

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
PPGEE

**PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DO IMPACTO
DA COMPENSAÇÃO REATIVA *SHUNT* CAPACITIVA
NA ESTABILIDADE DE TENSÃO**

ALUNO: Luiz Mariano Junior

ORIENTADORA: Maria Helena Murta Vale

Belo Horizonte, Dezembro de 2008

Luiz Mariano Junior

**“PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA
COMPENSAÇÃO REATIVA *SHUNT* CAPACITIVA NA
ESTABILIDADE DE TENSÃO”**

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

**Área de Concentração: Engenharia de Potência
Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica**

**Orientadora: Prof^a Maria Helena Murta Vale
Universidade Federal de Minas Gerais**

**Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
2008**

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que contribuíram de maneira decisiva no meu caminhar, fontes de amor, carinho, incentivo e apoio. Aos meus pais Luiz Mariano Neto e Aparecida Mercês Ferreira, minha irmã Maria Cecília, minha filha Luíze Cristina, minha esposa Michelle Cristina e meus avós (*in memoriam*) Amador Alves Ferreira e Maria Francisca Ferreira.

*"Tudo neste mundo tem uma resposta. O que
leva é tempo para se formular as perguntas."*

José Saramago

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Luiz Mariano Neto e Aparecida Mercês Ferreira pelo carinho, amor, atenção e confiança. Agradeço por todas as oportunidades proporcionadas sem as quais seria impossível chegar até aqui.

À minha irmã Maria Cecília pela amizade, companheirismo e incentivo sempre presentes.

À Michelle, Jade e Luíze pelo carinho, amor e compreensão da minha ausência no final deste trabalho.

À professora Maria Helena por todo o apoio e ensinamentos recebidos desde o início da graduação em engenharia, pelos quais serei eternamente grato.

Aos amigos Adelino Pinheiro Silva, Marcelo de Almeida Felipe e Renato Zica de Oliveira por todos os momentos compartilhados.

Ao amigo Fabrício Chaves, companheiro de sala e estudos, por toda a contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas Alberto, Alisson, Fernando, Fuad, José Luis, Valmir pelo incentivo e pelos momentos de descontração.

À UFMG pela qualidade no ensino.

Aos profissionais da Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG, pelos valiosos ensinamentos.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
2 – COMPENSAÇÃO REATIVA E CONTROLE DE TENSÃO NO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO	5
2.1. Introdução.....	5
2.2. As Atividades de Expansão e de Operação	5
2.3. Planejamento da Expansão Elétrica	7
2.4. Compensação Reativa e Controle de Tensão	10
2.5. Conclusão.....	15
3 – CONSIDERAÇÕES SOBRE ESTABILIDADE DE TENSÃO	16
3.1. Introdução.....	16
3.2. Estabilidade de Tensão - Definição	17
3.3. O Ponto de Máximo Carregamento e a Curva PV	21
3.4. A Relação entre Compensação Reativa <i>Shunt</i> Capacitiva e a Estabilidade de Tensão.....	25
3.5. Fluxo de Potência Continuado.....	30
3.6. Índices para Avaliação da Estabilidade de Tensão	37
3.7. Conclusão.....	42
4 – COMPENSAÇÃO REATIVA <i>SHUNT</i> CAPACITIVA NA ESTABILIDADE DE TENSÃO – PROPOSTA DE PROCEDIMENTO	44
4.1. Considerações Iniciais.....	44
4.2. Módulo (i): Classificação - Escolha das Barras Candidatas à Compensação Reativa <i>Shunt</i> Capacitiva	47
4.2.1. <i>Passo 1 - Representação do Sistema Elétrico</i>	48
4.2.2. <i>Passo 2 - Diagnóstico do Sistema: Casos de Referência</i>	51
4.2.3. <i>Passo 3 - Avaliação da Tensão no Ponto de Colapso</i>	53
4.2.4. <i>Passo 4 - Análise da Sensibilidade das Barras</i>	56
4.2.5. <i>Passo 5 - Classificação Geral</i>	59

4.3. Módulo (ii): Determinação dos Valores Limite para a Compensação Reativa <i>Shunt</i> Capacitiva	61
4.4. Conclusão.....	68
5 – APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO PROPOSTO	70
5.1. Introdução.....	70
5.2. Ambiente computacional	70
5.3. Escolha das Barras Candidatas à Compensação Reativa <i>Shunt</i> Capacitiva.....	72
5.4. Escolha dos Valores Limite para a Compensação Reativa <i>Shunt</i> Capacitiva.....	81
5.5. Avaliação do Sistema Compensado.....	88
5.6. Conclusões.....	92
6 – CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
ANEXO A – CONSIDERAÇÕES SOBRE TEORIA DA BIFURCAÇÃO.....	101
Modelos Usados para a Análise de Bifurcações.....	103
Tipos de Bifurcações	104
Bifurcação Sela-Nó	106
ANEXO B – MÉTODO DA BISSEÇÃO	108
ANEXO C – DADOS DO SISTEMA IEEE 39 BARRAS	110
Dados de Linhas de Transmissão e Transformadores	110
Dados das Barras	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Etapas da Expansão e Operação nos Sistemas Elétricos de Potência [Vale 2007].....	6
Figura 2.2 – Etapas Básicas dos Estudos de Planejamento da Expansão [Menezes 2007]	8
Figura 2.3 – Passos do Procedimento para CT/CR [adaptada de Valadares 2001] em Conjunto com a Avaliação do Impacto na Estabilidade de Tensão	13
Figura 3.1 – Sistema elétrico de potência – Duas barras	21
Figura 3.2 – Tensão, Potência e Corrente em função da carga	23
Figura 3.3 – Curva PV – Ponto de Máximo Carregamento	24
Figura 3.4 – Curvas PV para diferentes valores de ϕ [adaptada de Ajarapu 2006].....	28
Figura 3.5 – Curvas QV para diferentes valores de p - [Ajarapu 2006].....	30
Figura 3.6 – Fluxo de Potência Continuado - parte superior da curva	34
Figura 3.7 – Fluxograma - Fluxo de Potência Continuado	37
Figura 4.1 – Margem de carregamento e tensão objetivo	45
Figura 4.2 – Fluxograma: Escolha das Barras Candidatas a Compensação Reativa Shunt Capacitiva	48
Figura 4.3 – Exemplo: Pontos de Carregamento – Fluxo de Potência Continuado	54
Figura 4.6 – Fluxograma: Determinação dos valores limite para a Compensação Reativa Shunt Capacitiva	63
Figura 4.5 – Fluxograma: Valo Figura 4.2 – Fluxograma: Escolha das Barras Candidatas a Compensação Reativa <i>Shunt</i> Capacitiva	63
Figura 4.7 – Ponto A, Ponto B e Tensão Objetivo	65
Figura 5.1 – Sistema elétrico de potência IEEE 39 barras	71
Figura 5.2 – Autovalores da Matriz Jacobiana – Caso Base	72
Figura 5.3 – Perfil de Tensão (módulo) nas Barras – Caso Base	73
Figura 5.4 – Perfil de Tensão (módulo) nas Barras – Acréscimo de 25% de Carga	74
Figura 5.5 – Curvas PV das Barras do Tipo PQ	76
Figura 5.6 – Tensão no Ponto de Colapso - TPC	76
Figura 5.7 – Sensibilidade das Barras em Relação a Tensão ($dV/d\lambda$)	78
Figura 5.8 – Valores escolhidos para margem de carregamento e tensão objetivo	81
Figura 5.9 – Intervalo dos Valores para Compensação Reativa Shunt Capacitiva	82
Figura 5.10 – Resposta das Barras 7 e 8 - Compensação calculada pelo ponto A	83
Figura 5.11 – Resposta das Barras 7 e 8 - Compensação calculada pelo ponto B	83
Figura 5.12 – Resposta das Barras 7 e 8 - Compensação Ajustada.....	84
Figura 5.13 – Tensão Após Ajuste de Compensação (barras 7 e 8) – 95% de Carregamento Máximo	85
Figura 5.14 – Resposta das Barras 4, 7, 8 e 12 - Compensação Ajustada.....	86
Figura 5.15 – Tensão Após Ajuste de Compensação (barras 4, 7, 8 e 12) – 95% de Carregamento Máximo	86

Figura 5.16 – Resposta das Barras 4, 7, 8, 12 e 15 - Compensação Ajustada	87
Figura 5.17 – Tensão Após Ajuste de Compensação (barras 4, 7, 8, 12 e 15) – 95% de Carregamento Máximo	88
Figura 5.18 – Comparação das Curvas PV – Barras 4, 7, 8, 12 e 15	90
Figura 5.19 – Comparação dos Perfis de Tensão	91
Figura 5.20 – Autovalores da Matriz Jacobiana – Sistema Compensado – 95% de Carregamento Máximo	91
Figura A.1 – Ilustração - Funções de Energia	102
Figura A.2 – Tipos de bifurcação – diagrama de fase [Ajarapu 2006].....	106
Figura A.3 – Bifurcação do tipo sela-nó	107
Figura B.1 – Fluxograma - Método da Bisseção.....	108
Figura B.2 – Gráfico da Equação Exemplo.....	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Incidentes relacionados a Estabilidade de Tensão	16
Tabela 3.2 – Valores para os pontos de máximo carregamento em função do fator de potência	28
Tabela 4.1 – Valores Exemplo para a Figura 4.3	54
Tabela 5.1 – Sumário do Fluxo de Potência para o Caso Base	72
Tabela 5.2 – Sumário do Fluxo de Potência para Acréscimo de 25% de Carga.....	73
Tabela 5.3 – Classificação das Barras de acordo com a TPC	77
Tabela 5.4 – Sumário do Sistema no Ponto de Máximo Carregamento	77
Tabela 5.5 – Classificação das Barras de acordo com a Sensibilidade ($dV/d\lambda$)	79
Tabela 5.6 – Classificação Geral das Barras.....	80
Tabela 5.7 – Tensão (pu) com 95% de carregamento	84
Tabela 5.8 – Sumário do Sistema – 95% de Carregamento Máximo.....	89
Tabela 5.9 – Sumário do Sistema no Ponto de Máximo Carregamento	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CCPE	Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos
CR	Compensação Reativa
CT	Controle de Tensão
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
HVDC	<i>High-Voltage Direct Current</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LRC	<i>Lighting Research Center</i> – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas – Convênio UFMG/CEMIG
LT	Linha de Transmissão
LTC	<i>Load Tap Change</i>
MC	Margem de Carregamento
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
p.u.	por unidade
PPGEE	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TO	Tensão Objetivo
TPC	Tensão no Ponto de Colapso
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
V	Volts
W	Watts

RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta de procedimento para avaliação do impacto da Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva na Estabilidade de Tensão dos Sistemas Elétricos de Potência.

O procedimento proposto está inserido nas atividades de Planejamento da Expansão e tem por objetivo auxiliar o processo de decisão envolvido na elaboração dos planos, visando tornar mais seguro o sistema do ponto de vista da estabilidade de tensão.

A compensação reativa *shunt* capacitiva é amplamente aplicada nas expansões dos sistemas elétricos, pois alia aspectos positivos técnicos e econômicos, dentre os quais destacam-se: melhoria no perfil de tensão do sistema, ajuste do fator de potência das barras, diminuição de perdas, melhor aproveitamento do sistema, baixo custo e rapidez de implementação. Contudo, a adição deste tipo de compensação eleva o valor da tensão no ponto de máximo carregamento, o que pode causar problemas relacionados à estabilidade de tensão do sistema. Deve-se evitar que tal valor se aproxime da faixa operacional de tensão. Isto requer que a inclusão de uma nova compensação seja detalhadamente avaliada.

A metodologia implementada nesta dissertação identifica compensações que evitam a situação delineada acima e, para tal, está estruturada em dois módulos. O primeiro tem a tarefa de listar as barras mais propícias para a compensação e o segundo indica valores máximos de compensação de maneira a se evitem problemas de instabilidade de tensão.

ABSTRACT

This work proposes a procedure to evaluate the impact of the Reactive Shunt Capacitive Compensation on Power System Voltage Stability. The procedure is related to Expansion Activities and aims to support planning decision process in order to increase system security to avoid voltage instability phenomenon.

Reactive shunt capacitive compensation is widely applied on power systems due to several positive aspects. Among others, it provides better system voltage profile, power factor correction, power loss decrease and better exploitation of system network. Additionally, it presents low cost and simple implementation. However, the addition of this type of compensation on system network increases the bus voltage value at the maximum loading point, that may causes problems relative system voltage stability. The approximation of this dangerous condition to the usually adopted voltage operative limits must be hardly avoided. So, the decision about the inclusion of a new system compensation requires very detailed analyses.

The methodology implemented in this thesis identifies adequate system compensation and is structured in two modules. The former prepares a bus ranking to receive reactive compensation, and the later points maximum compensation values to avoid system voltage instability.

1 – INTRODUÇÃO

O planejamento da expansão dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) é uma tarefa com elevado grau de complexidade, dado o número de variáveis envolvidas. Consiste basicamente em otimizar os recursos econômicos e técnicos, visando obter uma nova configuração do sistema que permita atender com segurança às demandas estimadas para o futuro.

Do ponto de vista econômico, o cenário é caracterizado de um lado pelos investidores que esperam obter a rentabilidade do capital investido, com condições de risco e retorno atrativas. De outro lado estão os consumidores que desejam o fornecimento de uma energia segura, com qualidade e pelo menor preço possível. Intermediando essa relação estão os órgãos que devem proteger o interesse dos consumidores, além de regulamentar o setor de maneira a criar as condições necessárias e propícias para os investimentos, bem como para o funcionamento adequado do sistema.

Ainda em relação ao cenário econômico ressalta-se a necessidade de um alinhamento entre o crescimento da economia com a expansão dos sistemas elétricos. O crescimento da economia sem a devida expansão elétrica não é possível dada a atual dependência das atividades industriais e comerciais em relação à energia elétrica. Da mesma forma, os sistemas elétricos de potência não podem ser expandidos aleatoriamente, sem acompanhar o crescimento da demanda, uma vez que se tornariam ociosos e não poderiam remunerar o capital investido de maneira competitiva.

Conforme tratado posteriormente neste texto, um dos primeiros passos da elaboração dos planos consiste da determinação das estimativas de crescimento econômico. Estas são bastante influenciáveis por fatores políticos, meteorológicos, internacionais, dentre outros, e tendem a apresentar maiores variações para cenários mais distantes. Esse fato dificulta ainda mais a correspondência entre a expansão dos SEP com o crescimento econômico, uma vez que as obras (construção de novas linhas de transmissão, usinas geradoras, etc.) demandam uma janela de tempo considerável.

A avaliação técnica das alternativas de expansão por sua vez é muito ampla e complexa, pois devem ser analisados diversos pontos e fenômenos envolvidos com o comportamento dos sistemas elétricos.

Os recursos técnicos devem permitir que a energia nas suas diversas formas (potencial, nuclear, térmica, eólica, química e solar) seja transformada em energia elétrica que, por sua vez, deverá ser transportada e distribuída para as áreas consumidoras. Assim, as análises técnicas vão desde a seleção de algum recurso de energia disponível na natureza, passando pela avaliação da viabilidade de sua utilização e transporte, considerando aspectos econômicos, técnicos, ambientais, geográficos, dentre outros, até o seu uso pelo consumidor final.

Dada as não-linearidades dos SEP cada alternativa técnica selecionada para estudo implica diversas análises, a fim de verificar seu impacto no sistema e de compará-la com outras alternativas possíveis. Do exposto, percebe-se o grau de dificuldade da atividade de planejamento da expansão.

Dentre a vasta lista de alternativas que se apresentam à expansão, encontra-se a Compensação Reativa Shunt Capacitiva, foco desta dissertação. De forma mais específica, ênfase é dada ao seu impacto no Controle de Tensão e na Estabilidade de Tensão dos SEP.

A Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva se destaca entre as demais alternativas de expansão devido ao seu baixo custo, rapidez e facilidade de implantação. Permite um melhor aproveitamento das redes de transmissão e distribuição existentes, diminuindo perdas, ajustando o fator de potência das barras e melhorando o perfil de tensão.

A *motivação* para a realização deste trabalho de mestrado surge do fato que a compensação reativa, quando dimensionada com base apenas no fator de potência das barras e nos níveis de tensão do ponto de operação, pode levar o sistema a problemas de instabilidade de tensão. Tal compensação atua de forma *benéfica*, aumentando a margem de estabilidade (potência) com relação ao ponto de máximo carregamento. Porém, pode trazer *enorme risco* para a operação, caso traga o valor da tensão deste ponto para a faixa operacional do SEP.

A crescente preocupação com os problemas provocados pela perda da Estabilidade de Tensão reside no fato dos enormes prejuízos causados por este fenômeno. Mesmo sendo conhecido há mais tempo, o tema passou a receber maior atenção a partir da década de 80, quando os sistemas passaram a ser mais exigidos, trabalhando em condições próximas aos limites máximos. Neste cenário, a compensação reativa passou a ser bastante utilizada, levando alguns sistemas a uma condição de sobrecompensação, causando reações adversas nos mesmos. Apesar dos vários estudos relativos ao fenômeno da instabilidade de tensão, a inclusão de sua análise nos

procedimentos da expansão, considerando a influência da compensação reativa, ainda não se verifica de forma plena.

O quadro delineado acima mostra a relevância de pesquisas e desenvolvimentos que auxiliem o planejador na definição de uma compensação reativa (montante e localização) que não traga riscos à Estabilidade de Tensão do SEP. A presente dissertação de mestrado tem o objetivo de propor um procedimento para cumprir essa tarefa.

Basicamente, o procedimento está estruturado em dois módulos. O *primeiro* identifica as barras mais propícias para a compensação e o *segundo* indica valores máximos de Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva de maneira a evitar problemas de Estabilidade de Tensão. Adicionalmente, uma das metas é que a estratégia possa ser integrada com facilidade aos demais procedimentos em uso pelas equipes de planejamento.

Além da relevância do tema de dissertação para a área da engenharia elétrica, é importante destacar uma motivação adicional que levou ao seu desenvolvimento. Esta se refere às pesquisas que vêm sendo desenvolvidas no LRC¹/UFMG nos temas *Compensação Reativa/Controle de Tensão* [Cardoso 1999, Silveira 1999, Vale 2000, Chaves 2001, 2002, 2003, 2004, 2005a, 2005b, Vale 2005b e Chaves 2007] e *Estabilidade de Tensão* [Lobato 1998, Cortez 2001]. A aplicação desses trabalhos gerou uma ferramenta computacional chamada PlanEx, além de outros desenvolvimentos práticos [P&D 2002, 2004a e 2004b, Valadares 2001a e 2001b, Vale 2003, 2004 e 2005a].

Para cumprir seu objetivo este texto está estruturado em seis capítulos, brevemente descritos a seguir.

O primeiro capítulo apresenta o contexto no qual o trabalho está inserido, tanto no que se refere aos atuais desenvolvimentos acadêmicos, quanto às demandas geradas pelo cenário atual dos sistemas elétricos de potência. Mostra-se a importância da estratégia proposta.

O capítulo 2 tem o objetivo de relacionar as etapas do planejamento da expansão elétrica, com o procedimento proposto. Mostra-se como atualmente os trabalhos de planejamento são realizados, indicando as etapas onde é necessária uma avaliação do SEP sob o ponto de vista da Estabilidade de Tensão.

¹ LRC - *Lightning Research Center* – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas (convênio UFMG / CEMIG).

No capítulo 3 são discutidos os principais conceitos relacionados à Estabilidade de Tensão, com um detalhamento matemático necessário para o entendimento do fenômeno. É mostrado como a sobrecompensação pode levar a problemas de instabilidade, com a elevação do ponto de colapso até a faixa de tensão operacional.

O capítulo 4 apresenta o procedimento proposto propriamente dito. Detalham-se os passos e discutem-se os aspectos da modelagem matemática do SEP. O procedimento proposto está dividido em duas partes principais. A primeira diz respeito à escolha das barras candidatas a receberem a compensação. A outra parte indica os valores máximos de compensação que podem ser alocados sem comprometer a Estabilidade de Tensão. Para facilitar o entendimento procurou-se exibir os passos e tomadas de decisão no formato de fluxogramas. Além disso, houve uma preocupação com o formalismo matemático, mostrando os aspectos associados ao procedimento no formato de expressões matemáticas.

O capítulo 5 exibe os resultados obtidos com a aplicação do procedimento proposto a um sistema elétrico exemplo. Cada fase do procedimento é detalhada esclarecendo dúvidas em relação à aplicação da proposta.

No capítulo 6, são indicadas as principais conclusões do trabalho e apresentadas sugestões para desenvolvimentos futuros.

O trabalho conta ainda com três anexos onde mostra-se o método numérico da bisseção, a teoria da bifurcação aplicada a Estabilidade de Tensão e os dados do sistema utilizado no capítulo 5 para aplicação do procedimento proposto.

2 – COMPENSAÇÃO REATIVA E CONTROLE DE TENSÃO NO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO

2.1. INTRODUÇÃO

Conforme já comentado, a Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva vem sendo amplamente empregada nos sistemas elétricos devido a diversos fatores, mas principalmente por: possuir características de baixo custo; evitar ou adiar grandes investimentos; permitir o controle de tensão nas barras; aumentar a capacidade de atendimento de carga; diminuir perdas; melhorar o fator de potência das barras.

Contudo, como ensina uma famosa frase de Paracelso (“A diferença entre o veneno e o remédio é a dose.”) o uso descontrolado da Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva pode trazer sérios malefícios ao sistema elétrico. Para que o uso deste tipo de compensação se dê de forma adequada, é importante compreender seu impacto no comportamento do sistema elétrico.

Desta forma, este capítulo tem o objetivo de apresentar os conceitos relacionados à Compensação Reativa (CR) e ao Controle de Tensão (CT) no contexto do planejamento da expansão dos sistemas elétricos de potência. A visão geral das etapas do procedimento global permite localizar onde o procedimento proposto nesta dissertação pode ser inserido, além de auxiliar no entendimento da importância de sua aplicação.

2.2. AS ATIVIDADES DE EXPANSÃO E DE OPERAÇÃO

Considerando as atividades relacionadas aos sistemas elétricos de potência, é comum classificá-las, de maneira geral, em dois grupos principais: Expansão e Operação. Na Expansão o objetivo é a implantação de novas instalações, ampliando ou adequando a capacidade do sistema em atender à demanda estimada para curto, médio e longo prazo.

Por outro lado, a Operação é responsável pela melhor utilização dos recursos já existentes. Para que possam alcançar os seus objetivos, tanto a Expansão quanto a Operação englobam tarefas de *Planejamento* e de *Execução* dos planos, conforme ilustra a Figura 2.1.

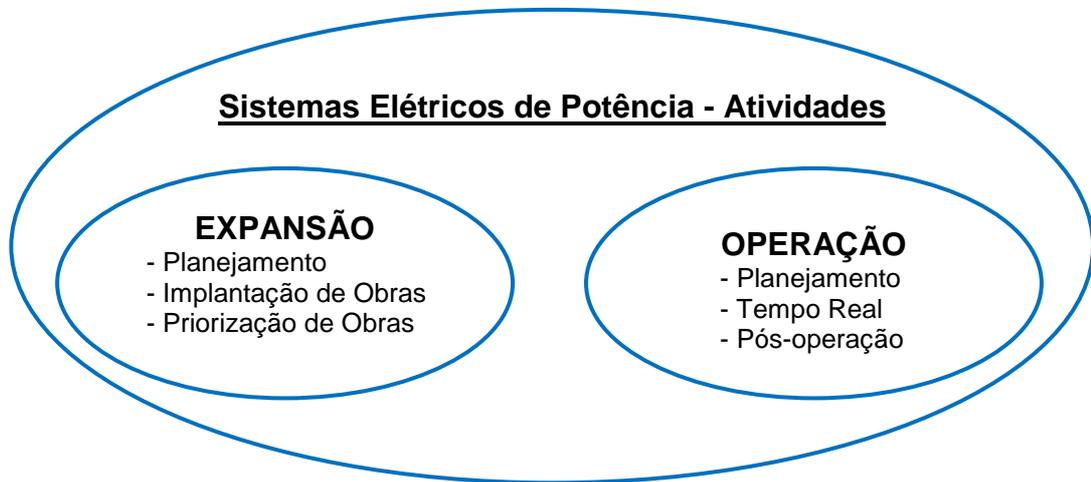


Figura 2.1 – Etapas da Expansão e Operação nos Sistemas Elétricos de Potência [Vale 2007]

A atividade de Expansão pode ser resumida em três etapas principais:

Planejamento: consiste na elaboração dos planos que contemplam a ampliação e a adequação dos SEP visando atender à demanda de carga projetada para o futuro. As obras e investimentos necessários são identificados por estudos e incluídos nos chamados planos de expansão. Conforme detalhado posteriormente neste texto, nessa etapa são realizadas várias análises técnicas com o objetivo de verificar o impacto das novas instalações no comportamento do sistema. Nesta fase, são confeccionados os programas de implantação e priorização das obras de expansão.

Implantação de obras: com base nos planos elaborados na etapa de Planejamento, as obras são iniciadas e executadas, sendo necessário o acompanhamento da evolução da implantação e suporte aos estudos de viabilidade técnica. Nessa fase também são desenvolvidos estudos de engenharia para a especificação das instalações e equipamentos que serão utilizados.

Priorização de obras: refere-se aos ajustes nos cronogramas de execução que por ventura se façam necessários em razão da modificação dos cenários

projetados. Nessa etapa podem ser priorizadas obras em detrimento das demais, devido, por exemplo, a restrições econômicas ou técnicas.

Para a etapa de Operação, têm-se basicamente as fases:

Planejamento: refere-se à elaboração dos planos com o objetivo de melhor gerenciar os recursos de geração e transmissão da energia. Essa etapa compreende a análise de desempenho do sistema já existente, além dos planos de contingências, desligamentos automáticos de carga, etc.

Tempo Real: consiste na execução dos procedimentos operativos em tempo real do SEP, contemplando as atividades de coordenação das ações de supervisão e controle.

Pós-operação: refere-se aos estudos e simulações *off-line* que visam analisar as perturbações de pequeno ou de grande porte ocorridas durante a operação em tempo real, procurando-se identificar suas possíveis causas. Com base nos resultados encontrados, podem ser tomadas medidas corretivas, de modo a atenuar os impactos negativos das perturbações, ou medidas preventivas com o objetivo de evitar, quando possível, que tais perturbações se repitam.

No contexto desta dissertação, é de especial interesse a etapa de Planejamento da Expansão Elétrica, sendo portanto seus passos detalhados no item seguinte.

2.3. PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO ELÉTRICA

Conforme já mencionado, a atividade de Planejamento da Expansão inclui análises técnicas e econômicas, onde se procuram viabilizar as ampliações no sistema elétrico para que a demanda possa ser atendida com qualidade e segurança. A Figura 2.2 exhibe as principais etapas que compõem um Estudo de Planejamento. Vale ressaltar que a análise sobre o uso de compensação reativa se insere, de forma mais específica, no contexto dos estudos elétricos, e não dos estudos energéticos.

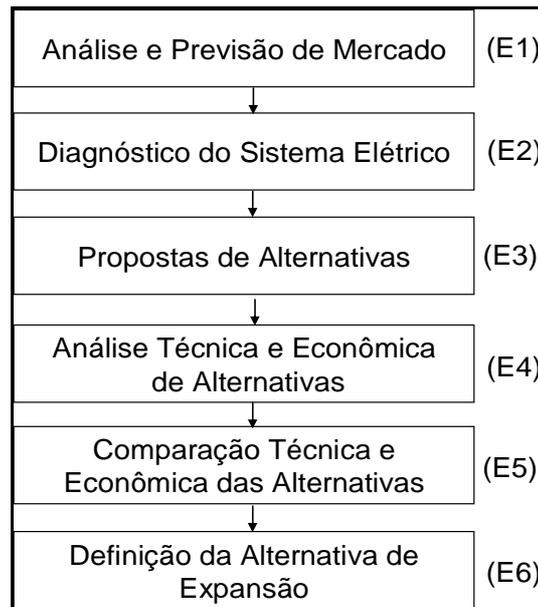


Figura 2.2 – Etapas Básicas dos Estudos de Planejamento da Expansão [Menezes 2007]

De forma sucinta, tais etapas podem ser assim caracterizadas [Menezes 2007]:

(E1) Análise e Previsão de Mercado: A partir de dados sobre pedidos de ligação de carga, previsão de crescimento econômico das áreas atendidas pelo sistema, entrada em operação de novas usinas, etc. é feita uma estimativa de demanda de carga para o futuro, em geral para um horizonte temporal de 10 anos.

(E2) Diagnóstico do Sistema Elétrico: Esta etapa visa a identificação das deficiências no sistema elétrico para o horizonte de tempo escolhido². O diagnóstico deve levar em consideração critérios estabelecidos pelos procedimentos do planejador, como por exemplo níveis de tensão nas barras, carregamento dos transformadores, perdas nas linhas de transmissão, deficiência de potência reativa (fator de potência), dentre outros. As análises realizadas nesta etapa utilizam tradicionalmente ferramentas para cálculo de fluxo de potência, curto-circuito e transitórios. Também são realizados estudos sobre a confiabilidade do sistema, estabilidade angular e de tensão. Desta forma, já nesta etapa o planejador deve estar atento a possíveis impactos negativos sobre a Estabilidade de Tensão do sistema causados pela compensação reativa nele instalada.

² Horizontes típicos no caso brasileiro:
Plano Determinativo – 5 anos
Plano Indicativo – 10 anos

(E3) Propostas de Alternativas: De acordo com as necessidades identificadas, nesta etapa são elaboradas alternativas para a expansão do sistema elétrico como, por exemplo, a construção de novas linhas de transmissão, a recapacitação de linhas de transmissão existentes, a construção ou ampliação de subestações, interligações de sistemas, instalação de Compensação Reativa Série ou *Shunt* e, também, alterações da configuração existente.

Para os planos que incluem a Compensação Reativa Shunt Capacitiva, pode-se utilizar o procedimento apresentado nesta dissertação nas propostas de alternativas. O procedimento proposto auxilia no levantamento das barras mais indicadas a receberem a compensação, bem como o montante máximo a ser injetado de forma a se evitar problemas relacionados à Estabilidade de Tensão.

(E4) Análise Técnica e Econômica das Alternativas: Nesta etapa as alternativas de expansão são analisadas técnica e economicamente. Repete-se aqui a análise técnica realizada na etapa de diagnóstico. Desta forma é possível visualizar o impacto das alternativas de expansão propostas. A avaliação econômica normalmente é realizada por meio de fluxo de caixa, representando como benefícios ou entradas positivas o ganho de mercado de energia, postergação de obras de reforço e a redução de perdas ôhmicas no sistema elétrico. A representação dos custos é feita considerando os custos de expansão e de operação.

A proposta de procedimento apresentada nesta dissertação é formulada de forma a sugerir a compensação nas barras onde o efeito será mais benéfico ao sistema, selecionando as barras onde a injeção de potência reativa trará maiores melhorias no perfil de tensão. Assim, menores montantes de potência reativa serão indicados trazendo ganhos do ponto de vista econômico. Além disso, ao avaliar a Estabilidade de Tensão do sistema frente às modificações da expansão, afasta o risco de colapso de tensão, reduzindo o número de desligamentos e conseqüentemente minorando os prejuízos causados por este fenômeno indesejado.

(E5) Comparação Técnica e Econômica das Alternativas: Nesta etapa as alternativas de expansão são comparadas técnica e economicamente.

(E6) Definição da Alternativa de Expansão: A melhor alternativa de expansão é definida nesta etapa. São detalhadas as obras da alternativa, os benefícios técnicos para o sistema e os respectivos benefícios econômicos.

Conforme já citado, uma grande motivação para a proposta desta dissertação reside no fato da maioria dos procedimentos atualmente existentes, para os planos de compensação reativa, não considerarem ou considerarem ainda de forma incipiente e não padronizada seus efeitos sobre a Estabilidade de Tensão do SEP. Neste sentido é importante conhecer o estágio atual dos desenvolvimentos na área, bem como apresentar de forma mais específica onde o procedimento aqui proposto poderá ser utilizado.

2.4. COMPENSAÇÃO REATIVA E CONTROLE DE TENSÃO

As grandezas tensão e potência reativa estão diretamente relacionadas. A tensão é uma variável a ser controlada, devendo permanecer entre limites máximos e mínimos pré-estabelecidos³. A potência reativa se apresenta como a variável de controle mais significativa para controlar o módulo da tensão das barras do sistema. Diferentes atuações no SEP podem ser adotadas para que a tensão se apresente dentro da faixa permitida. Contudo, de especial interesse são aquelas onde o fluxo de potência reativa pela rede seja mínimo. Para considerar estes dois aspectos, costumam ser caracterizadas duas questões: Compensação Reativa (CR) e Controle de Tensão (CT).

A Compensação Reativa refere-se ao fornecimento de potência reativa próximo aos locais onde é demandada, evitando-se assim a circulação desnecessária de reativos por grandes extensões da rede, de forma a propiciar um melhor uso dos recursos do SEP.

Por sua vez, o Controle de Tensão é realizado para manter o módulo das tensões nas barras do sistema dentro da faixa pré-estabelecida.

A Compensação Reativa e o Controle de Tensão têm constituído tema de vários trabalhos de natureza acadêmica e prática realizados nos últimos anos no LRC/UFMG. Citam-se como exemplo as referências [Cardoso 1999, Silveira 1999, Vale 2000, Chaves

³ Os limites de tensão são regulamentados e devem ser respeitados por diversas razões: limites físicos dos equipamentos, qualidade do produto entregue pelas concessionárias, segurança de pessoas, etc.

2001, 2002, 2003, 2004, 2005a, 2005b, Vale 2005b e Chaves 2007]. O elevado grau de evolução das pesquisas tem se traduzido em número significativo de trabalhos em parceria com a CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais [P&D 2002, 2004a e 2004b, Valadares 2001a e 2001b, Vale 2003, 2004 e 2005a].

Historicamente, os trabalhos citados se iniciaram com pesquisas sobre estratégias e ferramentas aplicadas ao CR/CT [Silveira 1999 e Cardoso 1999]. Em [Vale 2000] já é discutida a importância de uma *visão sistêmica* entre as atividades do SEP.

Em [Valadares 2001a e 2001b] são apresentadas propostas de Políticas, Critérios e Procedimentos para CR/CT aplicados ao *Planejamento da Expansão*. Tais procedimentos foram aperfeiçoados em [Chaves 2001] com a apresentação de uma proposta de *Procedimento Otimizado*. Os estudos caminharam para um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento onde foi implementada uma ferramenta aplicada ao planejamento da compensação reativa denominada *PlanEx*, sendo iniciado um banco digital de dados com referências bibliográficas sobre o tema [P&D 2002, Vale 2003, P&D 2004a, P&D 2004b]. As pesquisas são ampliadas e aperfeiçoadas em [Chaves 2007] onde são incluídas novas propostas de procedimentos para avaliação do impacto da CR no comportamento do SEP sob os aspectos de Estabilidade de Tensão, Transitórios e Harmônicos. A presente dissertação constitui continuidade aos desenvolvimentos citados.

Considerando a atividade de expansão, as Políticas, Critérios e Procedimentos para CR/CT apresentadas em [Valadares 2001] são de especial interesse para este trabalho, pois tratam de forma específica os aspectos a serem considerados por esta alternativa dentro das etapas básicas da Figura 2.2.

