excitação de geradores, etc [22].

No final da década de 50, com a interligação de sistemas elétricos e a entrada em operação de sistemas de excitação rápidos e de alto ganho, uma nova forma de instabilidade emergiu, a chamada instabilidade dinâmica, associada a condições de operação em que o sistema apresenta pouco amortecimento ou mesmo instabilidade oscilatória [25].

O problema da estabilidade de tensão se agravou recentemente, devido principalmente a problemas de infraestrutura no sistema de transmissão, que geralmente aperam sobrecarregados. Esta instabilidade de tensão se caracteriza pelo afundamento de tensão, em períodos de tempo que pode variar de alguns segundos até dezena de minutos. Quando o sistema de controle não é capaz de conter este afundamento, pode ocorrer um colapso parcial ou total do sistema.

Estabilidade de tensão está diretamente ligada à característica da rede de transmissão e ao tipo de carga conectada no sistema. Sendo assim, a limitação na capacidade de transmissão da rede elétrica limita o fornecimento de potência reativa às cargas, reduzindo assim a tensão. A característica das cargas conectadas ao

sistema e a atuação dos taps de transformadores pode piorar a situação levando à instabilidade de tensão. No entanto, sabe-se que a instabilidade de tensão é um fenômeno dinâmico, portanto a dinâmica de todos os elementos do sistema, incluindo geradores, deve ser considerada [25].

Quando o sistema opera no limite da sua capacidade de carregamento ele fica sujeito a um progressivo declínio da magnitude de tensão. Este problema envolve três aspectos básicos:

- características da carga;
- distúrbios na rede elétrica;
- controles para a manutenção da magnitude de tensão.

Estes aspectos interagem fortemente entre si, afetando a capacidade da rede de transferir potência reativa dos centros de geração aos centros consumidores.

2.2 CURVAS QV

Através da curva QV obtém-se a variação da magnitude da tensão em uma determinada barra em função da injeção de potência reativa. A obtenção desta curva é feito adicionando-se um condensador síncrono fictício à barra escolhida para análise. Reduz-se gradativamente a sua tensão à medida que se calcula a injeção de potência reativa através da solução de sucessivos fluxos de potência. Computacionalmente, isto é realizado convertendo-se a barra PQ em questão, em barra PV sem limites de injeção de reativos [15].

Analisando a curva QV ilustrada na Figura 10, percebe-se que o sistema está estável na região onde a derivada dQ/dV é positiva, e instável onde a derivada dQ/dV é negativa. O limite de estabilidade de tensão (ponto crítico) é atingido quando a derivada é igual à zero.

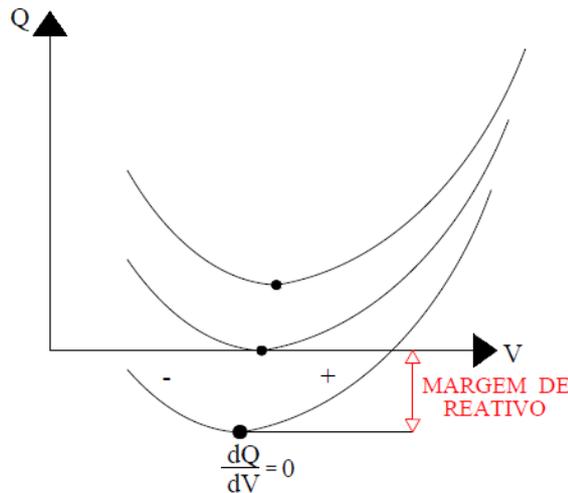


Figura 10 - Característica da curva QV.

A margem de potência reativa pode ser medida a partir da distância entre o eixo horizontal (saída nula do condensador síncrono) e o ponto mínimo (ponto crítico $dQ/dV=0$). Se o mínimo da curva se encontrar acima do eixo horizontal, o sistema de potência apresenta margem de potência reativa negativa, devido à incapacidade no suprimento de potência reativa. Na condição em que o ponto crítico se encontra abaixo do eixo horizontal, o sistema apresenta margem de potência reativa positiva. Não se sabe qual tipo de margem de potência reativa é mais benéfica para os sistemas elétricos de potência e tal fato é uma preocupação do presente documento.

A curva QV, se traçada para o ponto de máximo de carregamento, obtido a partir da curva PV, apresenta margem de potência reativa pequena ou nula para as barras críticas do sistema de potência, pois o ponto crítico está tangente ao eixo horizontal, conforme a Figura 10.

As Tabelas 1 a 3 indicam os valores de margem da curva QV real para diversos sistemas e cargas supridas. Para a obtenção destes resultados, o passo da curva QV obedeceu a seguinte equação:

$$V_{barramento} = V_{barramento} - 0,05pu \quad \text{Eq. 1}$$

Onde $V_{barramento}$ é a tensão terminal do gerador onde se deseja traçar a curva QV. Com relação à alteração da carga suprida, manteve-se o mesmo fator de potência. Adicionalmente, também considerou que a potência ativa gerada se

alterou na mesma proporção que o carregamento do sistema. Por exemplo, na Tabela 1, quando se localiza a linha com Fator de Carga igual 1,1[p.u.] é o mesmo que afirmar que as parcelas ativas e reativas de todas as cargas foram multiplicadas pelo fator 1,1, assim como todas as potências ativas geradas no sistema em relação ao caso base.

Na Tabela 1, observa-se que com o aumento do fator de carga, menor é a margem de potência reativa da curva QV. Isto é algo esperado, pois este aumento de carregamento faz com que as máquinas do sistema fiquem mais próximas dos seus limites operativos.

Tabela 1 - Relação da curva QV com fator de carga, sistema com 5 barras.

Fator de Carga	Margem da Curva QV	
	Gerador 1	Gerador 2
1,0	0,7179	0,3932
1,1	0,6934	0,3162
1,2	0,6650	0,2344
1,3	0,6318	0,1376
1,4	0,5924	0,0259
1,5	0,5445	-0,1004
1,6	0,4871	-0,2506
1,7	0,4190	-0,3901
1,8	0,3367	-0,5291
1,9	0,2372	-0,6782
2,0	0,1208	-0,8416

Tabela 2 - Relação da curva QV com o fator de carga, sistema com 14 barras.

Fator de Carga	Margem da Curva QV				
	Gerador 1	Gerador 2	Gerador 3	Gerador 6	Gerador 8
1,0	0,4399	4,7280	1,3774	0,9179	0,6440
1,1	0,2727	4,4085	1,2707	0,8397	0,6066
1,2	0,0724	3,9899	1,1533	0,7539	0,5647
1,3	-0,1569	3,4726	1,0228	0,6600	0,5168
1,4	-0,2605	2,8831	0,8747	0,5570	0,4603
1,5	-0,5269	2,2828	0,7004	0,4408	0,3904
1,6	-0,8436	1,7621	0,5009	0,3067	0,2944
1,7	-1,2398	0,9532	0,2474	0,1557	0,1579
1,8	-1,8044	-0,1101	-0,0644	-0,0221	-0,0287

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 1 o sistema com 5 barramentos apresenta margem negativa de reativos da curva QV para o fator de carga igual a 1,5 [p.u.]. Através da Tabela 2, percebe-se o sistema de 14 barramentos apresenta esta mesma margem negativa para fator de carga igual a 1,8 [p.u.].

A hipótese levantada por este trabalho relaciona o suporte de potência reativa indicado pela curva QV com o comportamento dinâmico do sistema. De certa forma, é um relacionamento interessante, pois unem resultados de uma análise estática, curva QV, com uma análise que permite a ocorrência de grandes distúrbios como a saída dinâmica de uma linha de transmissão. Foi observado que os sistemas apresentaram problemas de simulação dinâmica a partir do momento que a margem de potência reativa da curva QV apresentaram valores negativos. Tais constatações estão indicadas nas Tabelas 3 e 4. As figuras de 11 a 20 ilustram as instabilidades dinâmicas encontradas no sistema com 14 barramentos.

Tabela 3 - Comportamento dinâmico considerando o sistema com margem negativa de potência reativa para o sistema com 5 barramentos.

Saída de LT entre as barras	Comportamento Dinâmico
1-3	Estável
2-4	Atingiu o número máximo de iterações
3-4 circuito 1	Estável
3-4 circuito 2	Estável
3-5 circuito 1	Atingiu o número máximo de iterações
3-5 circuito 2	Atingiu o número máximo de iterações

Tabela 4 - Comportamento dinâmico considerando o sistema com margem negativa de potência reativa para o sistema com 14 barramentos.

Saida de LT entre as barras	Comportamento Dinâmico
1-2	Estável
1-5	Estável
2-3	Estável
2-4	Estável
2-5	Estável
3-4	Estável
4-5	Estável
7-4	Estável
9-4	Estável
6-5	Instável
6-11	Estável
6-12	Estável
6-13	Estável
7-8	Estável
7-9	Estável
9-10	Estável
9-14	Estável
10-11	Estável
12-13	Estável
13-14	Estável

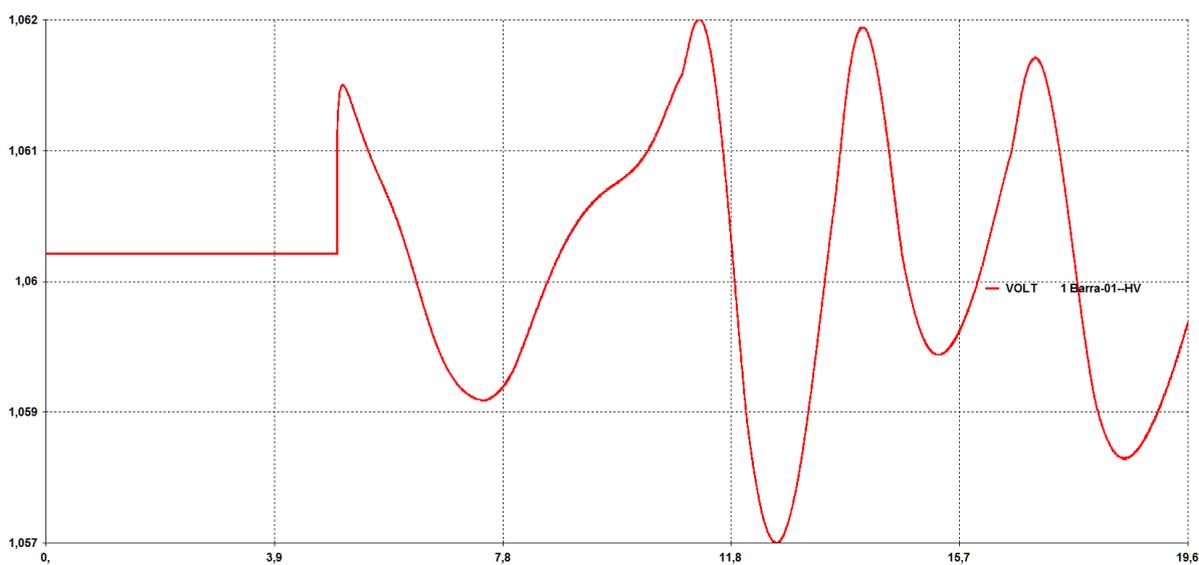


Figura 11 - Gráfico da tensão no gerador 1 para o sistema instável de 14 barras.

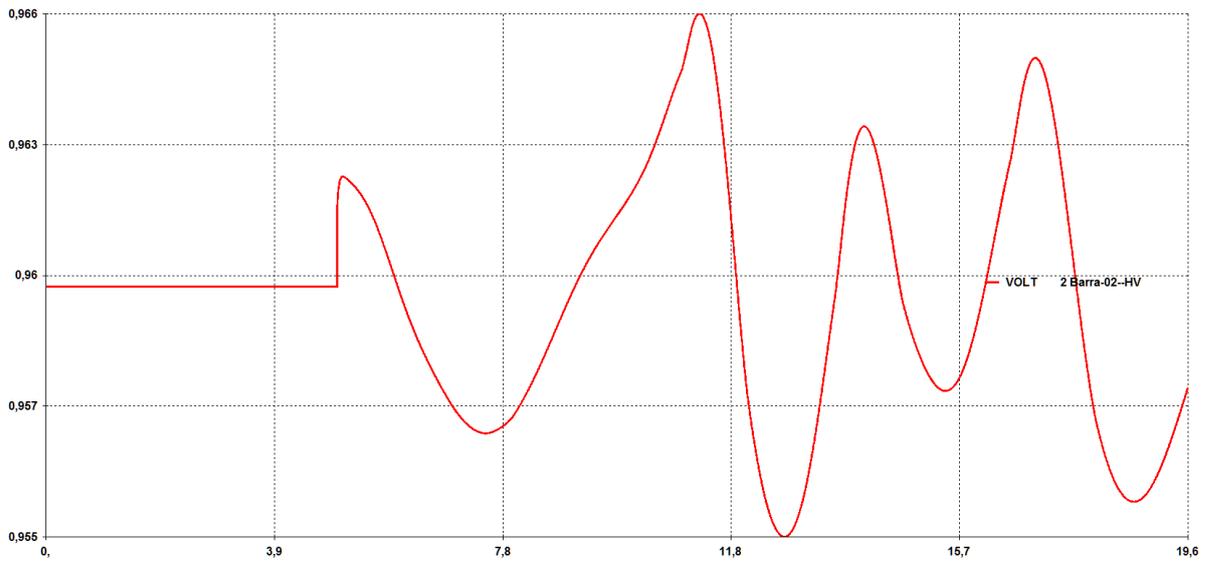


Figura 12 – Gráfico da tensão no gerador 2 para o sistema instável de 14 barras.

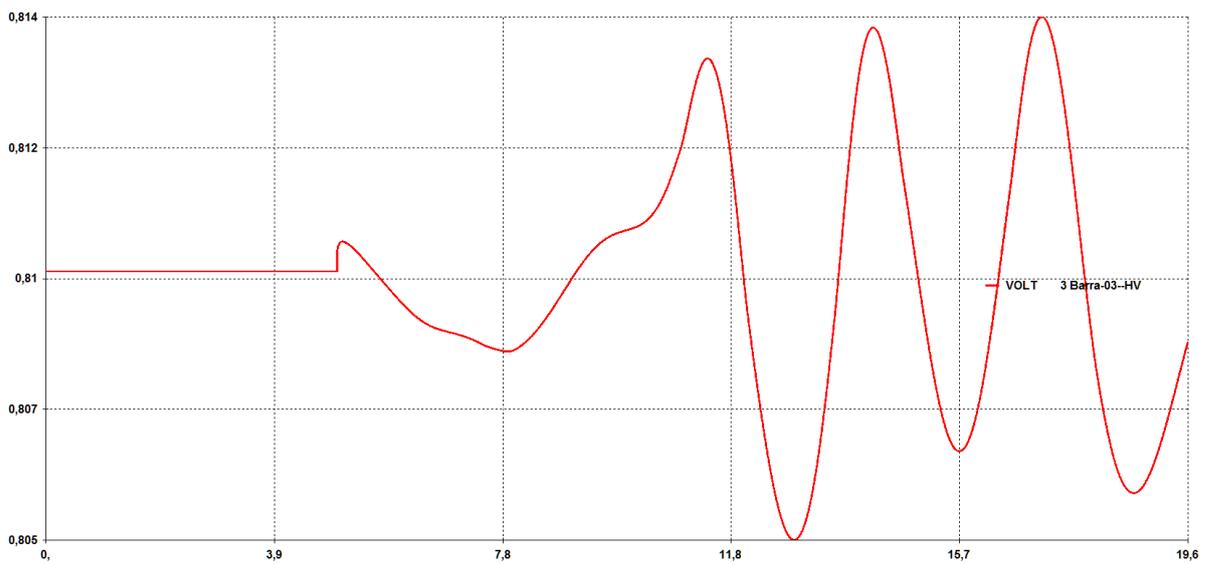


Figura 13 – Gráfico da tensão no gerador 3 para o sistema instável de 14 barras.

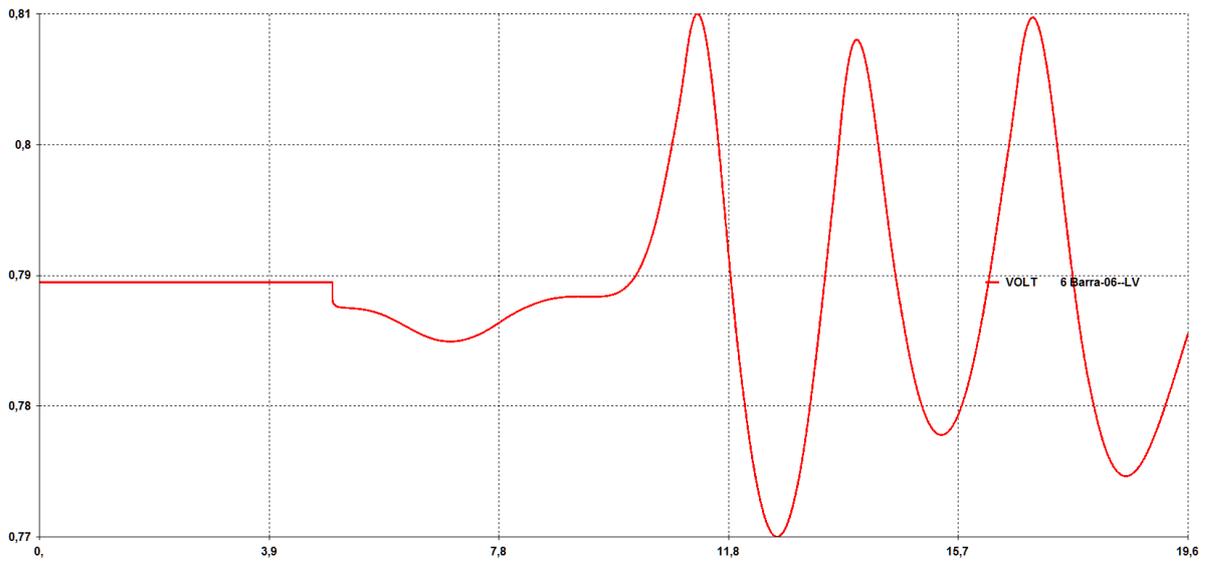


Figura 14 – Gráfico da tensão no gerador 6 para o sistema instável de 14 barras.

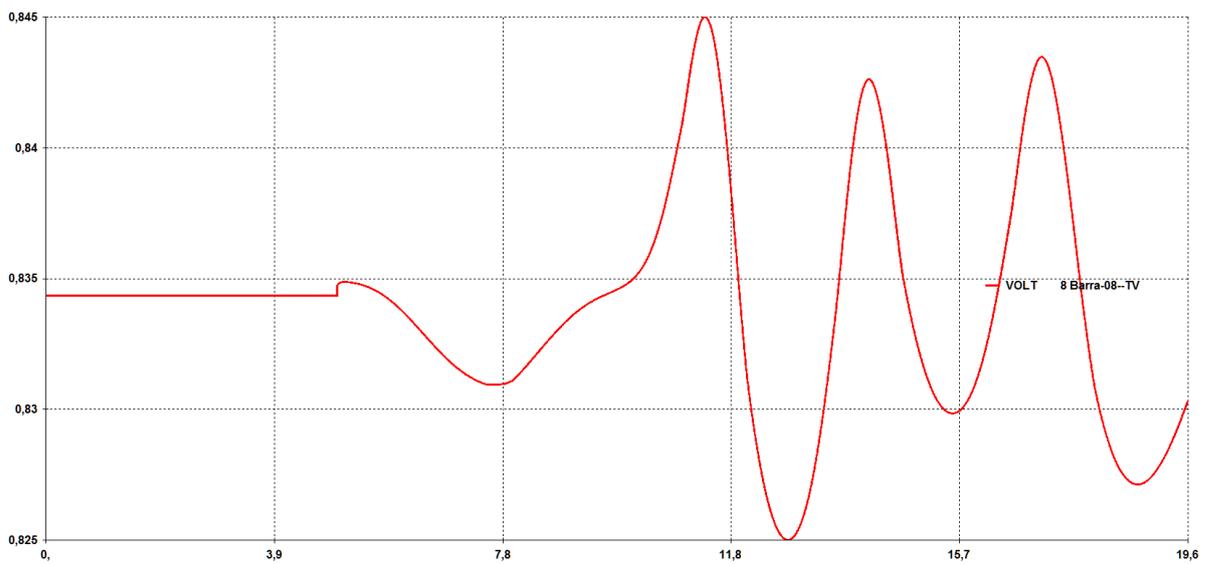


Figura 15 – Gráfico da tensão no gerador 8 para o sistema instável de 14 barras.

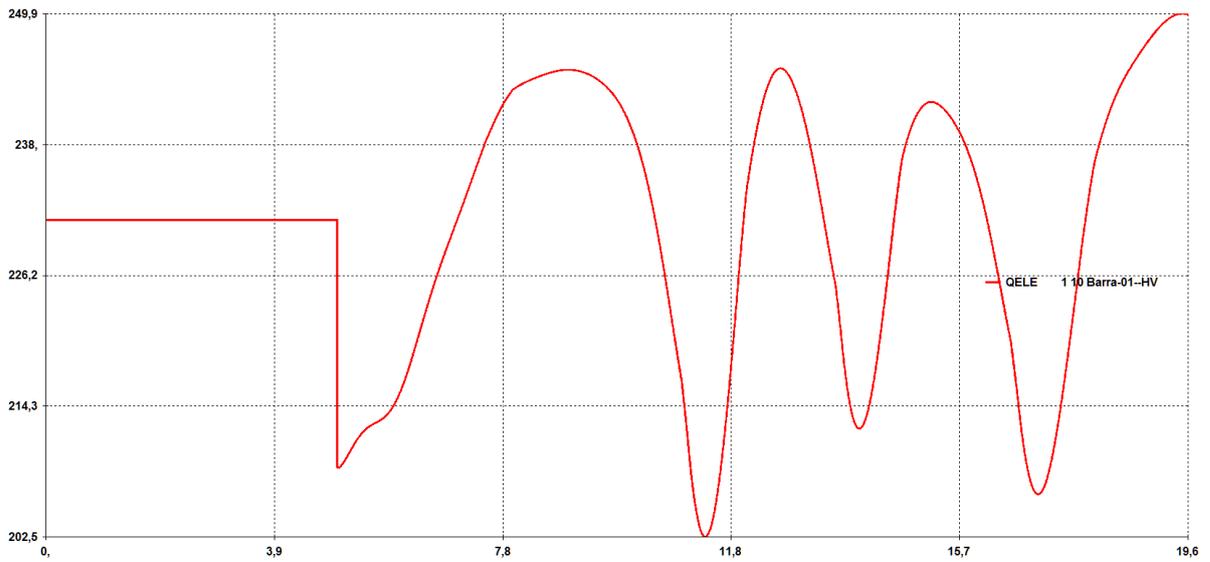


Figura 16 – Potência reativa no gerador 1 para o sistema instável de 14 barras.

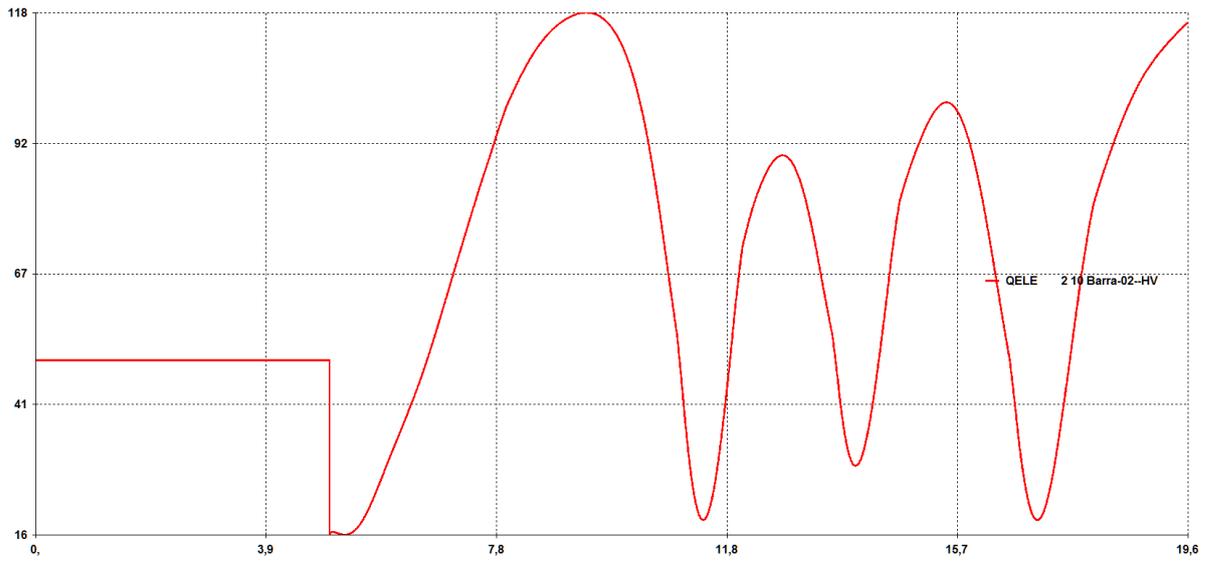


Figura 17 – Potência reativa no gerador 2 para o sistema instável de 14 barras.

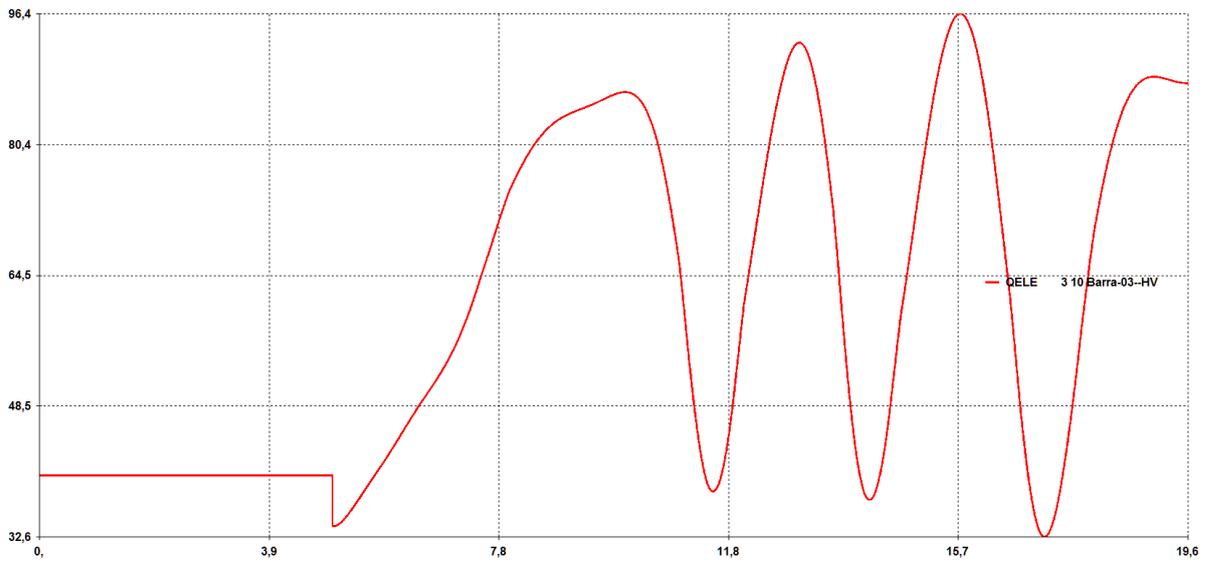


Figura 18– Potência reativa no gerador 3 para o sistema instável de 14 barras.

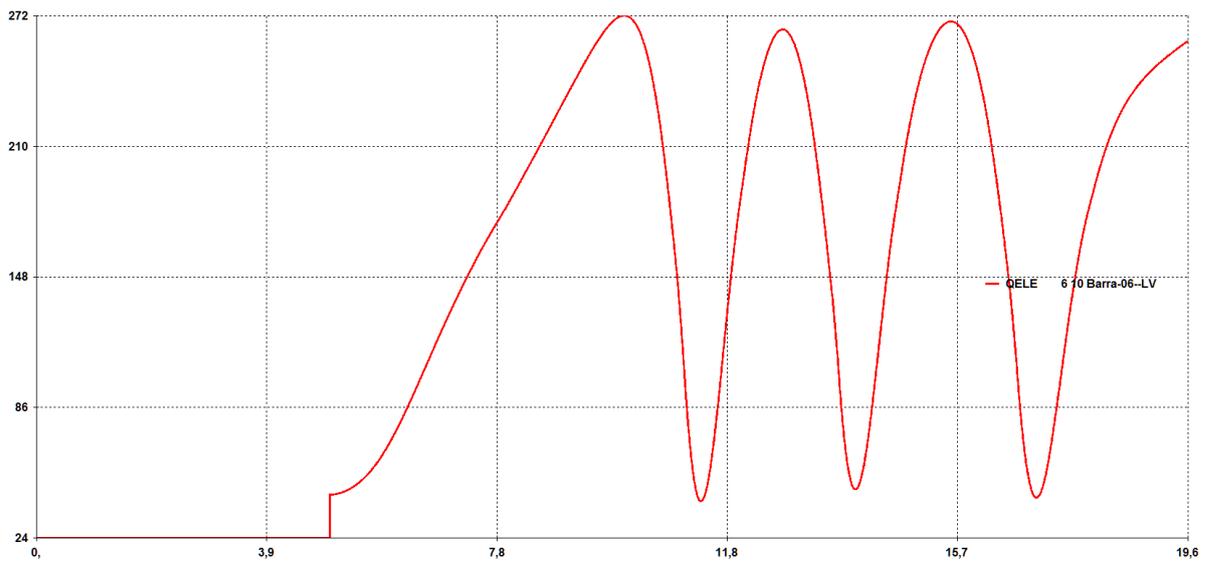


Figura 19– Potência reativa no gerador 6 para o sistema instável de 14 barras.

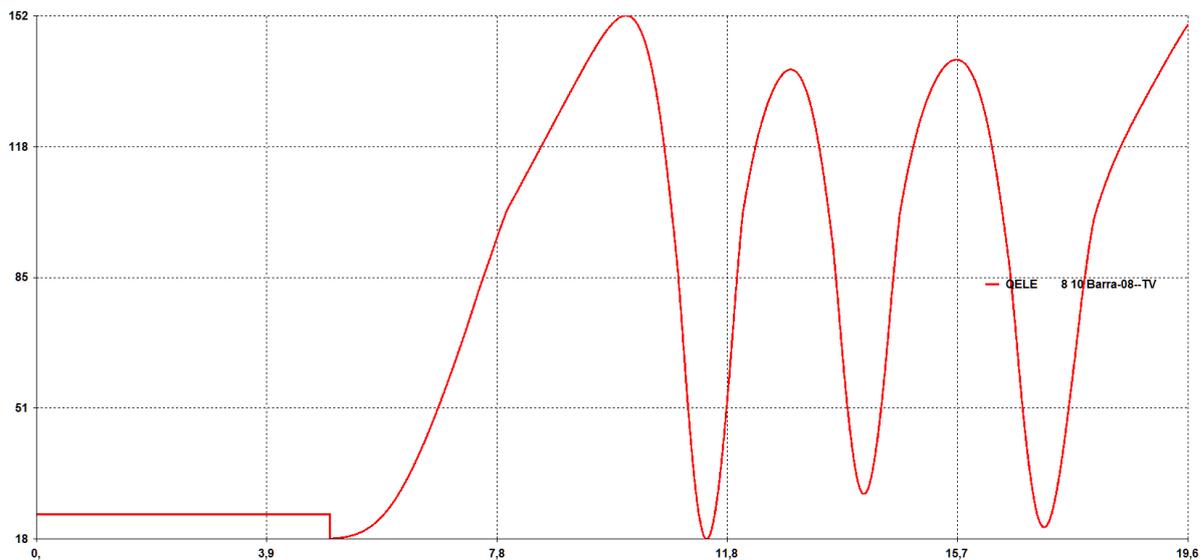


Figura 20 – Potência reativa no gerador 8 para o sistema instável de 14 barras.

Baseado nestas informações, vê-se a necessidade de fazer um controle que leve o sistema a estabilidade. Além disso, está demonstrado que margens negativas nas curvas QV estão associadas a problemas numéricos de simulações dinâmicas. A primeira ação de controle a ser adotada é a elevação das tensões terminais dos geradores afim de se buscar a estabilidade do sistema e verificar o comportamento da margem de potência reativa na curva QV.

2.3 ALTERAÇÕES NAS TENSÕES TERMINAIS

Como dito anteriormente, uma das maneiras de resolver o problema da instabilidade dos sistemas que possuam uma margem negativa de reativos, é elevando as tensões terminais dos geradores. Sendo assim, nesta seção será mostrado como isto foi feito.

Um acréscimo de 0,1 [p.u.] foi inserido no valor de tensão de cada barra geradora, e o sistema era simulado, primeiramente no ANAREDE e em seguida no ANATEM, até que foram encontrados os valores de tensão para os quais o sistema atingia a estabilidade.