As Políticas de CR/CT sugerem que a compensação deve ser feita inicialmente, visando à correção dos fatores de potência das barras de carga. Além da correção, espera-se como consequência imediata um ajuste nas tensões das barras do sistema. Ainda assim, recomenda-se um diagnóstico das tensões nas barras do sistema com o objetivo de verificar a necessidade de medidas de controle.

No que diz respeito a Critérios para CR/CT destacam-se os seguintes pontos:

- 1 – Critério N-1 para contingências no sistema de transmissão e subtransmissão de energia.
- 2 – Níveis de tensão máximos e mínimos estabelecidos pela regulamentação do setor elétrico brasileiro devem ser respeitados.
- 3 – Limite de 5% nas variações de tensão nas barras.

4 – Compensadores síncronos e estáticos não devem ter grande parte da sua capacidade comprometida com a compensação da rede ou da carga, para que possam cumprir sua função primária de controle fino de tensão e de garantia de bom funcionamento do sistema em situações de emergência.

Quanto aos Procedimentos de CR/CT, são indicadas duas etapas iniciais:

1 – Montagem dos casos a serem analisados, de tal forma que sejam representados o sistema instalado, as intervenções futuras e o crescimento previsto para a carga. Para que as análises sejam efetivas é importante que os dados representem, da forma mais próxima possível, a realidade.

2 – Definição do horizonte de análise – o horizonte temporal das análises deve ser definido em função da situação atual do sistema e da disponibilidade de informações confiáveis sobre a evolução de carga e configuração do sistema elétrico.

O procedimento proposto nesta dissertação está formulado de forma a permitir a sua integração com essas recomendações, facilitando o seu uso com os procedimentos atualmente aplicados.

Os passos básicos dos Procedimentos para CR/CT retirados de [Valadares 2001] estão exibidos no fluxograma adaptado da Figura 2.3 e detalhados em seguida. Na parte em destaque são indicados os passos onde o procedimento proposto no presente trabalho pode ser aplicado.

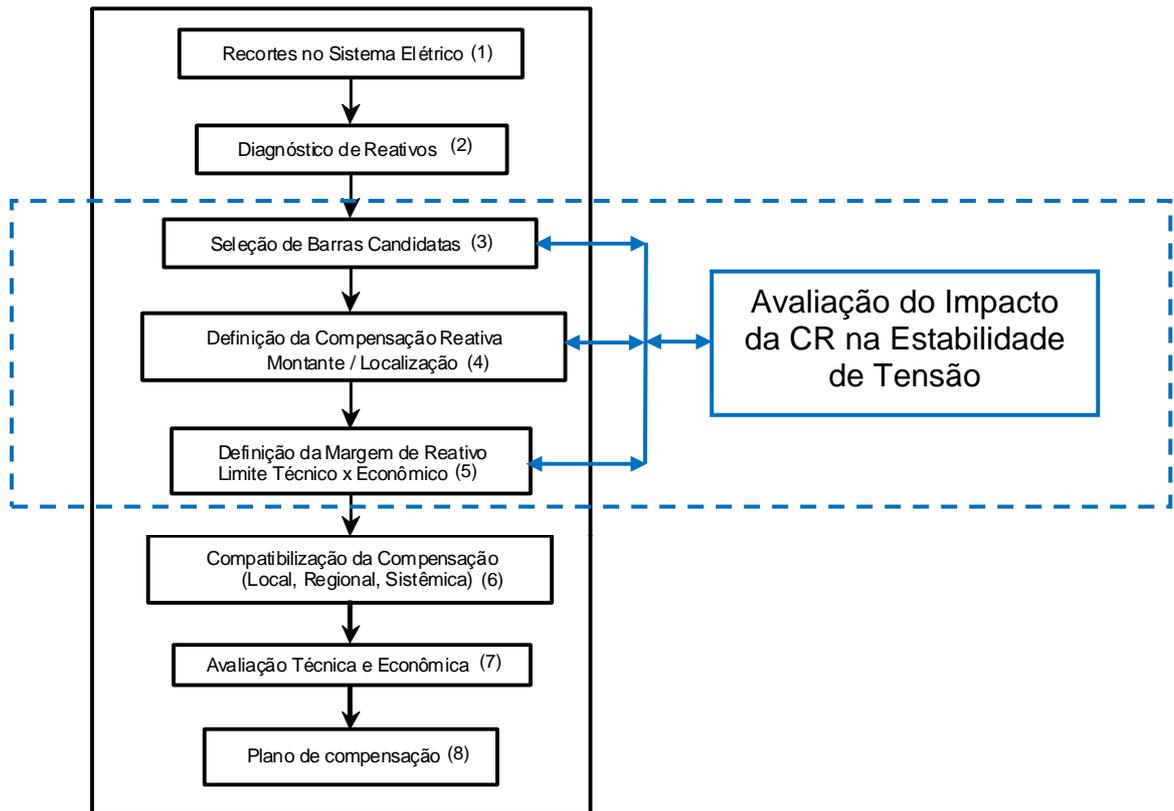


Figura 2.3 – Passos do Procedimento para CT/CR [adaptada de Valadares 2001] em Conjunto com a Avaliação do Impacto na Estabilidade de Tensão

(1) Recortes do Sistema Elétrico:

No primeiro passo o SEP sob análise é dividido em sistemas menores, chamados subsistemas, de modo a facilitar os estudos. Os critérios utilizados para essa divisão são escolhidos pelo planejador como, por exemplo: empresa concessionária, níveis de tensão, localização geográfica, importância estratégica, sistemas radiais, etc.

(2) Diagnóstico de Reativos:

Neste passo é feito um detalhamento dos consumidores e fontes de potência reativa instalados no sistema (cargas, linhas de transmissão, transformadores, compensadores síncronos e estáticos, geradores). Com base neste detalhamento, o planejador pode determinar se existe a necessidade de alguma alteração, no sentido de adicionar novas compensações ao sistema.

(3) Seleção de Barras Candidatas:

De acordo com a proposta da referência [Valadares 2001], a seleção das barras candidatas a receberem a compensação reativa é baseada em dois critérios:

- a) Fator de potência – barras com fator de potência mais baixo são priorizadas.
- b) Sensibilidade de tensão – verifica a variação da tensão em relação a injeção de potência reativa.

O procedimento proposto nesta dissertação sugere passos para a seleção das barras mais propícias à compensação reativa. Indica-se o uso de índices de sensibilidade para diferentes níveis de carregamento e verificação da Tensão no Ponto de Colapso. Os detalhes são apresentados no capítulo 4.

(4) Definição da Compensação Reativa:

Neste passo são especificados a quantidade, a localização e o tipo de compensação reativa a ser instalada no sistema.

Nos capítulos 4 e 5 é mostrado como o procedimento proposto indica a quantidade de reativo a ser instalado para o caso de Compensação Reativa Shunt Capacitiva.

(5) Definição da Margem de Reativo:

Neste passo avalia-se a possibilidade da instalação de uma quantidade extra de compensação reativa. Tal fato pode se justificar desde que os ganhos com essa alteração sejam maiores que os custos de implantação e manutenção.

Do ponto de vista da Estabilidade de Tensão, é importante também relacionar os prejuízos que podem ser causados caso o sistema entre em colapso. Para encontrar o valor sugerido de Compensação Reativa Shunt Capacitiva, o procedimento proposto seleciona inicialmente uma faixa de valores, indicando limites mínimos e máximos. Tal informação pode ser aproveitada pelo planejador como um indicativo de valores máximos, evitando que o sistema seja sobrecompensado.

(6) Compatibilização da Compensação:

Como, em geral, os planos de CR/CT prevêem a instalação concomitante de várias compensações, é necessário avaliar a influência provocada entre as áreas. Caso sejam identificadas influências indesejadas, os planos poderão ser revistos visando a adequação.

(7) Avaliação Técnica e Econômica:

No último passo são avaliados aspectos técnicos e econômicos para o plano de compensação elaborado. São feitas análises de viabilidade e de retorno econômico.

Avalia-se, por exemplo, a redução de perdas, a economia com a diminuição dos desligamentos, etc.

2.5. CONCLUSÃO

Conforme visto neste capítulo, as atividades de expansão, em especial as de planejamento, já são tradicionais no setor elétrico. De maneira a demonstrar como a estratégia proposta neste trabalho pode ser agregada às práticas adotadas atualmente, procurou-se enfatizar a etapa de planejamento bem como seus procedimentos.

Mesmo sendo uma atividade tradicional, com relação aos impactos da compensação reativa no comportamento do sistema elétrico, no que diz respeito à perda da Estabilidade de Tensão, esta ainda demanda o desenvolvimento de procedimentos específicos.

Tais impactos, quando não analisados no planejamento da expansão podem levar a indicação de compensações prejudiciais ao SEP. Conseqüências de um mau dimensionamento da compensação são sentidas na operação em tempo real. Por exemplo, quando o sistema experimentar um decréscimo nas tensões, o operador pode, em uma reação tradicional, conectar mais bancos de capacitores à rede. Porém, dependendo da situação, tal ação de controle pode ter o resultado inverso do esperado, levando a uma condição de operação instável.

A compreensão do fenômeno que leva à instabilidade de tensão, e de como a Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva influencia a estabilidade do SEP é de fundamental importância sendo, portanto o tema do próximo capítulo.

3 – CONSIDERAÇÕES SOBRE ESTABILIDADE DE TENSÃO

3.1. INTRODUÇÃO

A atenção recebida pelo tema Estabilidade de Tensão nos últimos anos por parte de pesquisadores, engenheiros, companhias e órgãos reguladores do setor elétrico decorre da necessidade de se compreenderem os fatores que, em conjunto, contribuem para a ocorrência da instabilidade. Vários são os relatos e as referências [Taylor 1994] e [Ajjarapu 2006] apresentam históricos de incidentes registrados em vários países. A Tabela 3.1 lista alguns deles.

Tabela 3.1 – Incidentes relacionados a Estabilidade de Tensão

Data	Local
09/12/1965	França
22/08/1970	Japão
20/11/1976	França
22/09/1977	Flórida/EUA
19/12/1978	França
04/08/1982	Bélgica
02/09/1982	Flórida/EUA
26/11/1982	Flórida/EUA
28/12/1982	Flórida/EUA
30/12/1982	Flórida/EUA
27/12/1983	Suécia
17/05/1985	Flórida/EUA
30/11/1986	Brasil/Paraguai
12/01/1987	França
23/07/1987	Tóquio/Japão
22/08/1987	Tennessee/EUA
01/12/1987	França
02/07/1996	EUA (WECC western region)
01/05/1997	Chile
12/07/2004 ⁴	Atenas/Grécia

Analisando tais fatores, e com o objetivo de subsidiar a compreensão do procedimento proposto neste trabalho, este capítulo exhibe conceitos básicos relacionados à Estabilidade de Tensão, discute pontos relativos aos componentes do SEP (geração,

⁴ Preparativos para os Jogos Olímpicos de 2004

transmissão e carga), além de aspectos matemáticos e físicos relativos ao fenômeno. Para cumprir tal objetivo, inclui os seguintes tópicos:

- Ponto de Máxima Transferência de Potência e Curva PV
- Relação entre Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva e Estabilidade de Tensão
- Fluxo de Potência Continuado
- Índices para Avaliação da Estabilidade de Tensão

3.2. ESTABILIDADE DE TENSÃO - DEFINIÇÃO

Os diversos conceitos encontrados na literatura indicam não ser uma tarefa simples definir o que é Estabilidade de Tensão. Carson W. Taylor em uma frase interessante que tornou-se bastante conhecida disse [Cutsem 1998]: “*Maybe I can’t define stability, but I know it when I see it!*”⁵.

Na realidade, o tema Estabilidade de Tensão se insere em um contexto mais amplo de Estabilidade de SEP. Uma referência que aborda de forma bastante completa os diversos tipos de estabilidade é [Kundur 2004]. Nessa referência são discutidos os diversos tipos de estabilidade, sendo assim classificadas:

- Estabilidade Angular
- Estabilidade de Freqüência
- Estabilidade de Tensão

No que diz respeito à Estabilidade de Tensão, a literatura apresenta diversas definições relacionadas ao tema. Em [Cortez 2001] encontram-se listadas e organizadas várias dessas definições. A seguir são exibidas duas definições para Estabilidade de Tensão:

CIGRE: um sistema de potência em um dado ponto de operação e sujeito a uma determinada perturbação é estável, sob o ponto de vista da estabilidade de tensão, se as tensões nas cargas das regiões próximas são capazes de atingir novos valores de equilíbrio pós-perturbação. O

⁵ “Pode ser que eu não consiga definir estabilidade, mas eu a conheço quando a vejo”. (tradução livre)

ponto de operação pós-perturbação está dentro da região de atração do equilíbrio estável.

IEEE: a estabilidade de tensão é a capacidade do sistema de manter as suas tensões, de forma que, quando a admitância da carga crescer, a sua potência também aumentará, pois tanto a demanda quanto as tensões são controláveis.

A instabilidade pode levar a uma diminuição ou queda progressiva da tensão de algumas barras do sistema. Possíveis conseqüências deste fenômeno são o corte de fornecimento de uma área ou região, ou a saída de linhas de transmissão e outros elementos devido à atuação de dispositivos de proteção, levando a um efeito em cascata que interrompe o fornecimento de energia a todas as cargas.

Um termo freqüentemente usado nos trabalhos desta área de estudo, definido na referência [Kundur 2004], é o Colapso de Tensão: processo em que uma seqüência de eventos devido à instabilidade de tensão leva a um *blackout* ou a baixas tensões em uma parte significativa do sistema. Tal situação pode ser atingida, por exemplo, quando transformadores com mudança de *tap* atingem o seu limite máximo, e algumas cargas são cortadas de forma intencional ou não. A carga restante tende a ser muito sensível a tensão, e a demanda conectada em tensão normal não é conhecida [Kundur 1994 e Taylor 1994].

Muitas vezes a instabilidade de tensão ocorre devido à reação das cargas a algum distúrbio. A potência consumida pelas cargas após o distúrbio tende a ser restabelecida pelo ajuste de escorregamento dos motores de indução, pelos reguladores de tensão presentes nas redes de distribuição, pelas mudanças de *tap* dos transformadores e termostatos de cargas térmicas. As cargas que apresentam esse comportamento tendem a aumentar o esforço das redes de transmissão de energia, aumentando o consumo de potência reativa, ocasionando mais diminuição nas tensões das barras. A instabilidade de tensão pode ocorrer quando a dinâmica das cargas em manter e/ou restabelecer o nível de consumo de energia é mais rápida do que a capacidade das linhas de transmissão e geradores em atender a demanda [Cutsem 2000] e [Hill 1993].

As linhas de transmissão e os geradores também têm parcela fundamental no fenômeno da instabilidade de tensão. A máxima potência que pode ser entregue às cargas é limitada pelas características da rede de transmissão. As restrições elétricas (Teorema da Máxima Transferência de Potência) e restrições térmicas impedem que seja fornecida

às cargas uma potência maior que o limite imposto pelas linhas de transmissão. Em casos de carga que exija potência constante, tal fato constitui causa para a perda da Estabilidade de Tensão.

Os geradores desempenham um papel importante fornecendo a potência ativa e reativa necessária ao sistema. A potência reativa está limitada pela máxima corrente de campo das máquinas síncronas, enquanto que a potência ativa é função da corrente de armadura e do torque mecânico disponível na entrada. A potência reativa é de grande relevância para a Estabilidade de Tensão do sistema, porém não se deve desprezar a importância da potência ativa, bem como o acoplamento entre ambas. Observa-se que quando a corrente de campo atinge seu valor máximo, o gerador síncrono perde sua capacidade de regulação de tensão, e a potência reativa de saída passa a ser uma função da tensão na barra.

A instabilidade de tensão é um fenômeno tipicamente não-linear. Diante disso, a literatura que trata desse assunto freqüentemente faz uso de técnicas de análises para problemas não-lineares, tais como Teoria da Bifurcação. No Anexo A são abordados conceitos sobre a Teoria da Bifurcação aplicados à Estabilidade de Tensão. Essas teorias são usadas para explicar o fenômeno, bem como auxiliam na sua classificação. A força tarefa IEEE/CIGRE [Kundur 2004] classifica a Estabilidade de Tensão nas quatro categorias apresentadas a seguir.

- Estabilidade de Tensão a grandes distúrbios: refere-se à habilidade do sistema em manter as tensões de regime permanente das barras após grandes distúrbios como curtos-circuitos, perda de grandes geradores ou de uma parcela significativa de geração e contingências severas. Essa habilidade é determinada pelas características das cargas do sistema e pela interação entre os controles e proteções contínuos e discretos do sistema. Do ponto de vista dos estudos e simulações de tais situações, o período de interesse pode variar entre alguns segundos a dezenas de minutos. Esse tempo deve ser suficiente para que interação entre a dinâmica dos componentes envolvidos (transformadores com mudança de *tap*, motores de indução, limitadores da corrente de campo dos geradores) possa ser observada.
- Estabilidade de Tensão a pequenos distúrbios: refere-se à habilidade do sistema em manter as tensões de regime permanente das barras quando exposto a pequenas perturbações como o incremento nas potências

demandadas pelas cargas. Além disso, a referência [IEEE 2002], em sua definição de Estabilidade e Tensão a pequenos distúrbios, considera o sistema estável se, após o distúrbio, este retornar ao mesmo ponto de operação pré-distúrbio, ou pelos menos muito próximo deste. Essa forma de estabilidade é influenciada pelas características das cargas, pelos controles contínuos e discretos em um dado instante de tempo. A utilidade deste conceito está na possibilidade de avaliar como o sistema responde a pequenas mudanças. Fazendo-se as considerações apropriadas, pode-se linearizar as equações utilizadas para modelar o fenômeno, e realizar análises que permitem identificar os fatores que influenciam a estabilidade. *As análises desenvolvidas durante o procedimento proposto neste trabalho são relativas a essa classificação: Estabilidade de Tensão a pequenos distúrbios.*

- Estabilidade de Tensão de curta duração: quando a dinâmica dos elementos de maior importância para o sistema é rápida, tais como motores de indução, cargas controladas eletronicamente e conversores do tipo HVDC (*High-Voltage Direct Current*), o estudo realizado é o de curta duração. Em geral, a ordem de grandeza do período de interesse é de alguns segundos, sendo que é necessária a solução das equações diferenciais que modelam o fenômeno.
- Estabilidade de Tensão de longa duração: para este caso, ao contrário do anterior, os equipamentos de maior relevância possuem dinâmica mais lenta como, por exemplo, transformadores com mudança de *tap*, cargas controladas por termostato e geradores com limitadores de corrente. Para esses casos, a ordem de grandeza do período é de alguns segundos até vários minutos.

Na literatura é comum encontrar os termos *reliability* (confiabilidade), *security* (segurança) e *stability* (estabilidade), sendo importante conhecer o que representam, bem como a relação conceitual entre eles. As definições apresentadas a seguir foram retiradas das referências [Fink 1978] e [Kundur 2004].

Confiabilidade: o termo confiabilidade de um sistema elétrico de potência refere-se à probabilidade deste continuar operando em condições satisfatórias após um longo tempo de operação.

Segurança: refere-se à capacidade do sistema elétrico de potência em continuar operando, sem cortar o fornecimento de energia aos consumidores, após sofrer distúrbios ou contingências. Relaciona-se com a robustez do sistema frente a distúrbios, e depende da condição de operação do sistema e da probabilidade de ocorrências de contingências e distúrbios.

Estabilidade: conforme já mencionado anteriormente, refere-se à capacidade do sistema em manter-se no mesmo ponto de operação, ou próximo deste, após sofrer algum distúrbio.

3.3. O PONTO DE MÁXIMO CARREGAMENTO E A CURVA PV

O teorema da máxima transferência de potência é de fundamental importância para os estudos envolvendo a Estabilidade de Tensão. Esse teorema afirma que existe um limite máximo de potência que as redes elétricas são capazes de transmitir. Tal limite é considerado, do ponto de vista da formulação estática, como sendo a condição do SEP a partir da qual, para qualquer aumento de carga (do tipo potência constante), ocorre a perda de estabilidade [Kundur 1994].

Em diversas referências da área, entre elas [Kundur 1994], [Lobato 1998], [Cortez 2001], encontra-se o desenvolvimento completo desse teorema. Considerando-se um sistema de duas barras (uma de referência – tipo $V\theta$ e uma de carga – tipo PQ), como o exibido na Figura 3.1, pode-se demonstrar o teorema.

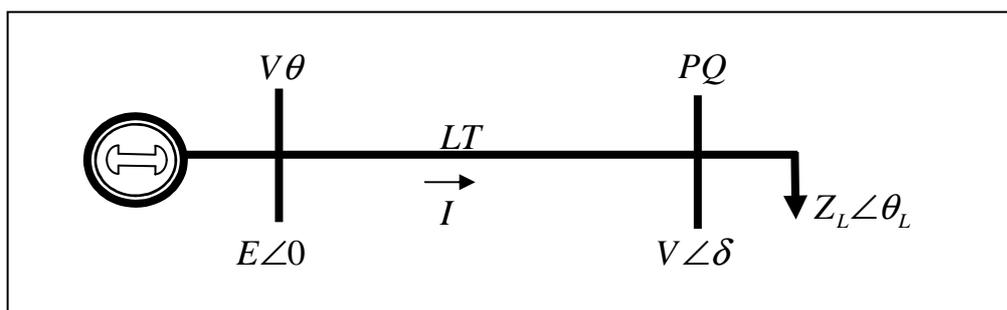


Figura 3.1 – Sistema elétrico de potência – Duas barras

Fazendo-se $E = 1$ e a impedância da LT igual a $Z_T \angle \theta_T$, pode-se calcular a potência entregue na barra de carga, em função da tensão na barra ($V \angle \delta$), da corrente injetada (I) e do fator de potência da carga ($\cos \theta_L$), por meio de (3.1).

$$P = VI \cos \theta_L = \frac{I^2 Z_L \cos \theta_L}{1 + \left(\frac{Z_L}{Z_T}\right)^2 + 2 \frac{Z_L}{Z_T} \cos(\theta_T - \theta_L)} \quad (3.1)$$

Tomando-se a derivada de (3.1) em relação à carga (Z_L), encontra-se o valor de carga que drena o máximo de potência calculando-se o ponto onde a derivada é nula.

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dZ_L} &= 0 \\ 1 + \left(\frac{Z_L}{Z_T}\right)^2 - 2 \left(\frac{Z_L}{Z_T}\right)^2 + 2 \frac{Z_L}{Z_T} \cos(\theta_T - \theta_L) - 2 \frac{Z_L}{Z_T} \cos(\theta_T - \theta_L) &= 0 \\ Z_L &= Z_T \end{aligned} \quad (3.2)$$

Observa-se por (3.2) que a máxima transferência de potência ocorre quando a impedância da carga é igual à impedância da LT. Para esta condição [Lobato 1998]:

$$\frac{P}{P_{\max}} = \frac{2 \frac{Z_L}{Z_T} (1 + \cos(\theta_T - \theta_L))}{1 + \left(\frac{Z_L}{Z_T}\right)^2 + 2 \frac{Z_L}{Z_T} \cos(\theta_T - \theta_L)} \quad (3.3)$$

$$\frac{V}{E} = \frac{\frac{Z_L}{Z_T}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_L}{Z_T}\right)^2 + 2 \frac{Z_L}{Z_T} \cos(\theta_T - \theta_L)}} \quad (3.4)$$

$$\frac{I}{I_{cc}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_L}{Z_T}\right)^2 + 2 \frac{Z_L}{Z_T} \cos(\theta_T - \theta_L)}} \quad (3.5)$$

A Figura 3.2 exibe o gráfico, retirado de [Lobato 1998], das equações (3.3), (3.4) e (3.5) para $\theta_L = 90^\circ$ e $\theta_T = 90^\circ$, onde é possível visualizar a relação de $\frac{P}{P_{\max}}$, $\frac{V}{E}$, e

$$\frac{I}{I_{cc}} \text{ com } \frac{Z_T}{Z_L}.$$

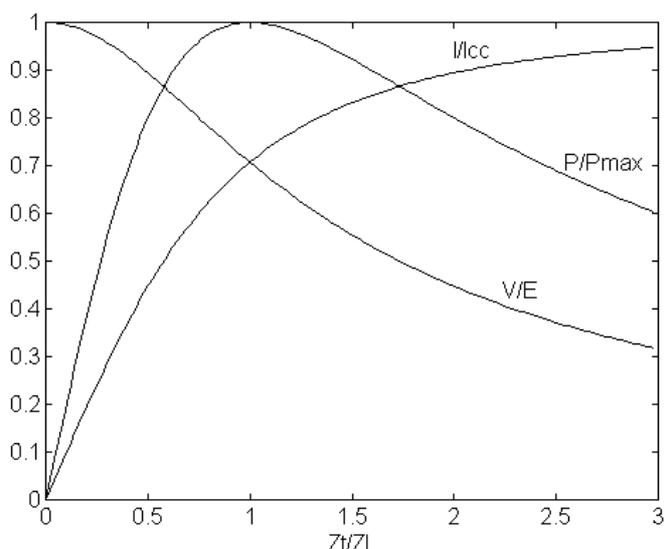


Figura 3.2 – Tensão, Potência e Corrente em função da carga

O gráfico da Figura 3.2 permite verificar que, para a condição de circuito aberto (carga nula), a tensão na barra é máxima, com potência e corrente nulas. No cruzamento das curvas $\frac{I}{I_{cc}}$ e $\frac{V}{E}$ a potência é máxima e $\frac{Z_T}{Z_L} = 1$. Este é o ponto de máximo carregamento do sistema, também conhecido como Ponto de Máxima Transferência de Potência.

Nos estudos sobre Estabilidade de Tensão que utilizam a formulação estática, é comum traçar o gráfico que mostra como varia a tensão na(s) barra(s) em função do aumento de potência, tal como mostrado na Figura 3.3. Estas curvas são conhecidas como curvas PV. O ponto indicado por P_{max} no gráfico é o Ponto de Máxima Transferência de Potência.

Para valores de P menores que P_{max} , existem dois pontos de equilíbrio: um com tensão mais elevada na parte superior da curva, e outro de tensão reduzida na parte inferior. A solução de tensão elevada implica uma menor corrente circulando na LT, enquanto a solução de tensão reduzida irá provocar uma corrente maior, de forma que a potência seja a mesma em ambos os casos. À medida que o parâmetro P é incrementado, as duas soluções se aproximam, até coalescerem no ponto indicado por P_{max} . Além deste ponto não existem soluções de equilíbrio. Nos sistemas onde as cargas são do tipo potência constante, a parte superior da curva está associada aos pontos de

operação estáveis, e a parte inferior, aos pontos instáveis. Para os sistemas em que as cargas não são do tipo potência constante, o sistema pode operar na parte inferior da curva, porém necessitando de correntes mais elevadas.

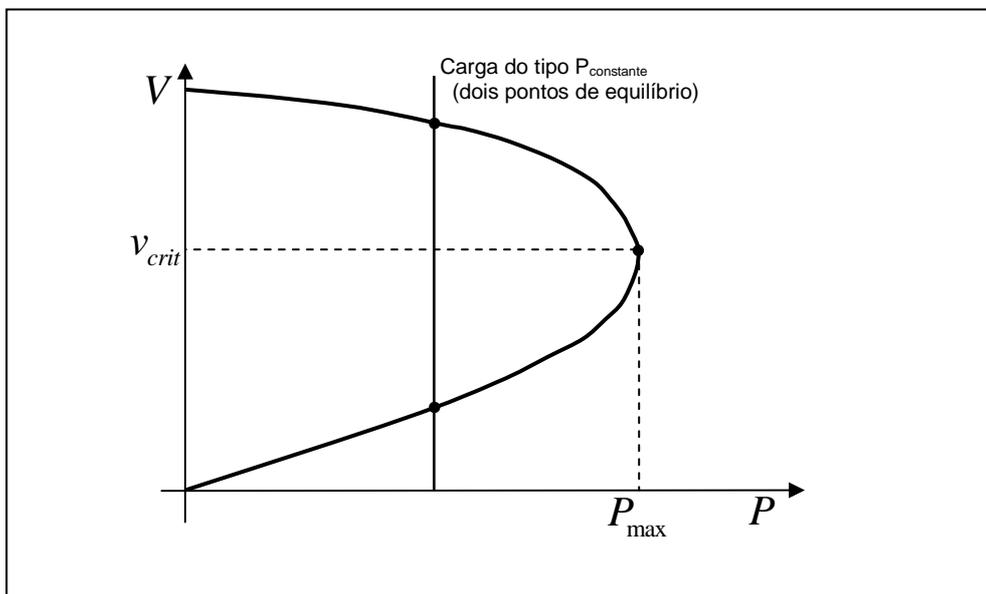


Figura 3.3 – Curva PV – Ponto de Máximo Carregamento

Os valores de potência e tensão no Ponto de Máximo Carregamento são informações importantes para as análises de Estabilidade de Tensão. Neste ponto, pequenos distúrbios no SEP podem levar a um quadro de perda da estabilidade. Desta forma, é desejável manter o ponto de operação do SEP a certa distância do Ponto de Máximo Carregamento, sendo este um dos objetivos do procedimento proposto neste trabalho. O princípio básico da estratégia proposta é indicar valores limite de compensação de forma a impedir que a Tensão no Ponto de Colapso - TPC, indicado na Figura 3.3 por V_{crit} , alcance valores dentro da faixa de operação do SEP.

3.4. A RELAÇÃO ENTRE COMPENSAÇÃO REATIVA SHUNT CAPACITIVA E A ESTABILIDADE DE TENSÃO

Na seção anterior foram mostrados, de forma qualitativa, conceitos sobre o Ponto de Máximo Carregamento e curvas PV. Conforme indicado, para cargas do tipo potência constante, três situações se apresentam: carga menor que P_{\max} (há dois pontos de equilíbrio – um estável e um instável); carga igual a P_{\max} (uma solução de equilíbrio); carga superior a P_{\max} (não existem soluções de equilíbrio).

A seguir é mostrada uma dedução que permite encontrar tais pontos de equilíbrio, bem como verificar as mudanças no Ponto de Máximo Carregamento devido a adição de compensações reativas do tipo *shunt*. Para isso, considera-se puramente indutiva a linha de transmissão (LT) da Figura 3.1, desprezando-se perdas resistivas, com impedância dada por jX . Assim, para a barra PQ a tensão e a potência são dadas por:

$$\vec{V} = \vec{E} - jX \vec{I} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} S &= P + jQ = \vec{V} \vec{I}^* \\ S &= \vec{V} \left(\frac{\vec{E} - \vec{V}}{jX} \right)^* = \vec{V} \left(\frac{\vec{E}^* - \vec{V}^*}{-jX} \right) \\ S &= V \angle \delta \frac{(E \angle 0 - V \angle -\delta)}{-jX} \\ S &= -\frac{EV}{X} \sin \delta + j \left(\frac{EV}{X} \cos \delta - \frac{V^2}{X} \right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Separando-se as partes real e imaginária:

$$P = -\frac{EV}{X} \sin \delta \quad (3.8)$$

$$Q = \frac{EV}{X} \cos \delta - \frac{V^2}{X} \quad (3.9)$$

Reescrevendo (3.8) e (3.9):

$$\sin \delta = -\frac{PX}{EV} \quad (3.10)$$

$$\cos \delta = \left(\frac{QX + V^2}{EV} \right) \quad (3.11)$$

Substituindo (3.10) e (3.11) na relação trigonométrica $\sin^2 \delta + \cos^2 \delta = 1$:

$$\left(\frac{-PX}{EV} \right)^2 + \left(\frac{QX + V^2}{EV} \right)^2 = 1 \quad (3.12)$$

Reescrevendo (3.12):

$$\left(\frac{V}{E} \right)^4 + \frac{V^2}{E^4} (2QX - E^2) + \frac{X^2}{E^4} (P^2 + Q^2) = 0 \quad (3.13)$$

Normalizando (3.13):

$$v = \frac{V}{E} \quad p = \frac{PX}{E^2} \quad q = \frac{QX}{E^2} \quad (3.14)$$

$$v^4 + v^2 (2q - 1) + p^2 + q^2 = 0 \quad (3.15)$$

Definindo ϕ como o ângulo do fator de potência da carga, a potência reativa pode ser substituída por $q = p \tan \phi$. Então (3.15) pode ser reescrita como:

$$v^4 + v^2 (2p \tan \phi - 1) + p^2 + \sec^2 \phi = 0 \quad (3.16)$$

Reescrevendo (3.16) em função de v^2 :

$$v^2 = -(2p \tan \phi - 1) \pm \frac{\sqrt{(2p \tan \phi - 1)^2 - 4p^2 \sec^2 \phi}}{2} \quad (3.17)$$

A equação (3.17) possui quatro soluções, das quais duas possuem significado físico. Essas duas soluções são os pontos de tensão elevada e tensão reduzida indicados na Figura 3.3 e comentados anteriormente.

No ponto de máximo carregamento o termo dentro da raiz quadrada da equação (3.17) é nulo. Nesta condição a potência no ponto de máximo carregamento bem como a tensão são dados por:

$$P_{\max} = \frac{\cos \phi}{2(1 + \sin \phi)} \quad (3.18)$$

$$v_{\text{crit}} = \frac{1}{\sqrt{2} * \sqrt{1 + \sin \phi}} \quad (3.19)$$

Desta forma a potência ativa e o módulo da tensão estão definidos em função do fator de potência da carga. As equações (3.18) e (3.19) podem ser utilizadas para analisar o comportamento das curvas PV à medida que se acrescenta uma compensação reativa à barra, modificando o seu fator de potência.

A adição da compensação reativa às barras traz benefícios ao sistema como diminuição de perdas e melhor utilização das linhas de transmissão. No que diz respeito à Estabilidade de Tensão, pode-se verificar os efeitos trazidos pela adição da compensação visualizando os resultados apresentados na Tabela 3.2.

Considerando o sistema de duas barras da Figura 3.1, os valores P_{\max} , v_{crit} e q foram obtidos por meio da aplicação das equações (3.14) e (3.15) para alguns fatores de potência. Observa-se que à medida que o sistema é compensado o ponto de máximo carregamento se desloca, permitindo entregar mais potência à carga.

Traçando-se as curvas PV para alguns valores de fator de potência pode-se visualizar as alterações da tensão crítica e da potência de máximo carregamento. A Figura 3.4 mostra as curvas PV para diferentes valores de ϕ , ou seja, para diferentes valores de compensação reativa.

Por outro lado, nota-se que para valores de fator de potência com ângulos menores que -22° , a tensão v_{crit} estará acima de 0,9 pu, podendo estar dentro da faixa de operação considerada normal para muitos sistemas. Esse fato é de extrema importância, uma vez que o sistema pode estar muito próximo à perda da Estabilidade de Tensão, mesmo apresentando tensões de operação dentro de uma faixa normal. *O procedimento proposto nesta dissertação visa justamente estabelecer um limite para o valor da compensação, de tal forma a evitar este problema.*

Tabela 3.2 – Valores para os pontos de máximo carregamento em função do fator de potência

ϕ (graus)	p_{max}	v_{crit}	q
0	0,500	0,707	0,000
15	0,384	0,630	0,103
28	0,300	0,583	0,160
30	0,289	0,577	0,167
40	0,233	0,552	0,196
45	0,207	0,541	0,207
60	0,134	0,518	0,232
90	0,000	0,500	0,250
-5	0,546	0,740	-0,048
-10	0,596	0,778	-0,105
-15	0,652	0,821	-0,175
-20	0,714	0,872	-0,260
-22	0,741	0,894	-0,299
-23	0,755	0,906	-0,321
-27	0,816	0,957	-0,416
-30	0,866	1,000	-0,500
-37	1,002	1,120	-0,756
-45	1,207	1,307	-1,207
-60	1,866	1,932	-3,232

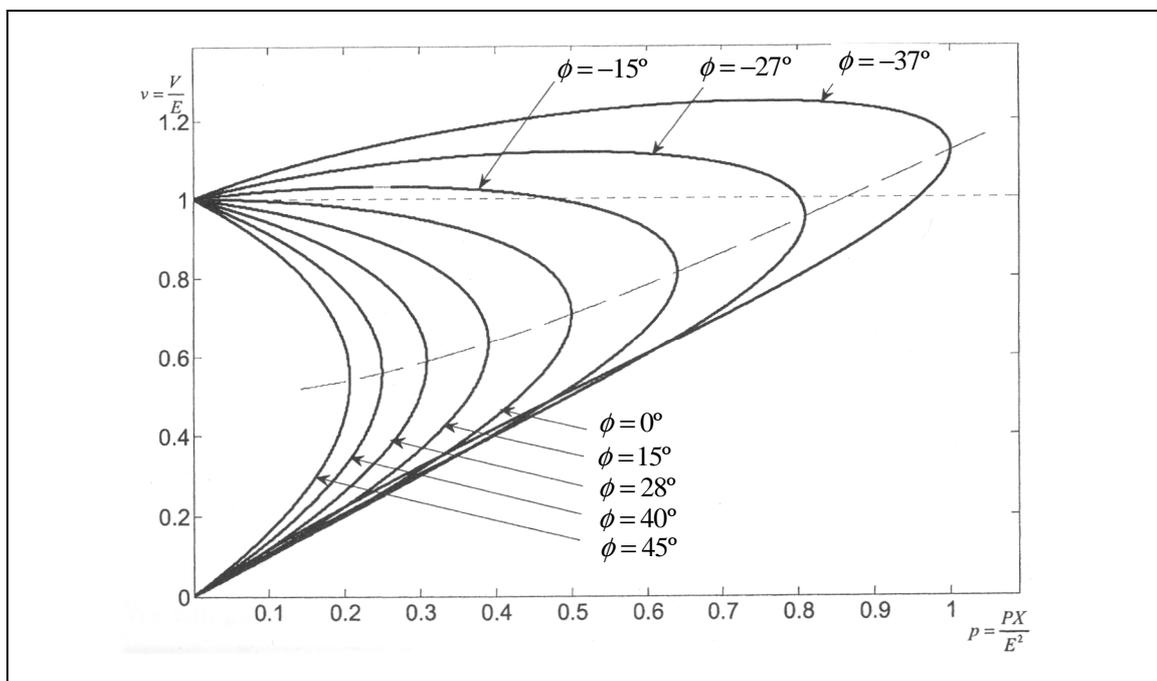


Figura 3.4 – Curvas PV para diferentes valores de ϕ [adaptada de Ajjarapu 2006]

De maneira análoga à usada para se obterem as curvas PV, também é possível calcular a dependência da tensão em relação à potência reativa, mantida a potência ativa constante. As curvas obtidas desta maneira são chamadas curvas QV.

Reescrevendo a equação (3.15) em relação à v^2 :

$$v^2 = \frac{-(2q-1) \pm \sqrt{(2q-1)^2 - 4(p^2 + q^2)}}{2} \quad (3.20)$$

Igualando o termo dentro da raiz quadrada da equação (3.20) a zero:

$$q_{crit} = \frac{1}{4} - p^2 \quad (3.21)$$

$$v_{crit} = \sqrt{\frac{1}{2}(1 - 2q_{crit})} \quad (3.22)$$

Convencionando-se q positivo para injeção de potência reativa na barra (fator de potência capacitivo), tal como adotado pela ampla maioria da literatura, podem ser obtidas as curvas exibidas na Figura 3.5.

As curvas QV são úteis para visualizar a quantidade necessária de potência reativa em uma barra para manter a tensão em certo nível, para uma potência ativa fixa. Por exemplo, para um valor de $p = 0,5$ na curva exibida na Figura 3.5, para manter a tensão em 1,0 pu, uma injeção de potência reativa (capacitiva) de $q = 0,13$ é necessária. Se este suporte de reativo for retirado, a tensão irá decair para o valor crítico $v_{crit} = 0,707$ pu.

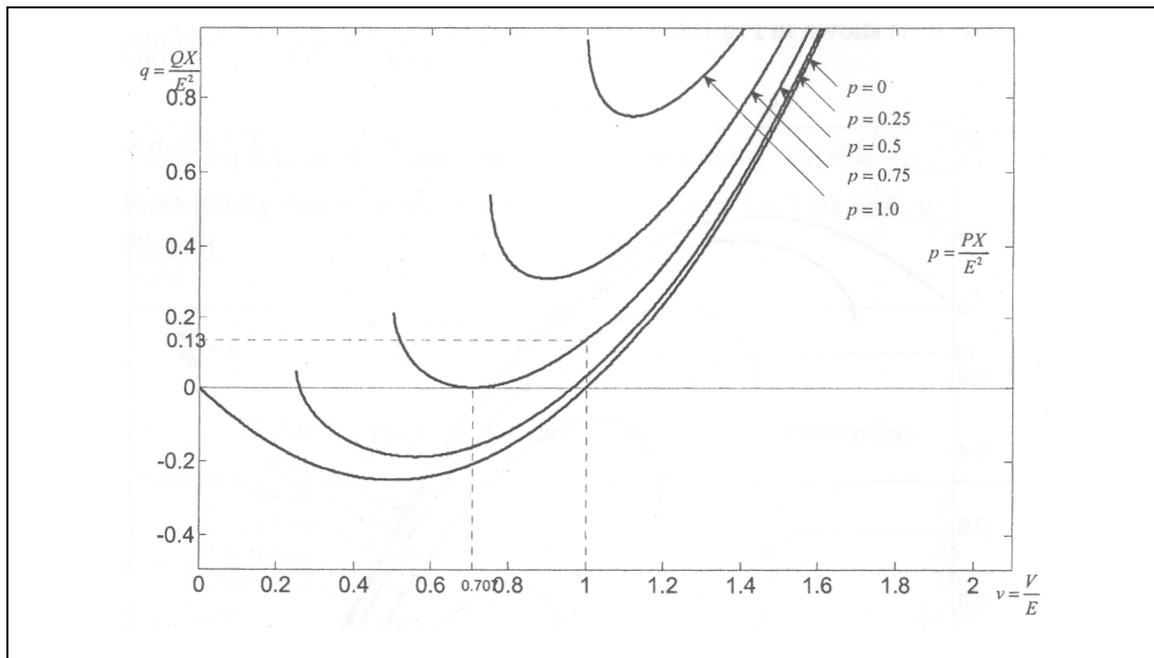


Figura 3.5 – Curvas QV para diferentes valores de p - [Ajarapu 2006]

As informações sobre o comportamento do sistema obtidas por meio das curvas PV e QV são de grande utilidade para a avaliação do impacto da Compensação Reativa Shunt Capacitiva na Estabilidade de Tensão. No procedimento proposto neste trabalho, esses conceitos são utilizados para encontrar as barras onde a compensação poderá agregar efeitos benéficos, tendo em mente sempre a preocupação com os limites de tensão para que esta não atinja valores operacionais no Ponto de Máximo Carregamento do sistema.

3.5. FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO

O procedimento proposto utiliza a construção de curvas PV. Conforme mostrado neste item, tal construção requer a utilização do chamado Fluxo de Potência Continuado. Logo, neste trabalho, foi incorporado o equacionamento pertinente a tal fluxo.

As curvas PV em geral não podem ser obtidas pelo cálculo do fluxo de potência convencional, utilizando o método de Newton-Raphson. A incapacidade desse método em gerar tais curvas reside no fato da matriz jacobiana tornar-se singular no ponto de máximo

carregamento. Além disso, à medida que o sistema se aproxima do ponto de inflexão da curva PV as derivadas começam a se tornar elevadas gerando problemas de convergência.

Para mostrar matematicamente a singularidade da matriz jacobiana no ponto de máximo carregamento é analisado novamente o sistema de duas barras. As equações do fluxo de potência são:

$$P + \frac{EV}{X} \sin(\phi) = 0 = f_1(E, V, \phi) \quad (3.23)$$

$$Q - \frac{EV}{X} \cos(\phi) + \frac{V^2}{X} = 0 = f_2(E, V, \phi) \quad (3.24)$$

A matriz jacobiana corresponde a:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \phi} & \frac{\partial f_1}{\partial v} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \phi} & \frac{\partial f_2}{\partial v} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{EV}{X} \cos(\phi) & \frac{E}{X} \sin(\phi) \\ \frac{EV}{X} \sin(\phi) & -\frac{E}{X} \cos(\phi) + \frac{2V}{X} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

O determinante da matriz jacobiana é:

$$\det(J) = -\frac{E^2V}{X^2} + \frac{2EV^2}{X^2} \cos(\phi) \quad (3.27)$$

Examinando-se a equação (3.27) nota-se que, quando $\cos(\phi) = \frac{1}{2v}$, o determinante da matriz jacobiana é nulo, ou seja, a matriz é singular.

Das equações (3.18) e (3.19) obtém-se a relação entre a potência ativa e a tensão no ponto de máximo carregamento:

$$\sin(\phi) = -\frac{P_{\max}}{v_{\text{crit}}} \quad (3.28)$$

Substituindo a equação (3.28) na relação trigonométrica $\cos^2(\phi) = 1 - \sin^2(\phi)$:

$$\cos(\phi) = \frac{1}{2v_{crit}} \quad (3.29)$$

Esta condição é a mesma para que a matriz jacobiana seja singular. Desta forma prova-se que no ponto de máximo carregamento a matriz jacobiana não possui inversa, o que inviabiliza o cálculo do valor da tensão neste ponto utilizando-se o método de Newton-Raphson. Para se evitar esse problema é usado o método da continuação.

O método da continuação é uma metodologia matemática usada para resolver sistemas de equações não-lineares. Aplicado ao fluxo de potência, o método da continuação permite calcular as soluções ao longo da curva PV sem incorrer em problemas de convergência. Esse cálculo é conhecido como fluxo de potência continuado. A idéia principal desta metodologia é adotar uma parametrização local, usando passos de predição e correção [Lobato 1998] e [Ajarapu 2006].

A parametrização local é um artifício matemático de dividir o caminho das soluções em ramos. O ramo neste caso é uma parte da curva delimitada por dois pontos conectados em um espaço dimensional, de ordem $n+1$, que são as soluções do sistema não-linear parametrizado. Para o fluxo de potência continuado, a parametrização é feita introduzindo um parâmetro de carregamento λ nas equações originais do sistema não-linear.

$$\text{Sistema original: } F(x) = 0 \quad (3.30)$$

$$\text{Sistema parametrizado: } F(x, \lambda) = 0 \quad (3.31)$$

Para uma determinada faixa de valores de λ é perfeitamente possível calcular cada solução do ramo, entretanto os ramos não podem ser parametrizados por um valor qualquer. O problema acontece quando não existe uma solução para algum valor de λ . Para contornar esse fato, uma das variáveis do vetor de estados x pode ser usada como o parâmetro, sendo escolhida localmente a cada passo. De maneira resumida pode-se dizer que a parametrização local permite não apenas a inclusão de um parâmetro de continuação λ , como também o uso de variáveis de estado para esta finalidade.

Deve-se reformular as equações do fluxo de potência convencional de modo a permitir a aplicação da parametrização local. A modificação nas equações consiste basicamente em inserir o parâmetro de continuação λ . Desta forma, os termos que

expressam a geração e a carga nas equações do fluxo de potência devem estar expressos em função de λ .

Tais equações podem ser reescritas da seguinte forma [Ajjarapu 2006]:

$$\Delta P_i = P_{Gi}(\lambda) - P_{Li}(\lambda) - P_{Ti}(\lambda) = 0 \quad (3.32)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li}(\lambda) - Q_{Ti} = 0 \quad (3.33)$$

onde:

$$P_{Ti} = \sum_{j=1}^n V_i V_j y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (3.34)$$

$$Q_{Ti} = \sum_{j=1}^n V_i V_j y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (3.35)$$

O parâmetro λ está definido no intervalo $0 \leq \lambda \leq \lambda_{crit}$, onde $\lambda = 0$ corresponde ao caso base, e $\lambda = \lambda_{crit}$ ao caso crítico (ponto de máximo carregamento). As letras subscritas L, G e T correspondem respectivamente a carga, geração e injeção de potência na barra. A tensão na barra i é $V_i \angle \delta_i$, e $y_{ij} \angle \gamma_{ij}$ é o elemento da linha i , coluna j da matriz de admitâncias $[y_{barra}]$.

Para simular os incrementos de carga, os termos P_{Li} e Q_{Li} podem ser definidos como:

$$P_{Li}(\lambda) = P_{Li0} + \lambda [K_{Li} S_{\Delta base} \cos(\psi_i)] \quad (3.36)$$

$$Q_{Li}(\lambda) = Q_{Li0} + \lambda [K_{Li} S_{\Delta base} \sin(\psi_i)] \quad (3.37)$$

onde:

$$P_{Li0} = S_{\Delta base} \cos(\Psi_i), \text{ carga de potência ativa original (caso base)} \quad (3.38)$$

$$Q_{Li0} = S_{\Delta base} \sin(\Psi_i), \text{ carga de potência reativa original (caso base)} \quad (3.39)$$

$$K_{Li} : \text{Taxa de mudança da carga na barra } i \text{ em relação ao parâmetro } \lambda \quad (3.40)$$

$$\psi_i : \text{Fator de potência da carga na barra } i \quad (3.41)$$

$$S_{\Delta base} : \text{Base escolhida para a potência aparente} \quad (3.42)$$

Definindo-se a potência reativa em função do fator de potência $Q_{Li0} = P_{Li0} \tan(\Psi_i)$, as equações (3.36) e (3.37) podem ser reescritas como:

$$P_{Li}(\lambda) = P_{Li0}[1 + \lambda K_{Li}] \quad (3.43)$$

$$Q_{Li}(\lambda) = P_{Li0} \tan(\Psi_i)[1 + \lambda K_{Li}] \quad (3.44)$$

De forma análoga, as equações para a potência ativa gerada são dadas por:

$$P_{Gi}(\lambda) = P_{Gi0}[1 + \lambda K_{Gi}] \quad (3.45)$$

onde:

$$P_{Gi0} : \text{potência ativa original gerada na barra } i \text{ (caso base)} \quad (3.46)$$

$$K_{Gi} : \text{Taxa de mudança da geração na barra } i \text{ em relação ao parâmetro } \lambda \quad (3.47)$$

Os parâmetros K_{Li} e K_{Gi} permitem selecionar a forma como a carga do sistema irá crescer e o modo como os geradores aumentarão a potência ativa gerada. Assim, pode-se escolher entre diversas metodologias como as que consideram que a barra de referência (*slack*) é a responsável por assumir toda a geração adicional, ou que cada gerador irá aumentar a geração de forma proporcional à sua capacidade.

Uma vez definidas as equações e os parâmetros, passa-se à etapa de predição e correção. A predição calcula o vetor tangente à curva de soluções, tal como mostrado na Figura 3.6 e, em seguida, prediz a próxima solução.

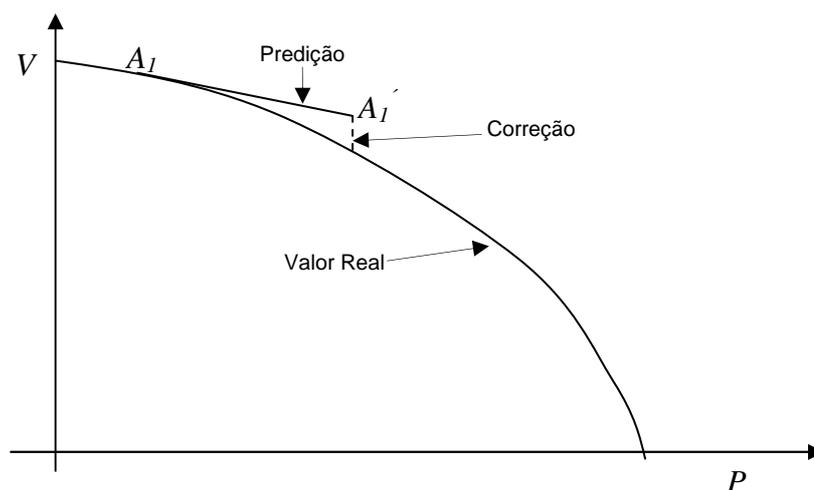


Figura 3.6 – Fluxo de Potência Continuado - parte superior da curva

O vetor tangente pode ser obtido resolvendo-se o sistema de equações (3.48).

$$\begin{bmatrix} \underline{F}_\delta & \underline{F}_v & \underline{F}_\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\underline{\delta} \\ d\underline{V} \\ d\underline{\lambda} \end{bmatrix} = 0 \quad (3.48)$$

Tal sistema representa a matriz de derivadas parciais multiplicada pelo vetor de diferenciais. A matriz $\begin{bmatrix} \underline{F}_\delta & \underline{F}_v & \underline{F}_\lambda \end{bmatrix}$ é a jacobiana do fluxo de potência convencional expandida por uma coluna \underline{F}_λ . O vetor $\begin{bmatrix} d\underline{\delta} & d\underline{V} & d\underline{\lambda} \end{bmatrix}$ é o vetor tangente procurado.

A inclusão de uma coluna na matriz jacobiana acarreta um problema para se encontrar uma solução única para o vetor tangente. Esse complicador surge do fato de uma incógnita adicional ter sido incorporada ao sistema, quando foi λ incorporado às equações do fluxo de potência, tendo o número de equações permanecido o mesmo. Desta forma, uma equação a mais é necessária para se alcançar o resultado pretendido [Ajjarapu 1992]. Uma maneira para contornar essa dificuldade é definir que o vetor tangente deve possuir uma norma diferente de zero. Isso pode ser feito normalizando-se o vetor tangente da seguinte maneira:

$$e_k^T \underline{t} = t_k = 1 \quad (3.49)$$

Nesta equação e_k^T é um vetor linha com todos os elementos nulos exceto o $k^{\text{ésimo}}$ elemento que é igual à unidade. Escolhendo um valor apropriado para o índice k , de forma que $t_k = \pm 1$, garante-se uma norma não-nula para o vetor tangente e, por consequência, a matriz jacobiana expandida não se tornará singular no ponto de máximo carregamento. Assim o vetor tangente pode ser calculado pelo seguinte sistema [Ajjarapu 2006]:

$$\begin{bmatrix} \underline{F}_\delta & \underline{F}_v & \underline{F}_\lambda \\ & e_k & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

A predição da próxima solução, representada por “*”, é encontrada multiplicando-se o vetor tangente por um escalar σ :

$$\begin{bmatrix} \underline{\delta}^* \\ \underline{V}^* \\ \underline{\lambda}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\delta} \\ \underline{V} \\ \underline{\lambda} \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\underline{\delta} \\ d\underline{V} \\ d\underline{\lambda} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

O valor encontrado no passo da predição necessita de uma correção para que seja determinado o valor real da curva de soluções. A correção pode ser feita por meio da parametrização. Neste trabalho é adotada a técnica de parametrização local.

Na parametrização local, o sistema de equações é expandido acrescentando-se uma equação que especifica o valor de uma das variáveis de estado. Para o caso do fluxo de potência continuado significa especificar um valor para a tensão (módulo e ângulo) ou para o parâmetro de continuação λ . Sendo η um valor apropriado para o $k^{\text{ésimo}}$ elemento de \underline{x} , o conjunto de equações pode ser escrito como:

$$\begin{bmatrix} F(x) \\ x_k - \eta \end{bmatrix} = 0 \quad x = \begin{bmatrix} \underline{\delta} \\ \underline{V} \\ \lambda \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

O conjunto de equações (3.52) pode ser resolvido pelo método de Newton-Raphson, de maneira muito similar a um fluxo de potência convencional. O valor do índice k usado na correção é o mesmo utilizado no passo da predição, e o valor de η pode ser x_k^* (valor de x_k^* encontrado no passo da predição).

A escolha do melhor valor para ser usado como parâmetro de continuação deve ser feito considerando-se qual variável de estado possui a maior taxa de variação próximo à solução encontrada. Assim, o parâmetro de continuação é escolhido como sendo o maior elemento do vetor tangente. Em geral, para o caso do fluxo de potência continuado, a escolha de λ como primeiro parâmetro de continuação é a melhor opção. Para os cálculos subseqüentes o parâmetro de continuação pode ser encontrado pela equação (3.53).

$$x_k : |t_k| = \max\{|t_1|, |t_2|, \dots, |t_m|\} \quad (3.53)$$

Após selecionar o parâmetro de continuação, deve-se fazer $t_k = \pm 1$.

O ponto de máximo carregamento pode ser identificado pela monitoração de λ , pois nesse ponto λ atinge seu valor máximo, decrescendo em seguida. O componente do vetor tangente $d\lambda$ é nulo no ponto de máximo carregamento, e torna-se negativo após passar por este, podendo ser usado também como critério de parada.

O fluxograma retirado da referência [Ajjarapu 1992] resume o procedimento para cálculo do fluxo de potência continuado.

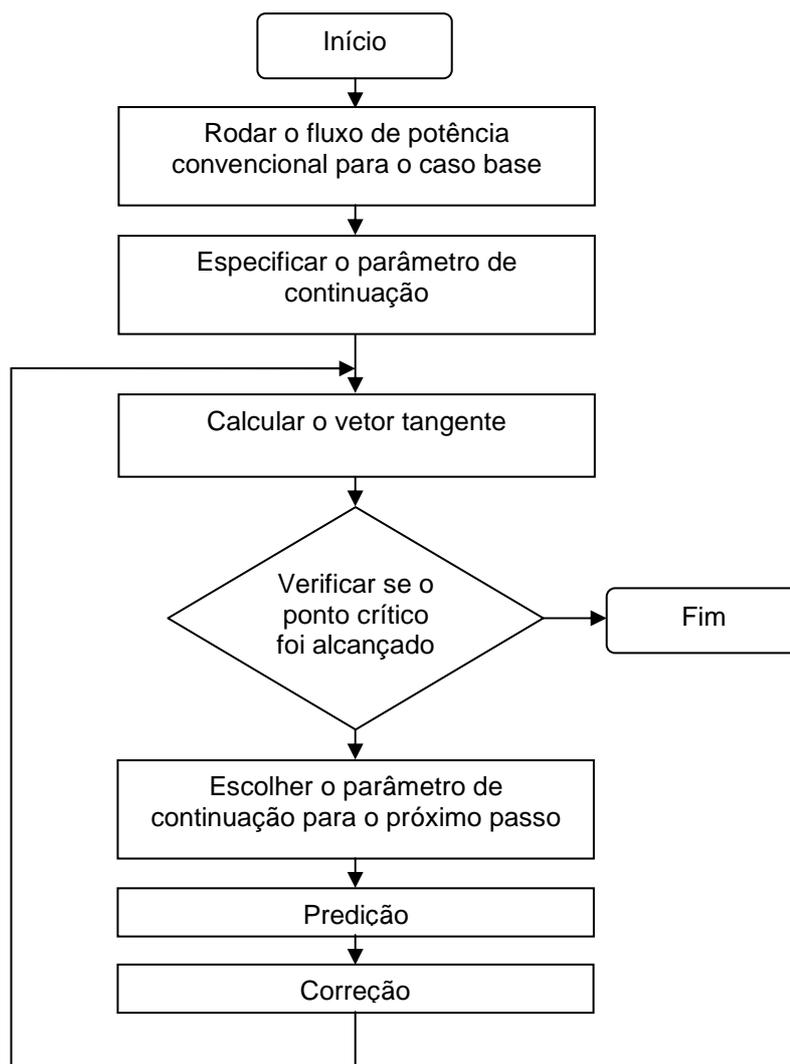


Figura 3.7 – Fluxograma - Fluxo de Potência Continuado

3.6. ÍNDICES PARA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TENSÃO

Os estudos sobre a estabilidade dos sistemas elétricos não visam apenas identificar o ponto de colapso, mas também analisar como mudanças nas configurações e alterações nos parâmetros do SEP afetam a estabilidade. Desta forma, pode-se não somente evitar alterações que impliquem deterioração nas condições de segurança do sistema, como também planejar modificações benéficas que afastam o sistema da instabilidade.

Freqüentemente, encontram-se na literatura estudos sobre a sensibilidade do sistema elétrico, ou seja, como a alteração de uma variável pode influenciar outras. Como forma de estabelecer uma escala relativa dentro de uma análise de sensibilidade, pode-se optar pela formulação de um índice. Os índices podem fornecer informações valiosas, tais como a distância entre o ponto de operação atual e o ponto de colapso, ou indicar condições potencialmente perigosas. Além disso, podem-se identificar barras ou áreas críticas e/ou com maior influência no fenômeno da instabilidade.

Na referência [IEEE 2002] são apresentados vários índices relacionados a Estabilidade de Tensão, tais como fatores de sensibilidade, valores singulares e autovalores, índice de proximidade da instabilidade de tensão, etc.

Para o procedimento proposto neste trabalho de mestrado é de grande importância conhecer alguns tipos de índices e os conceitos associados a este tipo de abordagem. A proposta de avaliação do impacto da compensação reativa *shunt* capacitiva na Estabilidade de Tensão é fundamentada em uma composição de índices de maneira a determinar uma ordem de classificação das barras mais propícias à compensação.

Os índices podem ser classificados em dois grupos: índices baseados no estado do sistema elétrico e os índices baseados em grandes perturbações. Para o primeiro, o índice é formado usando apenas informações disponíveis em um ponto de operação desejado. Já o segundo, leva em conta não-linearidades causadas por grandes distúrbios ou incrementos de carga [Ajarapu 2006]. A seguir são abordados alguns tipos de análises de sensibilidade e índices comumente encontrados nos trabalhos relativos ao tema [IEEE 2002].

(i) Mínimo Valor Singular e Mínimo Autovalor

A decomposição em valores singulares vem sendo utilizada nos estudos de estabilidade em sistemas elétricos de potência devido a sua facilidade de aplicação e pela utilidade das informações obtidas. A análise pelo mínimo autovalor é baseada no mesmo princípio, porém apresenta características de condicionamento numéricas inferiores à decomposição por valores singulares.

Para uma matriz real A , de dimensões $n \times n$, a decomposição por valores singulares é dada por:

$$A = QSP^T = \sum_{i=1}^n s_i q_i p_i^t \quad (3.54)$$

A matriz S é uma matriz diagonal de dimensões $n \times n$, Q e P são matrizes ortonormais de dimensões $n \times n$. Os elementos da diagonal de S são os valores singulares da matriz A . As colunas da matriz Q são os vetores singulares à direita, enquanto as colunas da matriz P são os vetores singulares à esquerda. É possível, por meio de técnicas apropriadas, encontrar a matriz S de tal forma que os elementos estejam em ordem decrescente, isto é, $s_1 \geq s_2 \dots \geq s_n \geq 0$.

A decomposição por autovalores pode ser feita resolvendo-se os sistemas (3.55) e (3.56).

$$AR = R\Lambda \quad (3.55)$$

$$LA = \Lambda L \quad (3.56)$$

De forma análoga à decomposição por valores singulares, a matriz Λ é uma matriz diagonal de dimensões $n \times n$, R e L são matrizes ortonormais de dimensões $n \times n$. Os elementos da diagonal de Λ são os autovalores da matriz A . As colunas da matriz R são os autovetores à direita, enquanto as linhas da matriz L são os autovetores à esquerda.

Se pelo menos um valor singular ou autovalor for nulo, a matriz A é singular. Desta forma, se a decomposição for aplicada à matriz jacobiana do fluxo de potência, pode-se monitorar o mínimo valor singular (MVS) ou o mínimo autovalor (MAV) e verificar o seu módulo. No ponto de colapso, o MVS e MAV se tornam nulos, e a matriz jacobiana é singular. Na referência [Lof 1992], os autores apresentam um índice baseado no mínimo valor singular que indica a distância relativa entre o caso analisado e ponto de limite de estabilidade de tensão para regime permanente.

(ii) Sensibilidade de autovalores

Os autovalores são tipicamente estudados em trabalhos relacionados à estabilidade a pequenas perturbações. Além dessa aplicação, a sensibilidade do mínimo autovalor pode ser avaliada em relação a alguma variável de interesse. Assim, pode-se planejar ações de controle e expansão dos sistemas para prevenir a instabilidade. Seja λ_i o mínimo autovalor da matriz A_{sys} que representa o sistema. A sensibilidade em relação a um parâmetro p escolhido é dada por:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial p} = \frac{v_i^T \frac{\partial A_{sys}}{\partial p} u_i}{v_i^T u_i} \quad (3.57)$$

Onde v_i e u_i são os autovetores à direita e à esquerda, respectivamente, associados ao menor autovalor.

(iii) Análise modal [Gao 1982]

A análise modal utiliza a decomposição da matriz jacobiana do fluxo de potência. Conforme equação (3.58) é calculada uma matriz jacobiana reduzida, com foco na tensão e potência reativa. Para isso, considera-se $\Delta P = 0$, obtendo as expressões (3.60) onde J_R é a matriz jacobiana reduzida.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

$$\Delta P = 0 \quad (3.59)$$

$$\Delta Q = [J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}] \Delta V \quad (3.60)$$

$$\Delta Q = J_R \Delta V$$

Sejam respectivamente ξ_i e η_i os autovetores à direita e à esquerda da matriz jacobiana reduzida, correspondentes ao autovalor λ_i . O subscrito i indica um modo particular, i , relativo ao autovalor λ_i . Para esse modo as variações de potência reativa e tensão são dadas por:

$$\Delta Q_{mi} = K_i \xi_i \quad (3.61)$$

$$K_i^2 \sum_{j=1}^n \xi_{ji}^2 = 1 \quad (3.62)$$

$$\Delta V_{mi} = \frac{1}{\lambda_i} \Delta Q_{mi} \quad (3.63)$$

Pode-se notar que quando a variação de potência reativa está no mesmo sentido de ξ_i , a variação de tensão também está no mesmo sentido, sendo que a amplitude é dada por um fator de escala igual ao inverso do autovalor associado. Assim, se o autovalor λ_i tende a zero, a variação de tensão para o modo associado tende a infinito, ou seja, uma pequena variação na potência reativa pode levar o sistema a uma variação significativa de tensão, podendo conduzir o mesmo ao colapso.

(iv) Análise de sensibilidade pelo vetor tangente [Ajjarapu 2006]

Seja a função $h(x, \lambda)$ uma restrição de operação do sistema elétrico (por exemplo, o fluxo de potência em um ramo, o limite de saída de reativo de um gerador ou o módulo da tensão em uma barra). Para essa função é possível encontrar uma expressão para uma mudança diferencial em $h(x, \lambda)$, em relação a uma mudança diferencial em λ . Para este caso x representa os ângulos e módulos das tensões nas barras.

$$\frac{dh}{d\lambda} = \frac{\partial h}{\partial x} \frac{dx}{d\lambda} + \frac{\partial h}{\partial \lambda} \quad (3.64)$$

Observando a equação (3.64) nota-se que para encontrar $\frac{dh}{d\lambda}$ é necessário calcular $\frac{dx}{d\lambda}$. Para tanto é preciso calcular a inversa da jacobiana, uma vez que $\frac{dx}{d\lambda} = -[F_x]^{-1} F_\lambda$. Porém, no ponto de colapso a matriz jacobiana é singular e não possui inversa. Uma alternativa para o cálculo é usar o vetor tangente para se ter $\frac{dx}{d\lambda}$ diretamente, uma vez que este é obtido durante o fluxo de potência continuado. Desta forma, pode-se substituir $\frac{dx}{d\lambda}$ na equação e obter a sensibilidade para qualquer restrição representada por $h(x, \lambda)$.

Para os estudos do impacto da Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva na Estabilidade de Tensão é de especial interesse conhecer a sensibilidade de tensão das barras. A função $h(x, \lambda)$ pode representar tanto o módulo quanto o ângulo da tensão em uma barra i . Para o módulo da tensão, tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{dh}{d\lambda} &= \sum_{j=1}^n \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \frac{dx_j}{d\lambda} + \frac{\partial V_i}{\partial \lambda} \\ \frac{dh}{d\lambda} &= \frac{\partial V_i}{\partial V_i} \frac{dV_i}{d\lambda} + 0 \\ \frac{dh}{d\lambda} &= \frac{dV_i}{d\lambda} \end{aligned} \quad (3.65)$$

De forma análoga, para o ângulo tem-se:

$$\frac{dh}{d\lambda} = \frac{d\delta_i}{d\lambda} \quad (3.66)$$

Examinando-se o lado direito das equações (3.65) e (3.66) conclui-se que os numeradores são os elementos do vetor tangente.

A sensibilidade das barras indica como a tensão varia à medida que o carregamento do sistema aumenta, auxiliando na identificação de barras ou áreas frágeis. O índice de sensibilidade pode ser obtido normalizando-se os elementos relativos ao módulo e ângulo das tensões. O elemento do vetor tangente de maior ângulo indica a barra mais frágil. Assim pode-se dividir todos os elementos pelo maior elemento. A sensibilidade de índice unitário corresponde à barra mais frágil.

Para o procedimento proposto, a análise de sensibilidade pelo vetor tangente é utilizada para minimizar a injeção de reativo nos estudos de compensação reativa.

3.7. CONCLUSÃO

Conforme demonstram os conceitos apresentados neste capítulo, a Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva desloca o ponto de máximo carregamento permitindo que o sistema seja mais bem aproveitado, aumentando a sua capacidade de fornecer potência às cargas. Contudo, o módulo da tensão no ponto de inflexão da curva tende a elevar-se à medida que o sistema é compensado. Tal efeito torna-se perigoso uma vez que a tensão no Ponto de Máximo Carregamento pode atingir a faixa de operação do sistema fazendo com que este opere muito próximo ao colapso. Caso esta condição seja alcançada o resultado poderá ser desastroso, pois apesar das tensões estarem dentro da faixa operacional esperada, o sistema pode tornar-se instável, sendo incapaz de fornecer a potência demandada. Para que este indesejável fenômeno seja evitado é preciso estabelecer limites para a Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva. Além disso, a escolha adequada das barras que receberão a compensação é importante para o melhor aproveitamento dos recursos do sistema elétrico.

Adota-se neste trabalho o uso de análises estáticas, assim como a maior parte dos trabalhos nacionais e internacionais relacionados ao tema. Embora o fenômeno da instabilidade de tensão seja dinâmico, a literatura tem mostrado que a análise estática pode modelar, ainda que de forma aproximada, as cargas, a atuação dos LTC e os limites de capacidade de fornecimento de potência reativa dos geradores. Contudo, alguns questionamentos têm surgido a este respeito, procurando apurar se a análise estática

contempla todos os fenômenos envolvidos, independentemente da escala de tempo [Cortez 2001].

4 – COMPENSAÇÃO REATIVA *SHUNT* CAPACITIVA NA ESTABILIDADE DE TENSÃO – PROPOSTA DE PROCEDIMENTO

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O planejamento da Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva busca determinar as barras mais propícias para a compensação, bem como o montante de potência reativa a ser injetado em cada barra. Este capítulo apresenta uma estratégia para planejamento da Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva considerando o seu impacto do ponto de vista da Estabilidade de Tensão.

O procedimento aqui proposto é composto por *dois módulos principais*:

- (i) Escolha das barras candidatas à Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva
- (ii) Determinação dos valores limite para a Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva

No módulo (i) são feitas análises de modo a classificar as barras em um *ranking*, indicando quais as barras devem ser priorizadas na compensação. Nessa etapa são utilizadas técnicas como fluxo de potência continuado e vetor tangente.