Na Tabela 5 estão apresentados os novos valores de tensão para os geradores do sistema de 5 barras, enquanto que na Tabela 6 estão apresentados os novos valores de tensão para os geradores do sistema de 14 barras.

Tabela 5 – Novas tensões nas barras geradoras do sistema de 5 barras.

Tensões	
Gerador 1	Gerador 2
1,07	1,07

Tabela 6 – Novas tensões nas barras geradoras do sistema de 14 barras.

Tensões				
Gerador 1	Gerador 2	Gerador 3	Gerador 6	Gerador 8
1,08	1,06	1,03	1,08	1,09

A partir destes valores de tensão, foram traçados os novos gráficos de tensão e potência reativa. Com este ajuste da tensão terminal dos geradores, o problema que ocorria de limite máximo de iterações no sistema de 5 barras (saída da linha de transmissão entre as barras 2-4, 3-5 circuito 1 e 3-5 circuito 2) foi eliminado, e o sistema alcançou a estabilidade, conforme indicado pelas Figuras de 21 a 26.

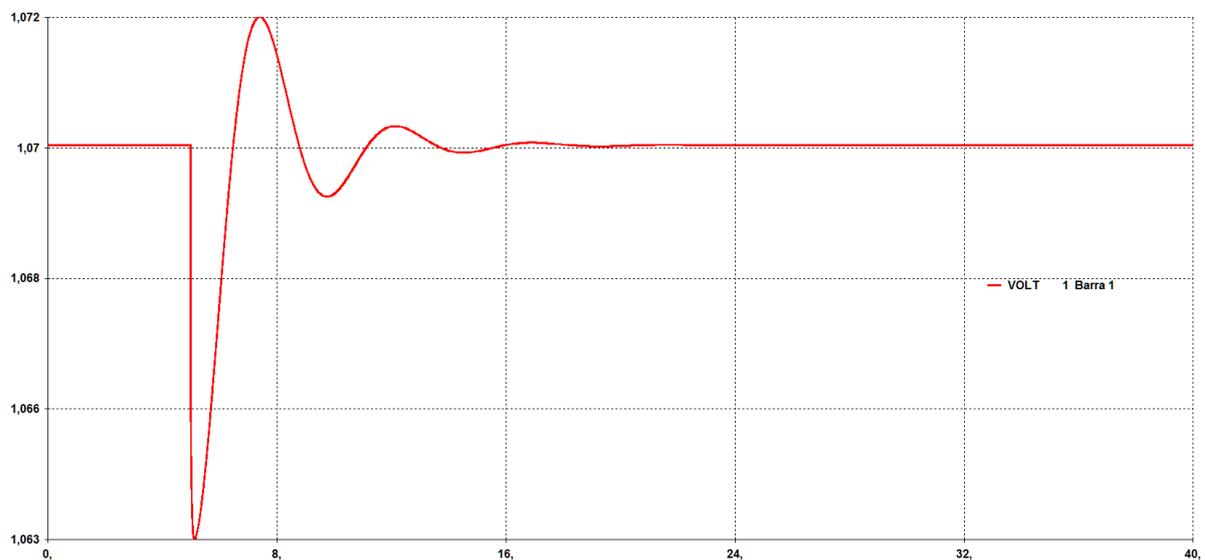


Figura 21 – Tensão no gerador 1 para o sistema estável de 5 barras na saída da LT 2-4.

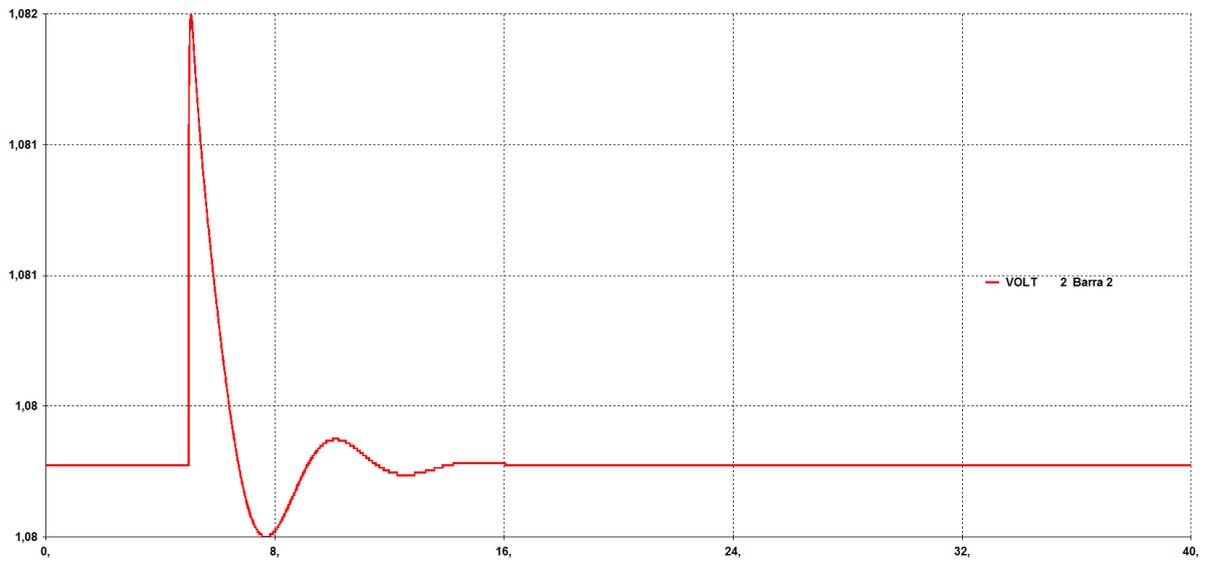


Figura 22– Tensão no gerador 2 para o sistema estável de 5 barras na saída da LT 2-4.

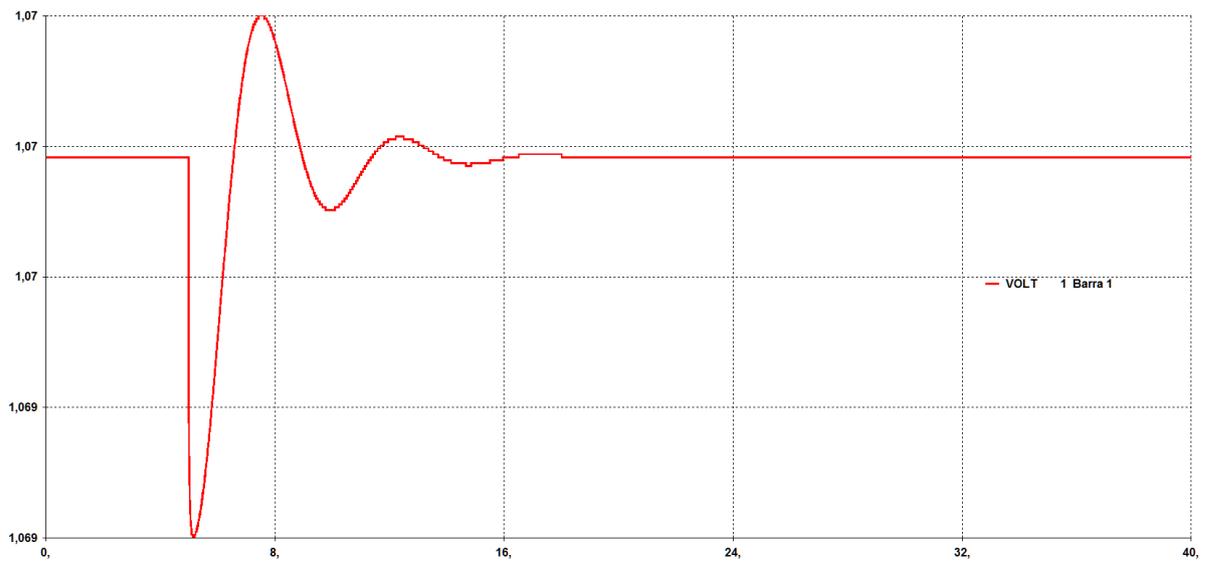


Figura 23 – Tensão no gerador 1 para o sistema estável de 5 barras na saída da LT 3-5 circuito 1.

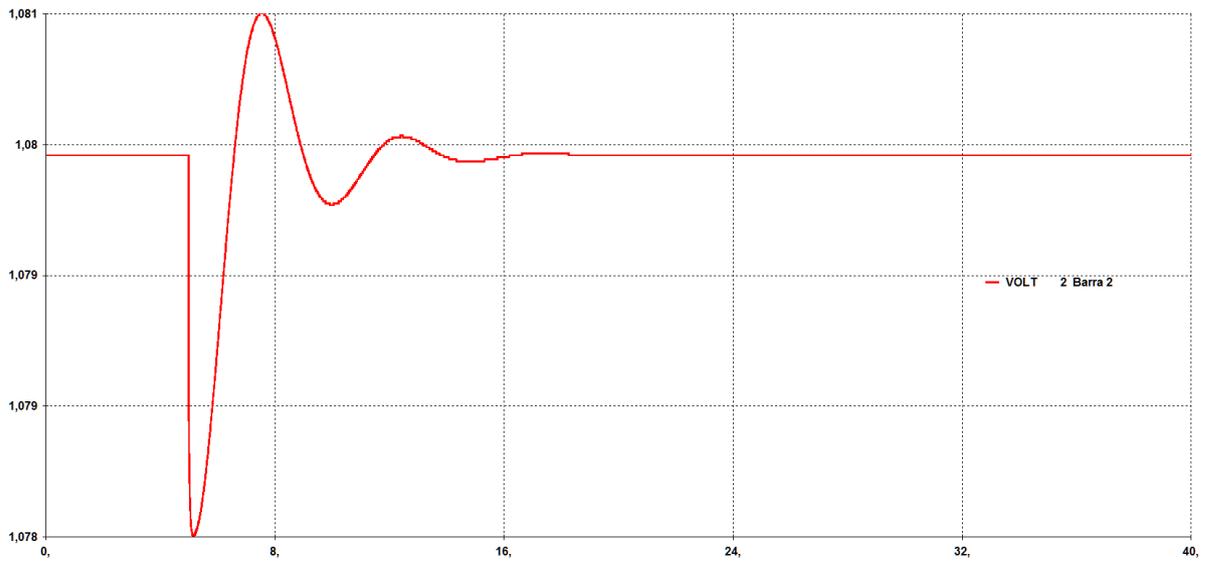


Figura 24 – Tensão no gerador 2 para o sistema estável de 5 barras na saída da LT 3-5 circuito 1.

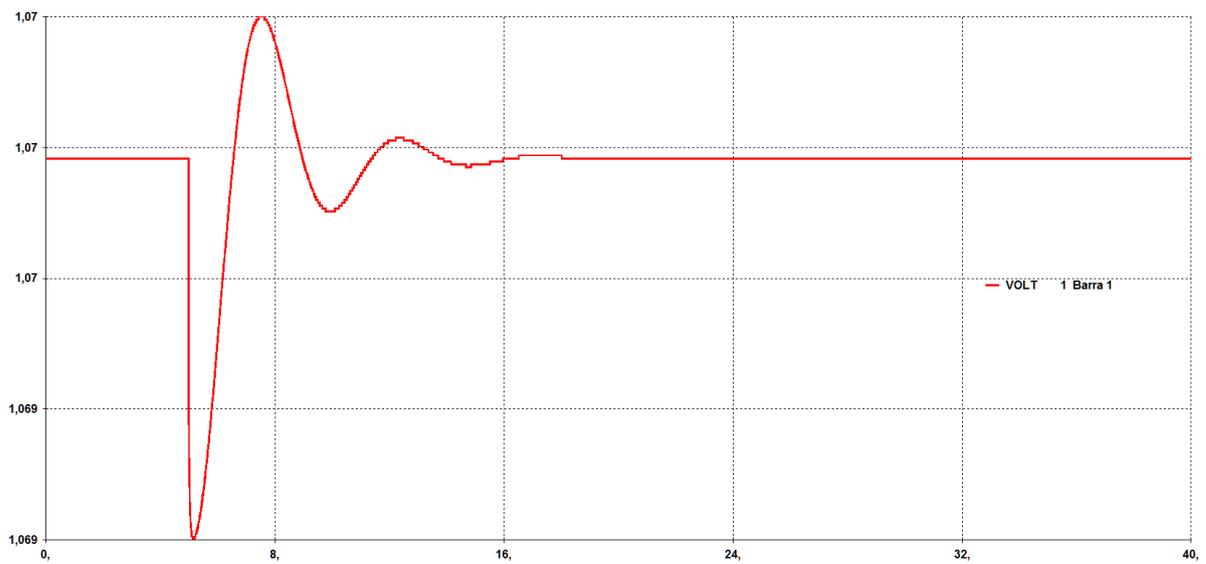


Figura 25 – Tensão no gerador 1 para o sistema estável de 5 barras na saída da LT 3-5 circuito 2.

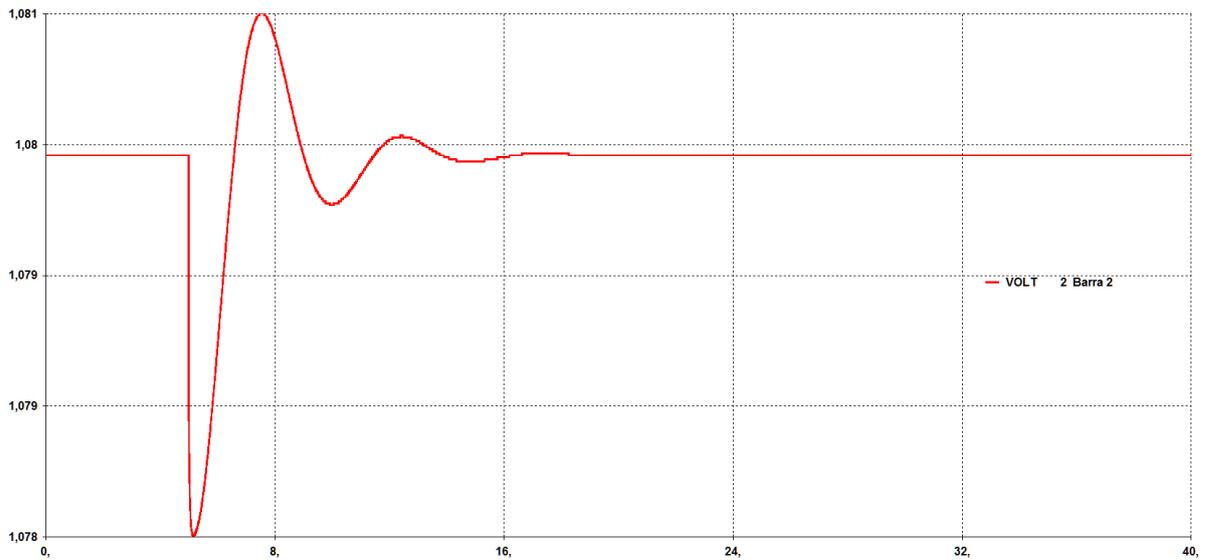


Figura 26 – Tensão no gerador 2 para o sistema estável de 5 barras na saída da LT 3-5 circuito 2.

A seguir, por meio das Figuras 27 à Figura 36, serão mostrados os gráficos de tensão e potência reativa para o sistema de 14 barramentos quando ocorre a saída da linha de transmissão 6-5, onde, assim como no sistema com 5 barras, a estabilidade foi alcançada.

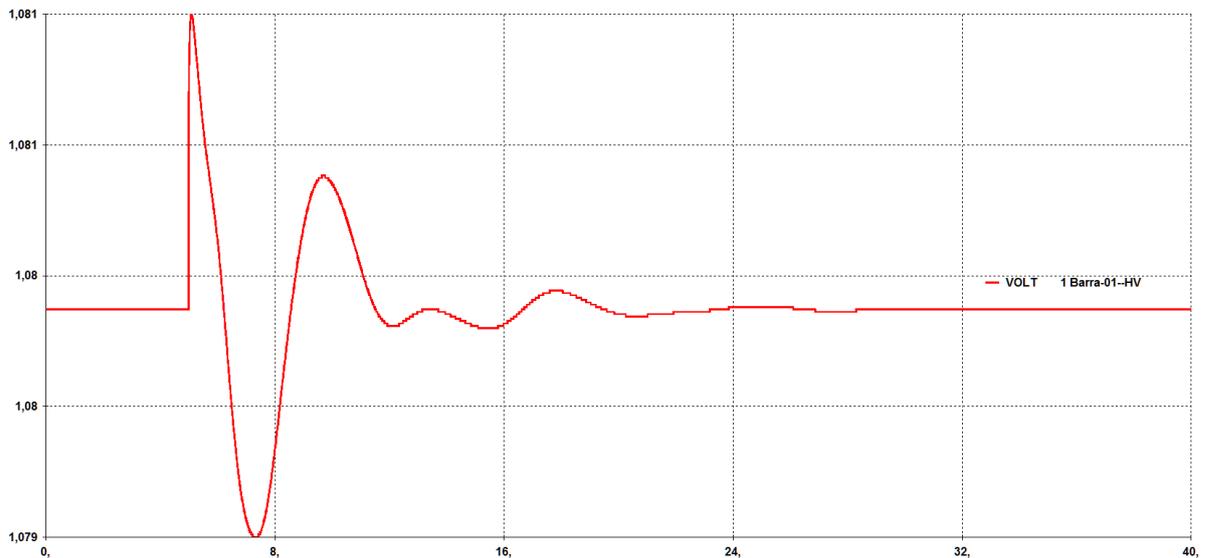


Figura 27 – Tensão no gerador 1 do sistema de 14 barras após a estabilidade.