No módulo (ii) determina-se o limite de potência reativa que pode ser injetado na(s) barra(s) sob análise, de forma que as tensões no ponto de colapso, ou próximas deste, não alcancem valores considerados perigosos, ou seja, aqueles dentro da faixa de operação do sistema.

Como apresentado mais detalhadamente adiante o processo pode ser repetido de forma iterativa até que as barras de interesse apresentem o perfil de tensão desejado. A idéia é garantir a segurança na expansão do SEP, ou seja, sugerir um procedimento que permita usufruir dos benefícios da Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva, sem que com isto o sistema tenha a sua confiabilidade diminuída. Neste sentido, é importante

estabelecer margens de operação do sistema, garantindo uma distância de segurança até o ponto de instabilidade.

A Figura 4.1 ilustra o conceito de margem de carregamento utilizado neste texto. A faixa de operação do SEP está indicada pela região compreendida entre V_{max} e V_{min} . Na Figura 4.1(a) é mostrada uma curva típica de barras sem compensação ou subcompensadas, onde a Tensão no Ponto de Colapso - TPC está bem abaixo da faixa de operação. Em Figura 4.1(b) é exibido um caso extremo de sobrecompensação, com a TPC dentro da faixa de operação. A relação entre as grandezas indicadas nos gráficos é: $TPC_b > TPC_a$ e $P_{max_b} > P_{max_a}$. Em Figura 4.1(c) é ilustrado o comportamento desejado com o uso do procedimento proposto, ou seja, aproveitar ao máximo os recursos do sistema sem comprometer sua estabilidade.

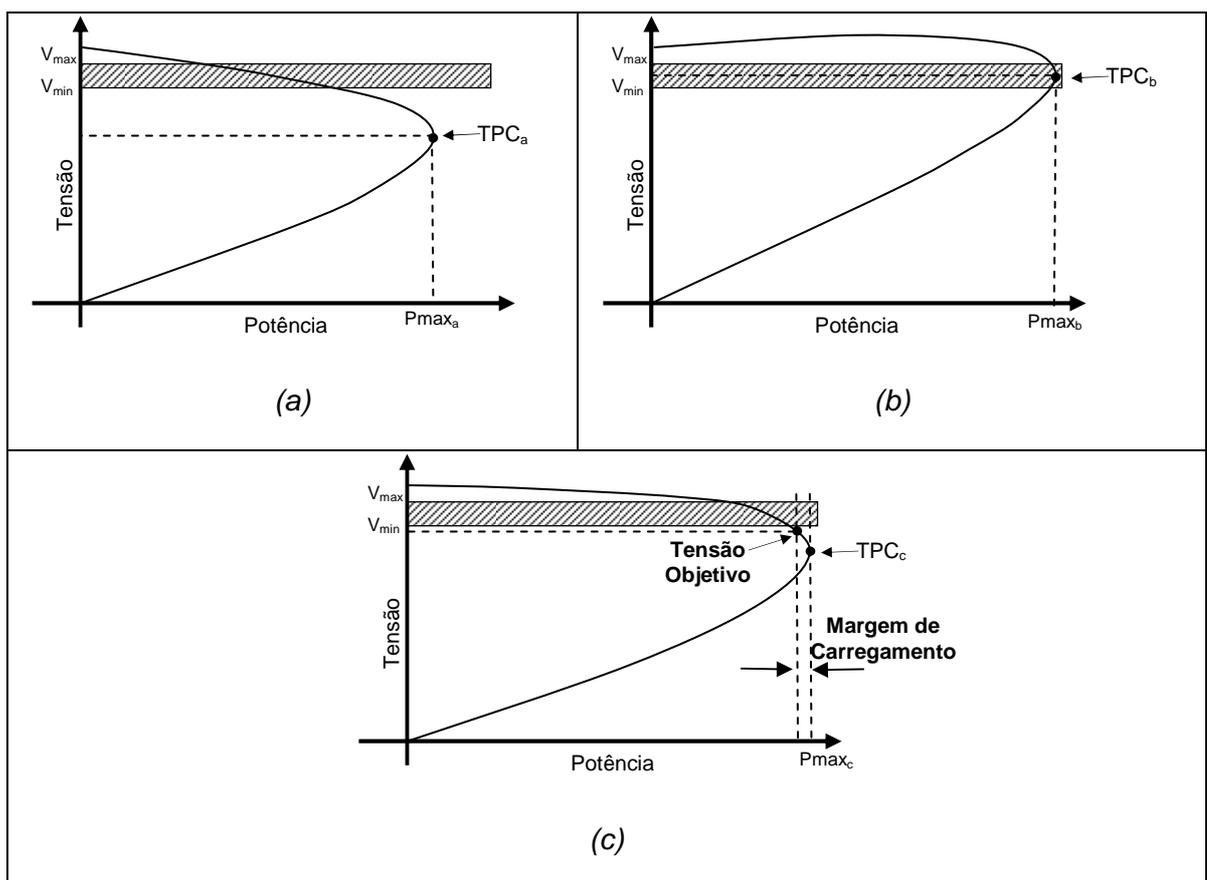


Figura 4.1 – Margem de carregamento e tensão objetivo

Para a descrição da proposta, dois novos parâmetros são apresentados: **Margem de Carregamento e Tensão Objetivo**:

- O parâmetro Margem de Carregamento - MC tem a função de garantir uma distância até o ponto de máximo carregamento, indicado por P_{max_c} .
- A Tensão Objetivo - TO é o valor do módulo da tensão desejada no ponto onde o carregamento da barra seja igual a “ P_{max_c} – Margem de Carregamento”.

Os valores atribuídos aos parâmetros devem ser tais que:

$$\text{Margem de Carregamento} > 0\% \quad (4.1)$$

$$V_{min} \geq \text{Tensão Objetivo} > TPC \quad (4.2)$$

Desta forma, garante-se pela equação (4.1) que o sistema irá operar, em termos de potência, a determinada distância do ponto de máximo carregamento, e pela equação (4.2) assegura-se que a TPC estará abaixo da faixa de operação do sistema, evitando os problemas anteriormente mencionados. O termo V_{min} na equação (4.2) faz referência à tensão mínima da faixa de operação em condição normal ou de emergência, conforme a situação que estiver sendo analisada.

Ainda para a curva apresentada na Figura 4.1(c), pode-se considerar que a compensação a ser adicionada deve ficar em um valor intermediário, entre o caso sem compensação ou subcompensado Figura 4.1(a) e o caso sobrecompensado Figura 4.1(b). Portanto, a relação esperada entre os valores deve ser:

$$TPC_b > TPC_c > TPC_a \quad (4.3)$$

$$Pmax_b > Pmax_c > Pmax_a \quad (4.4)$$

A escolha dos valores para a Margem de Carregamento e Tensão Objetivo deve ficar a cargo dos planejadores, de forma a atender aos objetivos do planejamento e às recomendações e especificações dos órgãos de regulamentação e controle do sistema elétrico.

Após estas considerações iniciais sobre o procedimento, este capítulo apresenta a estratégia proposta por meio do detalhamento do seus dois módulos básicos: (i) –

Classificação - Escolha das barras candidatas à Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva e
(ii) - Determinação dos valores limite para a Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva.

4.2. MÓDULO (I): CLASSIFICAÇÃO - ESCOLHA DAS BARRAS CANDIDATAS À COMPENSAÇÃO REATIVA *SHUNT* CAPACITIVA

Durante a elaboração dos planos de expansão devem-se eleger os parâmetros e aspectos a serem considerados para a definição das barras mais propícias à compensação reativa. O processo de escolha pode levar em conta diretrizes gerais tais como a menor quantidade de reativo a ser alocado, perfil de tensão desejado, minimização de perdas, a entrada no sistema de grandes obras, e características mais específicas de cada barra como disponibilidade de espaço físico na subestação para colocação dos bancos de capacitores, valores comerciais de capacitores disponíveis e a mudança no comportamento dos transitórios e harmônicos. A modelagem matemática destas restrições deve ser incluída nas análises conforme a necessidade e propósito do estudo.

A primeira parte do procedimento proposto neste texto consiste na formulação de análises com o objetivo de identificar as barras mais propícias a receber a compensação reativa *shunt*.

A estratégia considera como barras mais propícias aquelas que apresentam características tais como menores módulos de tensão no ponto de máximo carregamento (TPC) e maior sensibilidade da tensão em relação à injeção de potência reativa. Cada barra recebe uma classificação de prioridade de acordo com a TPC e a sua sensibilidade, sendo o índice de sensibilidade calculado para duas condições de carregamento distintas como visto adiante. Do ponto de vista da TPC as barras consideradas prioritárias são aquelas com menores módulos de tensão, enquanto que a classificação por sensibilidade atribui maior prioridade às barras mais sensíveis.

Conforme abordado no capítulo 3, existem na literatura vários índices para avaliação da Estabilidade de Tensão. Neste texto optou-se por uma composição de dois deles (análise de sensibilidade pelo vetor tangente e TPC). São particularmente interessantes as informações fornecidas por estes dois índices, uma vez que o objetivo é melhorar o perfil de tensão das barras de modo controlado, isto é, usando o mínimo de

potência reativa necessária, otimizando assim os recursos, e sem elevar demasiadamente as curvas PV, fazendo com que a TPC fique abaixo de um valor determinado, como por exemplo a faixa de operação do sistema.

Os passos da primeira parte do procedimento estão resumidos no fluxograma da Figura 4.2. Inicialmente é feita a escolha adequada da representação do sistema, das cargas e dos geradores. Foram retiradas de [CCPE 2002] e [Cortez 2001] recomendações para esta fase do procedimento. Logo após passa-se então à simulação do caso base, simulação do caso com aumento de carga, usando fluxo de potência continuado com avaliação da TPC e obtenção das sensibilidades com o uso do vetor tangente.

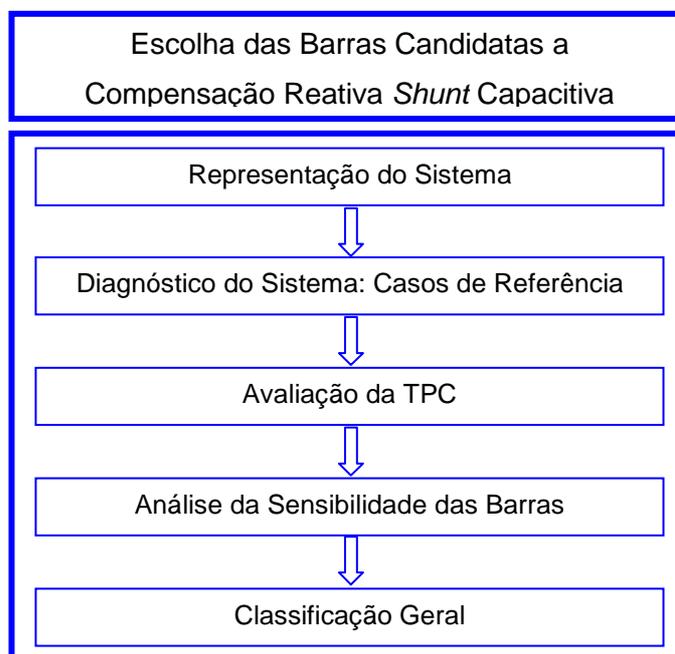


Figura 4.2 – Fluxograma: Escolha das Barras Candidatas a Compensação Reativa Shunt Capacitiva

4.2.1. Passo 1 - Representação do Sistema Elétrico

O SEP deve ser representado de forma que as análises apresentem resultados confiáveis. Conforme comentado anteriormente, o procedimento proposto utiliza a análise estática, não sendo necessária a representação do comportamento dinâmico dos elementos do sistema.

Nos estudos do sistema elétrico brasileiro o usual é representar detalhadamente a Rede Básica (transmissão) e de modo simplificado a subtransmissão. A simplificação é feita desprezando-se os ramais radiais e as transformações abaixadoras (subtransmissão para média tensão), conectando-se as cargas e a compensação de potência reativa diretamente nas barras de subtransmissão do sistema [Cortez 2001].

De especial interesse para a análise de Estabilidade de Tensão é a modelagem das cargas, dos geradores, dos transformadores com mudança de tap e dos compensadores, conforme indicado de forma sucinta abaixo.

Cargas

O fenômeno da instabilidade de tensão está intimamente ligado ao comportamento das cargas. A recomendação de [CCPE 2002] é de que se o tipo das cargas não for conhecido com exatidão deve-se utilizar o modelo de carga do tipo potência constante para as componentes ativa e reativa.

Em [Cortez 2001] o autor alerta para a possibilidade de resultados errôneos em função desta simplificação. Cita-se o caso do comportamento dos motores de indução, onde existe uma variação significativa do consumo de potência reativa em função de sua tensão terminal. Em regiões industriais ou com grande concentração de motores de indução, como os utilizados em aparelhos condicionadores de ar, a correta modelagem das cargas é de especial interesse.

Durante as simulações feitas no cálculo do fluxo de potência continuado ou no diagnóstico do sistema para uma situação futura é necessário escolher a maneira como as cargas serão incrementadas. Evidentemente, a taxa de crescimento da carga é um parâmetro particular de cada sistema elétrico e varia de acordo com as características dos consumidores representados por elas. A recomendação do CCPE [CCPE 2002] é que durante o incremento de carga mantenha-se o fator de potência constante. Tal preocupação se justifica porque a potência reativa é um dos fatores mais relevantes para o colapso de tensão. Assim a determinação correta do fator de potência torna-se muito importante para os estudos.

Outro fator relevante é fazer a distinção, para cada barra, entre as parcelas de potência reativa correspondente à carga e à compensação reativa, uma vez que apenas a potência da carga deve ser incrementada.

Redespacho dos Geradores

À medida que a carga é incrementada o redespacho de cada gerador deve ser realizado. A definição da participação de cada gerador no aumento da carga é de fundamental importância nos estudos, pois possui grande influência nos limites de máximo carregamento.

O quanto cada gerador irá fornecer para atender ao aumento da demanda é um critério do planejador. A recomendação do CCPE [CCPE 2002] é manter constante a geração da área interna (carga) e distribuir o aumento de geração pelas áreas externas (geração), fazendo um rateio proporcional à capacidade de cada gerador. Devem ser incluídos apenas os geradores que contribuem de forma significativa na área de carga sob análise. Os limites de capacidade de geração de potência ativa e reativa de todos os geradores envolvidos devem ser representados e respeitados nas simulações.

Transformadores e Reguladores de Tensão

A necessidade de representar os transformadores de transmissão e distribuição, com a ação dos LTC e dos reguladores de tensão é uma questão relevante para análise da estabilidade de tensão e deve ser avaliada pelos planejadores.

Em geral, não são representados os transformadores da subtransmissão, e conseqüentemente, ignoram-se os LTC que controlam a média tensão. Porém, caso o enfoque dos estudos seja o sistema de distribuição a representação desses transformadores é importante.

A recomendação encontrada na literatura é a representação dos LTC e reguladores de tensão como cargas do tipo potência constante. Desta forma, o efeito da atuação desses elementos estaria sendo aproximado de forma admissível, apesar de não se poder afirmar que o efeito seja exatamente o mesmo.

Para os estudos, ou regiões, onde o modelo de carga adotado for diferente do de potência constante, torna-se obrigatória a representação de todos os LTC das subestações envolvidas. Caso seja possível, deve-se agregar também aos LTC os efeitos dos reguladores de média tensão da distribuição, uma vez que tais reguladores não são representados nos estudos de planejamento da transmissão e subtransmissão [Cortez 2001].

Geradores Síncronos e Compensadores Estáticos

A utilização de geradores síncronos e compensadores estáticos tem grande relevância para o controle de tensão, pois em muitos casos a sua atuação é sistêmica, ou seja, possuem a capacidade de controlar a tensão em toda uma área de suprimento. Essa característica também confere a tais dispositivos grande importância no fenômeno da instabilidade, já que o suprimento de potência reativa tende a aumentar as margens de carregamento, deslocando o ponto de colapso para valores de potência mais elevada.

Merecem especial atenção as limitações de geração/absorção de potência reativa destes dispositivos, uma vez que fora destes limites o comportamento sofre alterações acentuadas. Para os compensadores estáticos, depois de atingido o ângulo de disparo máximo, o comportamento passa a ser o mesmo de um dispositivo passivo (capacitor) com a potência reativa gerada proporcional ao quadrado da tensão terminal. Os geradores síncronos geram potência reativa proporcionalmente ao valor da tensão desejada na barra controlada, porém não conseguem gerar potência reativa muito além do valor especificado pelo fabricante. Desta forma, depois de atingido o limite esse dispositivo perde a sua capacidade de regulação da tensão.

Conforme mostrado em [Cortez 2001] é de fundamental importância considerar na representação do sistema os limites corretos de geração/absorção de potência reativa relativos a capacidades desses equipamentos, além de ajustar as tensões controladas por esses equipamentos o mais próximo possível dos valores reais.

4.2.2. Passo 2 - Diagnóstico do Sistema: Casos de Referência

Após representar adequadamente o caso em estudo, seguindo as recomendações exibidas na seção anterior, a fase seguinte é a de diagnóstico, quando é feita uma análise da situação atual e futura do sistema elétrico. Esta fase não é privativa deste procedimento. O planejamento da expansão necessita naturalmente realizar este estudo como forma de verificar a capacidade de atendimento das cargas, o perfil de tensão, fator de potência, a necessidade de intervenções, como construção de usinas, linhas de transmissão, reforços, etc.

Para a proposta de procedimento aqui apresentada, o objetivo desta fase é um levantamento preliminar do sistema elétrico, quando se avalia, ainda de maneira geral, o montante de geração, carga e perdas das áreas e do sistema como um todo. O perfil de tensão das barras também deverá ser observado pelo planejador, identificando aquelas com tensões menores. Conjugando estas informações, obtém-se um indicativo inicial de quais regiões ou barras possivelmente necessitem de um reforço de potência reativa.

Quando se trata de um plano de compensação reativa de forma ampla, não se tratando especificamente da compensação reativa *shunt* capacitiva, a recomendação é avaliar o sistema em cinco níveis de carga, usualmente caracterizado por anos. Recomenda-se a avaliação nos três primeiros anos, em um ano intermediário e em um ponto de médio/longo prazo, a fim de verificar se a compensação planejada está compatível com o sistema futuro [Valadares 2001].

Neste trabalho, onde o foco é a compensação reativa *shunt* capacitiva, optou-se por estruturar o procedimento para receber como entrada dois casos de referência, representando dois níveis de carga subseqüentes no horizonte temporal de planejamento. Assim a cada vez são analisados dois cenários como, por exemplo, o ano atual e o seguinte, ou o terceiro ano e o ano intermediário. A avaliação feita desta forma contempla a característica da compensação reativa *shunt* capacitiva ser uma obra de curto prazo, possibilita avaliar ao longo do tempo as mudanças na classificação das barras mais indicadas à compensação, além de permitir que os efeitos das compensações planejadas nos casos de referência anteriores sejam considerados. A análise de dois cenários por vez também contribui para a redução de possíveis efeitos de mascaramento, pois se analisados todos os anos do planejamento de uma só vez, poderia acontecer de uma barra que apenas irá necessitar de compensação no médio/longo prazo seja considerada com maior prioridade que uma barra que necessita de compensação no curto prazo.

Além da necessidade técnica deste diagnóstico, existe também, em termos computacionais, a oportunidade de se iniciar as variáveis para cálculos seguintes. No próximo item, por exemplo, será mostrada a avaliação da TPC, onde é usado o fluxo de potência continuado que em geral requer o ajuste dos valores iniciais próximos à primeira solução.

4.2.3. Passo 3 - Avaliação da Tensão no Ponto de Colapso

O planejamento da Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva tem como um dos principais objetivos a melhoria na condição do perfil de tensão das barras. Em tópicos anteriores detalhou-se o efeito da inserção dos capacitores ao sistema, com a elevação da TPC e aumento da máxima potência entregue à barra.

Neste sentido, as barras que manifestam as menores tensões no ponto de máximo carregamento indicam a possibilidade da necessidade de reforço de reativo. Além disso, pode-se considerar que as barras com as menores TPC estão mais distantes de apresentar o efeito indesejável da sobrecompensação, quando a TPC se eleva a ponto de ficar dentro da faixa de operação do sistema. O procedimento proposto nesta dissertação utiliza esses conceitos como indicativos na escolha das barras prioritárias para a compensação reativa *shunt* capacitiva.

O ponto de colapso de tensão é calculado no procedimento proposto utilizando-se o fluxo de potência continuado. O algoritmo para esse cálculo é encontrado em artigos e dissertações sobre o tema [Ajarapu 1992], [Lobato 1998] e está presente em várias ferramentas computacionais comerciais disponíveis aos planejadores como *Powerworld* [Powerworld 2008] e *PSS/E* [PSS/E 2001]. O vetor tangente, calculado durante as iterações do algoritmo, é usado para a análise de sensibilidade seguinte. Assim, esta etapa do cálculo além de determinar as TPC também irá fornecer resultados para o próximo passo, poupando esforço computacional.

Durante o cálculo do fluxo de potência continuado é preciso estabelecer a forma como a carga e a geração são incrementadas. Conforme já mencionado anteriormente, para o caso dos geradores, de forma geral, sugere-se que o incremento seja proporcional ao valor gerado por cada um. Para as cargas o planejador deve estipular o crescimento usando a previsão de carga para cada região, visando sempre aproximar os resultados obtidos nas simulações dos valores que seriam apresentados pelo sistema real.

O crescimento precisa ser ajustado de tal forma que durante o incremento das cargas e dos geradores, em dois pontos o carregamento do sistema em estudo corresponda aos casos escolhidos como referência durante a fase de diagnóstico. O primeiro objetivo é garantir que na próxima etapa do procedimento proposto, quando for necessário utilizar o vetor tangente, esse já tenha sido obtido. O segundo, e mais

importante, é assegurar que as análises de sensibilidades sejam feitas para as condições de carregamento de interesse. Para facilitar o entendimento, supor um sistema com três barras de carga, numeradas de 1 a 3, e duas barras de geração de números 4 e 5, sendo a última a barra *slack*. Supor ainda, que na fase de diagnóstico o referido sistema tenha sido avaliado para os dois cenários apresentados na Tabela 4.1 (valor negativo representa injeção de potência). Assim, os valores escolhidos para crescimento da carga e do gerador, durante o cálculo do fluxo de potência continuado, devem ser tais que satisfaçam os valores da Tabela 4.1 simultaneamente para cada ano, tal como ilustrado na Figura 4.3.

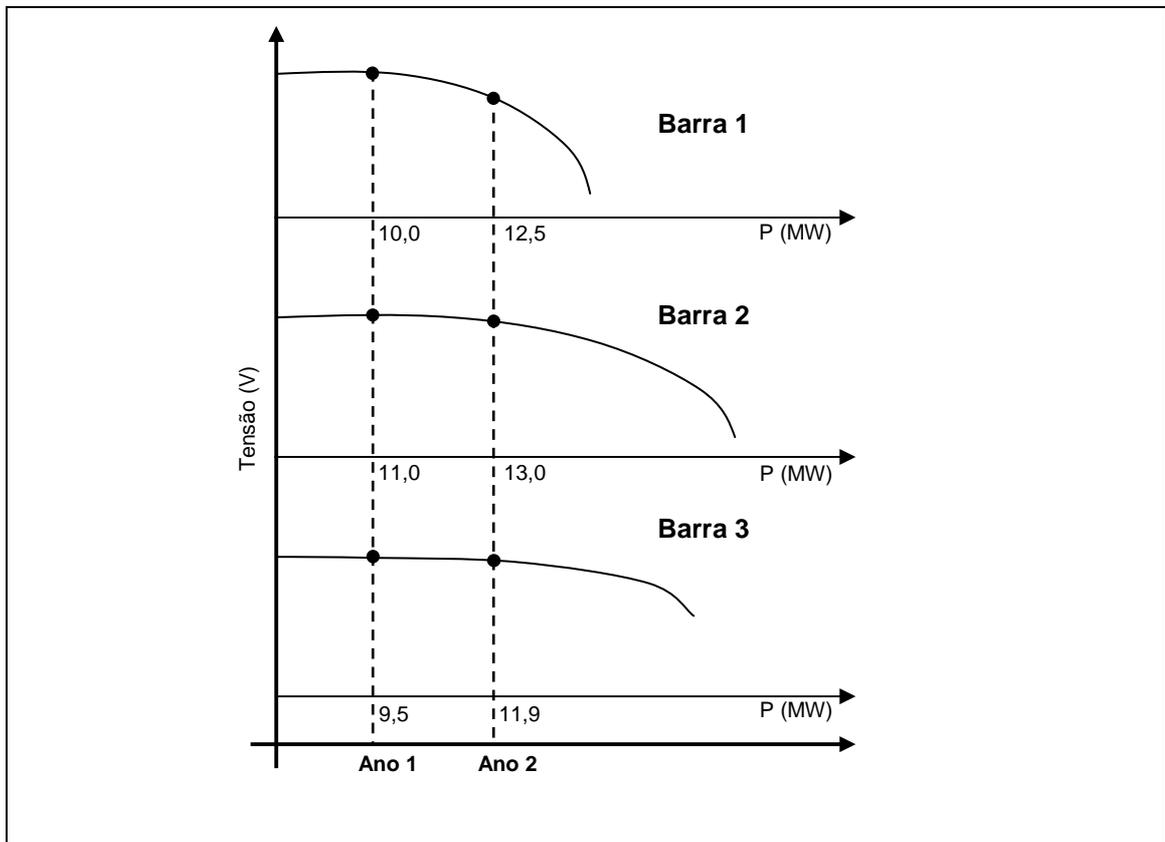


Figura 4.3 – Exemplo: Pontos de Carregamento – Fluxo de Potência Continuado

Tabela 4.1 – Valores Exemplo para a Figura 4.3

	Potência (MW)			
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4
Ano 1	10,0	11,0	9,5	-15,0
Ano 2	12,5	13,0	11,9	-16,0

Em ferramentas computacionais disponíveis para cálculo do fluxo de potência continuado é comum encontrar a opção para traçado da parte inferior da curva. Para o caso deste procedimento esta parte do cálculo não é necessária, pois o interesse é a TPC.

Depois de finalizado o cálculo do fluxo de potência continuado, os valores da TPC devem ser armazenados em uma matriz, contendo o número da barra e o valor da TPC. Em seguida, ordena-se a matriz em ordem crescente, usando como referência a coluna das tensões. Caso exista empate, ou seja, duas ou mais barras com a mesma TPC, devem-se definir critérios de desempate. Sugere-se neste texto o uso dos seguintes critérios:

- 1) Barra com o menor fator de potência;
- 2) Barra com a maior previsão de aumento de carga;
- 3) Decisão manual do planejador.

O primeiro critério visa evitar a circulação desnecessária de potência reativa na rede. O segundo critério prioriza as barras com maior previsão de aumento de carga, onde a compensação reativa *shunt* capacitiva pode ser útil por deslocar o ponto de máximo carregamento. Por fim, se ainda persistir o empate, o planejador deve definir a ordem das barras com base em sua experiência e conhecimento do sistema.

Feita a ordenação da matriz, atribui-se a cada barra o valor correspondente à ordem na lista. Por exemplo, se a barra 3 possui a TPC = 0,69 e ocupa o primeiro lugar na lista atribui-se o valor 1, se a barra 1 possui a TPC = 0,71 e ocupa o segundo lugar na lista atribui-se o valor 2, e assim por diante. No índice de classificação geral, calculado no fim do procedimento proposto, é usado o valor da ordem de classificação na lista, e não o valor da TPC. Os valores de tensão são usados para ordenar a lista de barras. Somente as barras do tipo PQ devem constar desta lista, uma vez que não faria sentido incluir as barras com tensão controlada. A matriz montada neste passo do procedimento proposto é denominada A_{TPC} e tem o formato da expressão (4.5).

$$A_{TPC} = \begin{bmatrix} Ic & NB & TPC_{nb} \end{bmatrix}_{nPQ \times 3} \quad (4.5)$$

Legenda:

Ic : posição relativa da barra na matriz

NB : número da barra

TPC_{nb} : Tensão no Ponto de Colapso da barra *nb*

nPQ : número de barras do tipo PQ

Na implementação computacional do procedimento, deve-se prever algum tipo de alerta ao planejador, caso existam barras que, antes mesmo da adição da Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva, já possuam TPC na faixa de operação do sistema. Essas barras não podem receber a Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva, considerando o impacto na Estabilidade de Tensão. O planejador deve elaborar um estudo visando a correção desta situação. Pode ser necessário o planejamento de uma nova configuração do sistema. Por exemplo, se a(s) barra(s) em questão já possui(em) algum tipo de compensação, esta deve ser revista.

4.2.4. Passo 4 - Análise da Sensibilidade das Barras

A Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva deve ser planejada de tal forma a alocar a injeção de potência reativa, usando o mínimo de capacitores e atendendo aos critérios técnicos e econômicos.

Na seção anterior foi mostrado o passo do procedimento para a avaliação da TPC usando o fluxo de potência continuado. O perfil de tensão nas barras pode ser melhorado com a elevação controlada desse ponto.

Para atingir aos objetivos de melhorar o perfil de tensão e aumentar a capacidade de atendimento de carga do sistema, utilizando para isso o mínimo de reativo necessário, deve-se fazer uma avaliação de sensibilidade, isto é, verificar as barras onde a injeção da potência reativa provoca maiores alterações na tensão. Esse é o objetivo deste passo do procedimento proposto. Dessa forma, avalia-se não somente onde o ponto de instabilidade ocorre, mas também como a alocação de potência reativa influencia a mudança desse ponto.

Conforme detalhado no capítulo 3, na literatura são encontrados vários índices para detecção da proximidade do colapso de tensão [Canizares 1995]. Uma abordagem comum é fazer a análise de sensibilidade definindo-se um índice de estabilidade e estudando como diferentes parâmetros afetam este índice [Ajarapu 2006]. A análise de sensibilidade além de permitir obter as informações sobre como o estado do sistema é afetado pela mudança do parâmetro escolhido, pode ajudar na avaliação da eficácia dos controles. Essas características são úteis no procedimento proposto porque podem apresentar um indicativo de como as tensões nas barras são alteradas pela potência

reativa. A sensibilidade da tensão em relação à potência ativa e reativa pode ser calculada pelos elementos do vetor tangente como demonstrado em [Ajarapu 2006] e exibido a seguir.

Definindo-se uma função $h(x, \lambda)$, como representação de qualquer restrição à operação do sistema elétrico de potência, tais como potência reativa de saída de um gerador, fluxo de potência em uma linha ou módulo de tensão na barra, pode-se obter uma expressão da derivada de $h(x, \lambda)$ em relação a λ , sendo x o vetor dos módulos e ângulos das tensões nas barras. Derivando-se $h(x, \lambda)$ tem-se a expressão (4.6).

$$\frac{dh}{d\lambda} = \frac{\partial h}{\partial x} \frac{dx}{d\lambda} + \frac{\partial h}{\partial \lambda} \quad (4.6)$$

Examinando-se a equação (4.6) verifica-se que para calcular $\frac{dh}{d\lambda}$ é preciso calcular $\frac{dx}{d\lambda}$. Para isso o inverso da matriz jacobiana $\left(\frac{dx}{d\lambda} = -[F_x]^{-1} F_\lambda \right)$ precisa ser computado. Como já discutido no capítulo 3, no ponto de colapso a matriz jacobiana torna-se singular e não é possível calcular a sua matriz inversa. Porém o valor de $\frac{dx}{d\lambda}$ é dado diretamente pelo vetor tangente obtido durante o cálculo do fluxo de potência continuado. Desta forma, pode-se substituir diretamente o vetor tangente na equação (4.6) e obter a sensibilidade para qualquer restrição de operação.

Para o cálculo da sensibilidade das barras, a função $h(x, \lambda)$ pode ser o módulo ou o ângulo da tensão em uma barra específica i . Substituindo na equação (4.6), para o módulo da tensão, tem-se a expressão (4.7):

$$\frac{dh}{d\lambda} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \frac{dx_j}{d\lambda} + \frac{\partial V_i}{\partial \lambda} = \frac{\partial V_i}{\partial V_i} \frac{dV_i}{d\lambda} + 0 = \frac{dV_i}{d\lambda} \quad (4.7)$$

Da mesma forma para o ângulo da tensão, tem-se a expressão (4.8).

$$\frac{dh}{d\lambda} = \frac{d\delta_i}{d\lambda} \quad (4.8)$$

Observando-se as equações (4.7) e (4.8) nota-se que os numeradores do lado direito das equações são exatamente os elementos do vetor tangente. Uma vez que o

valor de $d\lambda$ é o mesmo para cada dV_i ou $d\delta_i$, para um dado vetor tangente, as sensibilidades das barras são os elementos deste vetor. Vale lembrar que o parâmetro λ no fluxo de potência continuado é o responsável pelo incremento tanto da potência ativa quanto da reativa. Porém, como observado na matriz jacobiana os acoplamentos $\frac{\partial P}{\partial V}$ e $\frac{\partial Q}{\partial \theta}$ são fracos, prevalecendo com maior intensidade as relações $\frac{\partial P}{\partial \theta}$ e $\frac{\partial Q}{\partial V}$. Assim, as sensibilidades dV_i estão mais fortemente relacionadas à potência reativa que é o interesse do procedimento proposto.

O uso das sensibilidades obtidas pelo vetor tangente é computacionalmente vantajoso para a proposta desta dissertação porque no passo anterior, durante o cálculo do fluxo de potência continuado, tal vetor já foi calculado, e desta forma evita-se um novo esforço computacional.

A análise de sensibilidade mostrada é válida na vizinhança do ponto de operação onde foi calculada. Conforme citado anteriormente, o procedimento proposto está estruturado para receber dois casos de referência. Assim, o cálculo das sensibilidades deve ser feito para cada uma destas condições de carregamento.

Após obter os elementos do vetor tangente deve-se fazer a normalização para facilitar a visualização e o estudo das sensibilidades. Toma-se o módulo de cada elemento do vetor tangente e em seguida divide-se cada um dos seus elementos pelo módulo do maior elemento encontrado. O resultado obtido é o vetor S das sensibilidades.

$$S = \frac{1}{\max(V_{tg})} |V_{tg}| \quad (4.9)$$

Legenda:

V_{tg} : Vetor tangente

$\max(V_{tg})$: maior elemento do vetor tangente

Por fim, monta-se a matriz mostrada na equação (4.10) e classificam-se as linhas em ordem decrescente tomando por referência o vetor S das sensibilidades, correspondente à coluna 4 da matriz. Para manter a compatibilidade com o passo anterior, apenas as barras do tipo PQ devem entrar na lista. A matriz montada neste passo é semelhante à do passo anterior, denominada A_S , e tem o formato mostrado na expressão (4.10).

$$A_S^j = \begin{bmatrix} I_c & NB & V_{tg} & S \end{bmatrix}_{nPQ \times 4} \quad (4.10)$$

Legenda:

j : caso de referência (caso 1 ou 2)

I_c : posição relativa da barra na matriz

NB : número da barra

V_{tg} : vetor tangente

S : vetor das sensibilidades

Depois de realizada a ordenação é possível visualizar as barras ou regiões mais críticas do ponto de vista da sensibilidade em relação à potência. Além disso, pela comparação das matrizes de cada caso de referência pode-se verificar se o crescimento da carga do sistema provoca grandes mudanças no vetor de sensibilidades.

4.2.5. Passo 5 - Classificação Geral

Finalizados os cálculos apresentados nos passos anteriores, chega-se ao momento de reunir os resultados obtidos em um índice de classificação geral que indicará as barras mais propícias a receberem a Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva.

A aplicação do procedimento proposto gerou três matrizes até este ponto, uma para a análise da tensão no ponto de colapso e duas para a análise de sensibilidade. A classificação geral é feita considerando a posição relativa de cada barra nas matrizes calculadas. Na primeira coluna de cada matriz o vetor *I_c* representa a ordem de classificação da barra de acordo com a análise correspondente. O índice de classificação geral é obtido pela multiplicação dos elementos do vetor *I_c*. Deve-se estar atento ao seguinte detalhe: antes da multiplicação é preciso ordenar as matrizes usando como referência a coluna 2 que contém o número das barras. Isto é necessário porque cada matriz está ordenada até o momento pela TPC ou pela análise de sensibilidade. Ao ordenar a matriz usando como referência o número de cada barra garante-se que a multiplicação dos índices corresponde à mesma barra.

A seguir são mostradas as instruções para montagem da tabela com o Índice de Classificação Geral:

1) Ordenar as matrizes A_{TPC} , A_S^1 e A_S^2 , obtidas nos passos anteriores, usando a coluna 2 (vetor *NB*) como referência;

2) Calcular o produto mostrado na equação (4.11), para obter o vetor de classificação geral I_{cg} cujos elementos representam o Índice de Classificação Geral de cada barra.

$$I_{cg} = \begin{bmatrix} I_{cg(1,1)} \\ \vdots \\ I_{cg(i,1)} \\ \vdots \\ I_{cg(nPQ,1)} \end{bmatrix}_{nPQ \times 1} = \begin{bmatrix} A_{TPC(1,1)} \cdot A_{S(1,1)}^1 \cdot A_{S(1,1)}^2 \\ \vdots \\ A_{TPC(i,1)} \cdot A_{S(i,1)}^1 \cdot A_{S(i,1)}^2 \\ \vdots \\ A_{TPC(nPQ,1)} \cdot A_{S(nPQ,1)}^1 \cdot A_{S(nPQ,1)}^2 \end{bmatrix}_{nPQ \times 1} \quad (4.11)$$

3) Calcular o Índice de Classificação Geral Normalizado I_{cgn} , como mostrado na equação (4.12).

$$I_{cgn} = \min(I_{cg}) \begin{bmatrix} \frac{1}{I_{cg(1)}} \\ \vdots \\ \frac{1}{I_{cg(i)}} \\ \vdots \\ \frac{1}{I_{cg(nPQ)}} \end{bmatrix}_{nPQ \times 1} \quad (4.12)$$

Legenda:

I_{cg} : Vetor Índice de Classificação Geral

$\min(I_{cg})$: Menor elemento do vetor Índice de Classificação Geral

4) Montar a matriz estendida exibida na equação (4.13).

$$A_{Icg} = \begin{bmatrix} NB & A_{TPC(i,1)} & A_{TPC(i,3)} & A_{S(i,1)}^1 & A_{S(i,4)}^1 & A_{S(i,1)}^2 & A_{S(i,4)}^2 & I_{cg} & I_{cgn} \end{bmatrix}_{nPQ \times 9} \quad (4.13)$$

5) Ordenar a matriz A_{Icg} usando a última coluna (I_{cgn}) como referência em ordem crescente.

Finalizados os cálculos o resultado obtido é uma matriz que lista a ordem das barras mais propícias a receberem a compensação reativa *shunt* capacitiva em relação ao impacto na Estabilidade de Tensão.

Os resultados obtidos com as análises feitas nesta primeira parte do procedimento proposto podem ser úteis na integração com outros procedimentos e ferramentas utilizados durante o planejamento da expansão dos SEP. Pode-se usar diretamente a seqüência da lista de barras candidatas ou o índice de classificação geral. A normalização desse índice facilita a integração com as demais análises necessárias durante o planejamento porque atribui uma “nota” ou grau de prioridade a cada barra, em uma escala conhecida de 0 a 1. De posse dessa informação o planejador pode estabelecer pesos para cada análise (estabilidade de tensão, harmônicos, transitórios, etc.) e selecionar as barras prioritárias em um estudo mais amplo.

O procedimento proposto considera nas análises todas as barras do tipo PQ. Porém, dependendo das características do sistema, o planejador tem a opção de não incluir nas análises subseqüentes as barras sem consumidores diretamente conectados. Para essas barras a faixa de tensão de operação é mais ampla, ficando limitadas pelas especificações dos equipamentos, em geral de 0,85 a 1,15 pu [CCPE 2002]. O planejamento da expansão procura compensar as barras suprimindo a potência reativa o mais próximo possível da carga, evitando assim a circulação de potência reativa pela rede. Desta forma o planejador pode priorizar as barras que possuam consumidores diretamente conectados.

4.3. MÓDULO (II): DETERMINAÇÃO DOS VALORES LIMITE PARA A COMPENSAÇÃO REATIVA *SHUNT* CAPACITIVA

As análises mostradas na seção anterior visam classificar as barras do sistema em estudo, de forma a determinar uma lista de barras mais propícias a receber a compensação reativa. Na seqüência do procedimento proposto o próximo passo é determinar o montante de potência reativa que deve ser alocado nas barras selecionadas pelo planejador, para se atingir a situação de perfil de tensão desejada, tal como mostrado na Figura 4.1(c).

A Figura 4.6 mostra em forma de fluxograma a seqüência básica de tarefas e decisões para este passo do procedimento proposto. A inserção dos dados, obtidos na etapa de classificação, está simbolizada de forma simplificada na primeira tarefa “Início”, admitindo-se que o passo anterior já tenha sido executado, ou que pelo menos alguma forma de classificação das barras já tenha sido utilizada.

A primeira decisão a ser tomada pelo planejador neste passo é a definição do conjunto de barras que serão consideradas em cada análise para escolha dos valores limite para a Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva. Por exemplo, pode-se escolher uma única barra por vez, avaliando o impacto que a compensação de cada barra provocará no sistema. Em outra situação, se existirem barras fortemente relacionadas, (“eletricamente próximas”) como as conectadas por linhas de transmissão curtas, ou se pelos índices obtidos durante o passo de classificação das barras o planejador identificou uma área ou região como crítica, pode-se optar por avaliar simultaneamente a compensação de duas ou mais barras. Essa decisão depende do contexto do estudo, do sistema avaliado e da percepção e experiência do planejador. Devido a problemas de convergência numérica, pode ser necessário reduzir o conjunto de barras selecionadas para a análise, até o limite mínimo de uma barra.

Como visto adiante, o cálculo dos valores limites para a compensação reativa é feito pelo método da bissecção ou dicotomia e, devido às características não-lineares dos SEP, o cálculo pode não convergir caso duas ou mais barras sejam selecionadas simultaneamente. Assim, do ponto de vista numérico, pode ser necessário reduzir o conjunto de barras para que a convergência seja atingida.

Ao final de cada etapa de estudo é possível reiniciar o processo adicionando-se outras compensações que se verificarem necessárias. Independentemente do conjunto de barras escolhido, o planejador deve estar atento ao impacto que novas compensações adicionadas provocam nas demais barras do sistema, verificando a necessidade de ajustes na compensação planejada em estudos anteriores.

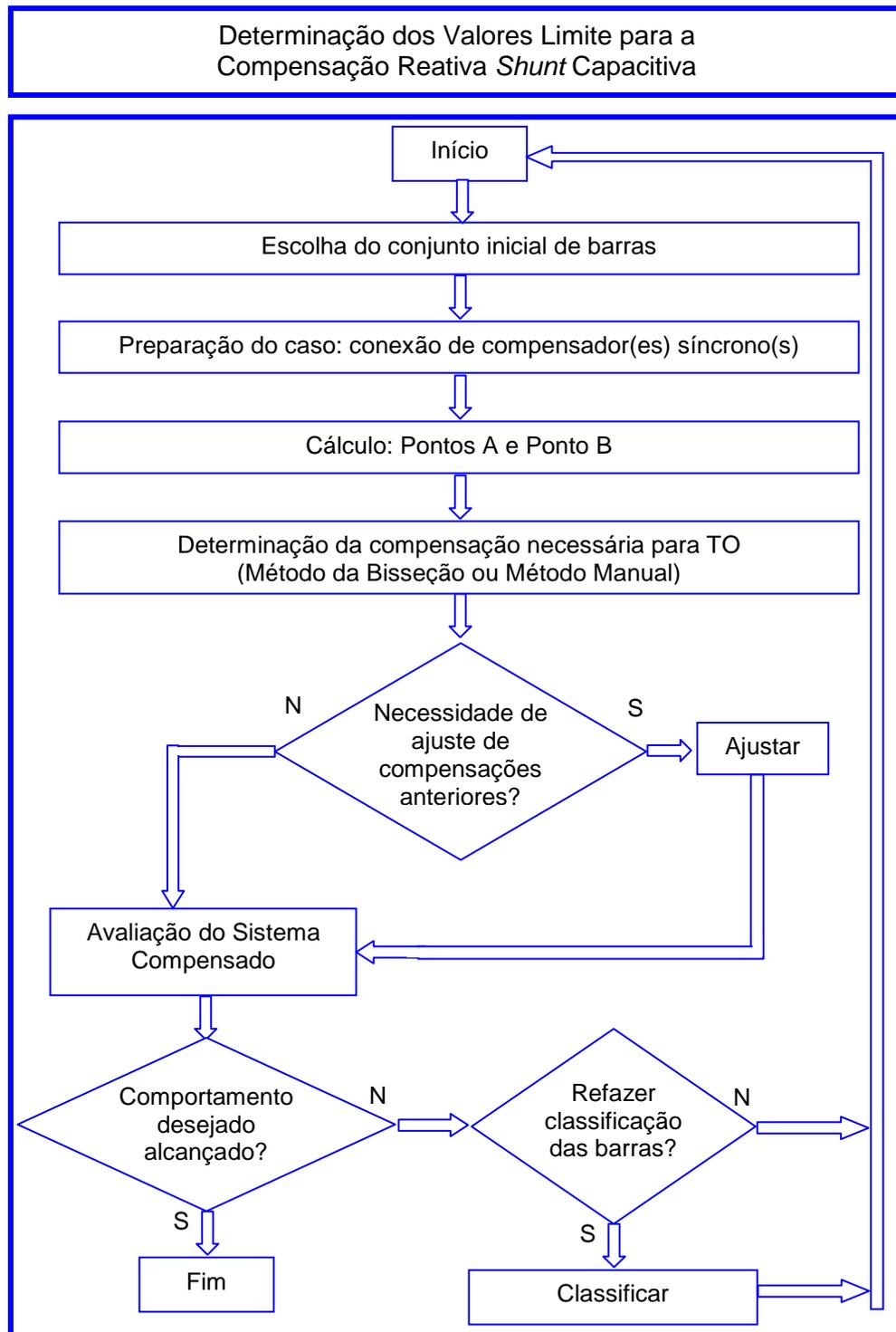


Figura 4.6 – Fluxograma: Determinação dos valores limite para a Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva

O cálculo do valor de injeção de potência reativa necessário para que a barra atinja a tensão objetivo não é uma tarefa simples. Entre os fatores complicadores podem-se citar a inexistência de um método direto para o cálculo, a não-linearidade dos SEP, a dependência da capacidade de fornecimento de reativo pelos bancos de capacitores em função da tensão na barra, a mudança no ponto de máximo carregamento do sistema em função da compensação reativa *shunt* capacitiva, etc. A idéia básica desta etapa do procedimento consiste em encontrar dois valores para a injeção de potência reativa, de modo a determinar uma faixa, e que a compensação desejada esteja contida dentro desta faixa. Em seguida, por aproximações sucessivas, convergir até a compensação desejada.

No procedimento aqui proposto, os dois valores de Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva, que definem a faixa retro descrita, são encontrados adicionando-se um compensador síncrono ideal a cada barra do conjunto selecionado para o estudo. A tensão de saída do compensador síncrono, ou seja, o valor de tensão controlado na barra deve ser ajustado para o valor escolhido como Tensão Objetivo. Assim a tensão permanecerá no valor escolhido durante o incremento de carga, desde que existam soluções válidas. A potência reativa de saída do compensador síncrono ideal não deve ser limitada.

Após ajustado o compensador síncrono ideal, passa-se ao cálculo do fluxo de potência continuado, respeitando-se as mesmas recomendações indicadas na seção 4.2.3 Passo 3 - Avaliação da Tensão no Ponto de Colapso, para incremento das potências dos geradores e das cargas.

Neste momento, torna-se importante observar que a mudança na configuração do sistema, causada pela adição da compensação reativa, provocará uma mudança no valor do ponto de máximo carregamento. Espera-se que essa mudança seja benéfica, ou seja, um incremento no valor do ponto de máximo carregamento, permitindo atender a maiores demandas de carga, sem tornar o sistema instável, ou elevar a tensão no ponto de máximo carregamento para a faixa de operação do sistema. Diante desta nova condição, a Tensão Objetivo deverá ser calculada pelo ponto de carregamento resultante da subtração do novo ponto de máximo carregamento, isto é, no máximo carregamento pós-compensação, pela margem de carregamento.

O ponto de máximo carregamento obtido como uso de compensadores síncronos ideais tende a ser mais elevado do que aquele que seria conseguido usando capacitores, uma vez que a injeção de potência reativa pelos geradores síncronos não está limitada pelo valor da tensão na barra como acontece com os capacitores.

Diante da dependência do ponto de máximo carregamento em relação aos valores da compensação podem-se estabelecer os dois pontos que definem a faixa de valores para o cálculo do valor limite da Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva. O primeiro ponto, mais conservador é quando se considera o carregamento de 95% do sistema com a configuração original. O segundo, de forma mais agressiva, é admitir 95% de carregamento com o sistema compensado pelos geradores síncronos. No procedimento proposto estes pontos são chamados de Ponto A e Ponto B, respectivamente.

Matematicamente, os pontos devem guardar entre eles a relação exibida nas equações (4.14) e (4.15), para potência e tensão respectivamente.

$$P_{PA} < P_{TO} < P_{PB} \quad (4.14)$$

Legenda:

P_{PA} : Potência no Ponto A

P_{TO} : Potência na Tensão Objetivo

P_{PB} : Potência no Ponto B

$$T_{PA} < TO < T_{PB} \quad (4.15)$$

Legenda:

T_{PA} : Tensão no Ponto A

T_O : Tensão Objetivo

T_{PB} : Tensão no Ponto B

A relação entre esses pontos e a Tensão Objetivo está ilustrada na Figura 4.7.

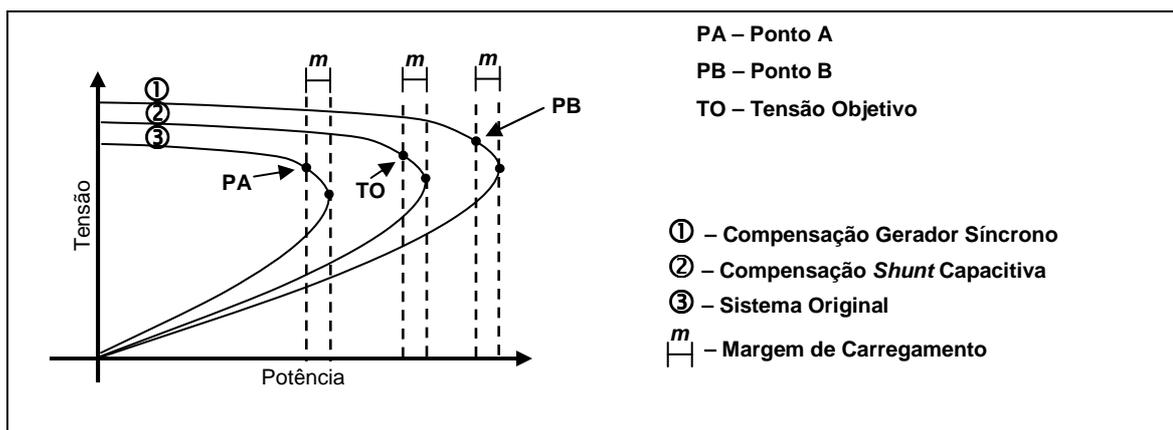


Figura 4.7 – Ponto A, Ponto B e Tensão Objetivo

Uma vez encontrados os carregamentos para os Pontos A e B, pode-se determinar o valor dos capacitores que injetariam a mesma potência reativa fornecida pelo gerador síncrono que foi inicialmente conectado à barra.

Além de propiciar uma forma de se encontrar o valor necessário para a Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva, a faixa de valores determinada pelos Pontos A e B, pode ser útil como informação complementar em outros estudos de planejamento de compensação. Em um estudo de otimização, por exemplo, pode-se usar esta faixa como um critério de restrição para a compensação.

*Esta característica do procedimento proposto está de acordo com o objetivo estabelecido para esta dissertação: apresentar um procedimento para avaliação do impacto da Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva na Estabilidade de Tensão que tenha a capacidade de ser integrado a outros procedimentos que avaliem os demais aspectos da compensação.*

O cálculo da potência reativa necessária para que a barra atinja a Tensão Objetivo pode ser feito por um cálculo numérico, estreitando-se sucessivamente a faixa inicialmente delimitada pelos pontos A e B, usando-se o Método da Bisseção, apresentado no Anexo B desta dissertação. Basicamente, esse método determina a raiz x de uma função $f(x)$ em um intervalo pré-estabelecido. A idéia é reduzir o intervalo por repetidas divisões ao meio, até que a função $f(x)$ seja nula dentro de uma certa tolerância. O uso do método visa proporcionar uma implementação computacional simples e direta do procedimento proposto, permitindo ao planejador obter o resultado desejado de forma automatizada. Para os casos de sistemas de menor complexidade, existe a possibilidade que o ajuste seja feito manualmente pelo planejador, uma vez que este, com sua experiência em relação ao comportamento do sistema, pode optar por ajustar o valor de forma manual, podendo com isso observar as alterações no estado do sistema.

Depois de encontrados os valores de compensação, o sistema deve ser avaliado, atentando-se para o perfil de tensão nas barras e verificando a necessidade da inserção de novas compensações. Neste momento pode-se observar se existem barras sem compensação com tensões consideravelmente abaixo da Tensão Objetivo, que surgem como candidatas naturais para mais uma “rodada” de estudo de compensação. Assim, o planejador pode de forma iterativa adicionar novas compensações até que o sistema alcance o comportamento desejado. Ressalta-se aqui a importância de sempre avaliar o impacto que novas compensações provocam naquelas adicionadas anteriormente.

Caso opte por adicionar novas compensações, o planejador deve decidir se irá repetir toda a etapa de classificação das barras mais propícias ou se usará a tabela já

obtida no passo anterior. Guardadas as devidas proporções, pode-se fazer uma analogia com o método de Newton-Raphson completo e o rápido, onde no primeiro caso a matriz jacobiana é calculada a cada iteração, enquanto no segundo é mantida fixa. A repetição do processo de classificação das barras permite ao planejador verificar as mudanças no comportamento do sistema, em relação às sensibilidades das barras e o Ponto de Máximo Carregamento, e se essas mudanças alteram a ordem de classificação. Por outro lado, os novos cálculos que deverão ser feitos na repetição do processo implicam mais esforço computacional. Desta forma, o planejador deve avaliar a necessidade de uma nova classificação das barras, considerando os aspectos particulares de cada caso de estudo como dimensão do sistema, número de barras que se deseja compensar, adequação a outros estudos, etc.

Em relação às características de implementação computacional, o fluxograma da Figura 4.6 facilita a observação de alguns aspectos relevantes. Procurou-se no fluxograma representar não apenas as funções e procedimentos computacionais, mas também os momentos em que a interação com o planejador é necessária. Em alguns momentos a decisão é do tipo binária, “sim” ou “não”. Porém, algumas das decisões implicam uma participação mais efetiva do planejador no processo. Por exemplo, durante a determinação da compensação necessária para a Tensão Objetivo, caso o planejador opte pelo Método Manual, será preciso fornecer como entrada de dados para continuidade da execução, os valores encontrados de forma manual. Outra situação semelhante é o caso de ajustes necessários em compensações anteriores.

Entre as tomadas de decisão, a representada pelo losango “Comportamento desejado alcançado?” merece comentário a parte, por definir o término da execução. O planejador deve estabelecer, de acordo com o objetivo do estudo, um critério de parada. Pode-se estabelecer, por exemplo:

- quantidade máxima total de potência reativa que pode ser alocada;
- perfil de tensão desejado em barras importantes do ponto de vista financeiro ou técnico;
- número máximo de iterações;
- número mínimo de barras com perfil de tensão adequado;
- parada manual.

Estabelecido(s) o(s) critério(s) de parada o planejador poderá decidir se o comportamento do sistema é satisfatório, com base nas informações obtidas pela tarefa “Avaliação do Sistema Compensado”.

4.4. CONCLUSÃO

O procedimento proposto neste capítulo para avaliação do impacto da Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva na Estabilidade de Tensão é formado por dois módulos: 1) Classificação - Escolha das Barras Candidatas à Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva e 2) Determinação dos Valores Limite para a Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva.

A primeira parte é responsável por indicar quais as barras mais propícias a receber a compensação, do ponto de vista da estabilidade de tensão. A classificação é feita utilizando-se análises sobre as sensibilidades das barras e da TPC, em dois pontos de carregamento distintos. Ao final deste passo é calculado um índice de classificação geral para cada barra, obtendo-se assim uma lista onde as barras mais propícias são listadas em ordem decrescente.

A determinação dos valores de compensação máximos para que o sistema não apresente problemas relacionados a estabilidade de tensão, tais como TPC dentro da faixa de operação do sistema, é feito na segunda parte do procedimento proposto. São calculados dois valores de compensação de modo a estabelecer uma faixa que contenha o valor procurado. Em seguida, o valor é determinado por um processo de cálculo numérico ou por procura manual.

Os passos podem ser repetidos e combinados até que o sistema atinja o comportamento desejado.

As características, detalhes de implementação, seqüência de execução são discutidos, justificando o uso dos índices e análises escolhidos para compô-lo. Ênfase é dada em seus aspectos de segurança, visando sempre um planejamento da expansão que garanta a operação segura do sistema, além das capacidades de integração com outros estudos elaborados durante o planejamento da expansão dos sistemas.

O procedimento foi elaborado desde o início com a previsão de implementação por algoritmos computacionais. Contudo, não existe a intenção de o procedimento ser um

processo totalmente automatizado, e sim um auxílio ao planejador na tarefa de planejamento da expansão. Assim é necessária a interação com o planejador para a tomada de decisão em alguns passos.

Outra característica importante a se destacar é possibilidade de integração com outras análises que contemplem os demais aspectos que devem ser levados em consideração quando da elaboração dos planos de expansão. As informações resultantes da aplicação do procedimento proposto podem ser reunidas com avaliações e outros procedimentos que considerem o impacto da Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva do ponto de vista dos harmônicos, transitórios, fator de potência e fluxo de potência ótimo.

Tendo sido discutidos os aspectos teóricos do procedimento proposto, apresenta-se no capítulo seguinte a aplicação a um sistema de testes, detalhando os passos, cálculos e verificando-se os resultados obtidos.

5 – APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO PROPOSTO

5.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a aplicação do procedimento proposto. O sistema elétrico escolhido para as simulações é o IEEE *New England* – 39 barras. Este sistema tem sido utilizado em vários trabalhos relacionados ao tema estabilidade de tensão [Athay 1979], [Pai 1989], [Begovic 1992], [Alvarado 1994], [Vu 1999], [Affonso 2004]. O sistema é composto por 39 barras, 10 geradores e 46 linhas de transmissão. Os dados de entrada para o caso base estão apresentados no Anexo C, e foram obtidos em [IEEE 39 barras]. A Figura 4.1 exibe o diagrama unifilar do referido sistema. Nas simulações apresentadas neste capítulo, utiliza-se o modelo de barra *slack* única/concentrada. Para o cálculo do fluxo de potência continuado, o parâmetro de incremento de carga é aplicado também à geração de potência ativa de cada gerador.

O capítulo está estruturado em tópicos relativos ao ambiente computacional utilizado nas simulações, aos resultados das simulações dos módulos do procedimento (escolha das barras e dos limites de compensação) e à análise dos resultados da aplicação da proposta.

5.2. AMBIENTE COMPUTACIONAL

As simulações foram realizadas nos *softwares Matlab e GNU Octave*, em conjunto com o *toolbox “PSAT - Power System Analysis Toolbox”*, que é compatível com ambos ambientes computacionais. O *toolbox “PSAT”* é uma ferramenta para simulações e análises de sistemas elétricos de potência. Estão disponíveis rotinas para cálculo de fluxo de potência (Newton-Raphson completo e desacoplado rápido), fluxo de potência continuado, fluxo de potência ótimo, análise de estabilidade para pequenas perturbações, além de simulações no domínio do tempo [PSAT 2006].

O procedimento proposto pode ser implementado em várias tipos de ambientes computacionais e com diferentes linguagens de programação. Isso permite a sua integração com o aplicativo PlanEx [VALE 2003] e [P&D 2004b], desenvolvido no LRC/UFMG, ou com outros aplicativos comerciais como PSS/E [PSS/E 2001]. A escolha do ambiente *Matlab/GNU Octave* foi feita por se tratar de trabalho acadêmico, onde é necessária uma maior flexibilidade durante os desenvolvimentos, sem a necessidade de disponibilizar um aplicativo diretamente executável e interpretado pelo sistema operacional.

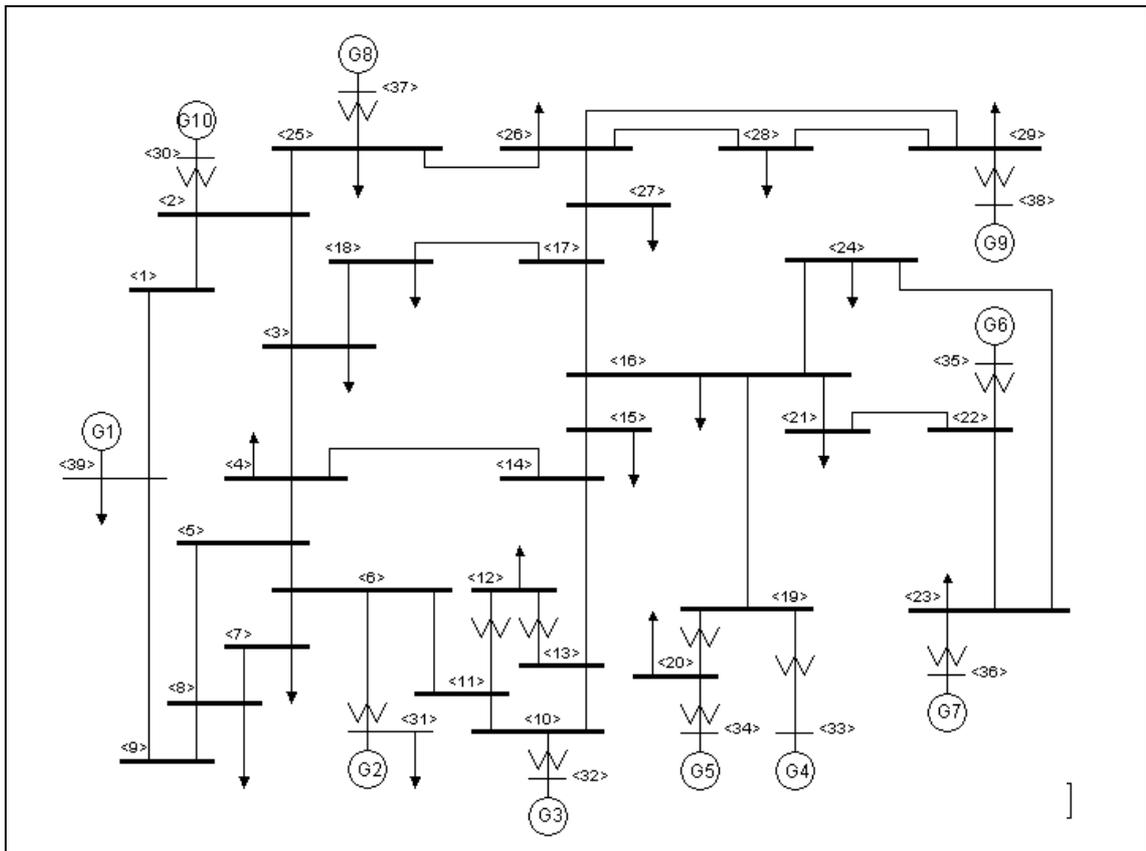


Figura 5.1 – Sistema elétrico de potência IEEE 39 barras

5.3. ESCOLHA DAS BARRAS CANDIDATAS À COMPENSAÇÃO REATIVA SHUNT CAPACITIVA

Primeiramente foi simulado o caso base, utilizando-se o método de Newton-Raphson completo, como forma de iniciar as variáveis internas do programa, e permitir um diagnóstico preliminar da situação do sistema. Como pode ser visto na Tabela 5.1 o sistema opera com baixo carregamento, com perdas negativas de potência reativa indicando que as linhas de transmissão estão gerando potência reativa.

Tabela 5.1 – Sumário do Fluxo de Potência para o Caso Base

	Pot. Ativa(pu)	Pot. Reativa(pu)
Geradores	61,3092	11,6962
Carga	60,889	14,043
Perdas	0,4202	-2,3468

Os autovalores da matriz jacobiana do fluxo de potência estão plotados na Figura 5.2, sendo que o menor autovalor tem módulo igual a 9,49. Nota-se que devido à estrutura quase-simétrica da matriz os autovalores têm parte imaginária nula, com valores similares aos que seriam encontrados com a decomposição por valores singulares [Cañizares 1996]. Observa-se que todos os autovalores são positivos indicando a estabilidade do sistema para este nível de carregamento.

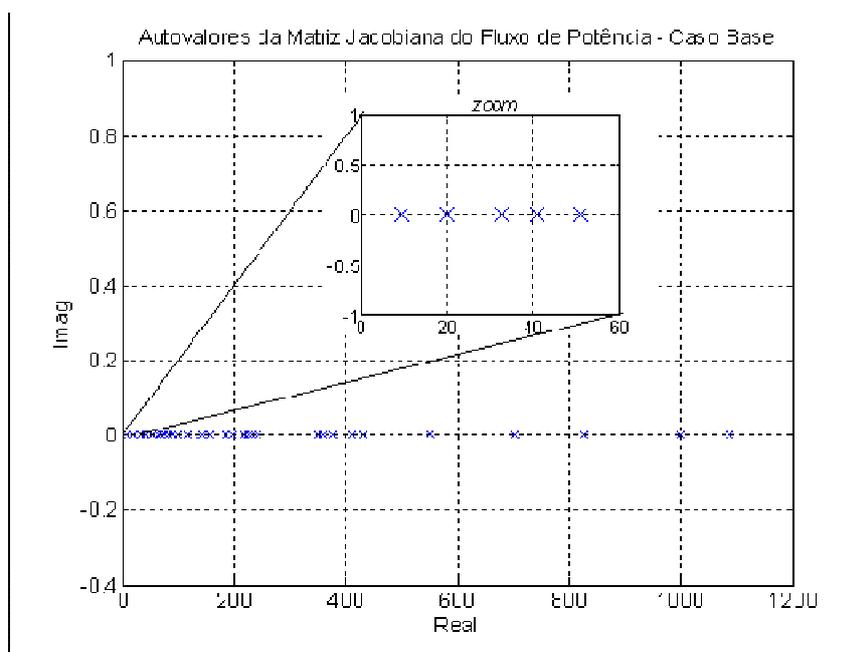


Figura 5.2 – Autovalores da Matriz Jacobiana – Caso Base

A Figura 5.3 apresenta o perfil de tensão nas barras do sistema. A barra 19 apresenta o maior valor de tensão, em torno de 1,11 pu, porém não possui nenhuma carga a ela conectada, mesmo sendo uma barra do tipo PQ. As barras 31 e 32 manifestam as menores tensões (0,98 pu), contudo são tensões controladas, mantidas fixas pelos geradores G2 e G3. Estas barras estão conectadas a transformadores com *tap* igual a 1,07, que elevam a tensão para as barras subsequentes.

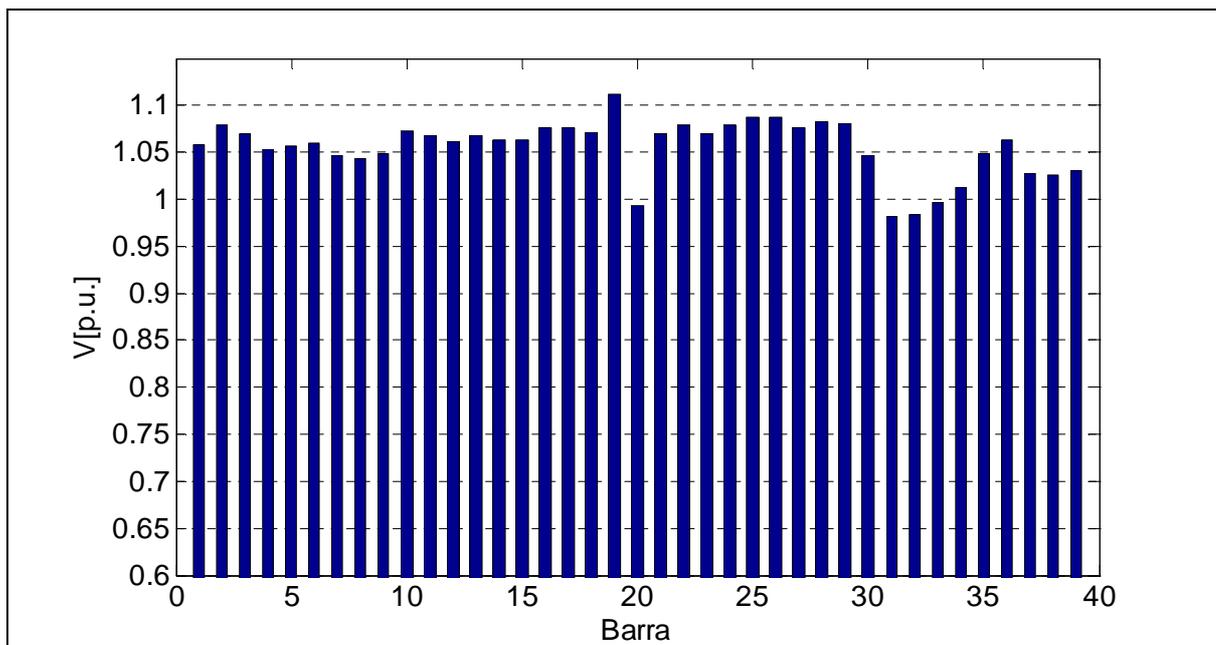


Figura 5.3 – Perfil de Tensão (módulo) nas Barras – Caso Base

Em seguida procedeu-se a um aumento de 25% da carga para avaliação do sistema sob uma situação de maior estresse. Nestas condições o sistema apresenta perdas de potência reativa elevadas, sendo superiores à potência reativa consumida pelas cargas, conforme indicado na Tabela 5.2. A variação total das perdas de potência reativa em módulo foi de 20,7214 pu, o que corresponde a um aumento de aproximadamente 880% em relação ao caso base. O perfil da tensão nas barras também foi alterado, como mostrado pela Figura 5.4. As barras de 4 a 8 experimentaram as maiores quedas de tensão, com reduções entre 9% e 11%. Para este carregamento o menor autovalor da matriz jacobiana tem módulo igual a 6,35, indicando que o sistema ainda permanece estável.