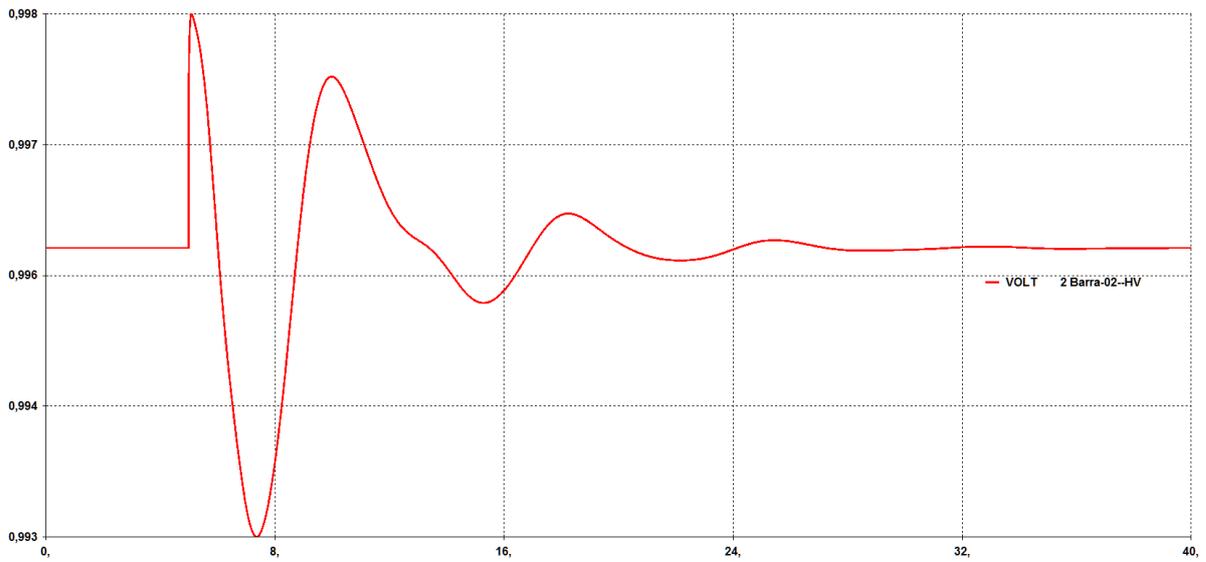


Figura 28 – Tensão no gerador 2 do sistema de 14 barras após a estabilidade.

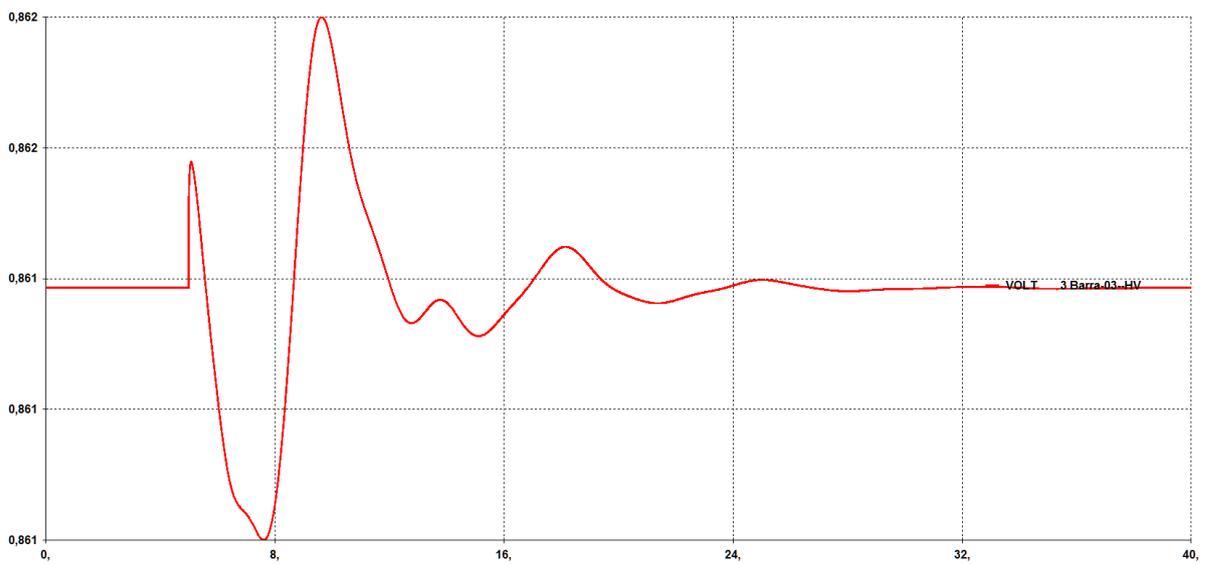


Figura 29 – Tensão no gerador 3 do sistema de 14 barras após a estabilidade.

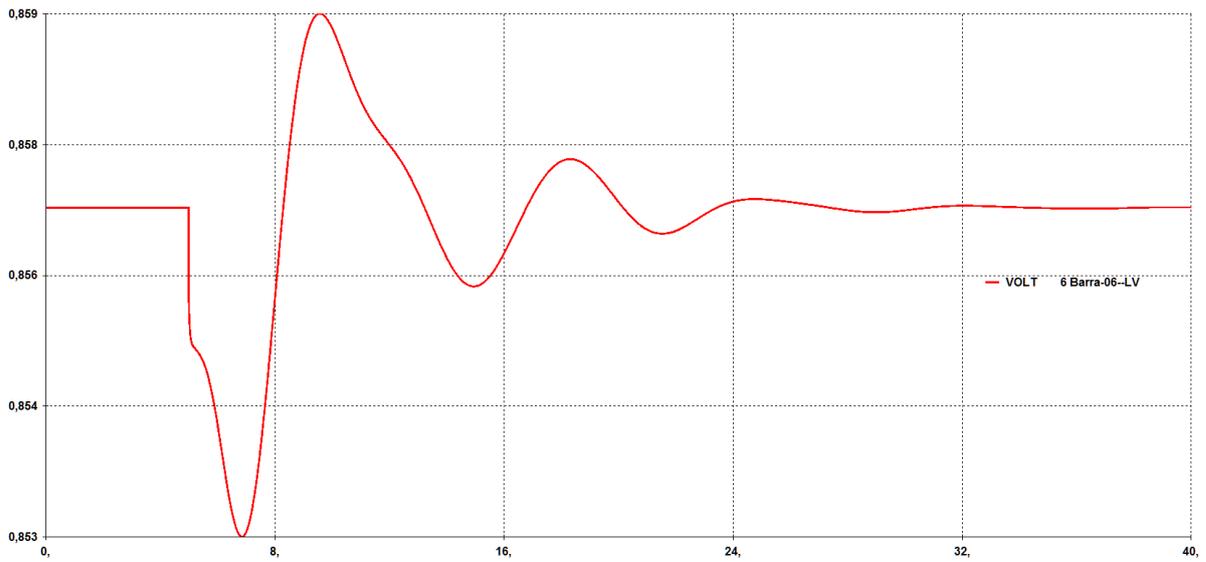


Figura 30 – Tensão no gerador 6 do sistema de 14 barras após a estabilidade.

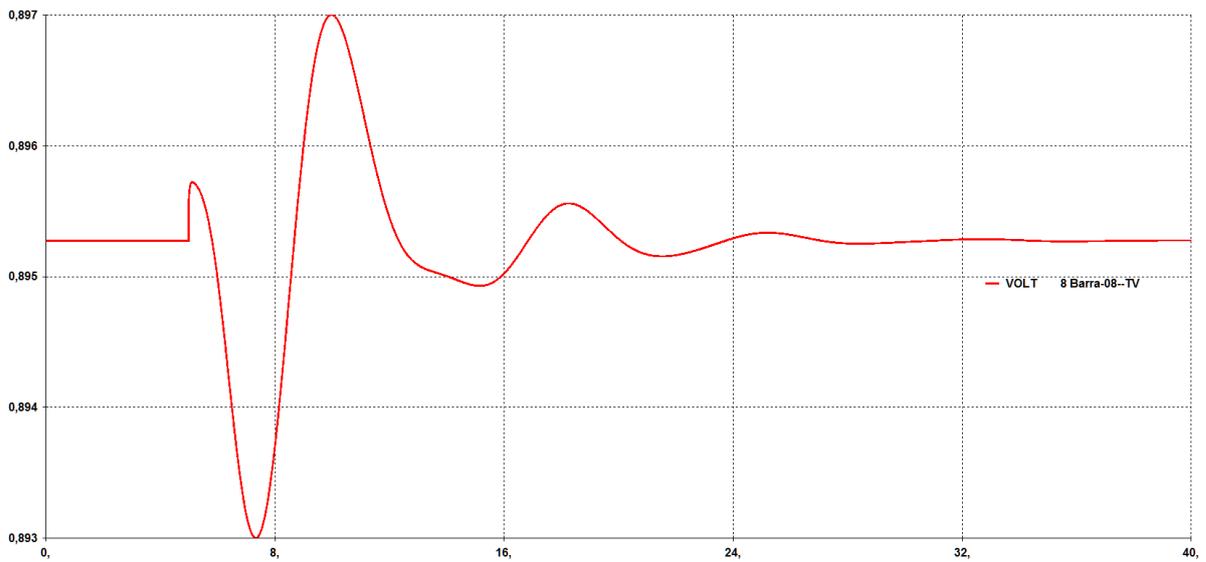


Figura 31 – Tensão no gerador 8 do sistema de 14 barras após a estabilidade.

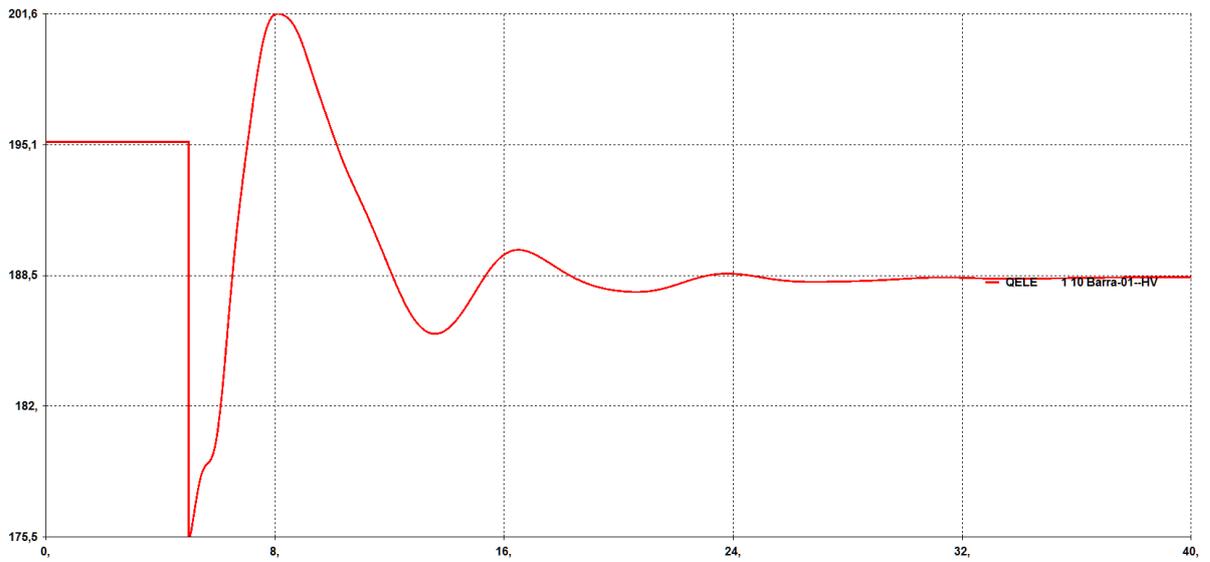


Figura 32 – Potência Reativa no gerador 1 do sistema de 14 barras após a estabilidade.

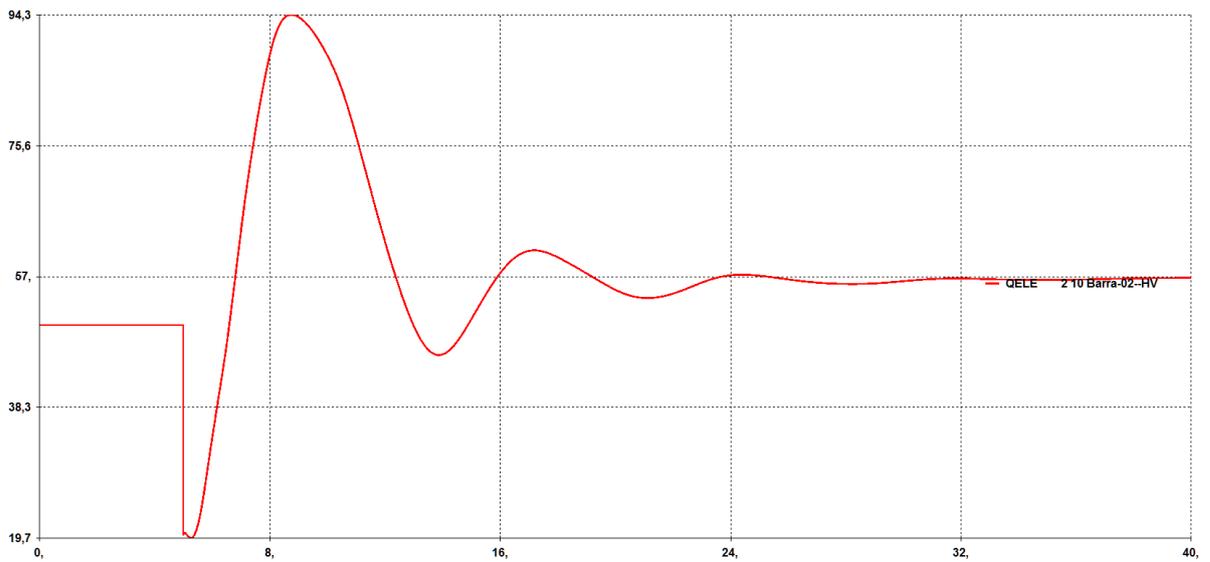


Figura 33 – Potência Reativa no gerador 2 do sistema de 14 barras após a estabilidade.

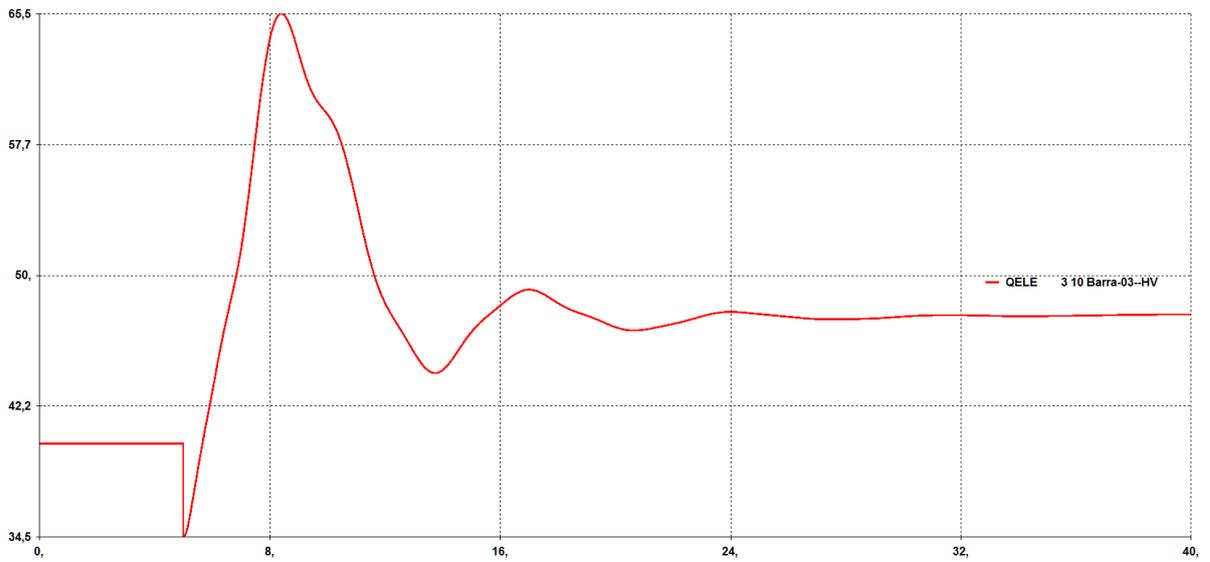


Figura 34 – Potência Reativa no gerador 3 do sistema de 14 barras após a estabilidade.