Tabela 5.2 – Sumário do Fluxo de Potência para Acréscimo de 25% de Carga

	Pot. Ativa(pu)	Pot. Reativa(pu)
Geradores	76,7876	35,9283
Carga	76,1113	17,5538
Perdas	0,67637	18,3746

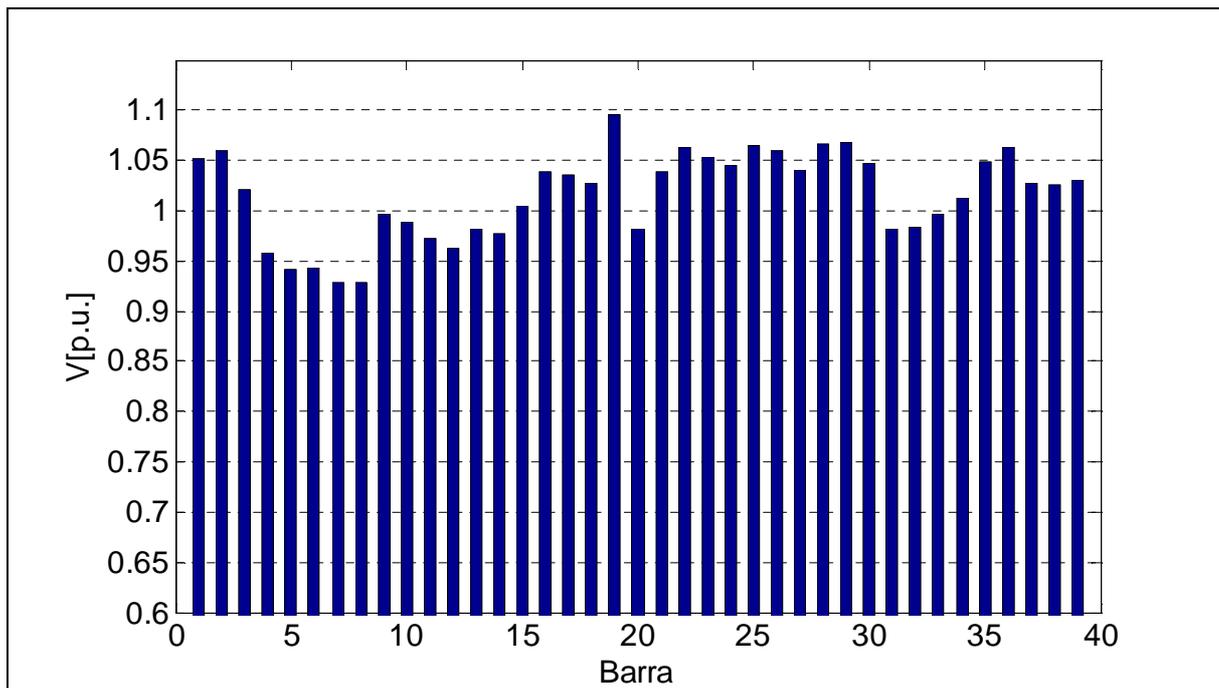
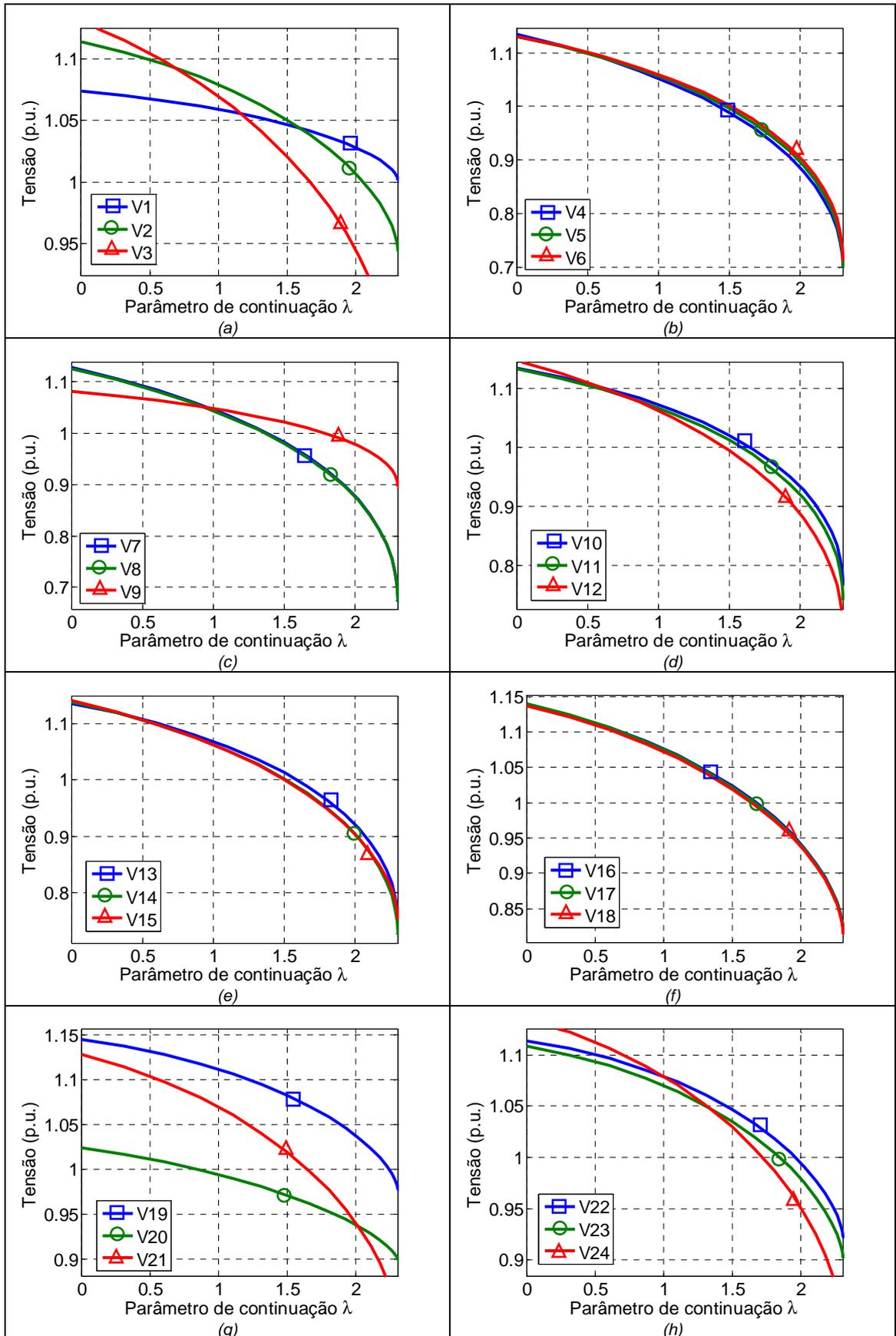


Figura 5.4 – Perfil de Tensão (módulo) nas Barras – Acréscimo de 25% de Carga

Utilizando-se o método de cálculo do fluxo de potência continuado obteve-se a Tensão no Ponto de Colapso (TPC) para cada uma das barras do tipo PQ. O parâmetro de continuação λ (lambda) foi aplicado a todas as cargas, mantendo-se o fator de potência constante. O cálculo foi feito iniciando-se com $\lambda = 0$ e progredindo até o momento da bifurcação, ou seja, a parte inferior da curva PV não foi traçada. O caso base corresponde nos gráficos da Figura 5.5 ao valor de $\lambda = 1$.

As curvas PV encontradas durante o cálculo estão exibidas na Figura 5.5. Como forma de normalizar os gráficos, foi utilizado o parâmetro λ substituindo as potências ativas de cada barra no eixo das abscissas. Na referida figura, as barras foram agrupadas em conjuntos de três ou duas barras para permitir maior facilidade na visualização dos resultados. Conforme esperado, as curvas apresentaram o comportamento clássico das curvas PV para barras sem sobrecompensação. Em alguns conjuntos as barras apresentaram comportamento quase idêntico, como é o caso dos gráficos “b”, “e” e “f”. Esses conjuntos são compostos por barras de carga e de passagem. Nota-se, entretanto, que nos gráficos onde estão presentes barras PQ ligadas a barras PV por meio de transformadores, o comportamento tende a diferenciar-se das demais barras PQ, uma vez que têm suas tensões fortemente influenciadas pelo ajuste da tensão de referência (*setpoint*) das respectivas barras PV. Este comportamento pode ser visto nos gráficos “a”, “g”, “h” e “i”.



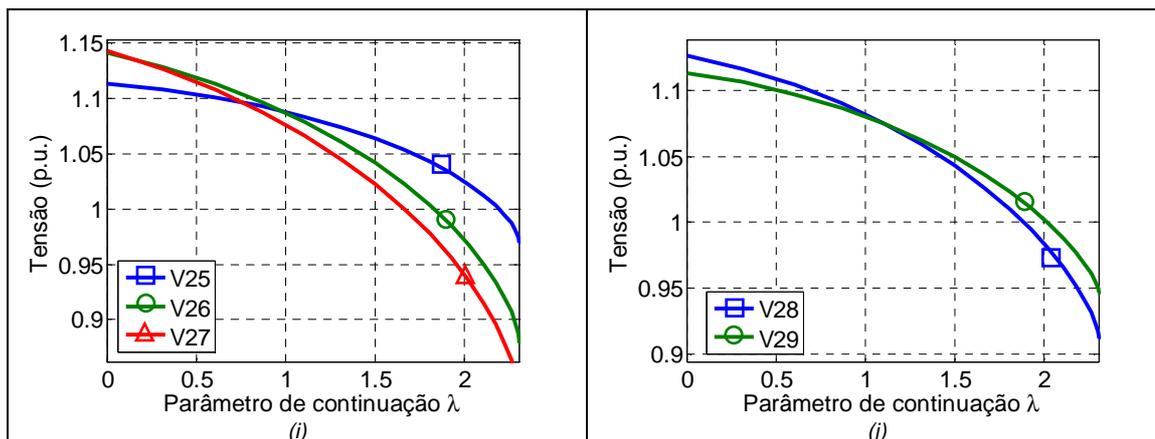


Figura 5.5 – Curvas PV das Barras do Tipo PQ

A partir dos valores da TPC foi traçado o gráfico da Figura 5.6 e preparada a Tabela 5.3, de forma a classificar as barras e/ou áreas com as menores tensões e, portanto, mais indicadas para alguma ação visando à melhoria do perfil de tensão. Os resultados mostram que as barras 7, 8, 12 e 4 surgem como candidatas à compensação do ponto de vista da TPC. As barras 5 e 6 apesar de também apresentarem tensões reduzidas, não possuem cargas diretamente conectadas. Desta forma, estas barras não foram priorizadas no estudo.

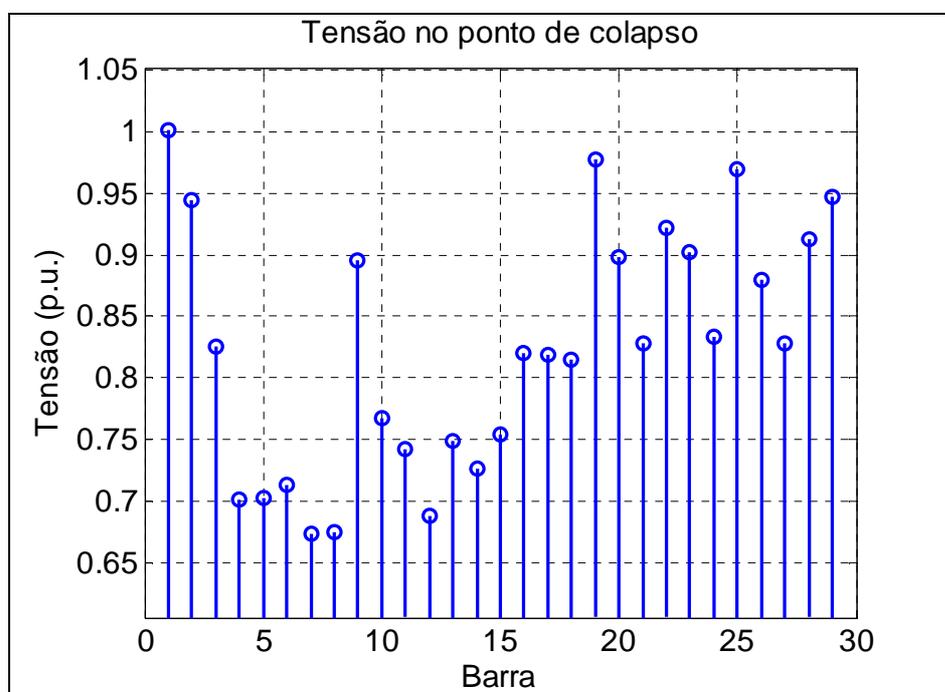


Figura 5.6 – Tensão no Ponto de Colapso - TPC

Tabela 5.3 – Classificação das Barras de acordo com a TPC

Número da barra	TPC	Número da barra	TPC	Número da barra	TPC
7	0,6736	10	0,7680	20	0,8983
8	0,6750	18	0,8152	23	0,9025
12	0,6890	17	0,8192	28	0,9120
4	0,7015	16	0,8199	22	0,9223
5	0,7025	3	0,8254	2	0,9439
6	0,7136	21	0,8283	29	0,9466
14	0,7274	27	0,8283	25	0,9697
11	0,7431	24	0,8336	19	0,9767
13	0,7486	26	0,8794	1	1,0015
15	0,7542	9	0,8959		

A Tabela 5.4 exibe o somatório de carga, geração e perda, tanto de potência ativa quanto de potência reativa do sistema no ponto de máximo carregamento. Como pode ser visto, na configuração original, ou seja, sem a adição de nenhum tipo de compensação, a carga máxima de potência ativa que pode ser atendida é de 140,21 pu ou, considerando a potência aparente, o valor é de 143,89 pu. Observa-se na Tabela 5.4 que apenas 27,7% da potência reativa gerada chegam efetivamente à carga, a maior parte compõe a parcela de perdas.

Tabela 5.4 – Sumário do Sistema no Ponto de Máximo Carregamento

	Pot. Ativa(pu)	Pot. Reativa(pu)
Geradores	143,8531	116,6762
Carga	140,2102	32,3371
Perdas	3,6430	84,3392

Em seguida, a sensibilidade das barras em relação à tensão foi avaliada por meio dos elementos do vetor tangente, utilizado no passo da predição no cálculo do fluxo de potência continuado.

Neste ponto escolheram-se novamente duas condições de carregamento do sistema: caso base e acréscimo de 25% de carga. Cabe aqui ressaltar que a escolha destes valores de carregamento depende da avaliação do planejador, levando em consideração o conhecimento do sistema em estudo, a previsão de obras, tais como: ampliação da capacidade de geração de usinas ou construção de novas unidades, construção de LTs ou reforços das já existentes, horizonte temporal de planejamento, previsão de crescimento de consumo, etc. Deve-se escolher uma condição de carregamento que seja particularmente interessante para o planejador. Nesta dissertação, considerou-se uma situação hipotética para um planejamento de cinco anos. Supondo de maneira aproximada um crescimento anual da carga demandada para o sistema em

estudo semelhante ao crescimento previsto para o Brasil [MME 2006], pode-se considerar 4,5% de crescimento médio anual. Em um cenário futuro de cinco anos tem-se aproximadamente 25% de crescimento total da carga no final do período.

De acordo com a Figura 5.7 pode-se verificar que as barras de número 4 a 14 possuem uma sensibilidade superior às demais. Observando o diagrama unifilar da Figura 5.1 nota-se que a área ocupada por estas barras corresponde à porção inferior esquerda do grafo. A demanda total de potência dessas barras, para potência ativa e potência reativa, respectivamente, é de 12,6430 pu e 5,3200 pu no caso base, e de 29,1130 pu e 12,2504 pu no ponto de máximo carregamento. Tomando as linhas de transmissão que interligam as barras desta área somam-se perdas de potência ativa e potência reativa, respectivamente de 0,0538 pu e -0,9423 pu no caso base, e de 0,7438 pu e 9,3914 pu no ponto de máximo carregamento. Assim, considerando as cargas e as perdas dessa área, tem-se um déficit de potência reativa de 21,6418 pu.

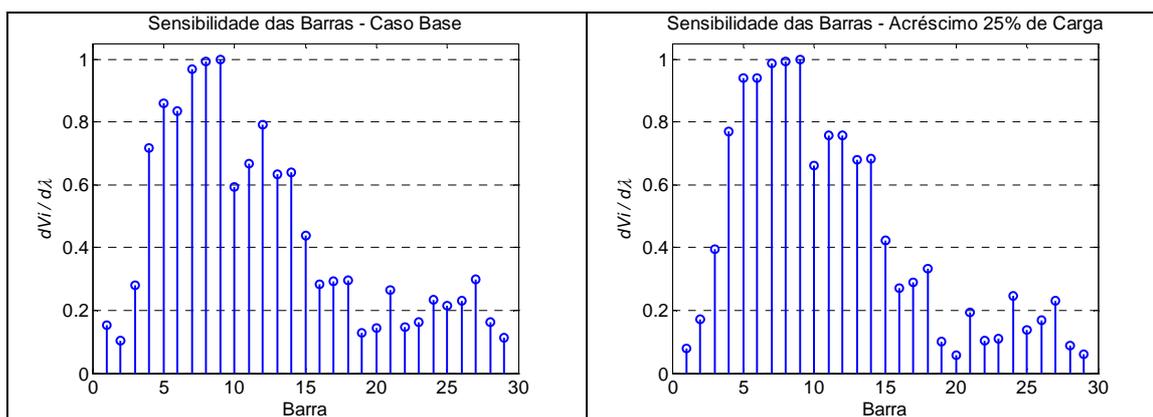


Figura 5.7 – Sensibilidade das Barras em Relação a Tensão ($dV/d\lambda$)

A classificação das barras em relação à sensibilidade da tensão está exibida na Tabela 5.5 em ordem decrescente, isto é, da maior sensibilidade para a menor. As três primeiras posições da tabela permaneceram inalteradas tanto para o caso base quanto para um acréscimo de 25% na carga. A partir da quarta posição aparecem algumas permutas de posições. Contudo, o conjunto de barras mais sensíveis permanece o mesmo, conforme já indicado visualmente na Figura 5.7.

Essas permutas de posições, em conjunto com os resultados obtidos para os módulos de tensão no ponto de colapso, indicam a necessidade da composição de um índice de classificação geral que considere os pesos relativos das sensibilidades encontradas para cada condição de carregamento analisada e para a TPC.

Tabela 5.5 – Classificação das Barras de acordo com a Sensibilidade ($dV/d\lambda$)

Caso Base			Acréscimo de 25% na carga		
Número da Barra	Elem. Vetor Tangente	Sensibilidade	Número da Barra	Elem. Vetor Tangente	Sensibilidade
9	-0,1581	1,0000	9	-5,4851	1,0000
8	-0,1570	0,9931	8	-5,4473	0,9931
7	-0,1530	0,9677	7	-5,4127	0,9868
5	-0,1359	0,8593	6	-5,1520	0,9393
6	-0,1318	0,8336	5	-5,1487	0,9387
12	-0,1253	0,7927	4	-4,2216	0,7696
4	-0,1132	0,7158	11	-4,1552	0,7575
11	-0,1056	0,6680	12	-4,1510	0,7568
14	-0,1011	0,6396	14	-3,7389	0,6816
13	-0,1001	0,6331	13	-3,7340	0,6808
10	-0,0940	0,5944	10	-3,6205	0,6601
15	-0,0692	0,4379	15	-2,3143	0,4219
27	-0,0473	0,2989	3	-2,1739	0,3963
18	-0,0469	0,2965	18	-1,8236	0,3325
17	-0,0462	0,2920	17	-1,5895	0,2898
16	-0,0446	0,2819	16	-1,4918	0,2720
3	-0,0441	0,2789	24	-1,3538	0,2468
21	-0,0417	0,2639	27	-1,2606	0,2298
24	-0,0372	0,2352	21	-1,0681	0,1947
26	-0,0367	0,2319	2	-0,9390	0,1712
25	-0,0342	0,2165	26	-0,9291	0,1694
28	-0,0256	0,1619	25	-0,7528	0,1372
23	-0,0255	0,1613	23	-0,5948	0,1084
1	-0,0244	0,1541	22	-0,5728	0,1044
22	-0,0230	0,1457	19	-0,5579	0,1017
20	-0,0228	0,1443	28	-0,4923	0,0898
19	-0,0203	0,1286	1	-0,4378	0,0798
29	-0,0178	0,1128	29	-0,3380	0,0616
2	-0,0165	0,1043	20	-0,3224	0,0588

Utilizando as análises anteriores, chega-se ao índice de classificação geral que indica as barras mais propícias a receber a Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva. A Tabela 5.6 apresenta os valores dos índices de classificação geral obtidos, conforme detalhado no capítulo anterior, pela multiplicação da ordem relativa de cada barra nas tabelas de análise pelo vetor tangente (sensibilidade de tensão) e pelo fluxo de potência continuado (TPC).

A Tabela 5.6 está estruturada de forma a permitir a visualização dos detalhes referentes a cada uma das três análises que compõem o índice de classificação geral. A primeira coluna identifica o número da barra já ordenada pelo Índice de Classificação Geral. Em seguida é mostrada a análise, usando o Ponto de Máximo carregamento, em

duas colunas, ordem da barra e TPC. Para a análise de sensibilidade é usado o mesmo formato: uma coluna com a ordem da barra e outra com o valor da sensibilidade calculada. O estudo de sensibilidade é mostrado para as duas condições: caso base e acréscimo de 25% na carga. As duas últimas colunas dizem respeito ao índice propriamente dito, com os valores totais e os normalizados.

Tabela 5.6 – Classificação Geral das Barras

Número da Barra	Fluxo de Potência Continuado		Análise pelo vetor tangente				Índice de Classificação Geral	
	Ordem	TPC	Caso Base		Acréscimo de 25% na carga		Total	Norm.
			Ordem	Sensibilidade	Ordem	Sensibilidade		
8	2	0,6750	2	0,9931	2	0,9931	8	1,000000
7	1	0,6736	3	0,9677	3	0,9868	9	0,888889
9	20	0,8959	1	1,0000	1	1,0000	20	0,400000
5	5	0,7025	4	0,8593	5	0,9387	100	0,080000
6	6	0,7136	5	0,8336	4	0,9393	120	0,066667
12	3	0,6890	6	0,7927	8	0,7568	144	0,055556
4	4	0,7015	7	0,7158	6	0,7696	168	0,047619
11	8	0,7431	8	0,6680	7	0,7575	448	0,017857
14	7	0,7274	9	0,6396	9	0,6816	567	0,014109
13	9	0,7486	10	0,6331	10	0,6808	900	0,008889
10	11	0,7680	11	0,5944	11	0,6601	1331	0,006011
15	10	0,7542	12	0,4379	12	0,4219	1440	0,005556
18	12	0,8152	14	0,2965	14	0,3325	2352	0,003401
17	13	0,8192	15	0,2920	15	0,2898	2925	0,002735
3	15	0,8254	17	0,2789	13	0,3963	3315	0,002413
16	14	0,8199	16	0,2819	16	0,2720	3584	0,002232
27	17	0,8283	13	0,2989	18	0,2298	3978	0,002011
21	16	0,8283	18	0,2639	19	0,1947	5472	0,001462
24	18	0,8336	19	0,2352	17	0,2468	5814	0,001376
26	19	0,8794	20	0,2319	21	0,1694	7980	0,001003
23	22	0,9025	23	0,1613	23	0,1084	11638	0,000687
25	27	0,9697	21	0,2165	22	0,1372	12474	0,000641
28	23	0,9120	22	0,1619	26	0,0898	13156	0,000608
22	24	0,9223	25	0,1457	24	0,1044	14400	0,000556
2	25	0,9439	29	0,1043	20	0,1712	14500	0,000552
20	21	0,8983	26	0,1443	29	0,0588	15834	0,000505
1	29	1,0015	24	0,1541	27	0,0798	18792	0,000426
19	28	0,9767	27	0,1286	25	0,1017	18900	0,000423
29	26	0,9466	28	0,1128	28	0,0616	20384	0,000392

5.4. ESCOLHA DOS VALORES LIMITE PARA A COMPENSAÇÃO REATIVA *SHUNT* CAPACITIVA

Na Tabela 5.6 estão incluídas todas as barras do tipo PQ pertencentes ao sistema em estudo, contudo neste tópico serão priorizadas as barras que possuem carga diretamente conectada.

Inicialmente são escolhidas para a Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva as barras 8 e 7, conforme a classificação apresentada na Tabela 5.6. Após a adição da compensação o sistema será reavaliado, indicando ou não a necessidade de novas compensações. Conforme descrito no capítulo anterior, a escolha do conjunto de barras inicial para a compensação depende dos resultados obtidos na análise e do conhecimento do planejador em relação ao sistema. Pode-se adotar como padrão a escolha de uma barra por vez. Neste estudo optou-se por escolher inicialmente duas barras devido à “proximidade elétrica” entre elas, ou seja, estão conectadas por uma linha de transmissão com uma impedância relativamente pequena, além de terem apresentado índices muito próximos na análise do tópico anterior.

São utilizados como parâmetros, para definição do limite de compensação, os valores de 5% de margem de carregamento em relação ao ponto de colapso, e 0,90 pu como valor máximo da tensão neste ponto (Tensão Objetivo).

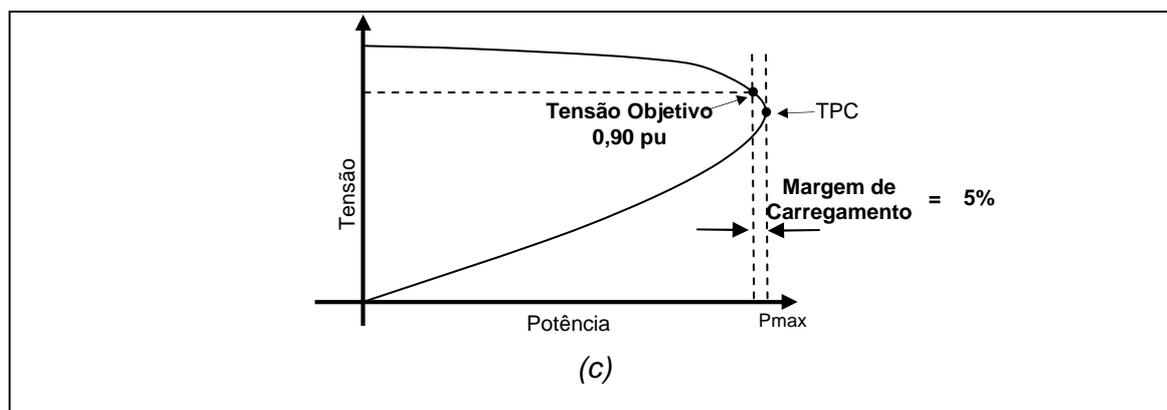


Figura 5.8 – Valores escolhidos para margem de carregamento e tensão objetivo

Uma vez definidos os parâmetros Tensão Objetivo e Margem de Carregamento e selecionadas as barras alvos passa-se então à fase de simulações. Uma estimativa inicial do montante de injeção de reativo necessário em cada barra, para que a tensão desejada seja alcançada, pode ser obtida pela conexão de geradores síncronos ideais (gerando

apenas potência reativa) nas barras com os devidos ajustes de tensão, sendo para este caso 0,90 pu (Tensão Objetivo). Vale ressaltar que com a adição da compensação, seja por capacitores ou por geradores síncronos, espera-se um incremento no valor do ponto de máximo carregamento. Assim, a margem de 5% deve ser calculada com base na nova condição, isto é, no valor de máximo carregamento pós compensação.

Um novo cálculo do fluxo de potência continuado foi realizado, acrescentando os geradores descritos acima. Nos gráficos da Figura 5.9 estão traçados os valores de potência reativa injetada pelos geradores síncronos em relação ao parâmetro de continuação. Definiu-se como “A” o ponto de 95% de carregamento do sistema original e como “B” o ponto de 95% de carregamento do sistema compensado pelos geradores. Analisando os pontos, nota-se que para manter a tensão das barras 8 e 7 em 0,9 pu é necessária uma injeção de potência reativa, em pu, de 0,30 (Ponto A); 3,34 (Ponto B) e 0,44 (Ponto A); 4,03 (Ponto B), respectivamente.

Como constatação imediata tem-se que a barra 8 precisa de um valor menor de potência reativa injetada, quando comparada com a barra 7, para manter o mesmo nível de tensão. Este fato corrobora os resultados obtidos nas análises anteriores que indicavam a maior sensibilidade da barra 8 em relação à tensão, ou seja, uma mesma injeção de potência reativa provoca maior variação da tensão na barra 8 do que na barra 7. Além disto, a barra 8 já apresentava uma TPC ligeiramente superior que a da barra 7 na configuração original do sistema.

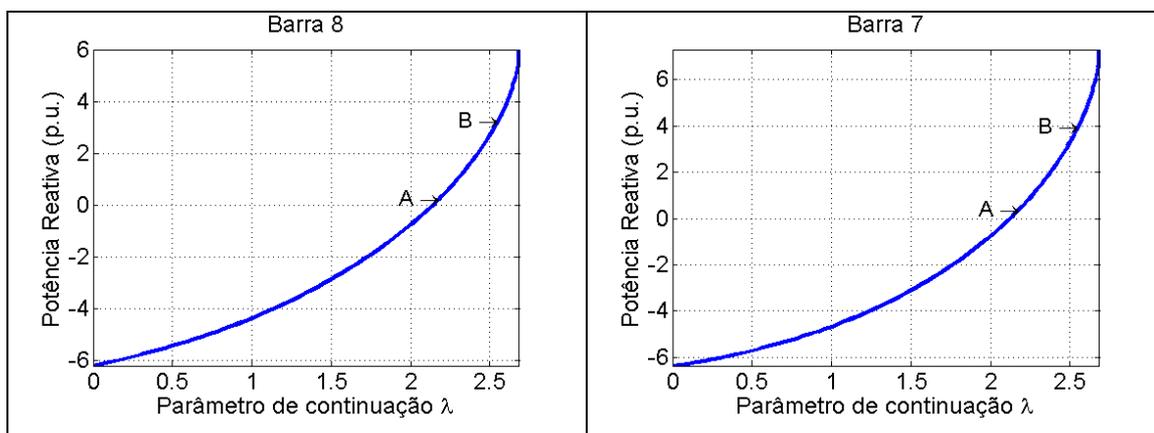


Figura 5.9 – Intervalo dos Valores para Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva

A partir dos valores de injeção de potência reativa obtidos pelos gráficos da Figura 5.9, e indicados pelos Pontos A e B, calculou-se a susceptância dos capacitores para a Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva pela equação (5.1).

$$Q = bV^2$$

Legenda:

Q: Potência Reativa

(5.1)

b: susceptância

V: Tensão

De posse dos valores das susceptâncias, os capacitores foram adicionados ao sistema. Em seguida, uma nova simulação foi realizada para observação do comportamento da tensão nesta nova condição. Os gráficos da Figura 5.10 e da Figura 5.11 exibem as curvas PV das barras 7 e 8, para as compensações calculadas pelos pontos A e B (Figura 5.9). As indicações nos gráficos correspondem a uma margem de 5% do carregamento máximo alcançado pelo sistema para cada compensação.

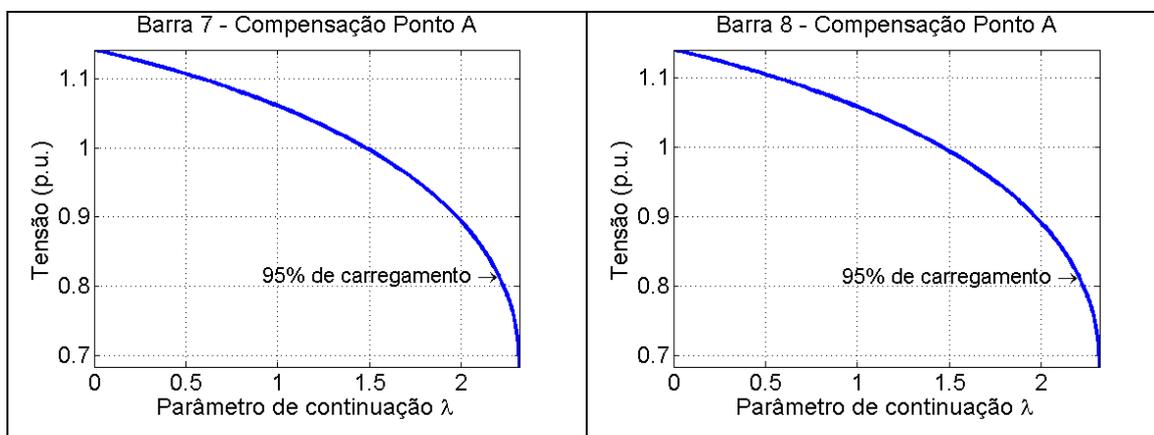


Figura 5.10 – Resposta das Barras 7 e 8 - Compensação calculada pelo ponto A

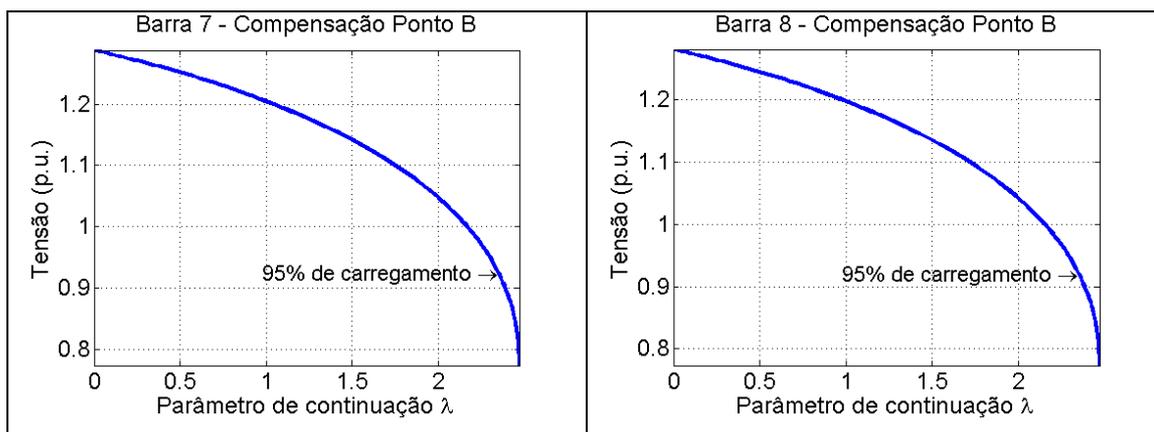


Figura 5.11 – Resposta das Barras 7 e 8 - Compensação calculada pelo ponto B

Como pode ser observado na Tabela 5.7, o valor objetivo de 0,9 pu para a tensão está contido dentro da faixa delimitada pelos pontos A e B. Pode-se dizer que o valor de compensação, para que o objetivo seja alcançado, está mais próximo do ponto B.

Tabela 5.7 – Tensão (pu) com 95% de carregamento

	Compensação - Ponto A	Compensação - Ponto B
Barra 7	0,82	0,93
Barra 8	0,82	0,92

Após os ajustes obteve-se a tensão desejada no ponto de 95% do carregamento máximo, como pode ser observado pela Figura 5.12. Para este carregamento os capacitores *shunt* conectados às barras 7 e 8 injetam ao sistema 3,46 pu e 2,84 pu de potência reativa, respectivamente.

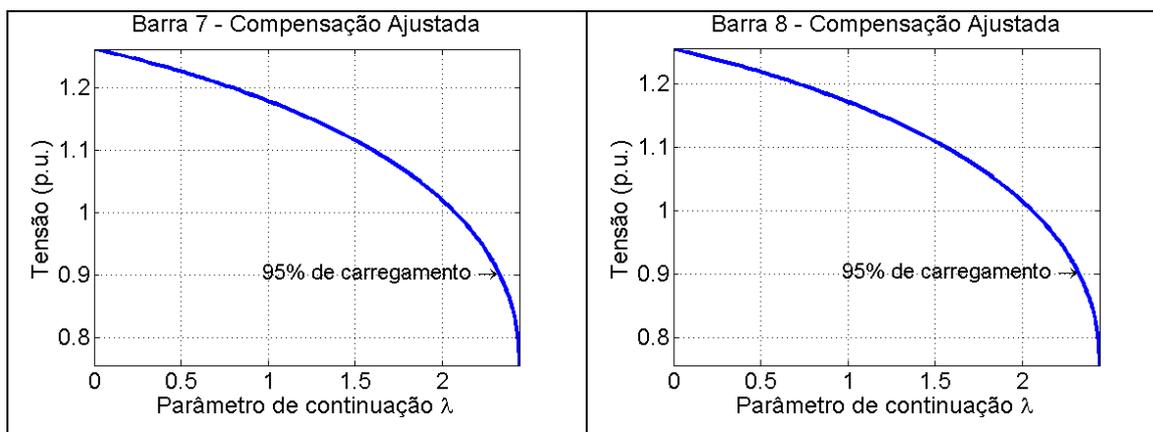


Figura 5.12 – Resposta das Barras 7 e 8 - Compensação Ajustada

Ao visualizar as tensões nas barras de carga, exibidas pela Figura 5.13, nota-se que as tensões foram elevadas, quando comparadas com a simulação do sistema original. Após os ajustes obteve-se a tensão desejada no ponto de 95% do carregamento máximo, como pode ser observado pela Figura 5.12. As barras 1, 2, 9 e 19 apresentam tensão elevada, contudo não possuem carga diretamente conectada. A barra 25 também exibe uma grande magnitude da tensão e possui uma carga ligada diretamente, porém, está ligada a um transformador que por sua vez está ligado a uma barra PV (barra 37). Neste caso, em virtude da tensão controlada em um dos terminais do transformador, a compensação reativa tem pouca influência sobre a tensão da barra 25.

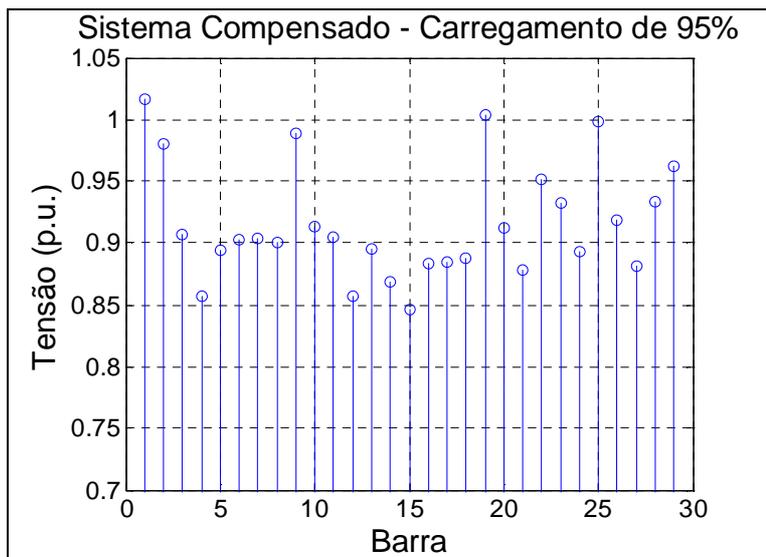
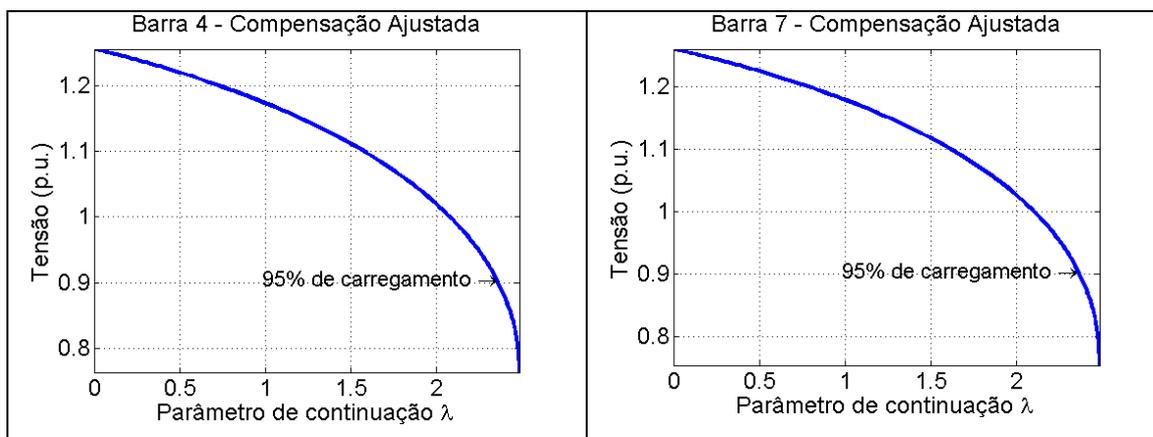


Figura 5.13 – Tensão Após Ajuste de Compensação (barras 7 e 8) – 95% de Carregamento Máximo

Ainda em relação ao gráfico da Figura 5.13, considerando a região entre as barras 4 e 14, inicialmente detectada como mais sensível, observa-se que as barras 4 e 12 ainda possuem uma margem de tensão considerável, em relação ao patamar de 0,9 pu, indicando que as mesmas podem receber compensação de potência reativa de forma a melhorar o perfil de tensão. Desta forma, repetiu-se o processo aplicado às barras 7 e 8 para as barras 4 e 12. Neste caso, foi necessário reajustar a compensação feita inicialmente, de forma a impedir que a tensão nas barras 7 e 8 apresentasse uma magnitude maior que 0,9 pu na condição de carregamento de interesse. O resultado desta simulação, para as barras 4, 7, 8 e 12, está exibido na Figura 5.14.



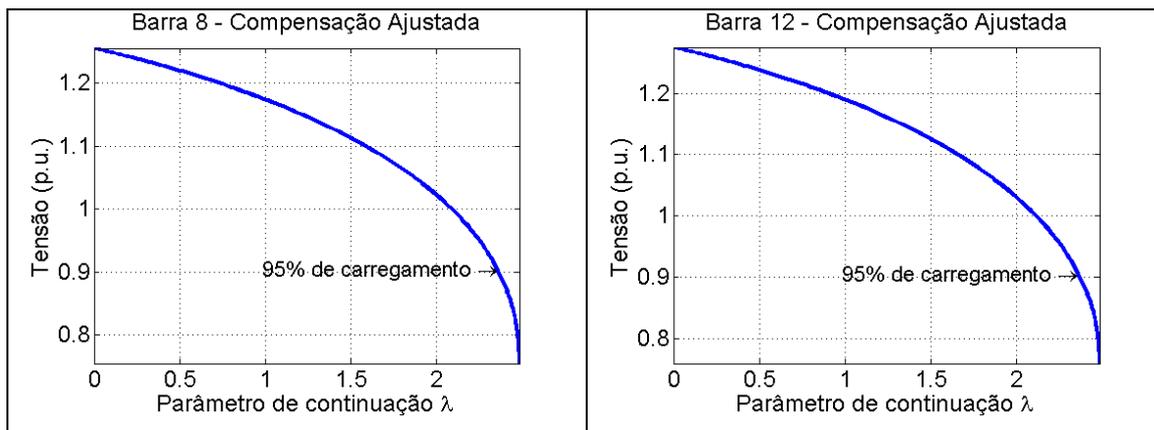


Figura 5.14 – Resposta das Barras 4, 7, 8 e 12 - Compensação Ajustada

Observando-se o perfil de tensão mostrado na Figura 5.15, nota-se que, além do efeito desejado de elevação da tensão nas barras 4 e 12, obteve-se também como efeito colateral uma melhoria na tensão da barra 14. Após esta referida adição de compensação a região compreendida entre as barras 4 e 14 apresenta o comportamento desejado para carga correspondente a 95% do carregamento máximo.

De acordo com a Tabela 5.6 a barra 15 é a próxima candidata a receber a compensação, o que é fortificado pelo gráfico da Figura 5.15 mostrando que a barra 15 possui o menor módulo de tensão naquela condição. Assim repetiu-se o processo de compensação, já aplicado as outras barras, para a barra 15. O resultado desta última simulação está exibido nas Figuras 5.15 e 5.16.

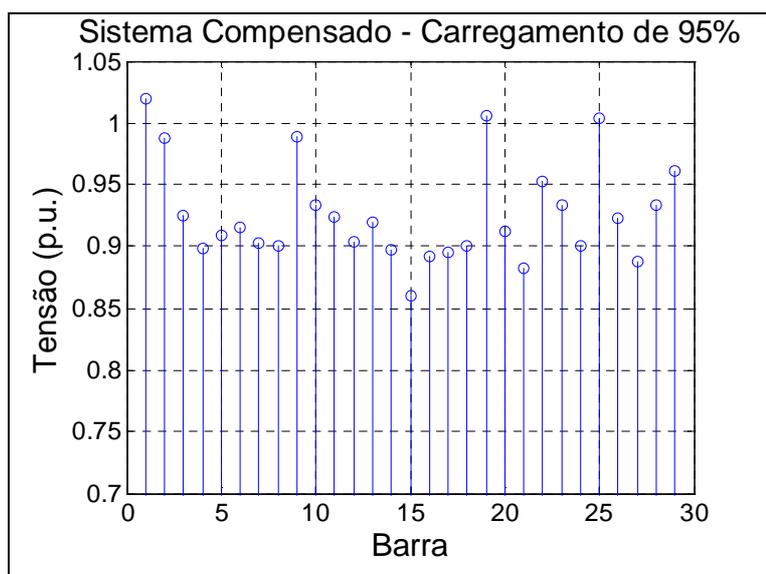


Figura 5.15 – Tensão Após Ajuste de Compensação (barras 4, 7, 8 e 12) – 95% de Carregamento Máximo

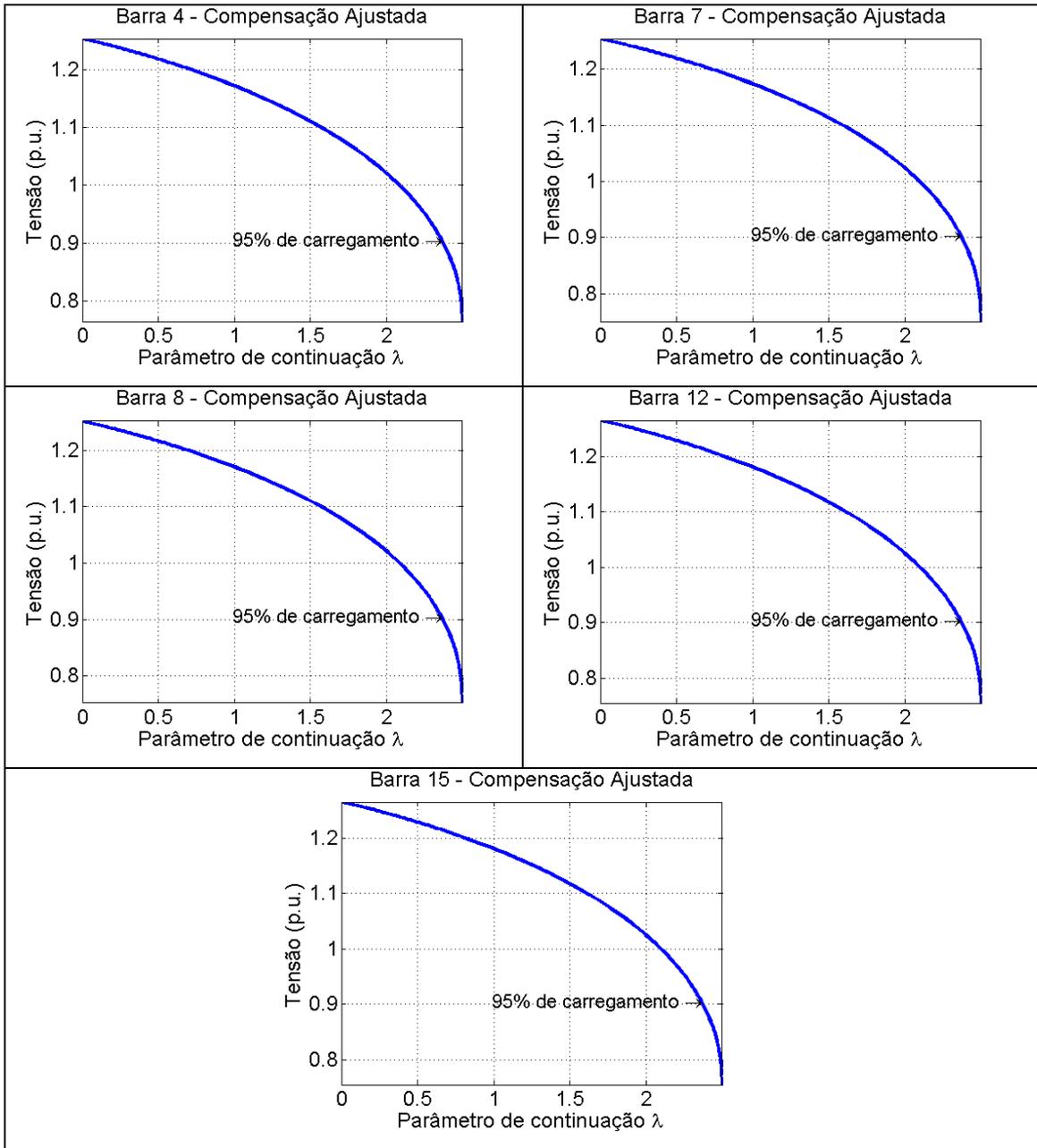


Figura 5.16 – Resposta das Barras 4, 7, 8, 12 e 15 - Compensação Ajustada

As tensões exibidas na Figura 5.17 mostram o sucesso da aplicação da compensação. Com a adição de capacitores na barra 15, novamente um efeito colateral benéfico foi alcançado, com a melhoria das tensões das barras 21 e 27. Atingiu-se o objetivo de elevar a tensão das barras mais críticas para valores que permitem um melhor aproveitamento do sistema, sem contudo desrespeitar os limites impostos inicialmente. Garantiu-se desta maneira que o ponto de máximo carregamento das curvas PV não será elevado pela adição da compensação reativa *shunt* capacitiva para valores dentro da faixa de operação do sistema.

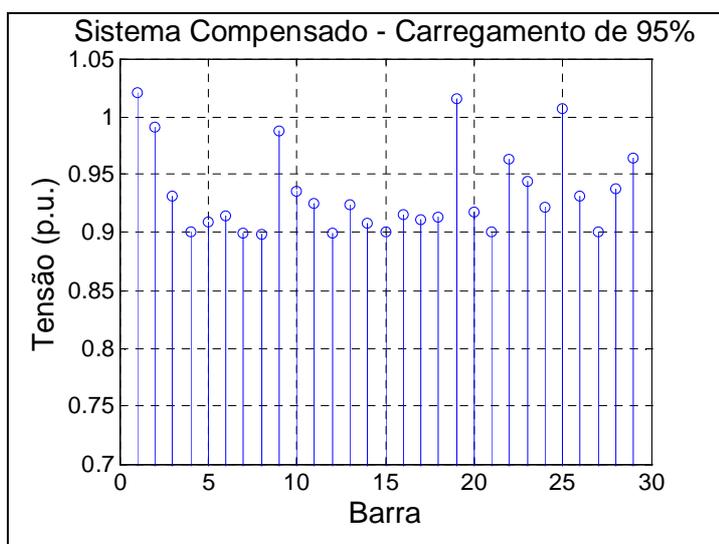


Figura 5.17 – Tensão Após Ajuste de Compensação (barras 4, 7, 8, 12 e 15) – 95% de Carregamento Máximo

5.5. AVALIAÇÃO DO SISTEMA COMPENSADO

Neste tópico são apresentadas as modificações no comportamento estático do sistema devido à adição dos capacitores. Os resultados são exibidos de maneira comparativa, isto é, o comportamento antes e depois da compensação.

Após a introdução da Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva, conforme detalhado nos tópicos anteriores, o sistema apresentou melhorias de desempenho como o aumento da capacidade máxima de carga, redução de perdas, além da elevação, de forma controlada, dos níveis de tensão das barras de carga.

A compensação proporcionou um aumento de aproximadamente 8,6% na capacidade de carregamento máxima do sistema (Tabela 5.9). No ponto de carregamento indicado pela Tabela 5.8, nota-se que a potência reativa fornecida pelos geradores foi reduzida após a compensação, mesmo com o aumento da capacidade de carga.

As tabelas 5.8 e 5.9 exibem o total de perdas do sistema em duas condições distintas. Na primeira linha é exibido o valor relativo ao carregamento particular, ou seja, foi utilizado como parâmetro o carregamento de 95% ou máximo para cada condição (antes e depois da compensação). Na segunda linha é exibido o valor de perdas do sistema compensado comparativo a mesma condição de carga experimentada pelo sistema não compensado. Desta forma, pode-se perceber que, quando comparado sob as mesmas condições de carregamento, o sistema compensado apresentou uma redução de perdas em torno de 26%.

Tabela 5.8 – Sumário do Sistema – 95% de Carregamento Máximo

	Antes		Depois	
	Pot. Ativa(pu)	Pot. Reativa(pu)	Pot. Ativa(pu)	Pot. Reativa(pu)
Geradores	135,7902	87,7117	147,386	83,4774
Carga	133,0668	30,6896	144,433	33,311
Perdas	2,7234	57,0221	2,9531	60,0767
Perdas ⁶	-	-	2,2693	41,9493
Cap. Shunt	-	-	-	9,9103

Tabela 5.9 – Sumário do Sistema no Ponto de Máximo Carregamento

	Antes		Depois	
	Pot. Ativa(pu)	Pot. Reativa(pu)	Pot. Ativa(pu)	Pot. Reativa(pu)
Geradores	143,8531	116,6762	156,1941	118,1145
Carga	140,2102	32,3371	152,2157	35,1059
Perdas	3,6430	84,3392	3,9784	90,1905
Perdas ⁷	-	-	2,665	52,3286
Cap. Shunt	-	-	-	7,1819

A mudança no comportamento das barras de carga que receberam a Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva está exibida na Figura 5.18 por meio da comparação das curvas PV. Nos gráficos é possível visualizar o aumento da tensão e da capacidade de carregamento.

⁶ Perdas no sistema compensado referentes ao ponto de carregamento equivalente a cerca de 95% de carregamento máximo do sistema antes da compensação.

⁷ Perdas no sistema compensado referentes ao ponto de máximo carregamento do sistema antes da compensação.

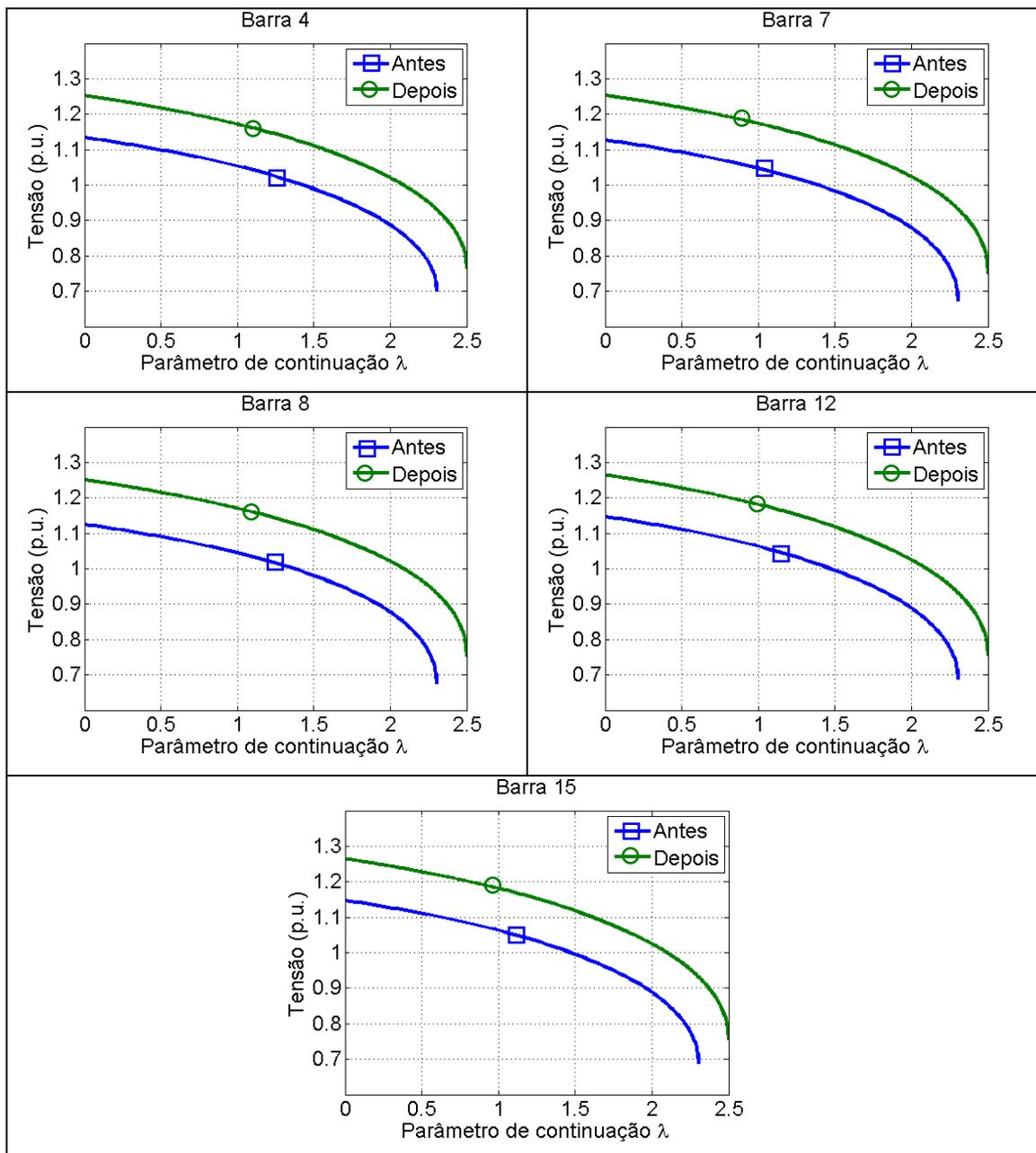


Figura 5.18 – Comparação das Curvas PV – Barras 4, 7, 8, 12 e 15

Como pode ser visto na Figura 5.19 a introdução da compensação provocou uma alteração significativa no perfil de tensão das barras de carga do sistema. Em uma condição de carregamento severa (95% do carregamento máximo) as barras possuem tensões próximas do objetivo desejado, 0,9 pu, permitindo um melhor aproveitamento do sistema, conforme demonstrado ao longo deste tópico.

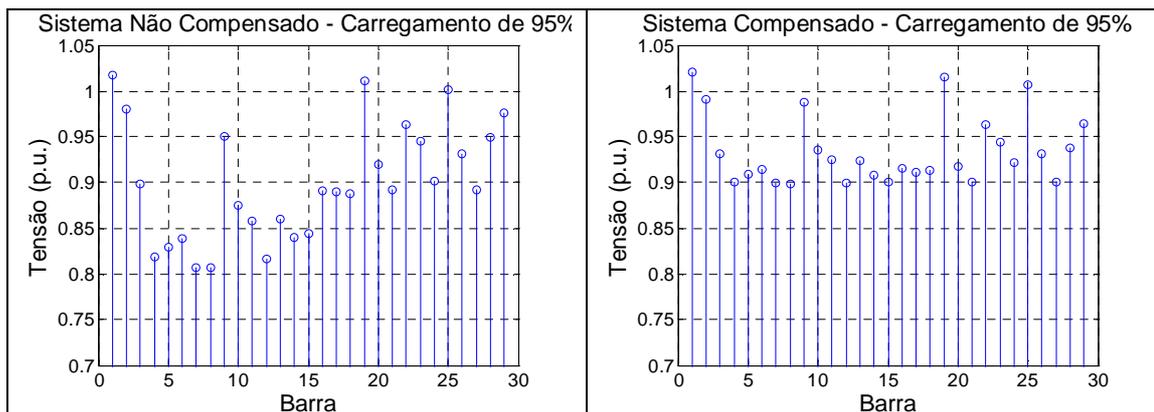


Figura 5.19 – Comparação dos Perfis de Tensão

Nota-se que algumas barras apresentam tensão elevada, porém não possuem consumidores diretamente conectados e possuem limites mais flexíveis, conforme recomendação do CCPE [CCPE 2002].

Exibe-se o gráfico de autovalores da matriz jacobiana do fluxo de potência confirmando que após as modificações feitas o sistema permanece estável no ponto de carregamento proposto. Para esta condição, o mínimo autovalor da matriz jacobiana tem módulo igual a 3,71.

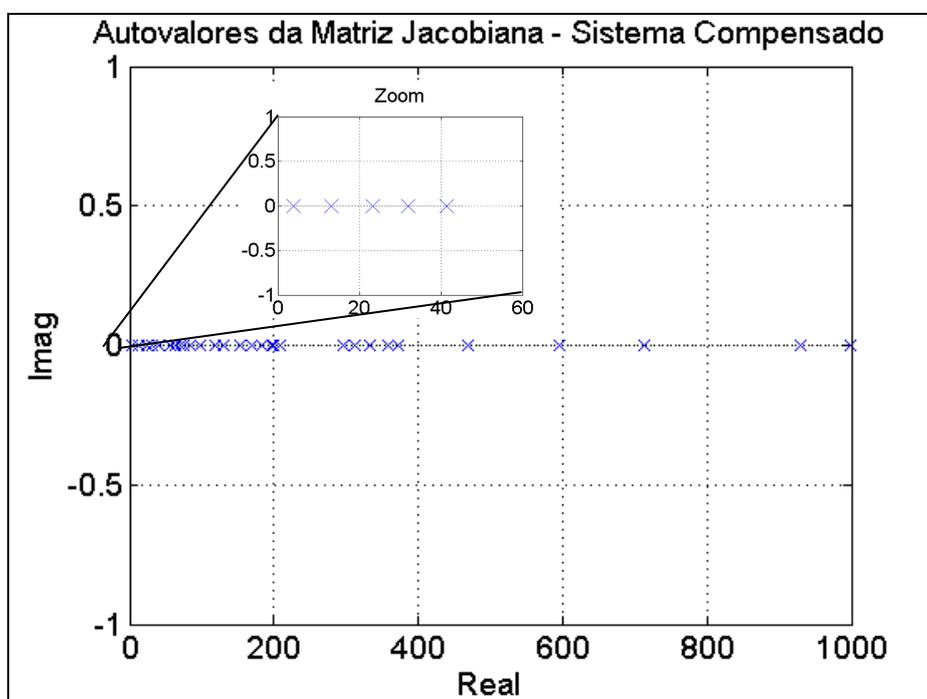


Figura 5.20 – Autovalores da Matriz Jacobiana – Sistema Compensado – 95% de Carregamento Máximo

5.6. CONCLUSÕES

As simulações apresentadas neste capítulo demonstram a aplicação do procedimento proposto. Os cálculos feitos, utilizando-se um sistema elétrico de potência padrão, comprovam a eficiência da proposta para Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva, avaliada sob o ponto de vista da Estabilidade de Tensão. Cada passo do procedimento foi detalhado permitindo a compreensão da proposta.

Além do resultado final apresentado, outras informações podem ser extraídas ao longo da aplicação do procedimento como, por exemplo, a classificação das barras mais propícias à compensação, ou a faixa de valores indicada para compensação. Essas informações podem ser usadas isoladamente ou em conjunto com outros procedimentos adotados durante o planejamento da expansão dos sistemas, como a avaliação do impacto de harmônicos, transitórios, fluxo ótimo de potência, etc.

6 – CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Este trabalho apresentou uma proposta de procedimento para avaliação do impacto da Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva na Estabilidade de Tensão. O objetivo é auxiliar as equipes de planejamento para que os planos de compensação sejam elaborados de forma a evitar efeitos indesejáveis de instabilidade de tensão na operação.

O texto evidenciou que as tarefas de planejamento da expansão possuem um alto grau de complexidade, uma vez que, devido às características dos sistemas elétricos, as análises são realizadas para vários cenários, sendo que cada um desses possuem um elevado número de variáveis associadas.

Espera-se que o presente trabalho possa ser integrado aos desenvolvimentos tradicionais de planejamento, contribuindo para que a alocação de recursos técnicos e econômicos possa ser aperfeiçoada, aumentando a segurança e qualidade da energia fornecida aos consumidores.

Os principais pontos a serem destacados acerca da metodologia apresentada são:

- A proposta apresenta de maneira detalhada um procedimento para classificação das barras (*ranking*), indicando quais as barras mais propícias para a alocação da compensação considerando as menores tensões no ponto de colapso e a sensibilidade da tensão nas barras em relação à injeção de potência reativa para dois cenários de carregamento;
- A classificação permite ao planejador detectar áreas ou regiões críticas onde a compensação deve ser priorizada;
- Uma vez identificada(s) a(s) prioridade(s) de compensação, passa-se à segunda etapa do procedimento, onde são indicados os valores máximos de compensação reativa *shunt* capacitiva que podem ser alocados;
- Os valores limite de compensação indicados pelo procedimento proposto evitam que o sistema apresente condições de operação indesejáveis, ou seja, tensão no ponto de colapso dentro da faixa de operação considerada normal;

- O procedimento foi elaborado de forma a permitir fácil integração com os demais procedimentos que o precederam [Valadares 2001a, Chaves 2001 e 2007].

Como trabalhos futuros, são apresentadas as seguintes indicações:

- Aplicação do procedimento proposto em atividades de planejamento reais pelas equipes de planejadores, avaliando os resultados obtidos do ponto de vista técnico e econômico;
- Implementação computacional do procedimento proposto, considerando as sugestões de interação com o planejador citadas no texto;
- Integração da implementação computacional com a ferramenta PlanEx [P&D 2004a];
- Incorporação da filosofia no procedimento otimizado implementado no LRC/UFGM.
- Ampliação do procedimento proposto para que sejam consideradas características dinâmicas do fenômeno de instabilidade de tensão;
- Estudos para avaliar a influência dos modelos das cargas utilizados no procedimento nos resultados obtidos;
- Aplicação a sistemas atualmente sobrecompensados, sugerindo alterações visando aumento da segurança dos sistemas.

Por fim, espera-se que este trabalho seja mais uma contribuição aos desenvolvimentos e pesquisas que têm como foco a Estabilidade de Tensão e a Compensação Reativa/Controle de Tensão. Acredita-se que o seu uso, por parte dos planejadores, irá propiciar planos de expansão melhorados do ponto de vista técnico e econômico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Affonso 2004] Affonso, Carolina de Mattos. "Planejamento de curto prazo da operação incluindo critérios de estabilidade de tensão." Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Campinas, SP, 2004.
- [Ajarapu 1992] Ajarapu, V., Christy, Colin, "The Continuation Power Flow: A Tool to Study Steady State Voltage Stability" IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, pp. 416-423, Feb. 1992
- [Ajarapu 2006] Ajarapu, V. Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control. Power Electronics and Power Systems Series. Springer, 1996.
- [Alvarado 1994] Alvarado, F.; Dobson, I.; Yi Hu., Computation of Closest Bifurcations in Power Systems, Transactions on Power Systems, May 1994, Volume 9, Issue 2.
- [Athay 1979] T. Athay, R. Podmore, S. Virmani, A Practical Method for Direct Analysis of Transient Stability, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no.2, March/April 1979, pp.573-584
- [Begovic 1992] Begovic, M.M. Phadke, A.G., Control of Voltage Stability Using Sensitivity Analysis, Sch. of Electr. Eng., Georgia Inst. of Technol., Atlanta, GA. Transactions on Power Systems, Feb 1992, Volume 7, Issue 1.
- [Canizares 1995] Canizares, C. A., Souza, A. C. Z., Quintana, V. H., Comparison of Performance Indices for Detection of Proximity to Voltage Collapse, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 3, August 1996.
- [Cañizares 96] Cañizares, Claudio A., Souza Antonio C. Z. de., Quintana, Victor H. "Comparison of Performance Indices for Detection of Proximity to Voltage Collapse" IEEE Transactions on Power Systems, págs 1441 – 1450, Vol. 11, No. 3, Agosto 1996.
- [Cardoso 1999] Cardoso, R. M., Ferramentas Computacionais Aplicadas ao Controle de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência, CPDEE/UFMG, Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte, 1999.

- [CCPE 2002] Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos (CCPE), Critérios e Procedimentos para o Planejamento da Expansão dos Sistemas de Transmissão, Volume II, 144p, Novembro 2002.
- [Chaves 2001] Chaves, F.S., Proposta de Procedimento para Compensação Reativa e Controle de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência, CPDEE/UFMG, Belo Horizonte, 2001, 107 p., (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica).
- [Chaves 2002] Chaves, F.S., Vale, M.H.M., Controle de Tensão e Compensação Reativa – Procedimento Aplicado à Expansão de Sistemas Elétricos, IX CBA – Congresso Brasileiro de Automática, Natal, Setembro 2002.
- [Chaves 2003] Chaves, F.S., Projeto de Tese II – Proposta Preliminar de “Critérios para Avaliação Técnica dos Procedimentos de Expansão” Considerando a Influência da CR/CT nos Sistemas Elétricos, CPDEE/UFMG, 2003, 47p.
- [Chaves 2004] Chaves, F.S., Relatório de Estudos de Estabilidade de Tensão, Transitórios Eletromagnéticos e Harmônicos, CPDEE/UFMG, 2004, 130p.
- [Chaves 2005a] Chaves, F.S., Vale, M.H.M., Valadares, J.R., Cortez, A.N., Avaliação Técnica de Planos de Expansão de Compensação Reativa e Controle de Tensão, SPGEE’05, UFMG, Setembro, 2005.
- [Chaves 2005b] Chaves, F.S., Vale, M.H.M., Avaliação Técnica de Transitórios Eletromagnéticos para Planos de Expansão de Compensação Reativa e Controle de Tensão, XVIII SNPTEE, Curitiba, Outubro, 2005.
- [Chaves 2007] Chaves, F.S., Avaliação Técnica do Desempenho da Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva Aplicada à Expansão de Sistemas Elétricos, Belo Horizonte, 2007, (Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica).
- [Cortez 2001] Cortez, A.N., Critérios e Procedimentos para Avaliação de Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência, CPDEE/UFMG, Belo Horizonte, 212p, 2001. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica)
- [Cutsem 1998] Cutsem, Thierry Van., Vournas, Costas. Voltage Stability of Electric Power Systems. Power Electronics and Power Systems Series, KAP, 1998.