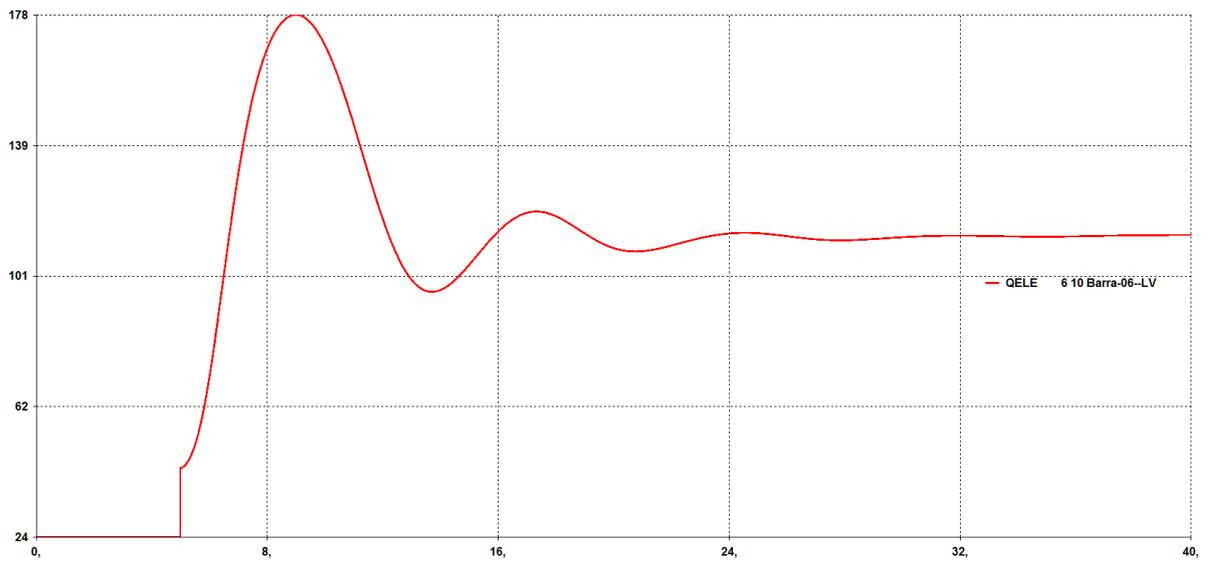


Figura 35 – Potência Reativa no gerador 6 do sistema de 14 barras após a estabilidade.

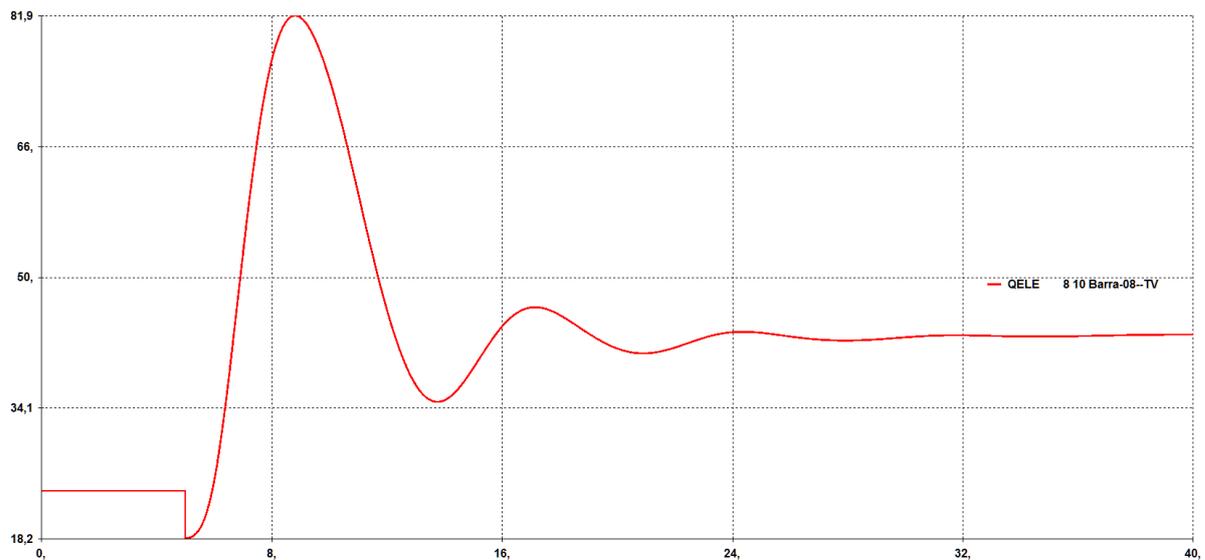


Figura 36 – Potência Reativa no gerador 8 do sistema de 14 barras após a estabilidade.

Repare que com os novos valores de tensão, o sistema obteve um melhor comportamento mediante ao distúrbio causado pela saída da linha de transmissão entre as barras 6-5 e, após alguns segundos, conseguiu alcançar a estabilidade novamente.

Entretanto os limites de potência reativa foram ultrapassados em todas as barras para o sistema com 14 barramentos. Esta questão de adequação dos limites operativos das máquinas é preocupação do próximo capítulo, onde será emulado um dispositivo FACTS.

Em relação ao tipo de margem de potência reativa da curva QV que é mais benéfica para os sistemas analisados, a próxima seção calculará as novas margens obtidas devido a ação de controle utilizada (alteração das tensões terminais).

2.4 NOVAS MARGENS NA CURVA QV

O cálculo das novas margens na curva QV foi feito com a contribuição do Prof. Msc. Renan Souza Moura e do aluno Arthur Moura Camargo e os resultados estão apresentados na Tabela 7 e na Tabela 8.

Tabela 7 – Novas margens na curva QV para o sistema de 5 barras.

Fator de Carga	Margem da Curva QV	
	Gerador 1	Gerador 2
1,5	0,6549	0,0677

Tabela 8 – Novas margens na curva QV para o sistema de 14 barras.

Fator de Carga	Margem da Curva QV				
	Gerador 1	Gerador 2	Gerador 3	Gerador 6	Gerador 8
1,8	-1,5545	0,5698	0,1301	0,0853	0,0839

Por meio das Tabelas 7 e 8 constatou-se que um sistema com margem positiva de reativos na curva QV se comporta dinamicamente melhor que um sistema com margem negativa de reativos na curva QV.

Entretanto, como no sistema de 14 barras existem limites de potência reativa nas barras geradoras, verificou-se que apenas com a elevação das tensões terminais, este limite era violado em todas as barras geradoras. Sendo assim, é necessário utilizar algum dispositivo que seja capaz de fazer o controle de potência reativa e resolva este problema.

No capítulo seguinte será mostrado como será feita esta correção de potência reativa.

CAPÍTULO 3

3.1 CONTROLADORES FACTS “FLEXIBLE AC TRANSMISSIONS SYSTEMS”

O conceito de “Sistemas com Fluxos de Potência Controláveis”, ou do inglês “Flexible AC Transmission System” (FACTS), foi desenvolvido em 1988 por N. G. Hingorani e permitiu a flexibilização do sistema elétrico associado à capacidade do controle direto do fluxo de potência ao nível de transmissão de energia elétrica. Estes dispositivos utilizam ferramentas de eletrônica de potência, e com isso consegue variar os parâmetros que controlam a dinâmica do sistema [7, 25].

O termo “FACTS” abrange diversos sistemas baseados em eletrônica de potência usados para a transmissão de energia elétrica. Estes dispositivos foram desenvolvidos com dois objetivos principais [25]:

- Aumentar a capacidade de transmissão de potência das redes;
- Controlar diretamente o fluxo de potência em trajetos específicos de transmissão.

O fluxo de potência numa rede de transmissão está limitado por uma combinação dos seguintes fatores:

- Estabilidade;
- Limites de tensão;
- Limites térmicos de linhas ou equipamentos.

A maior novidade trazida por essa tecnologia FACTS é a adoção de um aspecto mais abrangente dos dispositivos de controle e conversão eletrônica em todos os níveis de potência. Sendo assim, pode-se considerar que os primeiros dispositivos FACTS foram os retificadores e inversores permitindo uma maior capacidade de transmissão de potência nas linhas de HVDC, como a linha de Itaipu [25].

Os atuais equipamentos baseados em tiristores convencionais possuem limitações relacionadas com o excesso de perdas e a velocidade devido ao chaveamento destes dispositivos. Portanto, os maiores esforços na área de eletrônica de potência estão voltados para o aperfeiçoamento da tecnologia de chaves eletrônicas do tipo GTO, MCT e IGBT, que poderão gerar dispositivos para

ligar e desligar circuitos com maior rapidez quando comparados com as tecnologias dos tiristores atuais.

Existem inúmeros tipos de controladores FACTS e que podem ser aplicados à diferentes necessidades nos sistemas elétricos de transmissão. Estes dispositivos superam em muito aos controladores mecanicamente controlados, visto que oferecem uma maior velocidade de operação, confiabilidade, controlabilidade, dentre outros benefícios. Os principais equipamentos FACTS são:

- SVC (Static Var Compensator)
- TSSC (Thyristor Switched Series Condensador)
- TCSC (Thyristor Controlled Series Condensador)
- STATCOM (Static Synchronous Shunt Compensator)
- SSSC (Static Synchronous Series Compensator)
- UPFC (Unified Power Flow Controller)
- IPFC (Interline Power Flow Controller)
- CSC (Convertible Static Compensator)

O dispositivo utilizado neste trabalho é o compensador estático de reativos (SVC – Static Var Compensator). Ele tem como característica a variação da susceptância (indutiva/capacitiva) instalada na barra, e com isso permite o controle do fluxo de potência reativa na rede elétrica. O SVC, portanto, contribui para um melhor controle dinâmico da magnitude de tensão da barra, evitando assim as variações da potência reativa, provocados pelas variações das cargas ao longo de um período.

3.2 SVC

É uma associação de reatores shunt controlados por tiristores e capacitores fixos ou chaveados a tiristores com a função de, pela injeção de corrente reativa (em quadratura com a tensão) controlar o nível de tensão e/ou compensar o fator de potência da carga. A presença de reatores e capacitores permite a compensação reativa nos dois sentidos (indutivo e capacitivo). A comutação do reator controlado a tiristores (RCT) produz componentes harmônicas na corrente pelo sistema.

A Figura 37 mostra um modelo ideal de um compensador paralelo (SVC) conectado ao ponto médio de uma linha de transmissão. Nesta figura, a fonte de tensão V_m é constantemente controlada com o objetivo de controlar o fluxo de potência através dessa linha. Considera-se que as tensões V_s e V_r têm a mesma amplitude, mas estão defasadas de um ângulo δ .

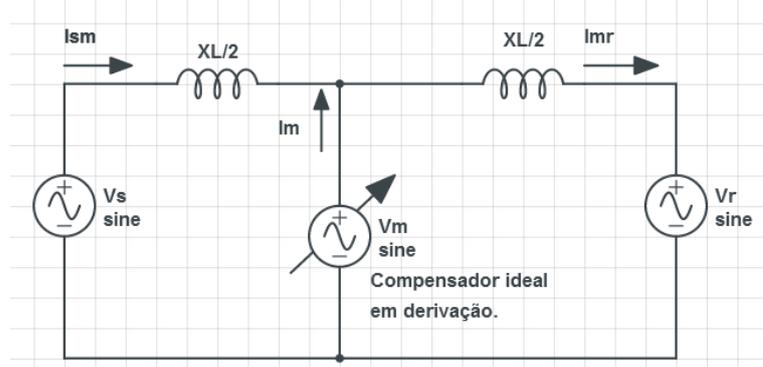


Figura 37 – Compensador shunt ideal conectado ao ponto médio de uma Linha de Transmissão.

Abaixo é mostrado o diagrama fasorial do compensador shunt do tipo SVC. Neste caso, a tensão de compensação V_m tem a mesma amplitude das tensões V_s e V_r .

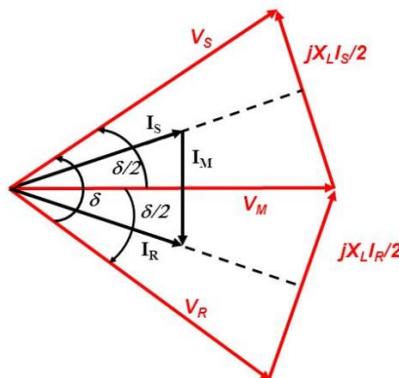


Figura 38 – Diagrama fasorial de um compensador shunt ideal.

Neste caso, a potência transferida do lado da fonte V_s para o lado da carga V_r é dada por:

$$P_S = \frac{2V_S^2}{X_L} \text{sen}\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad \text{Eq. 2}$$

Enquanto que a potência transferida quando não há compensação de reativos é:

$$P_S = \frac{V_S^2}{X_L} \text{sen}(\delta) \quad \text{Eq. 3}$$

Comparando a Eq. 2 com a Eq. 3 é possível perceber que quando há compensação reativa shunt, a capacidade de transmissão de potência ativa aumenta. Da Figura 38 é possível concluir também que como a corrente de compensação I_m está em quadratura com a tensão V_m não existe potência ativa fluindo através do compensador, ou seja, apenas potência reativa flui pela fonte V_m .

Outro benefício trazido pelo SVC é que quando alocado nas barras de cargas reativas estas passam a ser totalmente supridas pelo dispositivo, evitando assim o transporte de reativos pela linha de transmissão, o que contribui diretamente para a redução das perdas ativas.

A seguir será apresentado como o dispositivo será desenvolvido para ser utilizado nas simulações.

3.3 EMULANDO UM DISPOSITIVO FACTS

Como todas as simulações do trabalho foram desenvolvidas nos softwares ANAREDE e ANATEM, era necessário emular, nestes softwares, as características do dispositivo que foi escolhido neste trabalho. Para isto, é necessário que haja um controle da tensão terminal no barramento onde se deseja instalar o dispositivo, e em seguida definir o valor de potência reativa a ser compensado.

A potência foi fornecida com um retardo de 10s e o seu valor foi definido a partir do erro encontrado entre o valor que estava sendo gerado e os seus limites estáticos definidos na modelagem estática (ANAREDE). A malha de controle a seguir descreve o controle realizado utilizando o SVC.

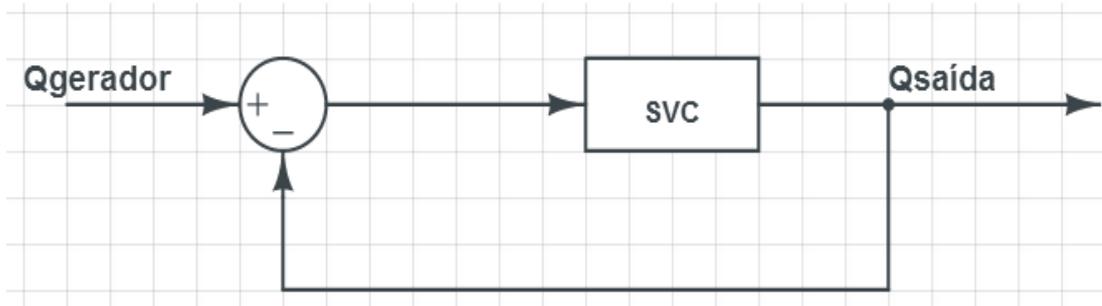


Figura 39 – Malha de controle do SVC simulado.

Onde:

- Q_{gerador} é a potência reativa do gerador que se encontra fora dos limites;
- SVC é o dispositivo FACTS que fará a compensação de reativos;
- $Q_{\text{saída}}$ é a potência reativa após a compensação.