- [Cutsem 2000] Cutsem, Thierry Van, "Voltage instability: Phenomenon, Countermeasures and Analysis Methods," Proc. IEEE, vol. 88, pp. 208–227, 2000.
- [Fink 1978] L. H. Fink and K. Carlsen, "Operating Under Stress and Strain," IEEE Spectrum, vol. 15, pp. 48–53, Mar. 1978.
- [Gao 1982] Gao, B., Morison, K., Kundur, P., Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis. Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 4. November 1992
- [Hill 1993] D. J. Hill, "Nonlinear Dynamic Load Models with Recovery for Voltage Stability Studies," IEEE Trans. Power Systems, vol. 8, pp. 166–176, Feb. 1993
- [IEEE 2002] Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools - IEEE Power Engineering Society, Power System Stability Subcommittee Special Publication, IEEE product number SP101PSS, ISBN 0780378695, August 2002
- [IEEE 39 barras] http://psdyn.ece.wisc.edu/IEEE_benchmarks/
- [Kundur 1994] P. Kundur, Power System Stability and Control. New York: McGraw- Hill, 1994
- [Kundur 2004] Kundur, P., Paserba, J., Ajarapu, V., Anderson, G., Bose, A., Canizares, C., Hatziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C. W., Van Cutsem, T., Vittal, V., Definitions and Classification of Power System Stability, IEEE/CIGRE Joint Task force on Stability Terms and Definitions, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 3, pp. 1387-1401, Aug. 2004
- [Lobato 1998] Lobato, M.V.C., Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica: Estudo do Fenômeno e de Métodos para Análise Estática, CPDEE/UFMG, Belo Horizonte, 1998 (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica).

- [Lof 1992] Lof, P.A., Anderson, G., Hill, D.J., Voltage Stability Indices for Stressed Power Systems IEEE PES Winter Meeting New York, 1992.
- [Menezes 2007] Menezes, Tiago Vilela. “Estratégia para Análise de Afundamento de Tensão no Planejamento do Sistema Elétrico”. Dissertação de Mestrado, PPGEE – UFMG, 2007.
- [MME 2006] Ministério de Minas e Energia (MME) – Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica – 2006-2015, Março 2006.
- [P&D 2002] Vale, M.H.M., Chaves, F.S., Valadares, J.R, Banco Digital de Referências – Projeto P&D CEMIG / ANEEL – Critérios e Procedimentos para Compensação Reativa e Controle de Tensão – UFMG -LRC, Outubro 2002.
- [P&D 2004a] Vale, M.H.M., Chaves, F.S., Silva, B.A.C., Mariano Jr., L. Valadares, J.R., Projeto P&D CEMIG / ANEEL – Critérios e Procedimentos para Compensação Reativa e Controle de Tensão – UFMG -LRC, Abril, 2002-2004.
- [P&D 2004b] Vale, M.H.M., Chaves, F.S., Silva, B.A.C., Mariano Jr., L. Valadares, J.R., Critérios e Procedimentos para Compensação Reativa e Controle de Tensão, Artigo de Relatório Técnico, 2004.
- [Pai 1989] Energy Function Analysis for Power System Stability, M.A.Pai, 256 pages, Publisher: Kluwer Academic Publishers (August 1989), ISBN: 0792390350
- [Powerworld 2008] Powerworld Simulator 13, Powerworld Corporation 2008
- [PSAT 2006] Documentation for PSAT version 2.0.0, dezembro, 2006 - Federico Milano - <http://thunderbox.uwaterloo.ca/~fmilano>
- [PSS/E 2001] PSS/E, Power System Simulator for Engineering, Versão 28.0, Copyright © Power Technologies, Inc. (PTI), 1976-2001.
- [Silveira 1999] Silveira, S.F., Controle de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência: Estudo de Estratégias Globais, CPDEE/UFMG, Belo Horizonte, 1999, 89p, (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica).

- [Souza 1996] SOUZA, A. C. Z. New Techniques to Efficiently Determine Proximity to Static Voltage Collapse; Waterloo: University of Waterloo, 1996. 119p. (Tese, Doutorado em Engenharia Elétrica).
- [Taylor 1994] Taylor, C.W., Power System Voltage Stability, McGraw Hill, 1994.
- [Valadares 2001a] Valadares, J.R., Proposta de Políticas, Critérios e Procedimentos para Compensação Reativa e Controle de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência, CPDEE/UFMG, Belo Horizonte, 212p, 2001 (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica).
- [Valadares 2001b] Valadares, J.R., Vale, M.H.M., Políticas, Critérios e Procedimentos para Compensação Reativa e Controle de Tensão, XVI SNPTEE, Campinas – SP, 6p, Outubro 2001.
- [Vale 03] Vale, M.H.M., Chaves, F.S., Silva, B.A.C., Valadares, J.R., Ferramenta Computacional Aplicada à Expansão – Compensação Reativa / Controle de Tensão, X ERLAC, Puerto Iguazú – Argentina, 2003.
- [Vale 04] Vale, M.H.M., Chaves, F.S., Silva, B.A.C., Cortez, A.N., Valadares, J.R., Teixeira, J.C., Avaliação Técnica de Alternativas de Expansão – Compensação Reativa e Estabilidade de Tensão, IX SEPOPE, Rio de Janeiro – RJ, 2004.
- [Vale 2000] Vale, M.H.M., Vale, M.H.M., Cardoso, R.M, Silveira, S.F., Electric Power System Voltage Control, VII SEPOPE, Curitiba, Paraná, Brasil, 7p, Maio 2000.
- [Vale 2005a] Vale, M.H.M., Chaves, F.S., Silva, B.A.C., Mariano Jr., L., Valadares, J.R., Critérios e Procedimentos para Compensação Reativa e Controle de Tensão, CITENEL, Florianópolis, Novembro, 2005.
- [Vale 2005b] Vale, M.H.M., Chaves, F.S., Compensação Reativa e Controle de Tensão – Avaliação Técnica de Alternativas de Expansão nos Aspectos de Estabilidade de Tensão, XI ERIAC, Hernandieriaz – Paraguai, Maio, 2005.
- [Vale 2007] Notas de aula da disciplina: Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica – 2007

- [Vu 1999] Vu, K. Begovic, M.M. Novosel, D. Saha, M.M., Use of Local Measurements to Estimate Voltage-Stability Margin, IEEE Transactions on Power Systems, Aug 1999, Volume 14, Issue 3.

ANEXO A

Considerações sobre Teoria da Bifurcação

A Teoria da Bifurcação é um assunto extenso e complexo, o que torna impraticável o detalhamento profundo neste trabalho. Contudo, devido a sua relevância para o tema tratado aqui, faz-se necessário apresentar breves considerações a respeito.

Assume-se na Teoria da Bifurcação que os parâmetros do sistema variam lentamente, e procura-se entender como esses parâmetros levam o sistema à instabilidade. Estes estudos procuram identificar o limite até onde o sistema é estável. Em que pese a dimensão dos sistemas elétricos de potência e a complexidade das suas equações, de acordo com a Teoria da Bifurcação, existe um número limitado de comportamentos típicos que tais sistemas podem apresentar. Esses comportamentos podem ser identificados, e esta informação utilizada no planejamento da expansão e operação dos sistemas.

Os principais conceitos sobre Teoria da Bifurcação destacados na referência [IEEE 2002] são:

1. A Teoria da Bifurcação assume uma variação lenta dos parâmetros e descreve mudanças qualitativas tais como perda de estabilidade.
2. Em uma bifurcação do tipo sela-nó, um ponto de operação estável desaparece com a variação dos parâmetros, e como consequência o sistema dinamicamente atinge o colapso. Esse fato pode ser usado para explicar a queda dinâmica das magnitudes das tensões no colapso de tensão.
3. Em uma bifurcação do tipo Hopf, um ponto de equilíbrio estável se torna oscilatório, e como consequência o sistema pode oscilar em torno de um ponto, ou apresentar oscilações crescentes.

Grandes distúrbios e análises de longa e curta duração

Desconsideram-se, na Teoria da Bifurcação, mudanças bruscas como os grandes distúrbios encontrados em muitos casos de colapso de tensão. Porém, sabendo-se desta

característica da teoria e tomando-se os devidos cuidados, é possível utilizar alguns conceitos da bifurcação mesmo em casos de grandes distúrbios. Mesmo em grandes distúrbios, em geral existe uma fase inicial em que as tensões decaem lentamente. Desta forma, pode-se estudar o fenômeno dividindo-o em duas partes, uma lenta e outra rápida. A parte lenta pode ser aproximada por um comportamento estável, e as dinâmicas rápidas consideradas como ideais ou instantâneas. Mais à frente, à medida que o fenômeno evolui a parte de dinâmica rápida pode perder a estabilidade em uma bifurcação, e o esperado decaimento rápido das tensões ocorrer. A parte principal desta teoria de duas escalas de tempo, lenta e rápida, é que se ações corretivas forem tomadas rapidamente logo após o distúrbio durante a parte de dinâmica lenta, pode ser possível manter o sistema dentro dos limites de estabilidade.

Funções de Energia

As análises pelas funções de energia fornecem uma visão “geométrica” do colapso de tensão. Conforme ilustrado pela Figura A.1, na abordagem pelas funções de energia, o ponto de operação do sistema é visto como uma bola entre duas montanhas. Intuitivamente, pode-se considerar que o caso (a) é uma condição mais estável que o caso (b), uma vez que se a bola sofrer uma perturbação no primeiro caso, a tendência é que após algumas oscilações, a bola volte para o ponto ocupado anteriormente, ou pelo menos fique muito próximo dele. Já para o caso (b), uma pequena perturbação pode ser suficiente para que a bola ultrapasse a montanha, e não volte mais ao ponto anterior. As mudanças nos parâmetros do sistema podem levá-lo da condição ilustrada por (a) para a (b), ou o contrário. Assim, as funções de energia podem auxiliar na elaboração do planejamento para que o sistema esteja mais próximo da condição (a) do que da (b). A energia potencial associada a cada montanha, ilustrada na Figura A.1 por h , fornece um índice de estabilidade relativo entre as duas situações.

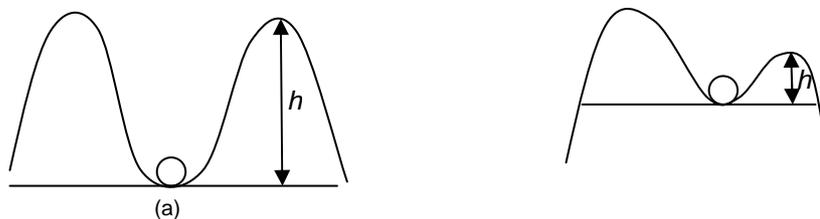


Figura A.1 – Ilustração - Funções de Energia

Modelos Usados para a Análise de Bifurcações

Não existe um modelo simples de sistema elétrico que possa ser usado para se estudar todos os possíveis tipos de colapso de tensão. Tipicamente utilizam-se os modelos do cálculo de fluxo de potência para os estudos de colapso de tensão, uma vez que esses permitem uma análise rápida e aproximada das condições do sistema que podem levar o sistema ao colapso. Na literatura a respeito do assunto [Kundur 1994], [Cutsem 1998] e [Souza 1996] é apontada a necessidade de uso de modelos mais complexos que os usados no fluxo de potência clássico. Essa demanda surge pela necessidade de se representar com mais precisão alguns dispositivos e controles que podem levar ao colapso. Citam-se como exemplo a dinâmica das cargas e os reguladores de tensão dos geradores.

Na análise usando a teoria da bifurcação é preciso que o sistema elétrico de potência seja como um conjunto de equações contendo dois tipos de variáveis: estados e parâmetros. A divisão entre os dois tipos de variáveis está baseada na dinâmica apresentada por cada uma delas. Enquanto os estados representam variáveis de dinâmica mais rápida, como ângulo das máquinas, módulo das tensões nas barras e correntes nos enrolamentos do gerador, as variáveis do tipo parâmetro representam as de dinâmica lenta, tais como a demanda de potência ativa nas barras.

A abordagem que considera os parâmetros variando lentamente é chamada de quasi-estática. Desta forma, os parâmetros são considerados como entradas do sistema, desprezando-se a sua dinâmica, e assumindo os valores de equilíbrio. Assim, embora se saiba que na realidade os parâmetros variam, assume-se que eles possuem um valor fixo. A aproximação quase-estática é válida para os casos em que a dinâmica dos parâmetros é muito mais lenta que o restante do sistema.

As equações usadas para modelagem dos sistemas são dependentes do fenômeno de bifurcação em estudo. Podem ser usados sistemas de equações diferenciais, algébricas ou uma composição de ambas. É importante destacar que as funções usadas neste tipo de análise usualmente possuem restrições, devendo ser suaves, ou seja, possuem derivadas de todas as ordens, e não variarem com o tempo, exceto para a aproximação quasi-estática.

Ainda que as análises convencionais pela teoria da bifurcação assumam as restrições mencionadas, não se deve esquecer que a estabilidade dos sistemas pode ser influenciada por eventos discretos, como por exemplo limites de componentes e dispositivos de controle sendo atingidos. Outra limitação é o fato de variações elevadas

e/ou rápidas nos parâmetros não serem contempladas. Esses tipos de efeito são de difícil modelagem e não são levados em conta nas análises convencionais. Apesar dessas limitações, o estudo das bifurcações é de grande valia para o estudo de estabilidade, em especial para situações particulares, onde as aproximações não afastam demasiadamente o modelo da realidade.

Tipos de Bifurcações

Após uma breve introdução sobre a teoria da bifurcação e a sua aplicação na avaliação da estabilidade dos sistemas elétricos de potência, esta seção apresenta os tipos de bifurcações mais comuns encontrados.

Seja um par de equações diferenciais ordinárias de primeira ordem como mostrado nas equações (A.1) e (A.2) [Ajarapu 2006].

$$\frac{dx_1}{dt} = f_1(x_1, x_2) \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{dx_2}{dt} = f_2(x_1, x_2) \quad (\text{A.2})$$

Os pontos de equilíbrio são dados por $f_1 = 0$ e $f_2 = 0$. Perturbando-se os pontos de equilíbrio por Δx_1 e Δx_2 , expandindo-se as equações resultantes em Séries de Taylor e linearizando as equações próximo ao ponto de equilíbrio obtêm-se as soluções de Δx_1 e Δx_2 como exibido em (A.3) e (A.4).

$$\Delta x_1 = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} \quad (\text{A.3})$$

$$\Delta x_2 = C_3 e^{\lambda_1 t} + C_4 e^{\lambda_2 t} \quad (\text{A.4})$$

As constantes C_1 , C_2 , C_3 e C_4 são determinadas pelas condições iniciais. Os expoentes λ_1 e λ_2 são os autovalores da matriz Jacobiana (A.5), onde a , b , c e d são as derivadas parciais em relação a f_1 e f_2 no ponto de equilíbrio.

$$J = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

Os autovalores podem ser encontrados resolvendo-se o sistema:

$$|J - \lambda I| = 0 \quad (\text{A.6})$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} [Tr(J) + \sqrt{\Delta}]$$

$$Tr(J) = a + d \quad (\text{A.7})$$

$$\Delta = Tr(J)^2 - 4 \det(J)$$

Pelos valores encontrados para λ_1 , λ_2 , $Tr(J)$ e $\det(J)$ pode-se conhecer qual será o comportamento típico do sistema. Em seguida estão relacionados alguns desses casos:

Caso 1: $Tr(J) < 0$, $\det(J) > 0$, $\Delta > 0$: para esta condição λ_1 e λ_2 são reais e negativos. O estado estacionário é estável e a perturbação decresce. Caracteriza um nó estável.

Caso 2: $Tr(J) > 0$, $\det(J) > 0$, $\Delta > 0$: para esta condição λ_1 e λ_2 são reais e positivos. Desta forma, os termos exponenciais nas equações (A.3) e (A.4) crescem monotonicamente com o tempo. A perturbação cresce exponencialmente. Caracteriza um nó instável.

Caso 3: $Tr(J) < 0$, $\det(J) > 0$, $\Delta < 0$: para esta condição λ_1 e λ_2 são complexos com parte real negativa. Sabendo-se que:

$$f(t) = e^{(a+bi)t} = e^{at} (\cos bt + i \cdot \text{sen } bt) \quad (\text{A.8})$$

A parte real negativa do expoente complexo das equações (A.3) e (A.4) faz com que as perturbações decaiam, e a parte imaginária será responsável por um movimento senoidal. Pode-se inferir que o sistema retornará ao equilíbrio por um movimento de oscilação amortecida. Caracteriza um foco estável.

Caso 4: $Tr(J) > 0$, $\det(J) > 0$, $\Delta < 0$: para esta condição λ_1 e λ_2 são complexos com parte real positiva. Por analogia com caso anterior, conclui-se que a perturbação crescerá em um movimento oscilatório. Caracteriza um foco instável.

Caso 5: $Tr(J) > 0$ ou $Tr(J) < 0$, $\det(J) < 0$, $\Delta > 0$: para esta condição λ_1 e λ_2 são reais. λ_1 é positivo, enquanto λ_2 é negativo. Um dos termos exponenciais em cada equação de Δx_1 e Δx_2 irá decrescer exponencialmente. O outro termo, ao contrário, irá crescer exponencialmente. Em algum momento, o termo de expoente positivo será

dominante e o sistema se afastará do estado estacionário. Caracteriza uma bifurcação do tipo sela-nó.

A Figura A.2 apresenta o diagrama de fase ilustrando cada um dos casos citados. Além dos casos apresentados, existem outros três casos em que o comportamento real do sistema irá depender da não-linearidade dos termos. Os casos são:

Caso 6: $\det(J)=0$: λ_1 e λ_2 são reais. Possibilidades: $Tr(J) > 0$ ($\lambda_1 > 0$ $\lambda_2 = 0$) ou $Tr(J) < 0$ ($\lambda_1 = 0$ $\lambda_2 < 0$).

Caso 7: $Tr(J)=0$, $\det(J) > 0$, $\Delta < 0$: λ_1 e λ_2 são complexos e com parte real nula.

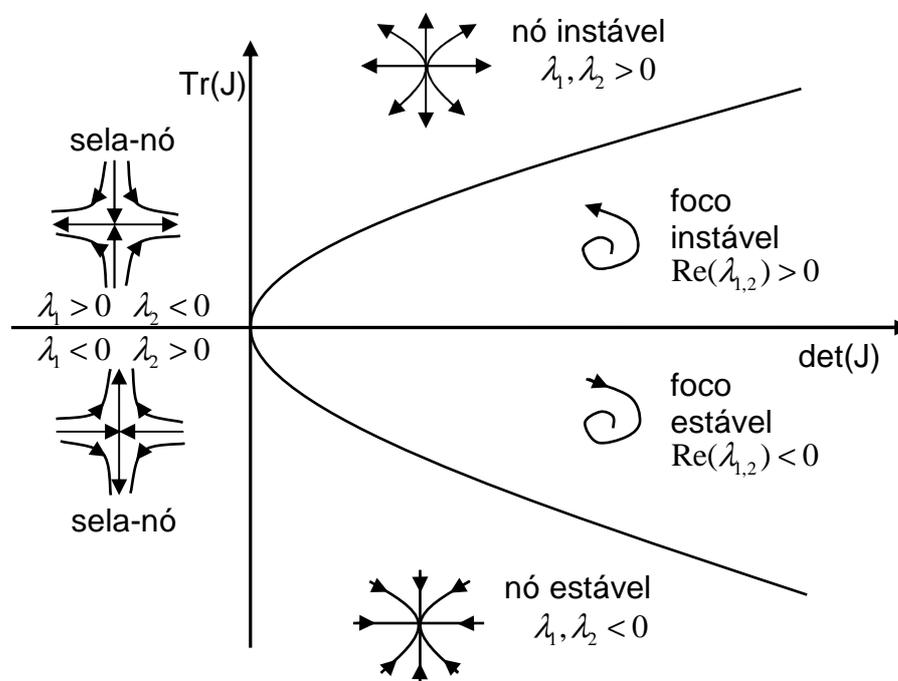


Figura A.2 – Tipos de bifurcação – diagrama de fase [Ajjarapu 2006]

Bifurcação Sela-Nó

Entre os tipos de bifurcações apresentados, a do tipo sela-nó merece especial atenção devido ao escopo desta proposta de procedimento. Esse tipo de bifurcação relaciona-se ao colapso de tensão e ao ponto de máxima transferência de potência.

A bifurcação sela-nó é caracterizada pela mudança nos pontos de equilíbrio à medida que algum parâmetro varia lentamente. Dois pontos de equilíbrio, um estável e

outro instável podem se juntar, dando origem a único ponto de equilíbrio, e em seguida desaparecer. A consequência é a perda da estabilidade, podendo levar ao colapso de tensão.

Tal como outros fenômenos não-lineares, a bifurcação sela-nó ocorre apenas para sistemas não-lineares, não aparecendo em modelos lineares. Um exemplo simples para ilustrar o comportamento pode ser obtido examinando-se uma equação quadrática.

Considerando-se uma equação de segundo grau, com duas raízes reais (soluções de equilíbrio), nota-se que à medida que os coeficientes (parâmetros) mudam lentamente, as soluções se movem até coalescerem e em seguida desaparecerem. A bifurcação ocorre na fronteira entre o caso onde existem duas raízes reais e o caso onde não existem raízes reais.

Como exemplo pode-se utilizar a equação (A.9):

$$-x^2 - p = 0 \quad (\text{A.9})$$

A variável x representa o estado do sistema, enquanto p representa um parâmetro do sistema. Para p negativo, existem duas soluções reais, $x_1 = \sqrt{-p}$ e $x_2 = -\sqrt{-p}$, que são os pontos de equilíbrio. À medida que p cresce, as duas soluções se aproximam, até o momento onde p se torna nulo. Neste ponto, as duas soluções coalescem e são também nulas, ou seja, $x = 0$. Se p continua a crescer tornando-se positivo, as soluções de equilíbrio desaparecem. A bifurcação ocorre no ponto onde $p = 0$. Essa é a fronteira que separa os dois casos. O conceito demonstrado está ilustrado na Figura A.3.

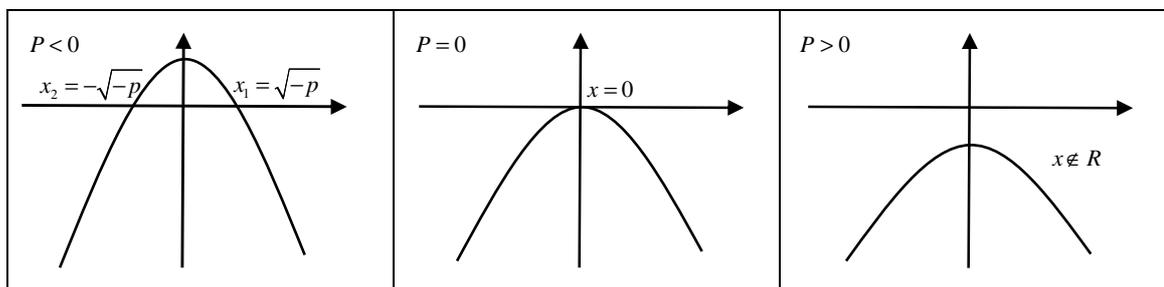


Figura A.3 – Bifurcação do tipo sela-nó

ANEXO B

Método da Bissecção

O Método da Bissecção é um método numérico que permite encontrar as raízes (zeros) de funções de maneira simples e intuitiva. Ao contrário do Método de Newton, não é necessário conhecer a derivada da função, porém é válido apenas em determinadas condições como será visto a seguir.

A idéia deste método é a partir de um intervalo dado, reduzi-lo sucessivamente até que a raiz seja encontrada dentro de um limite de tolerância estabelecido.

Seja x a raiz de uma função $f(x)$ em um intervalo $[x_a, x_b] \in \mathfrak{R}$ onde $f(x_a)f(x_b) < 0$. Por se tratar de um método numérico é necessário estabelecer um critério de parada como número de iterações e/ou uma tolerância. Seja o número de iterações igual a i e a tolerância igual a tol . Assim monta-se o seguinte esquema:

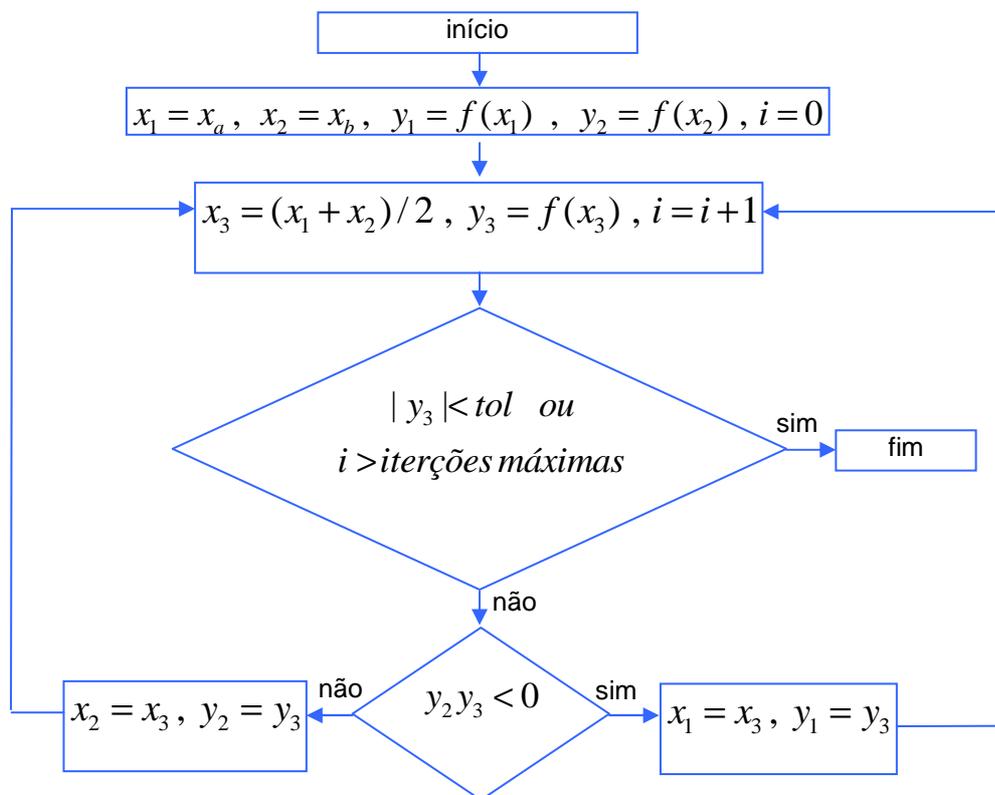


Figura B.1 – Fluxograma - Método da Bissecção

Dada uma função qualquer, como a ilustrada na Figura B.2, para a primeira iteração, observa-se que x_3 é o ponto médio do segmento definido por x_a e x_b .

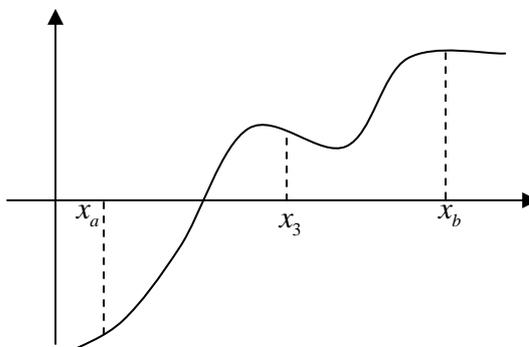


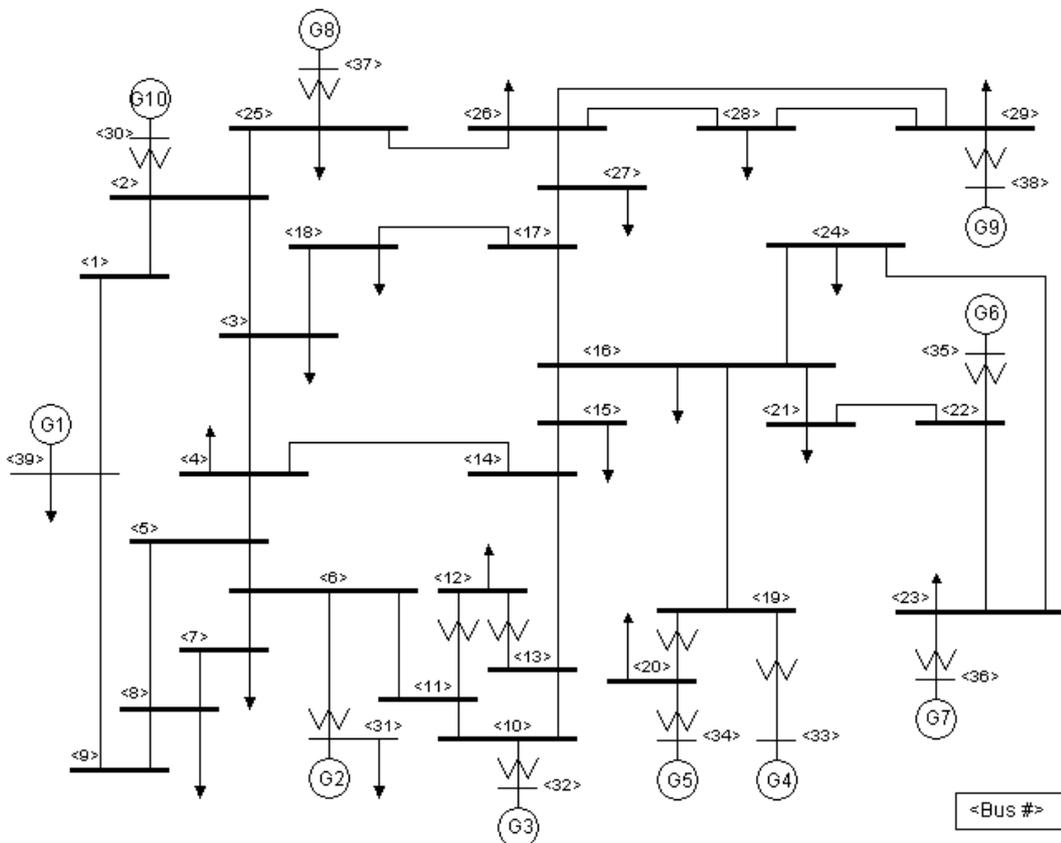
Figura B.2 – Gráfico da Equação Exemplo

Na iteração seguinte, uma das metades ($[x_a, x_3]$ ou $[x_3, x_b]$) é selecionada, ignorando-se a outra. O segmento selecionado é novamente dividido ao meio, em processo iterativo, até que a condição de parada seja alcançada.

Examinando-se o algoritmo, nota-se que x_3 é calculado em cada passo por $x_3 = (x_1 + x_2)/2$. Assim, é gerada uma seqüência de valores para x_3^i , onde i corresponde ao número da iteração, que tende a convergir para o valor da raiz procurada.

ANEXO C

Dados do Sistema IEEE 39 Barras



- Dados de Linhas de Transmissão e Transformadores**

Dados de Linha					Transformador	
Barra Origem	Barra Destino	R	X	B	TAP	Ângulo
1	2	0,0035	0,0411	0,6987	0,000	0,00
1	39	0,0010	0,0250	0,7500	0,000	0,00
2	3	0,0013	0,0151	0,2572	0,000	0,00
2	25	0,0070	0,0086	0,1460	0,000	0,00
3	4	0,0013	0,0213	0,2214	0,000	0,00

3	18	0,0011	0,0133	0,2138	0,000	0,00
4	5	0,0008	0,0128	0,1342	0,000	0,00
4	14	0,0008	0,0129	0,1382	0,000	0,00
5	6	0,0002	0,0026	0,0434	0,000	0,00
5	8	0,0008	0,0112	0,1476	0,000	0,00
6	7	0,0006	0,0092	0,1130	0,000	0,00
6	11	0,0007	0,0082	0,1389	0,000	0,00
7	8	0,0004	0,0046	0,0780	0,000	0,00
8	9	0,0023	0,0363	0,3804	0,000	0,00
9	39	0,0010	0,0250	1,2000	0,000	0,00
10	11	0,0004	0,0043	0,0729	0,000	0,00
10	13	0,0004	0,0043	0,0729	0,000	0,00
13	14	0,0009	0,0101	0,1723	0,000	0,00
14	15	0,0018	0,0217	0,3660	0,000	0,00
15	16	0,0009	0,0094	0,1710	0,000	0,00
16	17	0,0007	0,0089	0,1342	0,000	0,00
16	19	0,0016	0,0195	0,3040	0,000	0,00
16	21	0,0008	0,0135	0,2548	0,000	0,00
16	24	0,0003	0,0059	0,0680	0,000	0,00
17	18	0,0007	0,0082	0,1319	0,000	0,00
17	27	0,0013	0,0173	0,3216	0,000	0,00
21	22	0,0008	0,0140	0,2565	0,000	0,00
22	23	0,0006	0,0096	0,1846	0,000	0,00
23	24	0,0022	0,0350	0,3610	0,000	0,00
25	26	0,0032	0,0323	0,5130	0,000	0,00
26	27	0,0014	0,0147	0,2396	0,000	0,00
26	28	0,0043	0,0474	0,7802	0,000	0,00
26	29	0,0057	0,0625	1,0290	0,000	0,00
28	29	0,0014	0,0151	0,2490	0,000	0,00
12	11	0,0016	0,0435	0,0000	1,006	0,00
12	13	0,0016	0,0435	0,0000	1,006	0,00
6	31	0,0000	0,0250	0,0000	1,070	0,00
10	32	0,0000	0,0200	0,0000	1,070	0,00
19	33	0,0007	0,0142	0,0000	1,070	0,00
20	34	0,0009	0,0180	0,0000	1,009	0,00
22	35	0,0000	0,0143	0,0000	1,025	0,00
23	36	0,0005	0,0272	0,0000	1,000	0,00
25	37	0,0006	0,0232	0,0000	1,025	0,00
2	30	0,0000	0,0181	0,0000	1,025	0,00
29	38	0,0008	0,0156	0,0000	1,025	0,00
19	20	0,0007	0,0138	0,0000	1,060	0,00

- **Dados das Barras**

Barra	Tipo	Tensão	Carga		Geração		
			MW	Mvar	MW	Mvar	Número Gerador
1	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	
2	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	
3	PQ	-	322,0	2,4	0,0	0,0	
4	PQ	-	500,0	184,0	0,0	0,0	
5	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	
6	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	
7	PQ	-	233,8	84,0	0,0	0,0	
8	PQ	-	522,0	176,0	0,0	0,0	
9	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	
10	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	
11	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	
12	PQ	-	7,5	88,0	0,0	0,0	
13	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	
14	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	
15	PQ	-	320,0	153,0	0,0	0,0	
16	PQ	-	329,0	32,3	0,0	0,0	
17	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	
18	PQ	-	158,0	30,0	0,0	0,0	
19	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	
20	PQ	-	628,0	103,0	0,0	0,0	
21	PQ	-	274,0	115,0	0,0	0,0	
22	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	
23	PQ	-	247,5	84,6	0,0	0,0	
24	PQ	-	308,6	-92,0	0,0	0,0	
25	PQ	-	224,0	47,2	0,0	0,0	
26	PQ	-	139,0	17,0	0,0	0,0	
27	PQ	-	281,0	75,5	0,0	0,0	
28	PQ	-	206,0	27,6	0,0	0,0	
29	PQ	-	283,5	26,9	0,0	0,0	
30	PV	1,0475	0,0	0,0	250,0	-	Gen10
31	Vθ	0,9820	9,2	4,6	-	-	Gen2
32	PV	0,9831	0,0	0,0	650,0	-	Gen3
33	PV	0,9972	0,0	0,0	632,0	-	Gen4
34	PV	1,0123	0,0	0,0	508,0	-	Gen5
35	PV	1,0493	0,0	0,0	650,0	-	Gen6
36	PV	1,0635	0,0	0,0	560,0	-	Gen7
37	PV	1,0278	0,0	0,0	540,0	-	Gen8
38	PV	1,0265	0,0	0,0	830,0	-	Gen9
39	PV	1,0300	1104,0	250,0	1000,0	-	Gen1