Sendo assim, passa-se para o próximo passo, que é implementar este dispositivo no ANAREDE/ANATEM e apresentar os resultados obtidos.

3.4 SIMULAÇÃO DINÂMICA COM ESTABILIDADE E CONTROLE DE REATIVOS

Como não existe transporte de potência reativa em sistemas elétricos de potência, a compensação deve ser realizada em barramentos próximos aos geradores com limites de operação excedidos. Sendo assim ficou decidido que seria utilizado um SVC na barra de carga 5 e um SVC na barra de carga 11.

A seguir serão mostrados os gráficos de tensão e potência reativa para as barras geradoras, bem como para as barras onde os dispositivos foram inseridos:

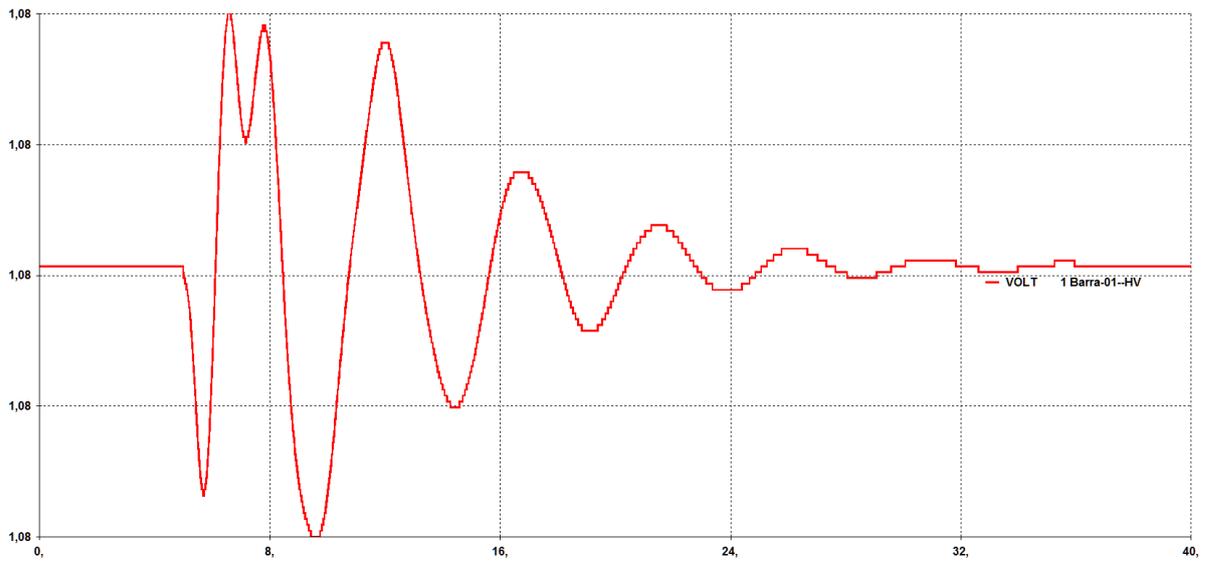


Figura 40 – Tensão no gerador 1 do sistema de 14 barras após inserir o SVC.

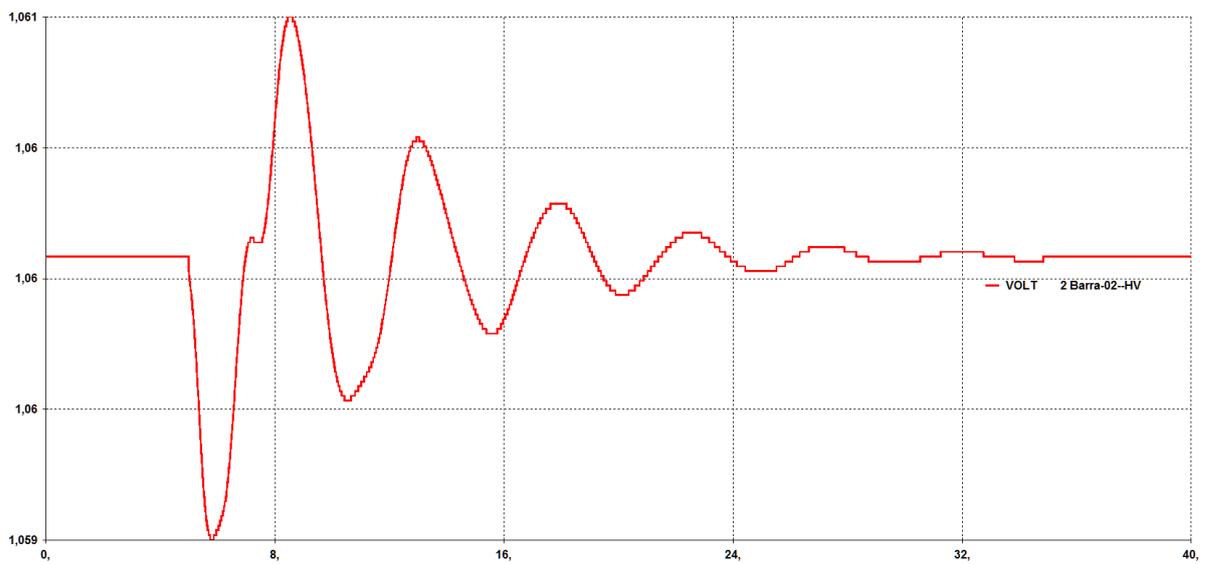


Figura 41 – Tensão no gerador 2 do sistema de 14 barras após inserir o SVC.

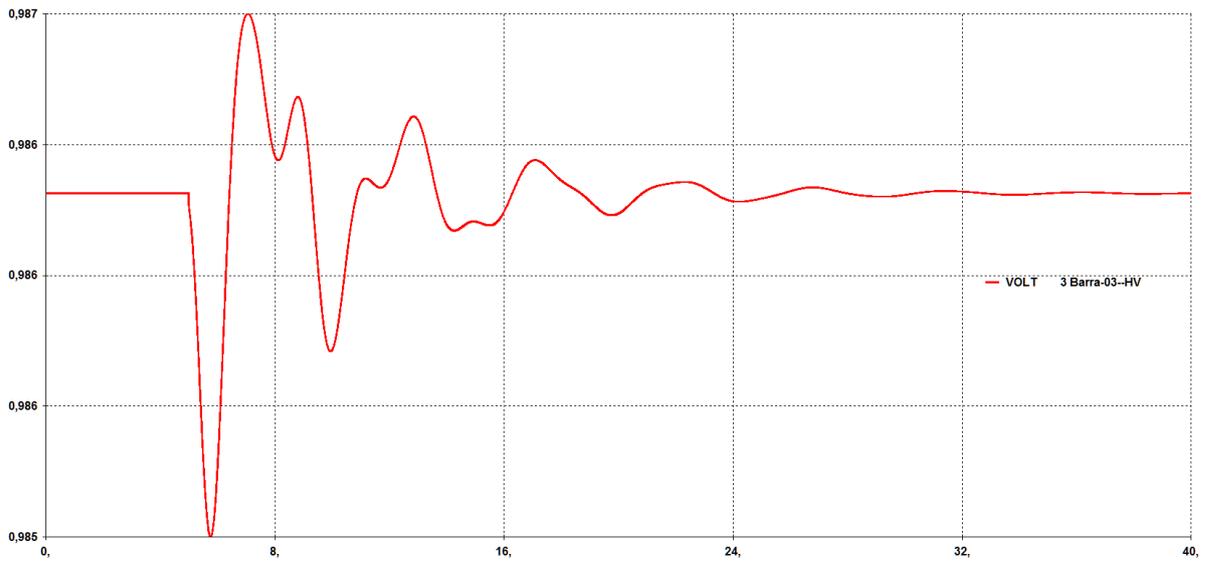


Figura 42 – Tensão no gerador 3 do sistema de 14 barras após inserir o SVC.

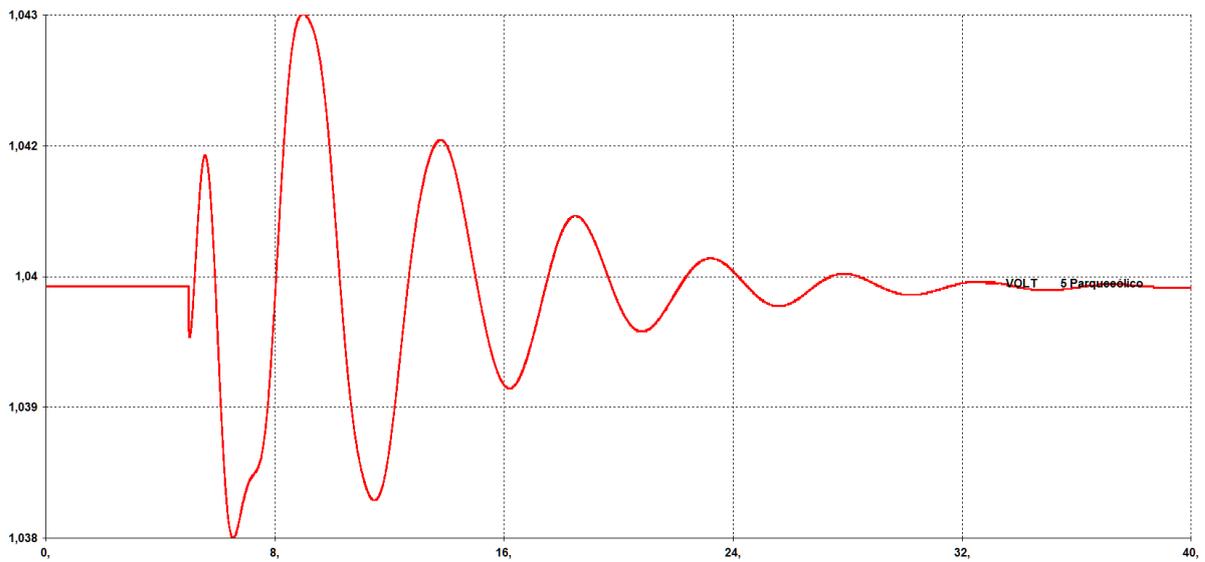


Figura 43 – Tensão na barra onde foi inserido o SVC (barra 5).

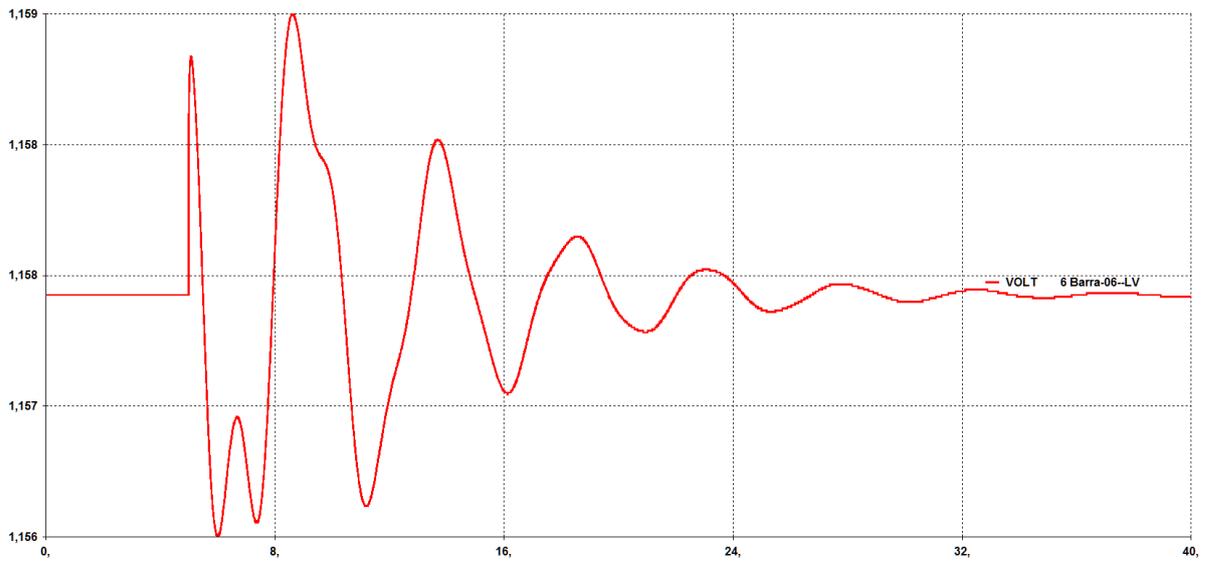


Figura 44 – Tensão no gerador 6 do sistema de 14 barras após inserir o SVC.

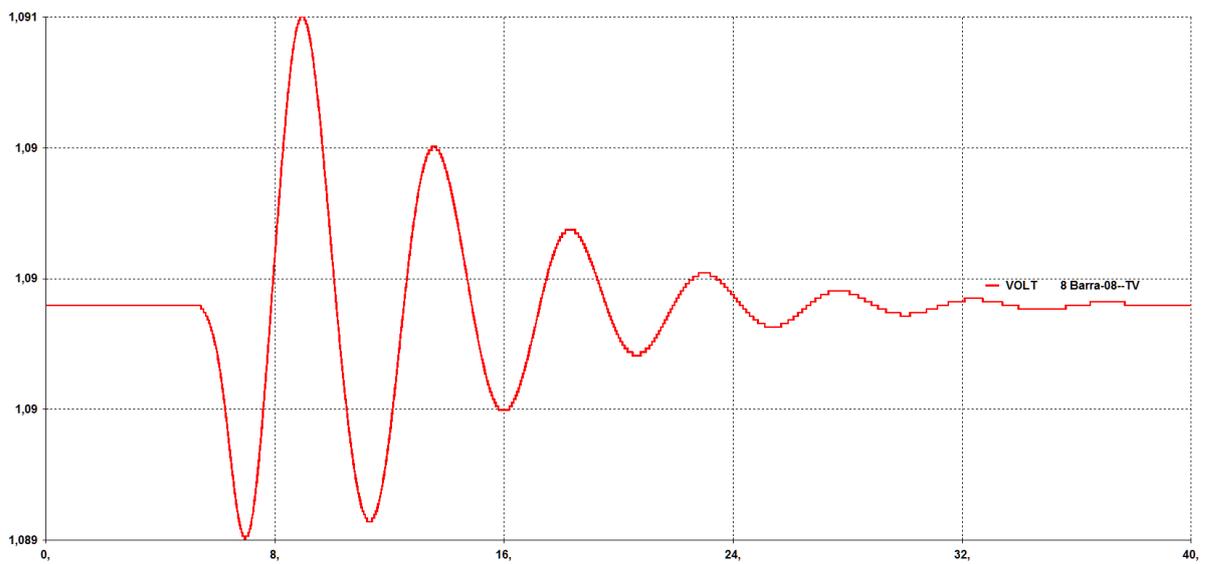


Figura 45 – Tensão no gerador 8 do sistema de 14 barras após inserir o SVC.

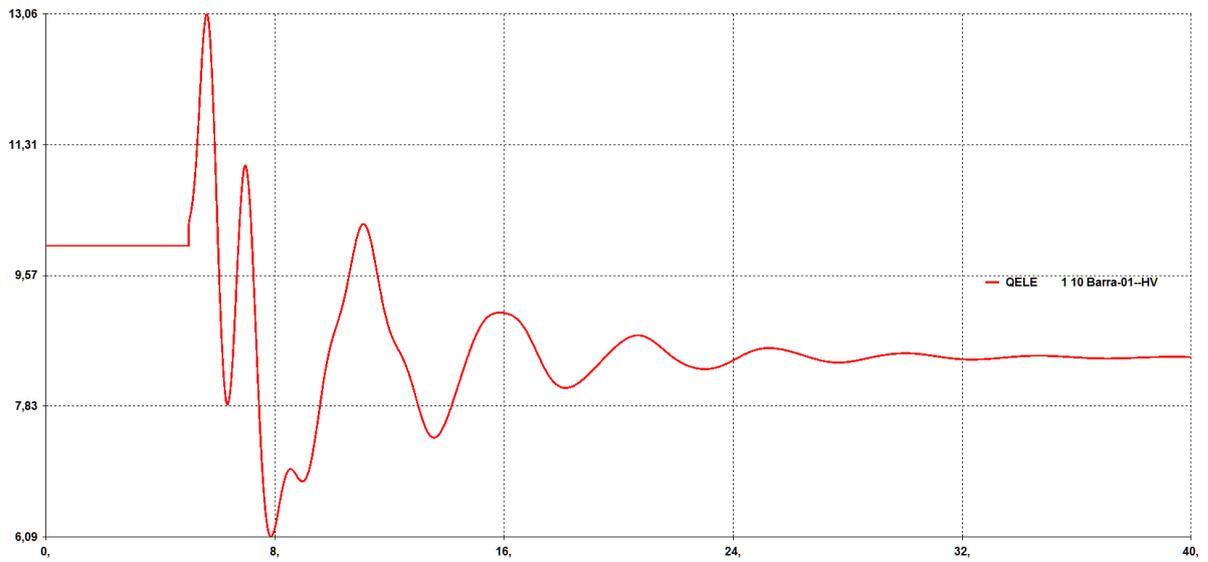


Figura 46 – Potência Reativa no gerador 1 do sistema de 14 barras após inserir o SVC.

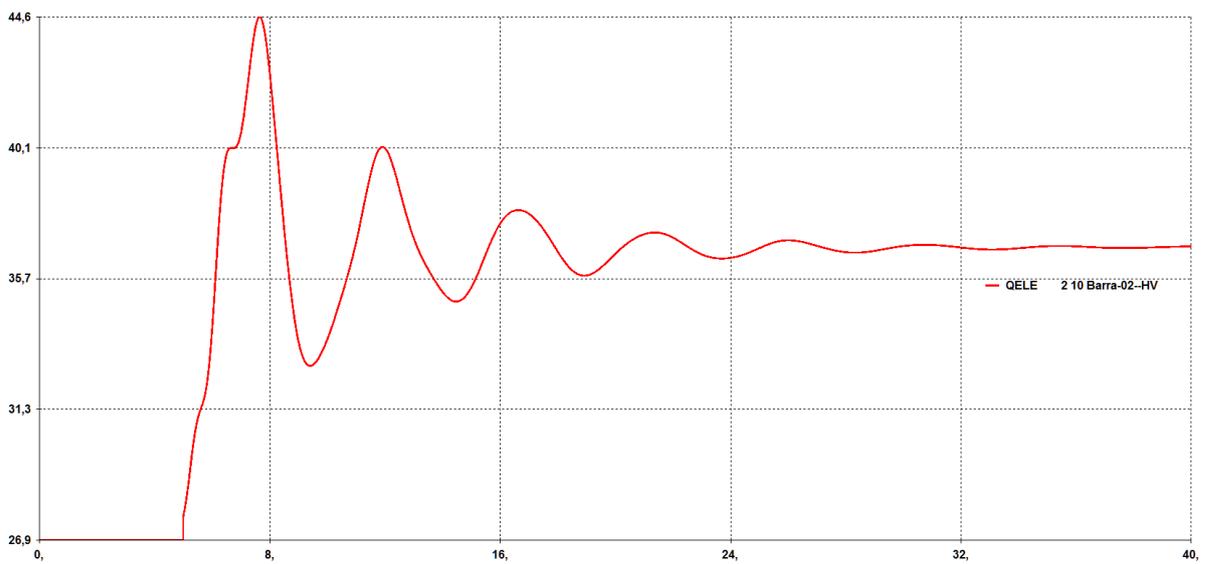


Figura 47 – Potência Reativa no gerador 2 do sistema de 14 barras após inserir o SVC.

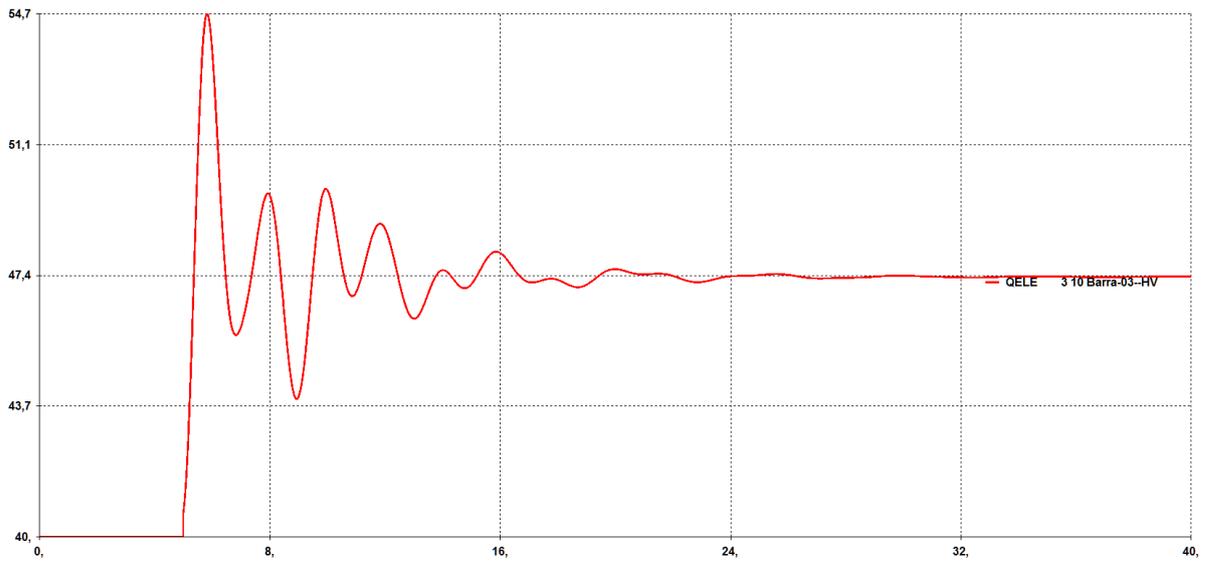


Figura 48 – Potência Reativa no gerador 3 do sistema de 14 barras após inserir o SVC.

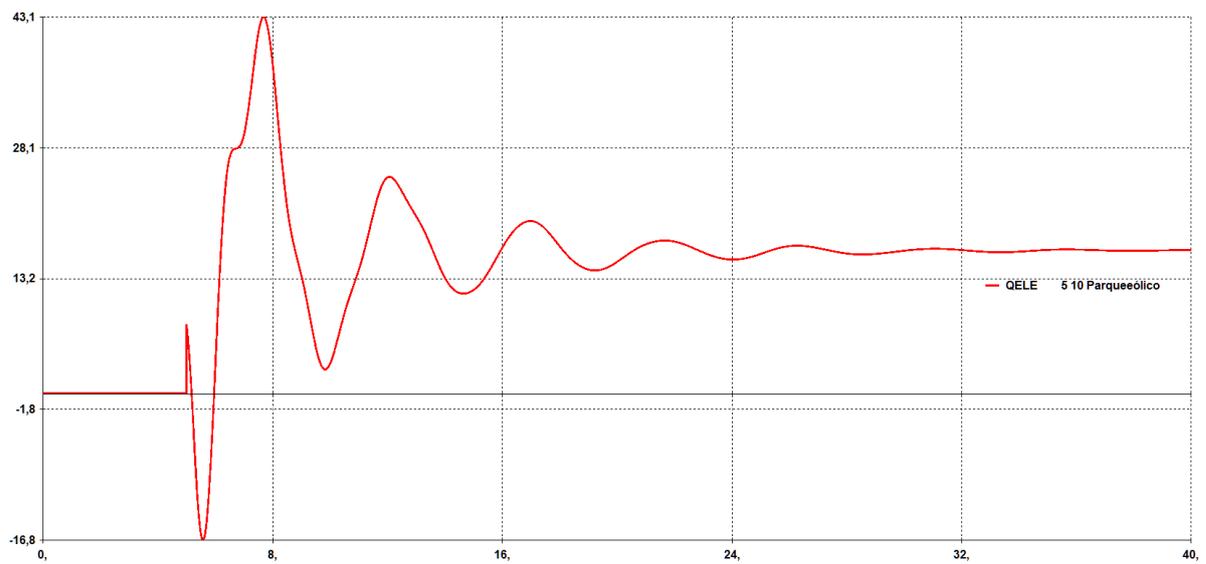


Figura 49 – Potência Reativa na barra onde foi inserido o SVC (barra 5).

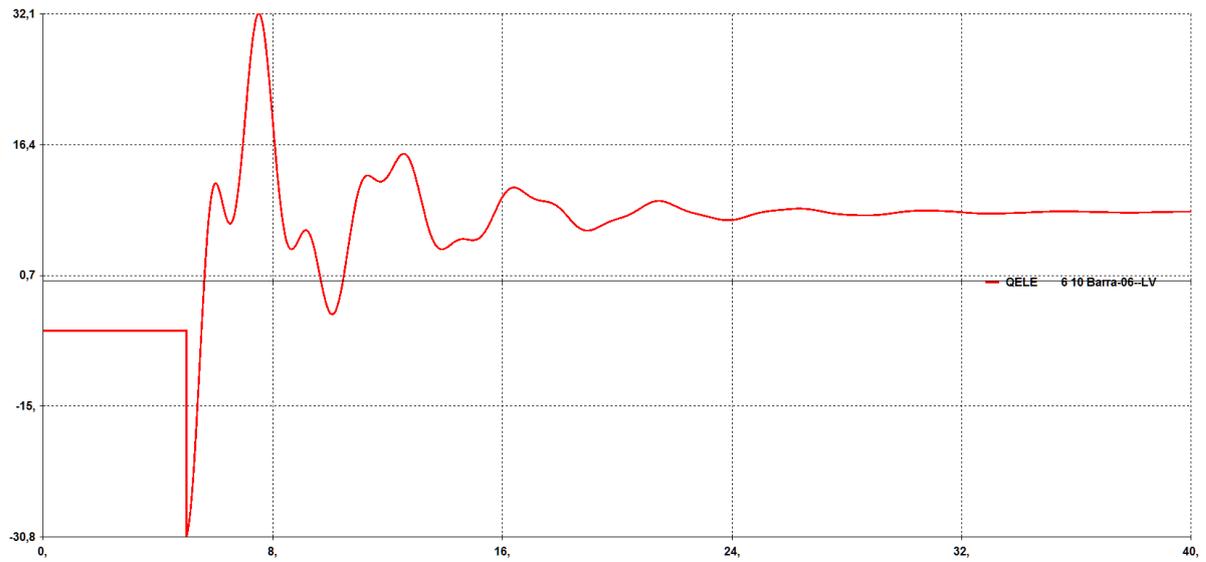


Figura 50– Potência Reativa no gerador 6 do sistema de 14 barras após inserir o SVC.

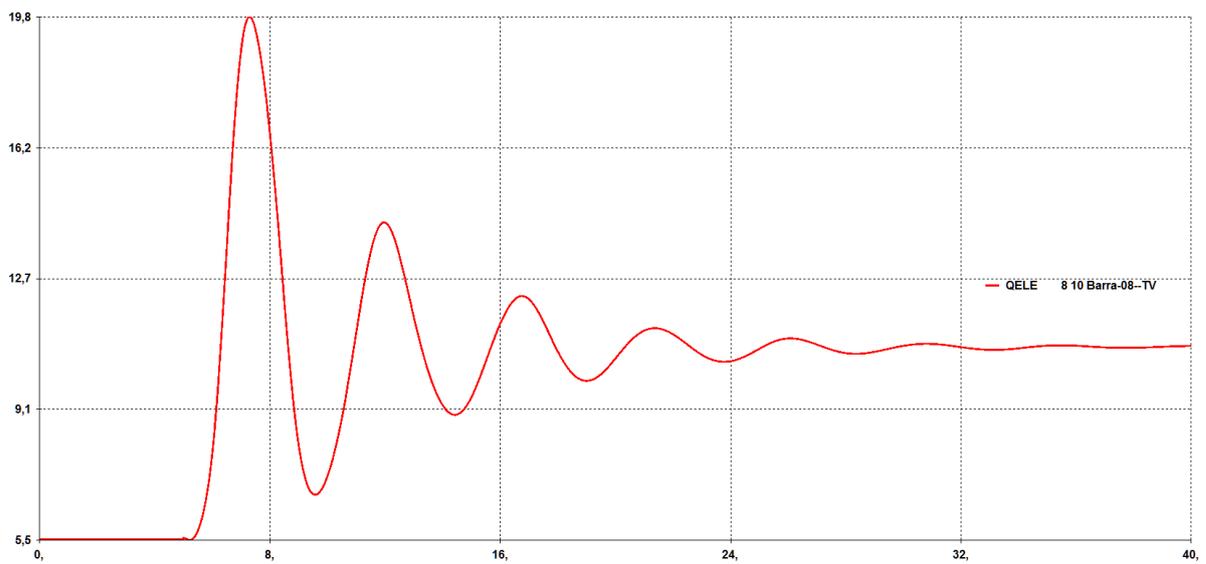


Figura 51– Potência Reativa no gerador 8 do sistema de 14 barras após inserir o SVC.

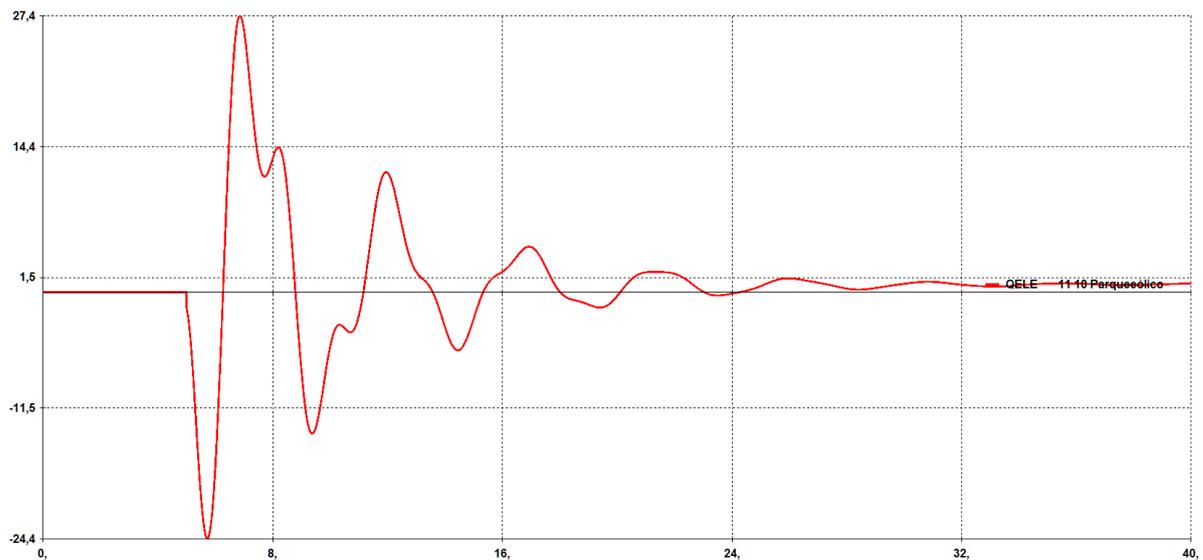


Figura 52 – Potência Reativa na barra onde foi inserido o SVC (barra 11).

A partir dos gráficos de tensão percebemos que após acrescentar o dispositivo FACTS, o sistema demorou alguns segundos a mais para estabilizar (se comparado com o sistema estável sem o SVC).

Nos gráficos de potência reativa observa-se que com a adição do SVC nas barras 5 e 11, todas as barras apresentam estabilidade. Além disso, as barras que estavam fora dos limites de reativos tiveram uma melhora significativa. A Tabela 9 mostra um comparativo das potências reativas nas barras para este sistema de 14 barras.

Tabela 9 – Comparativo entre as potências antes e depois de adicionar o SVC.

Barra	Q _{MIN}	Q _{MÁX}	Q _{ANTES}	Q _{DEPOIS}
2	-40,0	50,0	56,7	36,7
3	0,0	40,0	47,3	47,1
6	-6,0	24,0	113,0	8,2
8	-6,0	24,0	43,4	10,8

Repare que as barras 2, 6 e 8 diminuíram em 20 MVar, 104,8 MVar e 32,6 MVar, respectivamente, os seus valores de potência reativa e todas elas entraram dentro dos limites. A única barra que continuou violando os limites de potência reativa foi a 3, entretanto essa diferença de 7,1 MVar é aceitável e pode ser explicada pela curva de capacidade da máquina geradora.

As curvas de capacidade de geradores têm a função de determinar a área segura na qual o gerador poderá trabalhar, sem que ocorram falhas, e mantendo-se em condições de operação, como mostra a Figura 53.

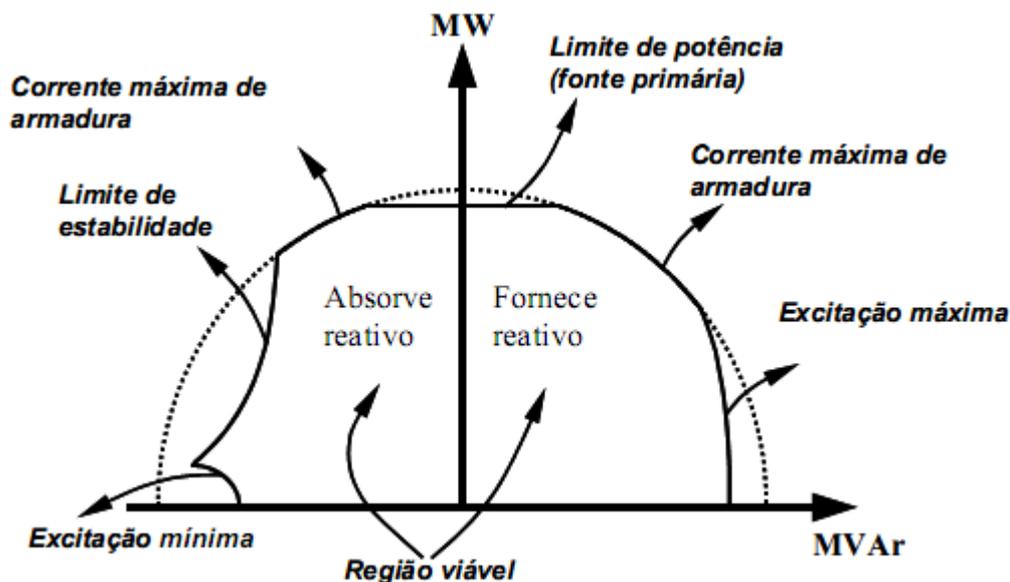


Figura 53 – Curva de capacidade de um gerador síncrono [1].

A curva contínua estabelece a região viável de operação da máquina (limites superior e inferior), enquanto que a curva pontilhada estabelece a região em que a máquina irá trabalhar sobre-excitada, mas ainda assim conseguirá operar sem apresentar problemas, desde que não ultrapasse essa margem de segurança.

Sendo assim, pode-se considerar aceitável a pequena violação que ocorreu na barra 3, pois basta deslocar o ponto operativo da máquina dentro da curva de capacidade fazendo com que a mesma diminua a geração de potência ativa e gere mais potência reativa sem comprometer os seus limites térmicos (principalmente os valores máximos e mínimos de corrente de armadura).

CAPÍTULO 4

4.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado o comportamento de um sistema elétrico de potência quando submetido a um grande distúrbio, como por exemplo a saída de uma linha de transmissão. A estabilidade foi investigada através do comportamento apresentado pelos sistemas de 5 e 14 barras quando ocorria a saída de uma linha de transmissão sem e com a presença do SVC.

Os resultados das simulações realizadas, apresentadas nos capítulos 2 e 3, mostram a eficácia do SVC para a melhoria das margens de estabilidade de tensão. Foi possível perceber que inicialmente, quando ocorria a saída de uma linha de transmissão, os sistemas entravam em colapso. Quando as tensões terminais dos geradores foram aumentadas o sistema conseguiu convergir, entretanto, no sistema de 14 barras, a potência reativa violou os limites estabelecidos. Sendo assim utilizou-se o SVC para fazer a correção de potência reativa. Feito isso, verificou-se que os limites foram obedecidos.

Os resultados obtidos com as simulações mostram claramente um sistema com margem positiva de potência reativa na curva QV apresenta melhores condições dinâmicas de suportar um distúrbio dinâmico. Meios que permitem a mudança do tipo de margem devem ser investigados.

4.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros têm-se:

- Análise da influência de outros dispositivos FACTS nos sistemas;
- Atuar dentro dos estudos de operação do SEP, visto que este trabalho atuou dentro dos estudos de planejamento;
- Testar os métodos utilizados neste trabalho em outros sistemas, até mesmo em sistemas reais.
- Fazer uma análise dos harmônicos inseridos pelos dispositivos FACTS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SILVEIRA, E. **Otimização da operação em sistemas distribuídos utilizando compensadores estáticos de reativo e estimadores de estados robustos**, Itajubá, 2011, p. 121. Tese de Pós-Graduação, Universidade Federal de Itajubá.
- [2] ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica: **Energia no Brasil e no mundo – Parte I**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 27Jun. 2014.
- [3] COSTA, A. & SILVA, A. **Controle e Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência**, Florianópolis, 2000. Notas de Aula, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [4] ONS. Operador Nacional do Sistema: **Histórico da Operação**. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/>>. Acesso em: 29 Jun. 2014.
- [5] ALVES, E. **Sistema Interligado Nacional (SIN) com ênfase no Controle de Tensão**, Brasília, 2008, p. 28. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Católica de Brasília.
- [6] FALCÃO, D. **Análise de Redes Elétricas**, Rio de Janeiro, 2006, p. 179. Notas de Aula, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [7] MELO, J.P. & LIMA, F. **Controle de Fluxo de Potência usando Dispositivos FACTS e Metaheurísticas**, Campo Grande, p. 15. Universidade Federal do Mato Grosso do Sul.
- [8] CUNHA, A. **Determinação do instante de instabilidade de tensão utilizando medição fasorial em tempo real**, Rio de Janeiro, 2009, p. 92. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [9] SANTOS, C. **Método rápido para avaliação da margem de estabilidade de tensão considerando os limites de potência reativa dos geradores**, São Carlos, 2008, p. 123. Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- [10] ANDERSON, P.M. & FOUAD, A.A. **Power System Control and Stability**, Ames, 1977. Iowa State University Press.

- [11] PAIXÃO, R. L. D. **A Compensação Série Chaveada como Solução para o Problema do Colapso Transitório de Tensão na Interligação Norte-Nordeste**, Brasília, 2006, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília.
- [12] BORGES. C.L.T. **Análise de Sistemas de Potência**, Rio de Janeiro, 2005. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [13] KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**, Palo Alto, 1994.
- [14] SANTOS, K.P. & MONTE, A.C. **Compensação de reativos em sistemas elétricos de potência**, Teresina, 2009, p.58. Monografia, Universidade Estadual do Piauí.
- [15] TAYLOR, C.W. **Power System Voltage Stability**, Palo Alto, 1994.
- [16] OLIVEIRA, A.M.S. **Estratégia para integração das áreas de operação em tempo em tempo real e pós-operação dos centros de operação do ONS**, Rio de Janeiro, 2007. Trabalho de conclusão de curso, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [17] NATURESA, J.S. **A Influência de Compensadores Estáticos de Reativos na Estabilidade de Tensão de Sistemas de Energia Elétrica**, Campinas, 2001. Universidade Estadual de Campinas.
- [18] MUZITANO, G.F. **Comparação da compensação de reativo entre linhas convencionais e não convencionais**, Rio de Janeiro, 2007, p. 60. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [19] CEPEL. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **A história do CEPEL**. Disponível em: <<http://www.cepel.br>>. Acesso em: 20 Jun. 2014.
- [20] ANAREDE. Análises de Rede Elétrica. Disponível em: <<http://www.anarede.cepel.br>>. Acesso em: 20 Jun. 2014.
- [21] MOURA, R. S. **Bloqueio da tensão de campo de máquinas geradoras como medida para evitar o fenômeno colapso de tensão**, Itajubá, 2010, p. 77. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá.
- [22] ANATEM. Análises de Transitórios Eletromecânicos. Disponível em: <<http://www.anatem.cepel.br>>. Acesso em: 20 Jun. 2014.

[23] MONTICELLI, A. & GARCIA, A. **Introdução a Sistemas de Energia Elétrica**, São Paulo, p. 251, Editora da UNICAMP.

[24] SALGADO, R. & SILVA, A.S & SOARES, V.L. **Curso de estabilidade de tensão**, Florianópolis, 2004, p. 139. Universidade Federal de Santa Catarina.

[25] MASUDA, M. **Aplicação do dispositivo FACTS (Flexible AC Transmission Systems) em sistema de distribuição – Simulação e desempenho**, São Paulo, 2006, p. 83. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.

ANEXO 1

As tabelas A1 a A4 apresentam os dados de barra para os sistemas escolhidos.

Tabela A1 - DBAR Sistema de 5 barras original						
Barra	Tipo	Tensão (pu)	P _{GERADA}	Q _{GERADA}	Q _{MIN}	Q _{MÁX}
1	V θ	1,017	45,0		-999999	999999
2	PV	1,025	135,0	19,56	-999999	999999
3	PQ	1,006				
4	PQ	1,014				
5	PQ	1,000				

Tabela A2 - DBAR Sistema de 14 barras original						
Barra	Tipo	Tensão (pu)	P _{GERADA}	Q _{GERADA}	Q _{MIN}	Q _{MÁX}
1	V θ	1,060	220,1	-16,9		
2	PV	1,045	298,0	42,4	-40,0	50,0
3	PV	1,010	0,0	23,4	0,0	40,0
4	PQ	1,019				
5	PQ	1,020				
6	PV	1,070	0,0	12,2	-6,0	24,0
7	PQ	1,062				
8	PV	1,090	0,0	17,4	-6,0	24,0
9	PQ	1,056				
10	PQ	1,051				
11	PQ	1,057				
12	PQ	1,055				
13	PQ	1,050				
14	PQ	1,036				

Tabela A3 – DBAR Sistema de 5 barras estável						
Barra	Tipo	Tensão (pu)	P _{GERADA}	Q _{GERADA}	Q _{MIN}	Q _{MÁX}
1	V θ	1,070	45,0		-999999	999999
2	PV	1,070	135,0	19,56	-999999	999999
3	PQ	1,006				
4	PQ	1,014				
5	PQ	1,000				

Tabela A4 – DBAR Sistema de 14 barras estável						
Barra	Tipo	Tensão (pu)	P _{GERADA}	Q _{GERADA}	Q _{MIN}	Q _{MÁX}
1	V θ	1,080	220,1	-16,9		
2	PV	1,065	298,0	42,4	-40,0	50,0
3	PV	1,030	0,0	23,4	0,0	40,0
4	PQ	1,019				
5	PQ	1,020				
6	PV	1,090	0,0	12,2	-6,0	24,0
7	PQ	1,062				
8	PV	1,100	0,0	17,4	-6,0	24,0
9	PQ	1,056				
10	PQ	1,051				
11	PQ	1,057				
12	PQ	1,055				
13	PQ	1,050				
14	PQ	1,036				

As tabelas A5 A6 apresentam os dados de linha do sistema:

Tabela A5 - DLIN Sistema de 5 barras					
Da Barra	Para Barra	Circuito	Resistência (%)	Reatância (%)	Tap
1	3	1	0,1	20,0	
2	4	1	0,1	7,0	
3	4	1	0,1	14,0	1,02
3	4	2	0,1	14,0	0,90
3	5	1	0,1	18,0	
3	5	2	0,1	18,0	

Tabela A6 - DLIN Sistema de 14 barras						
Da Barra	Para Barra	Circuito	Resistência (%)	Reatância (%)	MVAr	TAP
1	2	1	1,938	5,917	0,66	
1	5	1	5,403	22,304	0,61	
2	3	1	4,699	19,797	0,55	
2	4	1	5,811	17,632	0,47	
2	5	1	5,695	17,388	0,43	
3	4	1	6,701	17,103	0,43	
4	5	1	1,335	4,211	0,16	
4	7	1	0,000	20,912		0,978
4	9	1	0,000	55,618		0,969
5	6	1	0,000	25,202		0,932
6	11	1	9,498	19,890		
6	12	1	12,291	25,581		
6	13	1	6,615	13,027		
7	8	1	0,000	17,615		
7	9	1	0,000	11,001		
9	10	1	3,181	8,450		
9	14	1	12,711	27,038		
10	11	1	8,205	19,207		
12	13	1	22,092	19,988		
13	14	1	17,093	34,802		

ANEXO 2

Este anexo tem como função apresentar as funções utilizadas no *software* ANATEM para as simulações dinâmicas.

A2.1 CÓDIGO DE EXECUÇÃO DMAQ

Leitura de dados de associação de geração ao modelo de máquina e respectivos sistemas de controle.

As gerações que não tiverem associadas a modelo de máquina serão automaticamente convertidas pelo programa para uma impedância constante.

As máquinas que tiverem modelo de regulador de velocidade associado poderão sofrer alterações automáticas na referência destes reguladores através do código de execução DCEN.

A2.2 CÓDIGO DE EXECUÇÃO DMDG

Leitura de dados de modelos predefinidos de máquina síncrona (gerador por “*default*”).

A seguir é mostrado o modelo clássico de máquina síncrona com fonte de tensão constante em série com a reatância transitória de eixo direto:

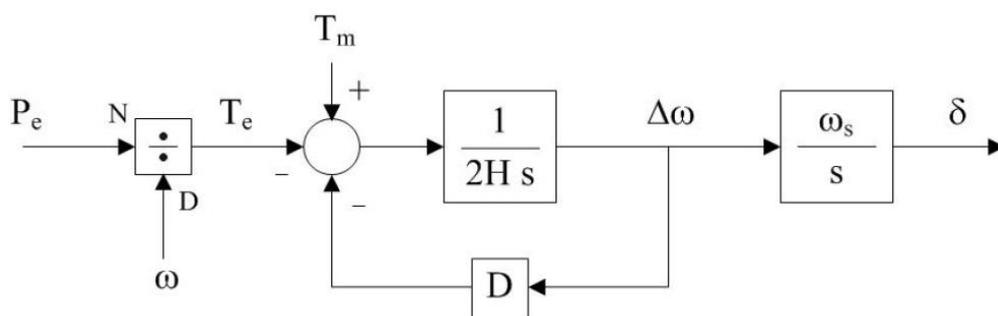


Figura A1 – Diagrama para a equação de oscilação eletromecânica.

Onde:

- P_e – potência elétrica ativa gerada pela máquina, em p.u. na base da máquina;
- P_m – potência mecânica da máquina, em p.u. na base da máquina;

- $\Delta\omega$ – desvio da velocidade angular da máquina, em p.u.
- ω – velocidade angular da máquina, em p.u.
- ω_s – velocidade angular síncrona da máquina, em rad/s.
- δ – ângulo absoluto do eixo q da máquina, em radianos.

A2.3 CÓDIGO DE EXECUÇÃO DCAR

Leitura dos parâmetros A, B, C e D que estabelecem a função de variação de carga estática em relação ao módulo de tensão nas barras. As cargas deste tipo são modeladas por:

$$\text{Carga ativa} = \begin{cases} \left[(100 - A - B) + A*(V/V_0) + B*(V/V_0)^2 \right] * P / 100 & \text{se } V \geq V_{fld} \\ \left[(100 - A - B)*(V/V_{fld})^2 + A*(V/V_0)*(V/V_{fld}) + B*(V/V_0)^2 \right] * P / 100 & \text{se } V < V_{fld} \end{cases}$$

$$\text{Carga reativa} = \begin{cases} \left[(100 - C - D) + C*(V/V_0) + D*(V/V_0)^2 \right] * Q / 100 & \text{se } V \geq V_{fld} \\ \left[(100 - C - D)*(V/V_{fld})^2 + C*(V/V_0)*(V/V_{fld}) + D*(V/V_0)^2 \right] * Q / 100 & \text{se } V < V_{fld} \end{cases}$$

Onde:

- A, B, C e D são parâmetros que definem as parcelas de carga representadas por corrente e impedância constantes, respectivamente;
- P e Q são as potências ativa e reativa da carga para a tensão V_0 ;
- V_0 é a tensão inicial da barra, convergida pelo fluxo de potência;
- V_{fld} é a tensão abaixo da qual a carga passa a ser modelada como impedância constante.

As demais são automaticamente convertidas de potência constante para impedância constante. Os parâmetros P e Q nas fórmulas acima podem ser alterados pelo código de Execução DEVT ou automaticamente pelo programa através de modificações de cenário de carga/geração, através de atuações de estágios de ERAC ou de atuações de relés de subfrequência ou subtensão.

A2.4 CÓDIGO DE EXECUÇÃO DCST

Leitura de dados de curvas de saturação.

As curvas de saturação podem ser referenciadas por modelos de gerador e/ou modelos de regulador de tensão.

A2.5 CÓDIGO DE EXECUÇÃO DRGT

Leitura de dados de modelos predefinidos de regulador de tensão e sistema de excitação de máquina síncrona.

A2.6 CÓDIGO DE EXECUÇÃO DRGV

Leitura de dados de modelos predefinidos de regulador de velocidade e turbina de máquina síncrona.

A2.7 CÓDIGO DE EXECUÇÃO DEVT

Leitura de dados de eventos.

A2.8 CÓDIGO DE EXECUÇÃO DPLT

Leitura de dados das variáveis a serem armazenadas no arquivo de plotagem.

A2.9 CÓDIGO DE EXECUÇÃO DSIM

Leitura de dados de simulação.